

Performance acoustique des alarmes de recul tonales et large bande en milieu ouvert en vue d'une utilisation optimale

Hugues Nélisse
Chantal Laroche
Christian Giguère
Véronique Vaillancourt
Jérôme Boutin

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-977



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

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)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2017
ISBN : 978-2-89631-953-4
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
juin 2017

Performance acoustique des alarmes de recul tonales et large bande en milieu ouvert en vue d'une utilisation optimale

Hugues Nélisse¹, Chantal Laroche², Christian Giguère²,
Véronique Vaillancourt², Jérôme Boutin¹

¹IRSST

²Université d'Ottawa

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-977



Avis de non-responsabilité

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

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

Cliquez recherche



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 du rapport tiennent à remercier les membres du comité de suivi qui ont soutenu le projet tout au long de son déroulement. Par leurs conseils, leurs appréciations et les échanges qu'ils ont favorisés lors des rencontres de suivi, ils ont contribué à l'aboutissement de ces travaux et à leur adéquation avec les besoins des milieux de travail. Les auteurs expriment aussi leur considération aux personnes qui ont participé aux essais en laboratoire et sur le terrain. Finalement, ils tiennent à saluer Nicolas Ellaham et Flora Nassrallah, de l'Université d'Ottawa, pour leurs contributions aux travaux.

SOMMAIRE

Ce rapport fait état de travaux portant sur l'audibilité et la localisation auditive des deux grands types d'alarmes de recul (tonale [« bip-bip »] et à large bande de fréquences [« pshit-pshit »]), le fonctionnement des alarmes à niveau autoajustable et l'effet du positionnement des alarmes sur la distribution sonore à l'arrière des véhicules, en vue de favoriser une utilisation optimale de ces dispositifs et de minimiser les risques d'accidents liés au recul des véhicules. Les deux premiers volets de l'étude nécessitaient la participation de sujets humains en laboratoire tandis que les deux derniers requéraient plutôt des mesures de bruit sur des véhicules autant en laboratoire que sur le terrain.

Plusieurs constats ont été tirés des diverses expérimentations. Les deux types d'alarmes demeurent audibles à des niveaux bien inférieurs à celui du bruit ambiant et induisent une réaction à des niveaux légèrement inférieurs au bruit ambiant. Par ailleurs, le temps de dégagement est relativement insensible au type d'alarme. Pour le volet localisation auditive d'une seule alarme, on note que celle à large bande est nettement supérieure à l'alarme tonale. En ce qui concerne la localisation sonore de deux alarmes présentées simultanément ou quasi simultanément, on observe toujours un net avantage de l'alarme large bande.

Pour ce qui est de l'ajustement du niveau des alarmes autoajustables, il se fait d'un cycle à l'autre en se basant sur une mesure du bruit ambiant et du signal de l'alarme obtenue juste avant chaque cycle. Ce rapport signal/bruit (S/B) peut varier de façon importante sur de très courtes périodes. Quant au positionnement des alarmes sur les véhicules, il soulève à son tour des inquiétudes. Les résultats des présents travaux pour cinq positions différentes d'alarmes montrent que la distribution sonore derrière le véhicule est beaucoup plus uniforme lorsqu'elle provient de l'alarme large bande.

La meilleure prévention des accidents dus aux mouvements de recul demeure de limiter au maximum l'utilisation de telles manœuvres ainsi que de limiter le plus possible la présence de piétons près des véhicules appelés à reculer, par la mise en œuvre de plans de circulation efficaces. Malgré tout, l'alarme de recul demeure un moyen utilisé pour prévenir les individus se trouvant autour des véhicules de l'existence d'un danger. Afin de rendre leur utilisation plus sécuritaire ou, à tout le moins, plus optimale, plusieurs recommandations ont été formulées : 1) les alarmes devraient être placées dans une position optimale, soit à l'arrière du camion, être visible directement par un travailleur se trouvant dans la zone de danger, à une hauteur entre 1 et 2 m; 2) la norme ISO 9533 devrait être utilisée pour l'ajustement du niveau sonore des alarmes de recul, en incluant toutes les sources de bruit autour du véhicule lors de la mesure du bruit ambiant; 3) une vitesse maximale de recul de 12,6 km/h devrait être observée afin de garantir le bon rapport S/B prescrit par la norme ISO 9533 et d'assurer un temps de réaction minimal de 2 secondes (conforme à SAE J1741); 4) l'usage des alarmes large bande devrait être préconisé dans les situations où plusieurs véhicules exécutent simultanément des manœuvres de recul et pour minimiser les risques associés à une mauvaise localisation auditive.

Finalement, les recommandations formulées dans ce rapport sont basées sur des résultats obtenus auprès d'auditeurs normaux (sujets sans pertes auditives) et de sujets ne portant pas de

protecteurs auditifs ou de casque de protection. L'effet de ces conditions sur la perception et sur la localisation auditives des alarmes de recul reste donc à être étudié.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES FIGURES	XI
1. INTRODUCTION	1
1.1 Contexte	1
1.2 Organisation du rapport	3
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	5
2.1 Rapport signal/bruit optimal	5
2.2 Alarmes à niveau autoajustable.....	7
2.3 Positionnement des alarmes	8
2.4 Localisation de plusieurs sources simultanées	9
2.5 Localisation lorsque l'attention est accaparée vers une autre tâche.....	9
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE	11
4. VOLET 1 : AJUSTEMENT OPTIMAL DU NIVEAU SONORE DES ALARMES DE REcul	13
4.1 Méthodologie	13
4.1.1 Stimuli sonores – alarmes et bruits ambiants.....	13
4.1.2 Participants.....	16
4.1.3 Procédures expérimentales.....	17
4.2 Résultats.....	18
4.2.1 Rapport S/B optimal	18
4.2.2 Temps de dégagement en condition de recul simulé	25

4.3	Discussion.....	27
5.	VOLET 2 : LOCALISATION AUDITIVE DES ALARMES	29
5.1	Méthodologie	29
5.1.1	Participants.....	29
5.1.2	Montage expérimental	29
5.1.3	Procédures expérimentales.....	30
5.2	Résultats.....	32
5.2.1	Localisation d'une alarme de recul avec et sans tâche	32
5.2.2	Localisation de deux alarmes de recul	37
5.3	Discussion.....	39
6.	VOLET 3 : ALARMES À NIVEAU SONORE AUTOAJUSTABLE	41
6.1	Méthodologie	41
6.1.1	Mesures en laboratoire : salle semi-anéchoïque	41
6.1.2	Mesures-terrains.....	45
6.2	Résultats.....	47
6.2.1	Mesures en laboratoire	47
6.2.2	Mesures-terrains.....	51
6.3	Discussion.....	56
7.	VOLET 4 : POSITIONNEMENT DES ALARMES.....	57
7.1	Pratiques courantes	57
7.2	Méthodologie	61
7.3	Résultats.....	64
7.4	Discussion.....	68
8.	CONCLUSION.....	71

8.1	Constats.....	71
8.1.1	Ajustement optimal du niveau des alarmes	71
8.1.2	Localisation auditive des alarmes	71
8.1.3	Alarmes autoajustables	72
8.1.4	Effet du positionnement des alarmes	72
8.2	Recommandations.....	73
	BIBLIOGRAPHIE.....	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Comparaison du seuil de détection moyen en fonction du type de bruit pour l'alarme tonale.	20
Tableau 2 :	Comparaison du seuil de détection moyen en fonction du type de bruit pour l'alarme large bande.....	21
Tableau 3 :	Comparaison du seuil de réaction moyen en fonction du type de bruit pour l'alarme tonale.	23
Tableau 4 :	Comparaison du seuil de réaction moyen en fonction du type de bruit pour l'alarme large bande.....	23
Tableau 5 :	Statistiques descriptives pour le taux de réussite et pour l'erreur angulaire moyenne (données avec et sans tâche combinées) pour l'ensemble des participants.....	33
Tableau 6 :	Statistiques descriptives pour la localisation d'une alarme de recul – taux de confusions avant/arrière et gauche/droite (données avec et sans tâche combinées).	35
Tableau 7 :	Statistiques descriptives pour la localisation de deux alarmes de recul.....	38
Tableau 8 :	Principales caractéristiques techniques des alarmes testées	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Représentation du contenu spectral des alarmes.....	14
Figure 2 :	Contenu spectral des 12 bruits ambiants retenus	15
Figure 3 :	Caractéristiques temporelles des 12 bruits ambiants retenus, par segment de 25 ms (niveau de bruit L_{eq} c. temps).....	16
Figure 4 :	Rapport S/B moyen au seuil de détection pour l'ensemble des participants, dans chacun des 12 bruits.	19
Figure 5 :	Rapport S/B moyen au seuil de réaction pour l'ensemble des participants, dans chacun des 12 bruits.	22
Figure 6 :	Temps de dégagement moyen pour 2 niveaux initiaux de l'alarme tonale et de l'alarme large bande, en fonction du niveau de bruit ambiant et pour deux vitesses de recul.	26
Figure 7 :	Positionnement des haut-parleurs pour les épreuves de localisation	30
Figure 8 :	Tâche principale – <i>Tower of London Test</i>	31
Figure 9 :	Proportion de réponses (%) en fonction de la grandeur de l'erreur exprimée en nombre de haut-parleurs (HP) qui séparent la cible (haut-parleur activé) et la réponse donnée.....	34
Figure 10 :	Matrice de réponses (données avec et sans tâche combinées) pour l'alarme tonale (panneau du haut) et pour l'alarme large bande (panneau du bas).	36
Figure 11 :	Taux de réussite moyen d'identification des deux sources par paire possible de haut-parleurs, lors des présentations des alarmes tonale et large bande.	39
Figure 12 :	Illustration du montage expérimental utilisé en laboratoire pour tester les alarmes autoajustables.	43
Figure 13 :	Illustration de l'évolution des niveaux de bruit ambiant générés et de l'alarme en fonction du temps pour deux scénarios.....	44
Figure 14 :	Illustration de ce que représentent les portions 'on' et 'off' lorsqu'une alarme est activée. La figure montre le signal généré par l'alarme, en vert, en fonction du temps.	45
Figure 15 :	Types de camions utilisés pour les essais-terrains sur les alarmes autoajustables	46
Figure 16 :	Position de l'alarme autoajustable lors de la deuxième séance d'essais-terrains. .	46
Figure 17 :	Niveau sonore à 1 m (SPL en dB[A]) en fonction du voltage de référence à la pince ampérométrique (dB re 1 V) pour l'alarme : (a) large bande; (b) tonale.	47
Figure 18 :	Salle semi-anéchoïque - niveau de pression sonore pour l'alarme large bande, scénario de bruit « hors phase ».	49
Figure 19 :	Salle semi-anéchoïque - niveau de pression sonore pour l'alarme tonale, scénario de bruit « hors phase ».	49

Figure 20 :	Salle semi-anéchoïque - niveau de pression sonore (SPL) pour l'alarme tonale, scénario de bruit « en phase ».....	50
Figure 21 :	Salle réverbérante - niveau de pression sonore (SPL) pour l'alarme large bande.....	51
Figure 22 :	Niveaux de pression sonore (SPL) de l'alarme estimés « champ libre à 1 m » et du bruit ambiant pour le camion de déménagement	52
Figure 23 :	Alarme large bande sur le camion de déménagement : bruit ambiant et estimé « champ-libre » (gauche); bruit capté par le microphone à l'arrière du camion (droite).....	53
Figure 24 :	Alarme tonale sur le camion de déménagement : bruit ambiant et estimé « champ-libre » (gauche); bruit capté par le microphone à l'arrière du camion (droite).....	53
Figure 25 :	Haut : Niveaux de pression sonore de l'alarme estimés « champ libre à 1 m » et du bruit ambiant pour le tracteur semi-remorque de transport en fonction du temps. Bas : Niveaux de pression sonore captés par le microphone placé sur l'alarme, à toutes les 125 ms.....	55
Figure 26 :	Alarme tonale sur le tracteur semi-remorque de transport : bruit ambiant et alarme estimé « champ-libre à 1 m ».....	55
Figure 27 :	Exemples de positionnements d'alarmes comme observés sur le terrain.....	60
Figure 28 :	Exemple d'un positionnement d'alarme jugé adéquat.....	60
Figure 29 :	Camion-benne utilisé pour les tests sur le positionnement des alarmes.....	61
Figure 30 :	Illustration des 5 positions d'alarme utilisées pour la mesure de la distribution sonore.....	62
Figure 31 :	Illustration du rail utilisé pour déplacer le microphone de mesure derrière le camion.....	63
Figure 32 :	Lignes de balayage utilisées pour la mesure de la distribution des niveaux sonores derrière le camion.....	64
Figure 33 :	Alarme tonale - niveaux de pression sonore derrière le camion pour différentes positions d'alarme.....	66
Figure 34 :	Alarme large bande - niveaux de pression sonore derrière le camion pour différentes positions d'alarme.....	67

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte

Des accidents graves, parfois mortels, survenus lors de manœuvres de recul de véhicules lourds sont recensés chaque année tant au Québec qu'un peu partout dans le monde [1–6], et ce, dans plusieurs secteurs d'activité (p. ex. : construction, transport, mines, municipalités). Bien qu'on préconise une meilleure conception des plans de circulation et la réduction, voire l'élimination, des manœuvres de recul afin de réduire le nombre de tels accidents, l'utilisation d'alarmes sonores de recul demeure obligatoire pour la plupart des véhicules lourds et reste un moyen largement utilisé pour prévenir et alerter toutes les personnes œuvrant à proximité des véhicules. Des études antérieures ont montré les limites d'efficacité des alarmes conventionnellement utilisées en milieu de travail (alarmes tonales « bip-bip ») pour minimiser les risques pour la sécurité des travailleurs [2,7]. D'un autre côté, les alarmes de recul, en raison du niveau sonore élevé et très typé qu'elles génèrent, sont très régulièrement une source de nuisance importante pour les riverains vivants à proximité d'environnements de travail dans lesquels se trouvent des véhicules susceptibles d'effectuer des manœuvres de recul.

Les avertisseurs sonores présentent un avantage sur les avertisseurs visuels puisqu'ils captent habituellement l'attention des individus, peu importe où est fixé leur regard. Des accidents peuvent quand même survenir en milieu de travail lorsque ces alarmes ne sont pas bien perçues par l'oreille à cause du bruit ambiant. Le port d'un protecteur auditif peut aussi compromettre une bonne perception; par exemple, lorsque le signal sonore des alarmes est difficile à localiser dans l'espace et n'engendre pas un réflexe de mouvement dans la bonne direction par le travailleur ou lorsqu'il est ignoré, comme dans les cas où le signal est fréquemment déclenché sans état réel de danger ou d'urgence. Dans d'autres circonstances, les alarmes de recul sont tellement fortes et dérangeantes que les travailleurs préfèrent les désactiver plutôt que de les laisser en fonction. Dès lors, il devient primordial d'assurer une conception optimale des alarmes de recul afin d'alerter promptement les travailleurs à proximité des véhicules, tout en limitant la nuisance due au bruit pour les individus éloignés de la source sonore.

Une technologie relativement récente, soit celle des alarmes de recul composées d'un bruit à large bande de fréquences, vise à surmonter les principaux problèmes liés aux alarmes tonales conventionnelles. Cette technologie a été commercialisée et une gamme d'alarmes de recul à large bande de fréquences est maintenant disponible sur le marché. Une étude antérieure menée par la présente équipe de recherche a porté sur l'évaluation des alarmes de recul à large bande de fréquences (voir le [rapport de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail \(IRSST\)](#) [7]). Cette étude avait premièrement permis de vérifier que l'alarme large bande est conforme à la norme SAE J994, qui est la plus utilisée pour la qualification des alarmes installées sur des véhicules lourds. Deuxièmement, les résultats permettaient de conclure, malgré certaines limites, qu'il n'y avait pas de contre-indication à utiliser l'alarme de recul large bande du point de vue de la sécurité des travailleurs. Compte tenu de la forte probabilité que l'utilisation de l'alarme large bande se répande au Québec et des résultats de cette étude, les membres du comité de suivi ont exprimé des besoins pour obtenir des réponses claires reliées à une utilisation sécuritaire des alarmes de recul en conditions réalistes en milieu de travail (que ce

soit pour l'alarme large bande ou celle dite conventionnelle). Certains de ces besoins constituent l'objet principal de ce rapport.

Bien qu'interreliés, les différents aspects soulevés par les membres du comité de suivi et par les chercheurs peuvent être catégorisés de la façon suivante : i) rapport signal/bruit optimal; ii) alarmes à niveau autoajustable; iii) positionnement/installation des alarmes; iv) localisation auditive avec plusieurs alarmes en fonction simultanément; v) localisation des alarmes lorsque l'attention des travailleurs est concentrée sur une autre tâche. Plus spécifiquement, les problèmes reliés à ces aspects sont :

1. Rapport signal/bruit trop élevé

L'étude précédente ainsi que des données de la littérature suggèrent que les alarmes de recul sont souvent utilisées à des niveaux sonores beaucoup trop élevés par rapport au bruit ambiant, causant ainsi une gêne considérable tant pour les travailleurs que pour les riverains. Il n'existe pas, à la connaissance des auteurs, de recommandations claires quant au choix d'un rapport signal/bruit optimal pour assurer un bon compromis sécurité/gêne.

2. Fonctionnement et efficacité des alarmes à niveau autoajustable mal compris

L'utilisation d'alarmes dont le niveau sonore s'ajuste automatiquement au bruit ambiant est une solution souvent utilisée afin de pallier les problèmes de gêne sonore. Cependant, le fonctionnement et l'efficacité de ces systèmes sur le terrain, ainsi que les algorithmes utilisés, sont très peu étudiés, de sorte que l'impact sur la sécurité des travailleurs est mal connu. De plus, encore une fois, les niveaux semblent généralement ajustés à des rapports signal/bruit trop élevés.

3. Mauvais positionnement des alarmes sur les véhicules

L'installation des alarmes sur les véhicules est la plupart du temps effectuée sans égard à la performance acoustique. En d'autres mots, les alarmes sont régulièrement installées à des endroits inappropriés du point de vue acoustique, que ce soit pour des raisons pratiques, de maintenance ou autres, ce qui peut compromettre la sécurité des travailleurs. Selon les intervenants en milieu de travail, il n'existe pas de directives ni de recommandations claires quant à l'installation optimale des alarmes sur les véhicules. Il y a donc un besoin de disposer de données objectives relatives aux conséquences d'une mauvaise installation des alarmes sur la sécurité.

4. Difficulté de localisation lorsqu'il y a activation simultanée de plusieurs alarmes

Lors de l'étude précédente, les essais réalisés en laboratoire consistaient à ne localiser qu'une seule alarme à la fois. Dans de nombreux milieux de travail, plusieurs alarmes peuvent être activées en même temps, ce qui soulève des questions au sujet de la localisation de celles-ci et des impacts sur la sécurité des travailleurs.

5. Difficulté de localisation des alarmes lorsque l'attention est concentrée sur une tâche principale

Les sujets testés lors de l'étude précédente n'avaient que des tâches expérimentales à effectuer. En revanche, en milieu de travail, les travailleurs peuvent se voir confier plusieurs autres tâches, en plus d'avoir à percevoir un éventuel signal d'alarme. La réalisation de telles tâches en milieu réel viendra fort probablement affecter la perception des alarmes qui pourraient alors retentir. Il existe malheureusement très peu de données dans la littérature à ce sujet.

Les cinq problématiques présentées ci-dessus n'ont été que peu ou partiellement étudiées dans la littérature et n'ont pas toujours été prises en considération par ceux qui établissent les normes. Or, la présente étude permet de mieux comprendre plusieurs des problèmes retenus par le comité de suivi et l'équipe de recherche, tout en fournissant des réponses concrètes aux questions scientifiques, techniques et pratiques qui y sont reliées. À terme, cette étude aidera à favoriser une utilisation optimale des alarmes de recul dans les milieux de travail.

1.2 Organisation du rapport

Les 4 volets de cette étude sont relativement indépendants les uns des autres. Ainsi, le rapport a été conçu en regroupant, dans une même section, la méthodologie et les résultats de chaque volet.

En premier lieu, un état des connaissances suivi d'un rappel des objectifs est présenté. Ensuite, un à un, les quatre sujets traités sont présentés, suivis des retombées, recommandations et conclusions.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Une revue complète de la littérature portant sur la propagation sonore des alarmes de recul, leur détection, audibilité et localisation a été effectuée dans un [projet précédent](#) par la présente équipe et les résultats sont consignés dans un [rapport de recherche](#) [7]. Les études ou travaux touchant, entre autres, les alarmes conventionnelles et large bande y sont répertoriés. Le présent état des connaissances porte, quant à lui, sur le peu d'études liées aux points abordés dans l'étude actuelle, soit : i) le rapport signal/bruit optimal; ii) les alarmes à niveau autoajustable; iii) le positionnement des alarmes; iv) la localisation auditive avec plusieurs alarmes en fonction simultanément; v) la localisation des alarmes lorsque l'attention est concentrée sur une tâche principale.

2.1 Rapport signal/bruit optimal

Les alarmes de recul vendues en Amérique du Nord doivent être conformes à la norme SAE J994 [8] qui spécifie, notamment, comment doit être effectuée, en laboratoire, la mesure du niveau de pression sonore généré par l'alarme à 1 m devant celle-ci. Cette valeur permet au manufacturier de classer l'alarme (p.ex. Type A – 107 dB[A]). Un utilisateur choisira donc, en général, une alarme en fonction du bruit ambiant qui règne à l'arrière des véhicules lors des manœuvres de recul¹. Le rapport entre le bruit généré par l'alarme et le bruit ambiant est appelé le rapport signal/bruit (S/B). Les questions qui se posent alors sont : quel doit-être ce rapport signal/bruit en milieu de travail et comment le mesure-t-on? Deux normes sont principalement utilisées pour guider le choix d'un rapport signal/bruit : ISO 7731 [9] et ISO 9533 [10].

ISO 7731 Ergonomie - Signaux de danger pour lieux publics et lieux de travail -- Signaux de danger auditifs

Cette norme spécifie les principes physiques de conception, les exigences ergonomiques et les méthodes d'essai correspondantes applicables aux signaux de danger dans les lieux publics et les lieux de travail à l'intérieur de la zone de réception du signal. Elle contient également des recommandations relatives à la conception de ces signaux. Bien qu'elle ne s'applique pas spécifiquement aux signaux émis par les alarmes de recul pour les véhicules en mouvement, cette norme est tout de même souvent évoquée pour guider le choix du rapport S/B des signaux avertisseurs. Sur cet aspect, la norme stipule notamment que la différence entre le niveau du signal d'alarme et le niveau du bruit ambiant doit être d'au moins 15 dB. La norme spécifie de plus la différence minimale qui devrait exister entre le niveau du signal d'alarme et le seuil masqué dans le bruit environnant si l'analyse acoustique est effectuée en bandes d'octave (différence >10 dB) ou tiers d'octave (différence >13 dB). Le seuil masqué réfère au niveau sonore nécessaire pour tout juste détecter, normalement 50 % du temps, le signal sonore à travers le bruit ambiant. Une procédure de calcul est fournie pour estimer les seuils masqués directement à partir du bruit environnant.

¹ Dans ce rapport, le bruit ambiant est considéré comme le bruit qui existe près du véhicule, soit le bruit généré dans l'environnement (sans le véhicule), le bruit généré par le véhicule ou les deux.

ISO 9533 Engins de terrassement — Avertisseurs sonores de déplacement et de recul montés sur engins — Méthodes d'essai et critères de performance

Cette norme prescrit une méthode d'essai acoustique et établit les critères nécessaires pour évaluer la performance sonore d'alarmes montées sur des engins de terrassement. Les essais sont effectués sur un engin dans des conditions statiques. La méthode proposée dans la norme nécessite sept microphones de mesures placés derrière le véhicule à des distances prescrites pour lesquelles des mesures du niveau de pression sonore sont effectuées dans deux conditions :

- a. Alarme en fonction/moteur éteint
- b. Alarme éteinte/moteur à haut régime

Le rapport S/B est alors défini à chaque microphone comme la différence de niveau entre les conditions a et b. Ce rapport S/B doit être égal ou supérieur à 0 dB à tous les microphones pour que l'alarme évaluée soit jugée conforme à la norme. Notons qu'ISO 9533 propose aussi, dans une annexe, une méthode avec analyse fréquentielle en tiers d'octave. Dans ce cas, la différence du niveau maximum de pression sonore entre les conditions a et b doit être supérieure à 13 dB dans une ou plusieurs bandes dominantes. Bien que la valeur de 13 dB soit la même que celle indiquée dans la norme ISO 7731 pour l'analyse en tiers d'octave, la marge de 13 dB y est calculée à partir de la composante masquante du bruit environnant et non pas à partir du niveau mesuré. La norme ISO 7731 peut ainsi prescrire des niveaux d'alarme un peu plus élevés que la norme ISO 9533 pour les bruits riches en basses fréquences.

Dans toutes ces normes, les bases scientifiques qui ont guidé le choix des rapports signal/bruit optimaux pour assurer la perception des avertisseurs sonores ne sont pas précisées. Les valeurs proposées sont possiblement extraites des travaux de Wilkins et Martin [11] et Patterson [12], ainsi que de ceux de Coleman et coll. [13]. Des valeurs entre 12 et 25 dB au-dessus des seuils masqués sont proposées pour assurer l'audibilité, la sollicitation de l'attention et la reconnaissance des signaux sonores avertisseurs en général. Les travaux de ces chercheurs ont d'ailleurs inspiré le développement d'un outil de prédiction des niveaux sonores des avertisseurs (Détectson [14]) qui est basé sur le concept de la fenêtre de conception (*design window*) avancé par Coleman et coll. [13]. Le modèle Détectson, validé en laboratoire [15] et sur le terrain [16], confirme que les valeurs de 12 à 25 dB semblent justifiées pour des signaux sonores composés de plusieurs tonalités. Enfin, dans le cadre d'une application-terrain portant sur la perception des sifflets de train, Dolan [17] a noté que ce type de signal sonore pouvait être détecté à des niveaux 15 dB plus bas que le niveau de bruit de fond à l'intérieur de différents véhicules automobiles. Selon cet auteur, un rapport signal/bruit de -3 dB (soit 12 dB au-dessus du seuil masqué) représente un choix optimal pour ce type de signal sonore.

Malgré les données recensées dans la littérature scientifique, il n'existe pas de consensus ni de recommandations claires quant aux valeurs de rapport signal/bruit qui permettraient de maintenir une utilisation sécuritaire des alarmes de recul tout en minimisant la nuisance tant pour les travailleurs que pour les riverains. De plus, les différentes options offertes (ISO 9533 c. ISO 7731; analyse fréquentielle c. niveau global; niveau au seuil masqué c. niveau absolu) peuvent amener beaucoup de confusion, en particulier chez les non-experts en acoustique. Des valeurs élevées de rapport S/B sont régulièrement rapportées en milieu de travail (> 20 dB).

L'étude précédente tendait à suggérer que l'utilisation de telles valeurs n'était pas justifiée et qu'elle contribuait de façon significative à la nuisance et à la gêne ressenties par les travailleurs et riverains.

Un deuxième aspect intimement relié au rapport signal/bruit optimal est celui de la distance sécuritaire. En effet, la détermination du rapport signal/bruit optimal n'est pas le seul objectif à viser pour minimiser le risque pour la sécurité des travailleurs situés à l'arrière d'un véhicule qui recule. Il faut aussi s'assurer que l'alarme soit perçue à une distance suffisamment importante pour permettre au travailleur de se retirer à temps de la trajectoire du véhicule en marche arrière. À titre d'exemple, la norme SAE J1741 [18] stipule que le temps de réaction d'un individu qui doit se retirer de la zone de danger est de 2 secondes. Si le véhicule recule à une vitesse de 2,8 m/s, il parcourra une distance de 5,6 m en 2 secondes. Il faut donc que le rapport signal/bruit optimal soit atteint à au moins 5,6 m à l'arrière du véhicule pour éviter une collision.

2.2 Alarmes à niveau autoajustable

L'utilisation d'alarmes dont le niveau s'ajuste automatiquement au bruit ambiant est une solution courante afin de pallier les problèmes de gêne. Ces alarmes contiennent des mécanismes (généralement des systèmes électroniques) permettant la mesure du bruit ambiant pour ajuster ensuite le niveau de l'alarme de telle sorte qu'elle soit perceptible en fonction de ce bruit. Le niveau de l'alarme peut s'ajuster jusqu'à la valeur maximale que peut générer l'unité utilisée. La norme ISO 9533 [10] a été révisée en 2010 pour tenir compte de l'existence de tels systèmes. Une méthode de mesure, découlant des travaux de McDaniel et coll. [19], y est proposée pour évaluer la performance de l'alarme lorsque celle-ci est installée sur un véhicule statique. La norme ne spécifie toutefois pas quelles devraient être les caractéristiques fonctionnelles de l'alarme (p. ex. : type de microphone, principe de mesure du bruit ambiant, ajustement du niveau de l'alarme, délai de réponse, emplacement de l'alarme). Les algorithmes et les composantes utilisés, ainsi que leurs caractéristiques, ne sont principalement connus que des manufacturiers. De plus, le fonctionnement et l'efficacité de ces systèmes sur le terrain, où les sources de bruit ambiant peuvent être complexes et multiples, sont mal connus et très peu étudiés. À l'exception des rapports de Burgess et McCarthy [20] et Schexnayder et Ernzen [21,22], où l'utilisation d'alarmes à niveau autoajustable en milieu de travail y est brièvement discutée, il n'existe pas à la connaissance des auteurs d'études scientifiques ou techniques ayant porté sur l'évaluation du fonctionnement et de la performance-terrain de ces alarmes. À titre d'exemple, Schexnayder et Ernzen [22] recommandent l'utilisation d'une alarme à niveau autoajustable pour minimiser la gêne, tout en mentionnant de bien déterminer l'endroit où celle-ci devrait être installée sur le véhicule :

... Close attention must be given to the alarm's mounting location on the machine in order to minimize engine noise interference, which can be sensed by the alarm as the ambient noise level. These alarms should be mounted as far to the rear of the machine as possible. An alarm mounted directly behind a machine's radiator will sense the cooling fan's noise and adjust accordingly. Such a mounting will negate the purpose of the device...

Traduit librement, on pourrait lire :

...Une attention particulière doit être portée à la position de l'alarme sur le véhicule afin de minimiser les interférences avec le bruit du moteur, qui peut être capté par l'alarme en tant que bruit ambiant. Ces alarmes doivent être installées le plus à l'arrière possible du véhicule. Une alarme installée directement à l'arrière du radiateur captera le bruit du ventilateur de refroidissement et ajustera son niveau sonore en conséquence. Une telle installation viendra annuler l'objectif visé par un tel dispositif...

Ces recommandations, bien qu'allant de soi en théorie, ne sont toutefois pas appuyées par des données scientifiques probantes.

2.3 Positionnement des alarmes

Pour éviter le plus possible les effets de diffraction et de réflexion des ondes sonores, une alarme devrait être positionnée le plus possible à l'arrière du véhicule, face à la zone de danger (espace derrière le véhicule) et être visible par tout travailleur se trouvant dans cette zone, peu importe sa position [2]. Cependant, l'installation des alarmes sur les véhicules est la plupart du temps effectuée sans égard à leur performance acoustique. En d'autres mots, les alarmes sont régulièrement installées à des endroits inappropriés d'un point de vue acoustique, que ce soit pour des raisons pratiques, de maintenance ou autres, ce qui peut compromettre la sécurité des travailleurs. Comme mentionné précédemment, la norme SAE J994 [8] spécifie comment doit être effectuée, en laboratoire, la mesure du niveau de pression sonore généré par l'alarme à 1 m devant celle-ci, tandis que la norme ISO 9533 [10] indique comment évaluer la performance sonore d'alarmes montées sur des engins de terrassement. Ces deux normes n'apportent toutefois aucune indication quant à l'emplacement de l'alarme sur le véhicule. De plus, selon les intervenants en milieu de travail, il n'existe pas de directives ni de recommandations claires dans la littérature quant à l'installation optimale des alarmes, et il y a un besoin de disposer de données objectives quant à l'impact d'une mauvaise installation des alarmes sur la sécurité.

L'effet de l'emplacement des alarmes conventionnelles a été discuté par Laroche et coll. [2]. Dans cette étude, deux positions d'alarme étaient considérées : une à l'arrière du véhicule, bien visible, et l'autre sous le châssis à l'arrière du véhicule, la rendant non visible de la zone de danger. Les niveaux de pression sonore mesurés derrière le véhicule à plusieurs endroits montrent de grandes variations pour les deux emplacements d'alarme. Les variations observées étaient toutefois plus élevées dans le cas de la seconde position d'alarme, ce qui suggérait des phénomènes d'interférence plus importants. Les auteurs en concluent que l'emplacement de l'alarme sur un véhicule lourd est en général critique. Des résultats similaires ont été obtenus lors du projet précédent [7], lors duquel des patrons d'immission derrière le véhicule ont été étudiés pour deux positions d'alarmes : une dite « optimale » où l'alarme était positionnée bien en vue, centrée à l'arrière du véhicule et une position dite « réaliste » où cette fois l'alarme était plutôt décalée par rapport au centre et placée derrière les grilles de protection du véhicule. On y observait bien que le fait de déplacer l'alarme, même légèrement, pouvait avoir un effet important sur les niveaux sonores et sur la distribution du son derrière un véhicule. Des constatations similaires ont été faites par Blouin [3]. Dans cette étude, l'auteur mentionne que tous les véhicules qui ont été inspectés (entre 25 et 30 au total) avaient leur alarme de recul

obstruée par le pare-chocs arrière métallique (et souvent dirigée vers l'avant du véhicule), à l'exception d'un seul camion à benne. Plus récemment, Heckman et coll. [23] ont étudié l'effet du positionnement de l'alarme sur la capacité à la localiser. Quatre emplacements d'alarmes sur un camion de déménagement ont été étudiés. Pour les positions 1 et 2 (notées *Alarm 1* et *Alarm 2*), l'alarme était placée à l'extérieur du camion et pointait, dans un plan horizontal, vers l'arrière du véhicule (vers la zone de danger). Pour les positions 3 et 4 (*Alarm 3* et *Alarm 4*), l'alarme était située sous le châssis du véhicule et n'était pas directement visible à partir de la zone de danger. Elle pointait soit vers l'intérieur du camion (*Alarm 3*) ou encore perpendiculairement à l'axe du camion (*Alarm 4*). Comme attendu, les résultats de l'étude montrent que la capacité de localisation dépend non seulement de l'emplacement de l'alarme, mais aussi de l'orientation de l'individu par rapport au camion. Le plus grand nombre d'erreurs de localisation a été observé lorsque les sujets tournaient le dos au camion alors que l'alarme était positionnée dans le haut de ce dernier. Il est à noter que l'étude ne portait que sur les aspects de localisation des alarmes. La répartition du champ sonore et la variation des niveaux sonores derrière les véhicules n'y sont pas discutées.

2.4 Localisation de plusieurs sources simultanées

La localisation de sources simultanées fait appel à des concepts reliés à l'audition binaurale et plus précisément à l'effet de préséance. L'effet de préséance peut être défini comme un mécanisme inhibiteur du système auditif qui fait en sorte que la personne soit capable de localiser une source sonore malgré la réverbération dans un local. Plusieurs phénomènes perceptuels sont associés à cet effet, par exemple, la fusion de deux sources en une seule ou encore la perception d'un son comme provenant de la direction de la première source déclenchée, en présence d'autres sources similaires. Dans le contexte du présent projet, il s'agit de la localisation d'une alarme de recul en présence d'une autre alarme de recul dont le niveau sonore et le temps d'activation peuvent être différents de la première. Dans leur article, Faller et Merimaa [24] révisent les modèles de localisation dans des situations d'écoute complexes et démontrent que la localisation d'une source cible n'est pas, ou peu affectée par l'ajout d'un ou de deux distracteurs sonores de mêmes caractéristiques acoustiques que la cible. Lorsque le nombre de distracteurs augmente ou que le ratio cible/distracteur est diminué, la performance de localisation commence toutefois à se dégrader. Dans la plupart des configurations où l'on retrouve une cible et un distracteur dans un plan horizontal frontal, la performance demeure cependant très bonne, même à des niveaux très près du seuil de détection. Par contre, dans le cas de deux sources déphasées, mais de même enveloppe temporelle, leur localisation demeure problématique.

2.5 Localisation lorsque l'attention est accaparée vers une autre tâche

Déjà au cours des années 1970, Wilkins et Martin [11] étaient conscients que la perception des avertisseurs sonores pouvait être affectée par l'attention portée à une autre tâche. Ils ont tenté de quantifier cet effet par diverses expérimentations qui avaient toutes des limites (p. ex. : moments prévisibles de présentation des alarmes dans les études en laboratoire, nombre limité de tâches secondaires étudiées). Malgré les limites de leurs études, les auteurs ont suggéré que le signal

d'alarme devait être de 6 à 24 dB au-delà du seuil masqué pour attirer l'attention des travailleurs, mais que la reconnaissance de la source sonore n'était pas assurée à 100 %. Ces études portaient sur la perception des avertisseurs sonores sans exiger leur localisation dans l'espace. Peu d'études semblent avoir porté sur la localisation de sources sonores lorsque l'attention est accaparée par une autre tâche. Merat et Groeger [25] ont tenté, à l'aide d'expérimentations faisant appel à des processus cognitifs de plus en plus complexes, de déterminer si des tâches cognitives telles que l'énumération de chiffres, la mémorisation de 7 chiffres ou l'addition de chiffres juxtaposés avaient un impact sur la localisation de bouffées tonales de 100 ms émanant d'un des 5 haut-parleurs séparés de 15 degrés l'un de l'autre. Le rythme de présentation des bouffées tonales, ou des chiffres était de 1 ou 2 par seconde. Cette étude a réussi à démontrer que la performance tend à chuter quand les 2 tâches doivent être réalisées simultanément, et qu'une des tâches est menée à faible cadence (1 par seconde) et que l'autre est réalisée à une cadence plus élevée (2 par seconde). Selon ces auteurs, les ressources centrales sont davantage sollicitées dans un tel scénario.

Afin de prendre en compte l'élément « attention » dans une étude sur la détection d'alarmes de recul avec et sans protecteurs auditifs et de reproduire le plus fidèlement possible la situation réelle sur le terrain, Christian [26] s'est assuré d'inclure une tâche pour distraire les participants (*probability monitoring task*). Les résultats obtenus ne permettent pas de quantifier l'effet de la tâche qui visait à distraire les participants, car elle était présente dans toutes les conditions expérimentales. Toutefois, cette tendance d'ajouter une tâche supplémentaire (paradigme de double tâche) pour étudier l'attention auditive dans des conditions réalistes semble prometteuse [27]. Cette tâche peut prendre plusieurs formes, incluant le *tracking* visuel, la détection de stimuli tactiles, la mémorisation de mots, etc.

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

Ce projet s'inscrit dans le cadre de la programmation thématique « Signaux sonores d'alarmes en milieu de travail » du champ de recherche Prévention des risques mécaniques et physiques de l'IRSST. Il se situe dans la continuité du projet *Évaluation des alarmes de recul à large bande de fréquences (broadband alarm)* [7]. Son objectif principal est d'analyser la propagation sonore, l'audibilité et la localisation des deux grands types d'alarmes de recul (conventionnelle et à large bande de fréquences), pour un ensemble de situations typiques des milieux de travail, en vue de minimiser les risques d'accident liés aux alarmes de recul. La participation à ce projet était limitée aux individus ayant une audition normale sans protecteurs auditifs, œuvrant dans les milieux ouverts.

L'atteinte de l'objectif principal passe par la poursuite des sous-objectifs suivants :

1. Déterminer, en laboratoire, les paramètres optimaux des deux grands types d'alarmes de recul permettant une audibilité adéquate et un retrait sécuritaire avant l'impact (volet 1);
2. Évaluer la capacité de sujets humains à localiser deux alarmes déclenchées en simultanée (volet 2);
3. Mesurer la capacité de sujets humains à localiser une alarme tout en effectuant une autre tâche préétablie (volet 2);
4. Comprendre le fonctionnement des alarmes autoajustables en laboratoire et sur le terrain (volet 3);
5. Quantifier sur le terrain l'uniformité ou pas du patron sonore généré derrière les véhicules lourds dans différentes positions d'alarmes (volet 4).

4. VOLET 1 : AJUSTEMENT OPTIMAL DU NIVEAU SONORE DES ALARMES DE REcul

Pour assurer la sécurité des travailleurs œuvrant derrière les véhicules lourds, les alarmes de recul doivent être ajustées à un rapport signal/bruit permettant non seulement aux personnes une audibilité adéquate des alarmes, mais également de susciter la réaction de se retourner en direction du camion ou de se retirer de la zone de danger suffisamment rapidement pour éviter un impact. D'un autre côté, les alarmes ne doivent pas être ajustées à des niveaux trop élevés pour ne pas causer une gêne environnementale excessive et une nuisance pour les travailleurs œuvrant autour des véhicules. Dans cette optique, un rapport signal/bruit optimal est défini dans ce projet comme la différence entre le niveau sonore de l'alarme de recul et celui du bruit ambiant qui suscite une perception de danger tout juste suffisante pour entraîner la réaction de se retourner en direction du camion ou de se retirer de la zone de danger. Pour se prononcer sur l'ajustement optimal du niveau des alarmes, des mesures en laboratoire ont été effectuées sur deux groupes de participants, afin de déterminer les seuils masqués et les seuils de réaction (groupe 1), ainsi que le temps de dégagement (groupe 2).

4.1 Méthodologie

4.1.1 Stimuli sonores – alarmes et bruits ambiants

4.1.1.1 Alarmes

Le contenu spectral des deux alarmes de recul utilisées dans ce projet est illustré à la Figure 1. Les niveaux de pression sonores (dB SPL), mesurés dans une chambre semi-anéchoïque à une distance approximative d'un mètre de l'alarme, sont représentés en fonction de la fréquence exprimée en bandes fines.

L'alarme tonale utilisée est une alarme de marque Grote², modèle 73030. Cette alarme génère le signal classique bien connu de type « bip-bip » que l'on retrouve sur la grande majorité des véhicules. Elle consiste principalement en un son pur situé à 1264 Hz (± 1 Hz) ainsi que ses harmoniques de plus hautes fréquences, à des niveaux beaucoup plus faibles. Chaque cycle de l'alarme a une durée nominale de 990 ms comprenant un « bip » de 500 ms et une pause de 490 ms.

L'alarme large bande utilisée est la BBS-107 *Heavy duty* commercialisée par la compagnie Brigade Electronics³. L'énergie acoustique produite par cette alarme est répartie sur un plus large spectre allant principalement de 700 à 4000 Hz. Le signal produit par cette alarme sonne comme un « pschitt pschitt » plutôt que le « bip-bip » des alarmes conventionnelles. Chaque

² Grote Industries, Inc., Indiana, USA (<http://fr.grote.com/products/73030-field-selectable-backup-alarm-107-or-112-selectable-decibels/>).

³ Brigade electronics (<http://brigade-inc.com/>).

cycle de l'alarme a une durée nominale de 770 ms comprenant un « pschitt » de 400 ms et une pause de 370 ms.

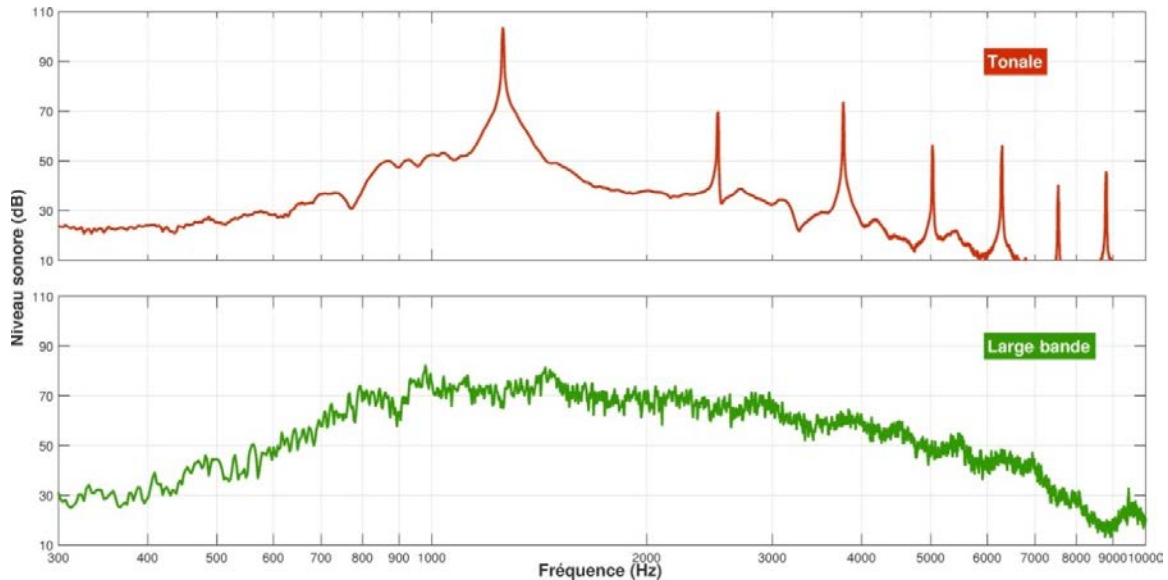


Figure 1 : Représentation du contenu spectral des alarmes.

4.1.1.2 Bruits ambiants

Douze bruits ambiants ont été sélectionnés pour couvrir un éventail riche en basses, moyennes ou hautes fréquences et d'allures temporelles différentes. L'ensemble est représentatif de bruits réalistes susceptibles de se retrouver sur les sites de travail où circulent des véhicules lourds munis d'alarmes de recul. On retrouve parmi ces bruits des enregistrements de la circulation routière, de la construction, de carrières, de scieries, ou encore d'une variété d'outils et d'équipements. Les caractéristiques spectrales des douze bruits sont représentées à la figure 2, et ont été déterminées à l'aide d'une analyse spectrale par bandes de tiers d'octave, alors que les caractéristiques temporelles sont illustrées, par segment de 25 ms, à la figure 3.

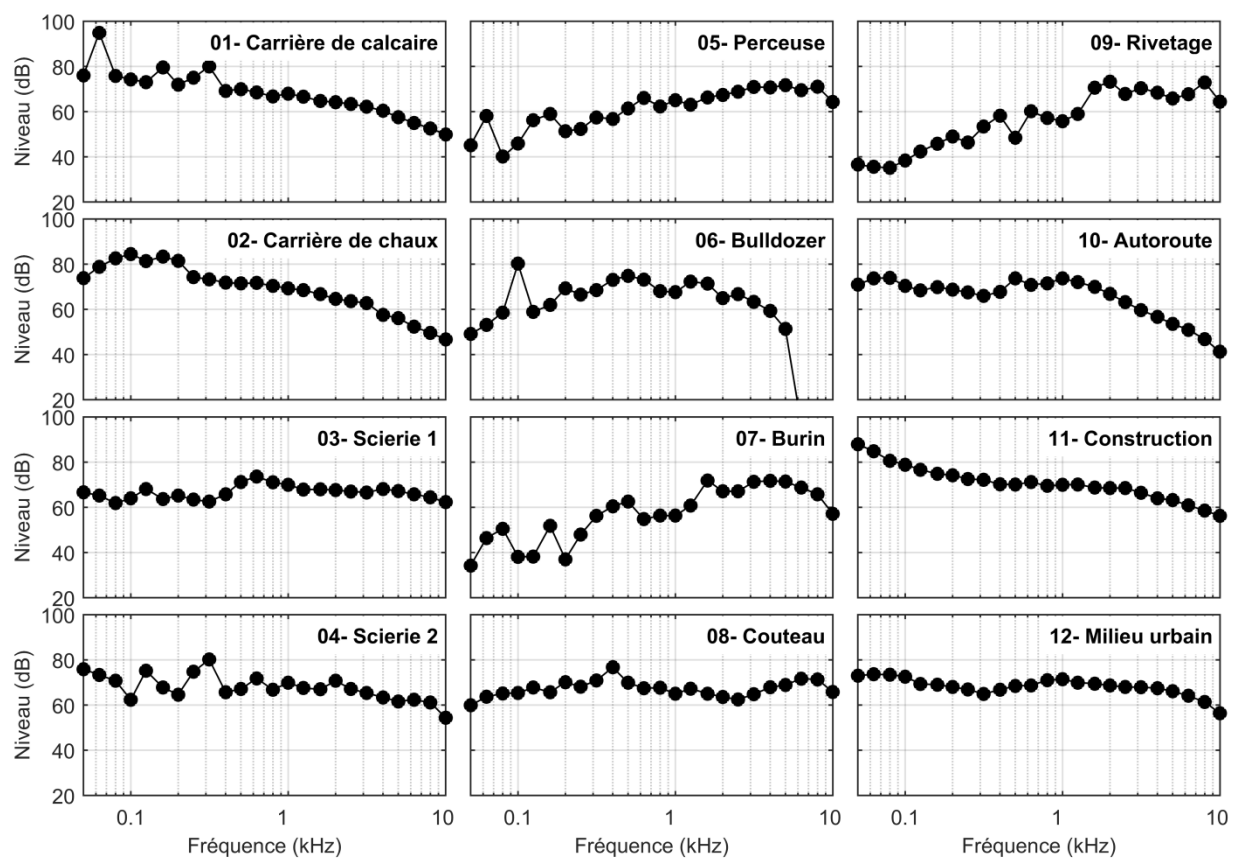


Figure 2 : Contenu spectral des 12 bruits ambiants retenus (niveau de bruit L_{eq} c. fréquence) – analyse par bande de tiers d’octave.

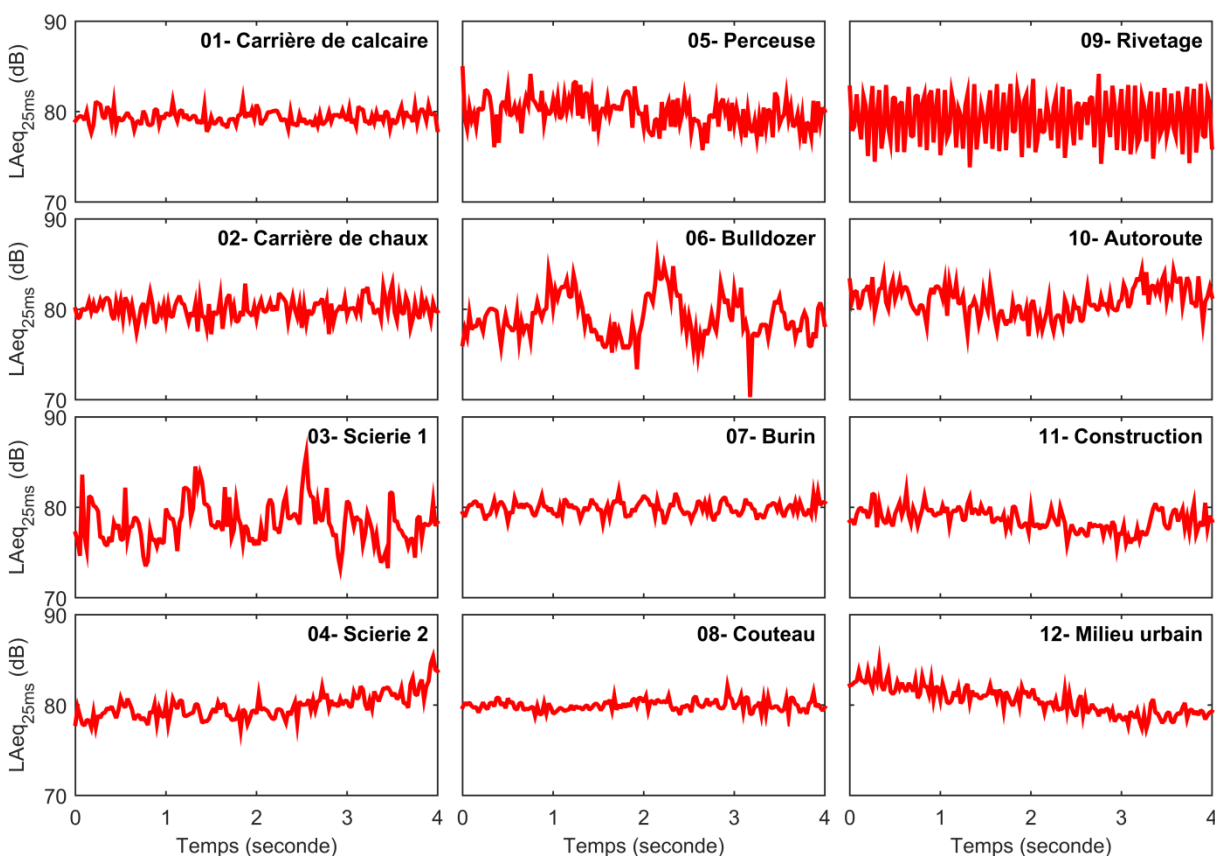


Figure 3 : Caractéristiques temporelles des 12 bruits ambiants retenus, par segment de 25 ms (niveau de bruit L_{eq} c. temps).

4.1.2 Participants

Au total, 48 jeunes adultes ont participé aux différentes épreuves de laboratoire qui visaient l'ajustement optimal des alarmes de recul, soit 24 participants (18 femmes et 6 hommes) âgés de 18 à 33 ans (moyenne = 22,8 ans ; écart-type = 3,4 ans) pour la mesure des seuils de détection et de réaction, et 24 participants (19 femmes et 5 hommes) âgés entre 20 et 39 ans (moyenne = 23,9 ans; écart-type = 3,8 ans) pour la détermination du temps de dégagement. Tous les participants rencontraient les critères de sélection suivants : 1) sensibilité auditive normale des deux oreilles, comme définie par des seuils de détection de sons purs en conduction aérienne égaux ou inférieurs à 25 dB HL (250 – 8000 Hz), et 2) tympanogrammes normaux (compliance statique = 0,30 – 1,70 cm³; volume du conduit auditif externe = 0,9 – 2,0 cm³; gradient = 51 – 114 daPa; pression = -150 à +50 daPa) [28].

Avant de prendre part au projet de recherche, les participants devaient lire une lettre d'information, signer un formulaire de consentement, et remplir un questionnaire d'histoire auditive. Le recrutement des participants et l'expérimentation ont été réalisés selon les politiques de déontologie en vigueur au Bureau d'éthique et d'intégrité de la recherche de l'Université d'Ottawa (certificat H09-13-01). Afin de s'assurer que les participants satisfaisaient aux critères

de sélection, un otoscope Welch Allyn a été utilisé pour visualiser le conduit auditif externe et le tympan, alors qu'un tympanomètre GSI 38 a permis d'évaluer l'intégrité de l'oreille moyenne. Finalement, un dépistage auditif a également été effectué à l'aide d'un audiomètre portable (Interacoustics AD25) couplé à des écouteurs Telephonics TDH-39P. Lors de ce dernier test, des sons de différentes fréquences (entre 250 et 8000 Hz) ont été présentés sous écouteurs et les participants devaient appuyer sur un bouton poussoir lorsqu'ils percevaient le son.

4.1.3 Procédures expérimentales

4.1.3.1 Rapport S/B optimal

Cette première expérimentation visait à déterminer le rapport signal/bruit optimal pour la détection et le seuil de réaction des deux types d'alarmes de recul (conventionnel et large bande) pour les 12 bruits ambiants retenus ci-dessus. Les bruits, générés en format *.wav* à l'aide d'un logiciel développé lors d'une étude antérieure, ont été présentés aux participants, dans une cabine insonorisée, à des niveaux de 80 dBA à l'aide de six haut-parleurs (Vaillancourt et coll., 2012). Simultanément, l'alarme de recul émanait d'un haut-parleur placé derrière eux à 0 degré azimut et à une distance de 1 mètre. Les réponses des participants étaient enregistrées à l'aide d'un ordinateur portable de marque HP sous forme de tablette, utilisé pour ajuster le niveau de l'alarme au seuil de détection ou de réaction.

Lors des mesures du seuil de détection (seuils masqués) dans les différents bruits, chaque participant devait ajuster le niveau de pression sonore de l'alarme pour atteindre le seuil, soit le niveau tout juste perceptible dans un bruit donné. À partir d'un niveau de présentation initial supraliminaire, soit 80 dBA, le niveau sonore était réduit par pas de 2 dB à des niveaux infraliminaires et ensuite augmenté pour atteindre le seuil masqué. Cette méthode adaptative d'ajustement a été répétée à plusieurs reprises jusqu'à ce que le participant soit confiant que sa réponse représente le plus bas niveau sonore perceptible, dans une série ascendante. Il est à noter que les participants devaient enregistrer leur réponse lors d'une progression ascendante et non descendante comme prescrite dans la plupart des méthodes normalisées de recherche de seuils (ex. ANSI/ASA S3.21-2004 (R2009) [29]). Ce choix correspond bien aussi à la situation acoustique lors d'une manœuvre de recul vers une personne située à l'arrière du véhicule. Cette procédure de recherche des seuils a été répétée pour chacune des deux alarmes, dans chacun des douze bruits. De plus, pour quantifier la variabilité test-retest, les mesures de seuil ont été répliquées, avec une pause entre les divers blocs de 12 bruits x 2 alarmes, afin de limiter l'effet de fatigue. Au total, 48 mesures de seuil ont été effectuées par l'entremise d'un devis de recherche à mesures répétées (2 alarmes x 12 bruits x 2 mesures répétées du seuil de détection). L'ordre de présentation des bruits et des alarmes a été prédéterminé et contrebalancé sur l'ensemble des participants.

Des mesures du seuil de réaction ont également été réalisées, en utilisant une procédure similaire auprès du même groupe de participants. Cette fois-ci, le niveau initial de l'alarme était plus faible (65 dBA) et les participants devaient ajuster le niveau sonore jusqu'au point où ils ressentaient le besoin de réagir au son de l'alarme, soit en se retournant vers le camion ou en se déplaçant hors de la zone de danger (zone correspondant à la trajectoire d'un camion qui

s'approcherait). Il s'agit donc du niveau sonore nécessaire pour provoquer une réaction qui amène le travailleur à se retourner en direction du camion ou de se retirer de la zone de danger.

4.1.3.2 Temps de dégagement en condition de recul simulé

Dans cette deuxième expérimentation, chez un second groupe de participants avec audition normale, l'équipe de recherche cherchait à déterminer, en utilisant une approche légèrement différente, le temps restant, avant l'impact entre le véhicule et l'individu (le temps de dégagement), après que ce dernier ait réagi au son de l'alarme (réaction de retrait), dans diverses conditions de recul simulées. Un seul bruit de fond a été utilisé pour cette expérimentation, soit le bruit 3 (copeaux de bois dans une scierie) présenté à 74 ou 80 dBA. Cette décision de ne retenir qu'un seul bruit a dû être prise afin de limiter le nombre de conditions à tester. Ce bruit a été retenu pour la richesse de son contenu fréquentiel et temporel (voir figure 2 et figure 3).

Afin de reproduire plusieurs scénarios de manœuvre de recul, différents paramètres ont été utilisés tels que le niveau de départ de l'alarme (92 et 98 dBA), la distance entre le véhicule et le participant (30 et 60 m), ainsi que la vitesse du véhicule (10 et 15 km/h). Trente-deux conditions ont ainsi été créées (2 alarmes x 2 niveaux de bruit x 2 niveaux de départ x 2 distances x 2 vitesses). De plus, pour quantifier la variabilité test-retest, trois mesures ont été effectuées pour chacune des conditions, pour un total de 96 essais par participant, avec une pause entre les blocs de 32 essais afin de limiter l'effet de fatigue.

Le même dispositif expérimental que celui utilisé à la sous-section 4.1.3.1 a été retenu. En présumant une augmentation du niveau de 6 dB par dédoublement de la distance et en fonction du niveau de départ de l'alarme, de la distance entre le véhicule et le participant, de la vitesse du véhicule et du niveau du bruit de fond, le niveau de l'alarme (et conséquemment le rapport signal/bruit) était augmenté graduellement pour simuler un véhicule s'approchant du participant. À l'aide du stylet de la tablette d'ordinateur, les participants devaient appuyer sur une case intitulée « Réaction » quand le niveau sonore était jugé suffisant pour provoquer une réaction soit en se retournant en direction du camion, soit en se retirant de la zone de danger. En même temps, le participant était occupé à réaliser une tâche de détection de chiffres pairs ou impairs sur l'écran de la tablette. Cette tâche consistait à repérer un chiffre pair (ou impair selon les instructions fournies à l'écran) en appuyant sur la case présentant le bon chiffre ou en sélectionnant une case vide si aucune réponse n'était valable. À partir de la vitesse du véhicule, de la distance de départ et du temps écoulé, il a été possible de déterminer une valeur de temps en secondes, appelée temps de dégagement.

4.2 Résultats

4.2.1 Rapport S/B optimal

4.2.1.1 Rapport S/B au seuil de détection

La figure 5 illustre le seuil de détection moyen, exprimé en rapport S/B, de l'ensemble des participants pour chacun des douze bruits. Pour l'ensemble des bruits, le seuil de détection moyen varie entre -12,8 et -24,9 dB S/B (moyenne = -16,9) pour l'alarme tonale et entre -10,5 et

-21,5 dB S/B (moyenne = -14,3) pour l'alarme large bande. Les alarmes demeurent donc audibles à des niveaux significativement inférieurs à celui du bruit de fond.

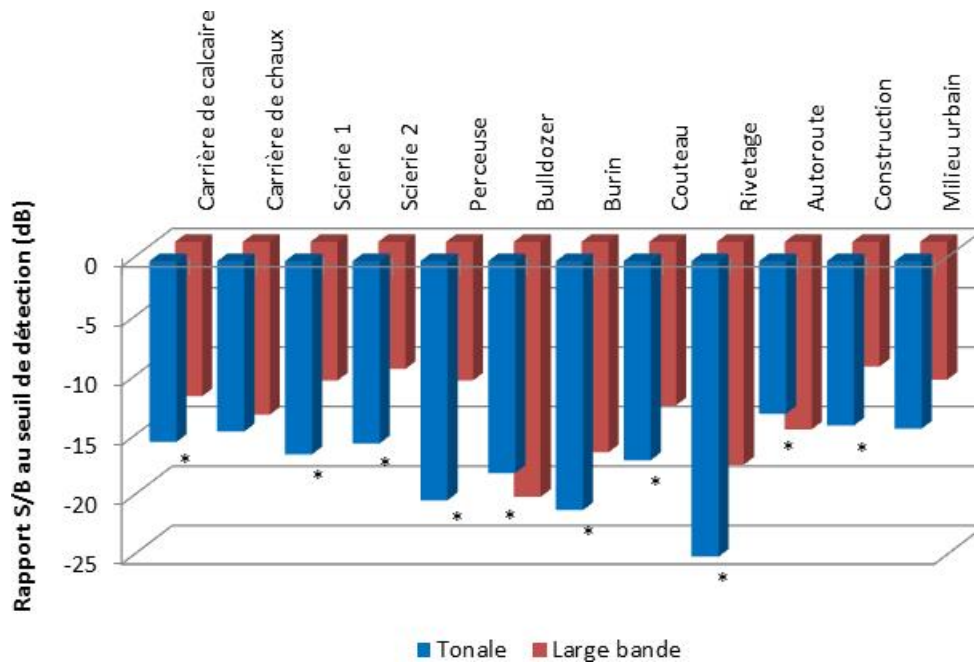


Figure 4 : Rapport S/B moyen au seuil de détection pour l'ensemble des participants, dans chacun des 12 bruits. L'astérisque (*) indique que le rapport S/B est statistiquement différent entre l'alarme tonale et celle large bande.

Le plan expérimental consistait en un devis statistique de mesures répétées sur deux facteurs intrasujets : 1) le type d'alarme (2 niveaux – alarme conventionnelle tonale et alarme large bande), 2) le type de bruit (12 niveaux – 12 bruits différents). Afin de vérifier la présence d'effets principaux et d'une interaction entre ces facteurs, une analyse de la variance (ANOVA) pour mesures répétées a été effectuée. Les résultats démontrent un effet significatif du type d'alarme [$F(1, 18) = 22,779, p < 0,0001$] et du type de bruit [$F(11, 8) = 284,534, p < 0,0001$], ainsi qu'une interaction significative entre le type d'alarme et le type de bruit [$F(11, 8) = 31,612, p < 0,0001$]. De plus, l'indice *eta* carré partiel⁴ indique une moyenne taille de l'effet ($\eta^2 = 0,559$) pour l'effet principal du type d'alarme, et une large taille de l'effet pour l'effet principal du type de bruit ($\eta^2 = 0,997$) et pour l'interaction entre les deux facteurs ($\eta^2 = 0,978$). Étant donné la présence d'une interaction significative entre les deux facteurs, il semblerait que la direction de la différence dans le seuil de détection entre les deux alarmes ne soit pas la même pour tous les bruits. En d'autres mots, de meilleurs seuils de détection sont obtenus avec l'alarme tonale dans certains bruits et avec l'alarme large bande dans d'autres bruits.

⁴ L'*eta* carré est une mesure de la taille de l'effet communément utilisée dans les ANOVA. Variant entre 0 et 1, il fait référence à la force de l'association entre deux variables.

Tableau 2 : Comparaison du seuil de détection moyen en fonction du type de bruit pour l'alarme large bande. Les différences significatives sont identifiées par un astérisque.

	Carrière de calcaire	Carrière de chaux	Scierie 1	Scierie 2	Perceuse	Bulldozer	Burin	Couteau	Rivetage	Autoroute	Construction	Milieu urbain
Carrière de calcaire				*		*	*		*	*	*	
Carrière de chaux			*	*	*	*	*		*	*	*	*
Scierie 1						*	*	*	*	*		
Scierie 2						*	*	*	*	*		
Perceuse						*	*	*	*	*		
Bulldozer								*		*	*	*
Burin								*			*	*
Couteau									*		*	*
Rivetage									*		*	*
Autoroute											*	*
Construction											*	*
Milieu urbain												*

4.2.1.2 Rapport S/B au seuil de réaction

La figure 5 illustre le seuil de réaction moyen (rapport S/B) pour l'ensemble des participants et pour chacun des douze bruits. Pour l'ensemble des bruits, le seuil de réaction moyen varie entre -0,4 et -4,2 dB S/B (moyenne = -1,7 dB) pour l'alarme tonale et entre -0,6 et -4,3 dB S/B (moyenne = -2,3 dB) pour l'alarme large bande.

Le plan expérimental consistait en un devis statistique de mesures répétées sur deux facteurs intrasujets : 1) le type d'alarme (2 niveaux – alarme conventionnelle tonale et alarme large bande), 2) le type de bruit (12 niveaux – 12 bruits différents). Afin de vérifier la présence d'effets principaux et d'une interaction entre ces facteurs, une ANOVA pour mesures répétées a été effectuée. Les résultats démontrent un effet significatif du type de bruit [$F(11, 9) = 25,775$, $p < 0,0001$], mais pas du type d'alarme [$F(1, 19) = 3,456$, $p = 0,079$], ainsi qu'une interaction significative entre le type d'alarme et le type de bruit [$F(11, 9) = 3,595$, $p = 0,032$]. De plus, l'indice *eta* carré partiel indique une large taille de l'effet pour l'effet principal du type de bruit ($\eta^2 = 0,969$) et pour l'interaction entre les deux facteurs ($\eta^2 = 0,815$).

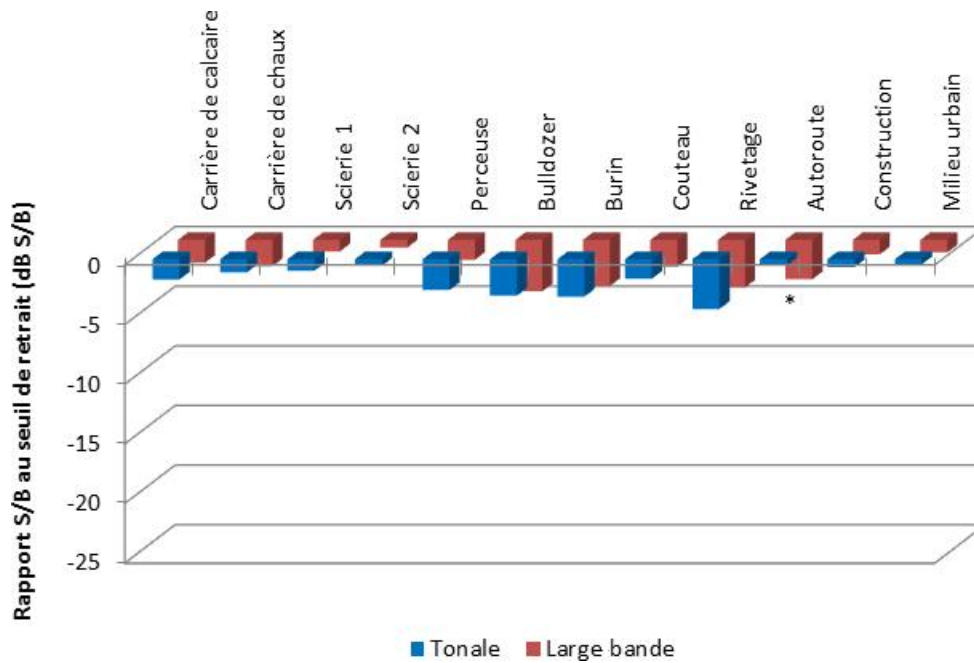


Figure 5 : Rapport S/B moyen au seuil de réaction pour l'ensemble des participants, dans chacun des 12 bruits. L'astérisque (*) indique que le rapport S/B est statistiquement différent entre l'alarme tonale et celle à large bande.

Un *test-t* à mesures répétées a été effectué pour chacun des 12 bruits afin de comparer le seuil de réaction moyen de l'alarme tonale à celui de l'alarme large bande. Étant donné les multiples comparaisons qui s'imposaient, un ajustement de Bonferroni a été utilisé. La seule différence qui se soit avérée significative est identifiée par un astérisque à la figure 5. Il semblerait ainsi que le seuil de réaction moyen est peu affecté par le type du bruit, à l'exception du bruit d'autoroute pour lequel le seuil de réaction moyen est plus faible (meilleur) pour l'alarme large bande que pour l'alarme tonale.

Finalement, une ANOVA à mesures répétées a révélé un effet significatif du type de bruit sur le seuil de réaction pour l'alarme tonale [$F(11, 11) = 8,512, p < 0,0001$] et pour l'alarme large bande [$F(11, 9) = 16,438, p < 0,0001$]. Pour chacune des alarmes, les comparaisons significatives entre deux bruits sont représentées par un astérisque au tableau 3 (alarme tonale) et au tableau 4 (alarme large bande).

4.2.1.3 Comparaison aux normes

Sur l'ensemble des bruits, le seuil de détection moyen varie entre -12,8 et -24,9 dB S/B pour l'alarme tonale et entre -10,5 et -21,5 dB S/B pour l'alarme large bande. Les alarmes demeurent donc audibles à des niveaux significativement inférieurs à celui du bruit de fond. En ce qui a trait au seuil de réaction moyen, il varie beaucoup moins (soit de -0,4 et -4,2 dB S/B pour l'alarme tonale et de -0,6 et -4,3 dB S/B pour l'alarme large bande) et il semble davantage insensible au type d'alarme que le seuil de détection moyen. Les alarmes induisent donc une réaction à des niveaux légèrement inférieurs au bruit de fond.

Ces données peuvent être comparées à celles issues d'études psychoacoustiques afin de déterminer si la détection et la réaction se font à des niveaux adéquats [11-15]. La différence entre le seuil de détection moyen de tous les bruits et pour les deux alarmes (-15,6 dB S/B) et le seuil de réaction moyen, également de tous les bruits et pour les deux alarmes (-2,0 dB S/B) est de 13,6 dB. Cette valeur est comparable aux recommandations générales pour l'ajustement des alarmes sonores, soit un niveau de 10-15 dB au-dessus du seuil masqué [11-15]. En fait, cette valeur correspond presque parfaitement à la limite inférieure de la plage de 12 à 25 dB au-dessus des seuils masqués, préconisée dans l'outil Détectson [14,15]. Lorsque cette plage de 12 à 25 dB au-dessus des seuils masqués est appliquée, cela se traduit par un rapport S/B près de 0 dB qui correspond aux recommandations de la norme ISO 9533 [10], présentée à la sous-section 2.1.

La norme ISO 7731, bien qu'elle ne s'applique pas spécifiquement aux signaux émis par les alarmes de recul pour les véhicules en mouvement, est tout de même souvent évoquée pour guider le choix du rapport S/B des signaux avertisseurs. Si la méthode tiers d'octave ou d'octave de cette norme était appliquée, des niveaux d'alarme comparables à ce qui est prescrit par la norme ISO 9533 seraient obtenus. Par contre, la méthode basée sur le niveau global de la norme ISO 7731 (15 dB au-dessus du bruit ambiant) mènerait à des niveaux sonores beaucoup plus élevés que ceux obtenus dans la présente étude. Pourtant, par sa simplicité, cette approche semble être la procédure la plus communément utilisée sur le terrain.

Malgré que les seuils de réaction varient en fonction du type de bruit, l'étendue des seuils moyens (-0,4 à -4,2 dB S/B pour l'alarme tonale et de -0,6 à -4,3 dB S/B pour l'alarme large bande) demeure limitée. Pour les deux types d'alarmes, ces seuils sont légèrement inférieurs aux prescriptions de la norme ISO 9533, soit 0 dB S/B calculé sur des niveaux globaux en dBA. Cette norme serait donc adéquate pour l'ajustement des niveaux sonores des alarmes de recul. Aussi, d'un côté pratique, elle est relativement facile à mettre en œuvre et permet de vérifier l'ajustement à 0 dB S/B des alarmes de recul avec un sonomètre. Il est par contre important de mentionner que cette norme ne considère que le bruit du moteur du véhicule sur lequel est installée l'alarme de recul comme bruit ambiant pour le calcul du rapport S/B. Pour un ajustement optimal, il est recommandé d'inclure toutes les sources de bruit émises dans la zone où l'alarme de recul est utilisée.

4.2.2 Temps de dégagement en condition de recul simulé

4.2.2.1 Analyses statistiques

Le plan expérimental consiste en un devis de mesures répétées sur quatre facteurs intrasujets : 1) le type d'alarme (2 niveaux – alarme conventionnelle tonale et alarme large-bande), 2) le niveau de bruit (2 niveaux – 74 et 80 dBA), 3) le niveau initial de l'alarme (2 niveaux – 92 et 98 dBA), et 4) la vitesse de recul du camion (2 niveaux – 10 et 15 km/h). L'autre facteur, soit la distance initiale entre le véhicule et le participant, est une variable qui peut difficilement être réglementée ou contrôlée sur le terrain et elle n'a pas été considérée pour simplifier le plan expérimental. Les données ont donc été moyennées sur les deux distances (30 m et 60 m) utilisées lors des simulations.

Afin de vérifier la présence d'effets principaux et d'une interaction entre ces facteurs, une ANOVA pour mesures répétées a été effectuée. Les résultats démontrent un effet significatif du niveau de bruit [$F(1, 23) = 36,50, p < 0,001$], du niveau de l'alarme [$F(1, 23) = 86,75, p < 0,001$] et de la vitesse [$F(1, 23) = 47,6, p < 0,001$]. Malgré l'absence d'un effet significatif du type d'alarme, ce facteur interagit de façon significative avec le niveau de bruit [$F(1, 23) = 10,37, p = 0,004$] et le niveau de l'alarme [$F(1, 23) = 6,60, p = 0,017$], ainsi qu'en interaction triple avec le niveau de bruit et la vitesse [$F(1, 23) = 5,17, p = 0,033$]. Nous retrouvons aussi les interactions significatives suivantes : niveau de bruit et vitesse [$F(1, 23) = 13,25, p = 0,001$], niveau de l'alarme et vitesse [$F(1, 23) = 43,32, p < 0,001$] et niveau de bruit, niveau d'alarme et vitesse [$F(1, 23) = 6,18, p = 0,021$]. Les autres interactions n'ont pas atteint le seuil de signification statistique.

4.2.2.2 Temps moyen de dégagement

La figure 6 présente le temps de dégagement moyen obtenu avec les deux types d'alarmes (tonale et large bande) dont le niveau initial de départ était 92 dBA ou 98 dBA, pour deux vitesses de recul (panneau de gauche = vitesse de 10 km/h; panneau de droite = 15 km/h), en fonction du niveau de bruit ambiant (74 dBA et 80 dBA).

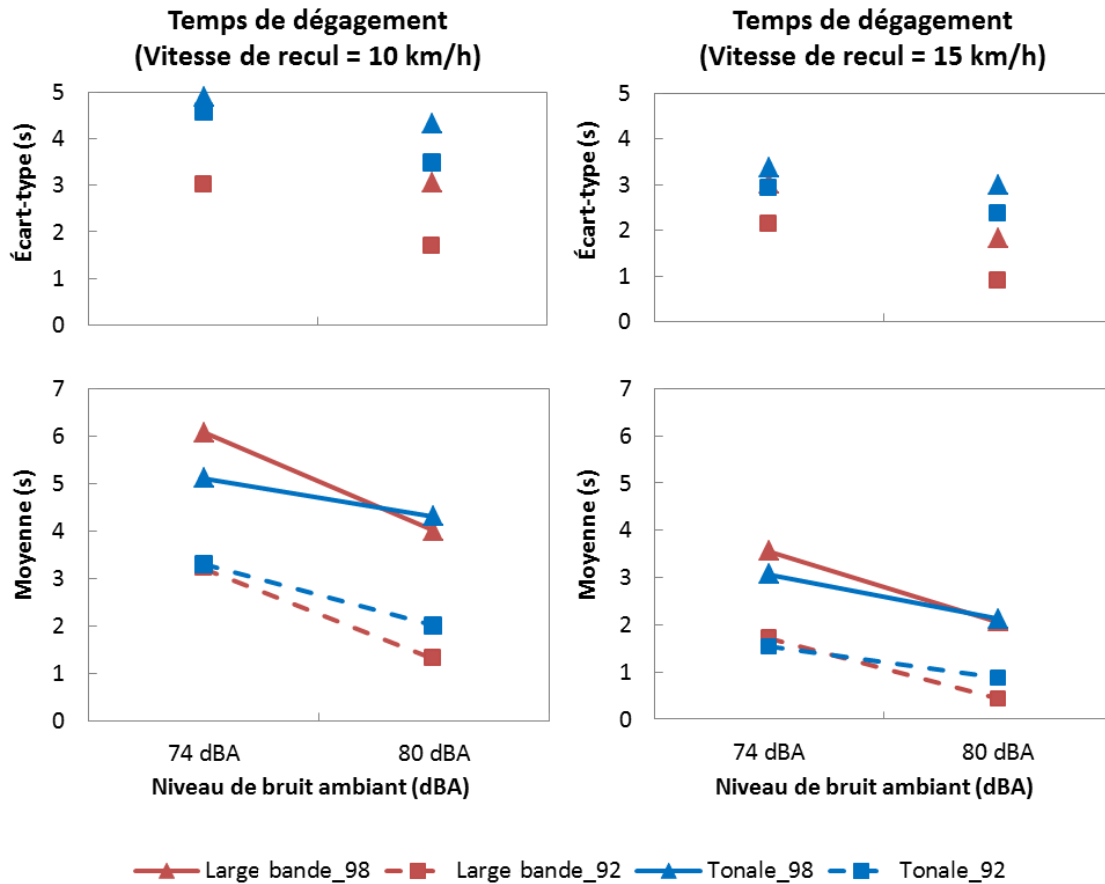


Figure 6 : Temps de dégagement moyen pour 2 niveaux initiaux de l'alarme tonale et de l'alarme large bande, en fonction du niveau de bruit ambiant et pour deux vitesses de recul.

Les données sont moyennées sur les deux distances entre le véhicule et le participant utilisées dans les simulations.

Tout comme pour le seuil de réaction, le temps de dégagement est peu influencé par le type d'alarme. Le temps de dégagement moyen est de 2,8 s (0,4 à 7,4 s) pour les deux types d'alarmes, tous autres facteurs étant confondus. En examinant de plus près les données de la figure 6, nous pouvons constater, en général et pour des conditions de recul semblables, que : 1) plus le niveau de bruit ambiant est élevé, plus le temps de dégagement est court, 2) plus le niveau initial de l'alarme est élevé, plus le temps de dégagement est long, 3) plus la vitesse de recul est lente, plus le temps de dégagement est long.

Deux normes sont pertinentes à l'interprétation des données du temps de dégagement. La norme SAE J1741 [17] suggère un temps de réaction minimal de 2 secondes. La norme ISO 9533 [10] prescrit un rapport S/B supérieur à 0 dB à 7 m. L'analyse ci-dessous indique les conditions nécessaires pour que les deux normes soient respectées selon les données de la figure 7.

Pour une vitesse de recul de 10 km/h, le temps moyen de dégagement est supérieur à 2 secondes dans toutes les conditions de recul, sauf pour la condition de faible niveau initial de l'alarme

large bande (92 dBA) dans un bruit de fond de 80 dBA. Dans une telle condition, la norme ISO 9533 [10] ne serait pas respectée. En effet, le rapport S/B à 7 m serait de -5 dB (niveau de l'alarme à 7 m = 75 dBA; niveau de bruit = 80 dBA). Dans toutes les autres conditions, la norme ISO 9533 [10] est respectée, soit + 1 dB S/B pour le niveau initial de l'alarme large bande de 98 dBA dans un bruit de 80 dBA, + 1 dB S/B pour le niveau initial de l'alarme tonale de 92 dBA dans un bruit de 74 dBA et + 7 dB S/B pour le niveau initial de l'alarme tonale de 98 dBA dans un bruit de 74 dBA.

À une vitesse de 15 km/h, on note des conditions de recul pour lesquelles le temps de dégagement est inférieur à 2 secondes malgré le respect des exigences de la norme ISO 9533 [10]. Il s'agit de la condition de recul avec un niveau initial de l'alarme (tonale ou large bande) de 92 dBA dans un bruit de 74 dBA. Malgré un rapport S/B adéquat à 7 m (+ 1 dB), le temps de dégagement est inférieur à 2 secondes. Cela peut être expliqué par le facteur vitesse. Présument un rapport S/B de 0 dB à 7 m, un camion dont la vitesse de recul est de 15 km/h va parcourir 7 m en 1,7 s, ne respectant ainsi pas le temps de réaction minimum préconisé par la norme SAE J1741 [17]. En comparaison, un camion dont la vitesse de recul est de 10 km/h va parcourir 7 m en 2,5 s. Sur la base de la valeur de 2 secondes préconisée dans la norme SAE J1741 [17], la vitesse maximale de recul à ne pas dépasser est déterminée afin que le camion ne parcoure pas une distance supérieure à 7 m en 2 s. Cette vitesse maximale est de 12,6 km/h. Par ailleurs, lorsque le rapport S/B à 7 m est supérieur à 0 dB (par exemple, pour une alarme dont le niveau initial est de 98 dBA dans un bruit de 74 dBA), l'individu réagirait davantage à la force sonore de l'alarme qui serait alors suffisamment élevée, lui permettant ainsi de se déplacer de la zone de danger dans un temps adéquat, et ce, malgré la vitesse plus élevée du camion.

Sur la base de ces résultats, on peut conclure que la conformité avec la norme SAE J1741 [17] est assurée lorsque la norme ISO 9533 [10] (0 dB S/B à 7 m) est respectée et que la vitesse du véhicule est inférieure à 12,6 km/h.

4.3 Discussion

Le seuil de détection des alarmes de recul semble être influencé par le contenu spectral et temporel des bruits, ainsi que le contenu spectral des alarmes. Pour l'ensemble des bruits, le seuil de détection moyen varie entre -12,8 et -24,9 dB S/B pour l'alarme tonale et entre -10,5 et -21,5 dB S/B pour l'alarme large bande. L'alarme tonale est favorisée dans 8 des 12 bruits utilisés dans cette étude, alors qu'un meilleur seuil de détection est obtenu pour l'alarme large bande dans 2 des 12 bruits.

Le seuil de réaction semble, quant à lui, moins sensible aux effets spectraux et temporels que le seuil de détection. Sur l'ensemble des bruits, le seuil de réaction moyen varie entre -0,4 et -4,2 dB S/B pour l'alarme tonale et entre -0,6 et -4,3 dB S/B pour l'alarme large bande.

Les alarmes demeurent donc audibles à des niveaux significativement inférieurs à celui du bruit de fond et induisent une réaction à des niveaux légèrement inférieurs au bruit de fond. Sur la base de ces résultats, il semblerait qu'un rapport S/B de 0 dB serait adéquat pour permettre aux individus de détecter facilement les alarmes et d'y réagir à temps. Ce rapport S/B de 0 dB présenterait par ailleurs l'avantage de permettre l'ajustement des alarmes à des niveaux sonores

beaucoup moins élevés que ceux couramment mesurés dans plusieurs milieux de travail et ainsi limiter la nuisance environnementale. L'établissement de ce rapport de 0 dB peut se faire sur la base des méthodes tiers d'octave, ou octave de la norme ISO 7731 ou plus facilement, par la méthode préconisée par la norme ISO 9533, à la condition d'intégrer toutes les sources de bruit présentes dans l'environnement pour caractériser le bruit ambiant à l'arrière du véhicule.

Finalement, le temps de dégagement est relativement insensible au type d'alarme, avec une valeur moyenne de 2,8 secondes pour l'alarme tonale et pour l'alarme large bande, tous autres facteurs étant confondus. Pour assurer un temps de dégagement qui respecte la valeur du temps de réaction préconisée par la norme SAE J1741 [17], soit 2 secondes, il semblerait qu'une alarme ajustée à un rapport S/B de 0 dB à 7 m, conformément à la norme ISO 9533 [10], soit adéquate à la condition que la vitesse de recul du véhicule ne dépasse pas 12,6 km/h.

5. VOLET 2 : LOCALISATION AUDITIVE DES ALARMES

Quoique l'ajustement optimal du niveau des alarmes de recul et la détermination du temps de dégagement soient importants pour assurer la sécurité derrière les véhicules lourds, les travailleurs doivent également être en mesure de bien localiser la provenance de la source sonore afin de s'éloigner rapidement de la zone de danger. Des accidents mortels pourraient survenir, même si l'alarme est bien ajustée et positionnée de façon optimale sur le véhicule lourd, si la localisation sonore est compromise en raison des caractéristiques acoustiques de l'alarme et du milieu ambiant, des capacités auditives des travailleurs, du port de protecteurs auditifs, de la présence de multiples alarmes dans le milieu de travail, et des ressources cognitives des travailleurs investis dans ses tâches. Dans cette section, seuls les caractéristiques acoustiques de l'alarme, la multiplicité des alarmes et l'investissement cognitif dans une tâche sont abordés.

5.1 Méthodologie

5.1.1 Participants

Vingt-huit jeunes adultes (14 femmes et 14 hommes) âgés de 22 à 31 ans (moyenne = 25,5 ans; écart-type = 3,7 ans) ont participé aux épreuves de localisation sonore effectuées en laboratoire. Tous les participants respectaient les critères de sélection suivants : 1) sensibilité auditive normale aux deux oreilles, telle que définie par des seuils de détection de sons purs en conduction aérienne égaux ou inférieurs à 25 dB HL (250 – 8000 Hz), 2) tympanogrammes normaux (compliance statique = 0,30 – 1,70 cm³; volume du conduit auditif externe = 0,9 – 2,0 cm³; gradient = 51 – 114 daPa; pression = -150 à + 50 daPa) [27].

Avant de prendre part au projet de recherche, les participants devaient lire une lettre d'information, signer un formulaire de consentement, et remplir un questionnaire d'histoire auditive. Le recrutement des participants et l'expérimentation ont été réalisés selon les politiques de déontologie en vigueur au Bureau d'éthique et d'intégrité de la recherche de l'Université d'Ottawa (certificat H09-13-01). Afin de s'assurer que les participants satisfaisaient les critères de sélection, un otoscope Welch Allyn a été utilisé pour visualiser le conduit auditif externe et le tympan, alors qu'un tympanomètre GSI 38 a permis d'évaluer l'intégrité de l'oreille moyenne. Finalement, un dépistage auditif a été effectué à l'aide d'un audiomètre portable (Interacoustics AD25) couplé à des écouteurs Telephonics TDH-39P.

5.1.2 Montage expérimental

Un système à huit haut-parleurs a été installé dans une cabine audiométrique pour permettre la présentation d'alarmes de recul provenant de diverses positions autour des participants, ainsi que le bruit ambiant qui émanait simultanément de tous les haut-parleurs. Un ordinateur portable générait les signaux (alarmes et bruit) à l'aide d'une interface développée sous LabView par l'équipe de recherche. Le système était connecté à une carte d'acquisition de données National Instruments et à un amplificateur relié aux haut-parleurs. Une tablette électronique fixée à un trépied et placée directement devant les participants servait à compléter la tâche principale, le cas échéant. Les participants devaient se tenir debout au centre d'un cercle délimité par les 8 haut-parleurs positionnés à 1 mètre d'eux, à des angles de 45 degrés l'un de l'autre (figure 7). Ils

devaient déterminer la provenance des signaux d'alarme en donnant le(s) chiffre(s) du(des) haut-parleur(s) concerné(s), le haut-parleur 1 étant celui directement devant et le haut-parleur 8 étant situé à 45 degrés vers la droite. Le niveau de présentation était de 75 dBA pour les alarmes de recul et de 75 dBA pour le bruit ambiant (bruit 3 – copeaux de bois dans une scierie, décrit dans les sous-sections 4.1.1.2 et 4.1.3.2), calibré afin d'obtenir un rapport S/B de 0 dB dans la portion « on » des alarmes (portion durant laquelle l'alarme émet un bruit). Pour chacune des expérimentations décrites ci-dessous, une familiarisation a été menée au préalable afin de s'assurer de l'audibilité suffisante des alarmes par chacun des participants et de la compréhension de la tâche. Ils pouvaient bouger la tête et le haut du corps, mais devaient garder les pieds fixés au sol.

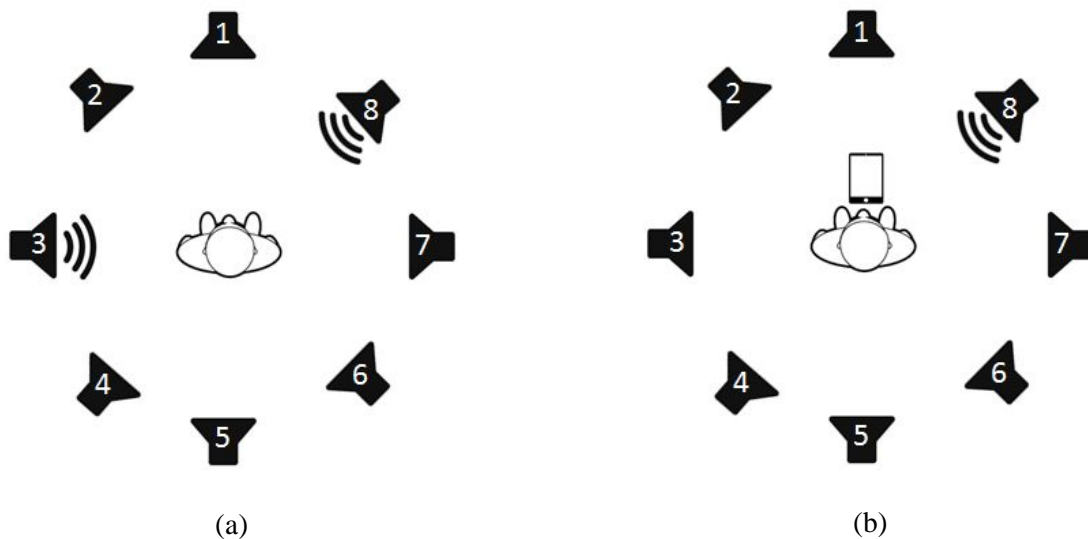


Figure 7 : Positionnement des haut-parleurs pour les épreuves de localisation : (a) localisation de 2 sources de bruit; (b) localisation d'une source de bruit avec tâche

5.1.3 Procédures expérimentales

5.1.3.1 Localisation d'une alarme de recul avec et sans tâche

Dans la première expérimentation, les participants devaient déterminer la provenance d'une seule alarme de recul (tonale ou large bande), dans quatre conditions expérimentales : 1) alarme large bande sans tâche, 2) alarme large bande avec tâche, 3) alarme tonale sans tâche, 4) alarme tonale avec tâche. Dans chacune des conditions, 24 signaux d'alarme ont été présentés aléatoirement par le biais des 8 haut-parleurs. La durée du signal correspondait à celle d'un cycle de l'alarme, soit 950 ms pour l'alarme tonale et 780 ms pour l'alarme large bande. Le délai entre l'apparition du bruit ambiant et la présentation du signal d'alarme variait aléatoirement de 2 à 8 secondes. L'ordre de présentation des alarmes et des conditions a été contrebalancé pour l'ensemble des participants, de manière à ce qu'au total 7 d'entre eux soient exposés à chacune des séries suivantes : 1) sans tâche et alarme tonale, sans tâche et alarme large bande, avec tâche et tonale, avec tâche et large bande, 2) sans tâche et large bande, sans tâche et tonale, avec tâche et large

bande, avec tâche et tonale, 3) avec tâche et tonale, avec tâche et large bande, sans tâche et tonale, sans tâche et large bande, 4) avec tâche et large bande, avec tâche et tonale, sans tâche et large bande, sans tâche et tonale.

Le logiciel PEBL *Psychological Test Battery*, disponible en ligne gratuitement (<http://pebl.sourceforge.net/battery.html>), a été utilisé pour administrer la tâche principale. Le *Tower of London Test*, un test couramment utilisé en neuropsychologie pour l'évaluation des fonctions exécutives du processus de planification, a été retenu parmi les tests disponibles dans la batterie PEBL puisqu'il pouvait s'effectuer entièrement à partir de l'écran tactile d'une tablette électronique et ne nécessitait ni mots ni chiffres. La tâche consistait à reproduire, à l'aide d'une série de disques de différentes couleurs, un patron donné. La figure 8 illustre un exemple avec six disques. L'individu doit manipuler, en différentes étapes, les disques situés au bas de la figure afin de reproduire le patron au haut de celle-ci.

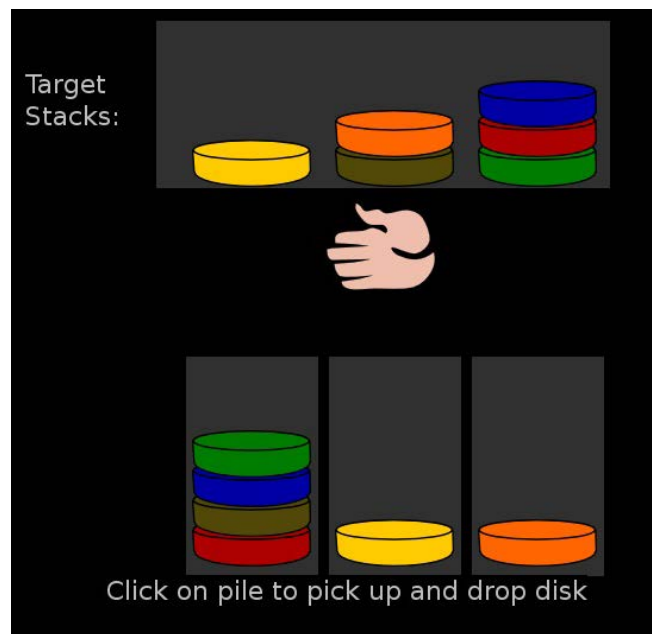


Figure 8 : Tâche principale – *Tower of London Test*.

5.1.3.2 Localisation de deux alarmes de recul

Dans la seconde expérimentation menée auprès des mêmes participants, ces derniers devaient déterminer la provenance de deux signaux d'alarme de recul (tonale ou large bande) présentés simultanément ou quasi simultanément. Pour chacun des deux types d'alarmes, 56 paires de signaux ont été présentées (pour un total de 112 paires par participant), chaque signal provenant d'un haut-parleur distinct choisi aléatoirement. Seuls des signaux provenant d'un même type d'alarmes ont été présentés dans une paire donnée. L'expérimentation s'est effectuée en premier avec l'alarme tonale chez la moitié des participants (identifiés par les chiffres impairs) et en premier avec l'alarme large bande chez l'autre moitié des participants (identifiés par les chiffres pairs).

Tout comme lors de l'expérimentation précédente, le délai entre l'apparition du bruit ambiant et la présentation des signaux d'alarme variait aléatoirement de 2 à 8 s. Un délai aléatoirement choisi était également introduit entre les deux alarmes présentées dans une paire, de telle sorte que la seconde alarme était présentée simultanément à la première (aucun délai), un quart de cycle après la première ou trois quarts de cycle après la première. Comparativement à la première expérimentation avec une seule alarme, la durée des signaux était plus longue, soit 3 s, permettant ainsi aux individus d'utiliser davantage les mouvements de la tête et du haut du corps pour déterminer la provenance des sources sonores. Finalement, les participants étaient avisés d'identifier les sources sonores perçues, sans accorder une importance à l'ordre dans lequel les deux alarmes étaient entendues.

5.2 Résultats

5.2.1 Localisation d'une alarme de recul avec et sans tâche

5.2.1.1 Analyses statistiques

Le plan expérimental consistait en un devis statistique de mesures répétées sur deux facteurs intrasujets : 1) le type d'alarme (2 niveaux – alarme conventionnelle tonale et alarme large bande), 2) la présence d'une tâche principale (2 niveaux – présente ou absente). Deux indicateurs de performance de localisation auditive ont été analysés pour chaque participant dans chacune des quatre conditions expérimentales, soit le taux de réussite (nombre de haut-parleurs correctement identifiés/24 présentations x 100) et l'erreur angulaire moyenne (total des erreurs exprimées en degré/24 présentations). Pour ce dernier indicateur, une confusion entre deux haut-parleurs voisins représente une erreur de 45 degrés, alors que des erreurs qui séparent deux, trois et quatre haut-parleurs consistent en des erreurs de 90, 135 et 180 degrés, respectivement.

Une ANOVA pour mesures répétées a été effectuée séparément pour chacun des indicateurs de performance. Les résultats démontrent un effet significatif du type d'alarme sur le taux de réussite [$F(1, 27) = 291,108$, $p < 0,0001$] et sur l'erreur angulaire moyenne [$F(1, 27) = 105,847$, $p < 0,0001$]. De plus, l'indice *eta* carré partiel indique une large taille de l'effet ($\eta^2 = 0,915$ pour le taux de réussite et $\eta^2 = 0,797$ pour l'erreur angulaire). Pour sa part, le second facteur ne semble pas avoir d'effet significatif [$F(1, 27) = 0,061$, $p = 0,807$ pour le taux de réussite; $F(1,27) = 0,007$, $p = 0,936$ pour l'erreur angulaire], résultat qui suggère que, du moins dans le cadre de cette étude, l'ajout de la tâche principale n'a pas eu d'impact négatif sur les performances de localisation auditive. Finalement, l'analyse statistique n'a pas révélé d'interaction significative entre les deux facteurs [$F(1, 27) = 4,112$, $p = 0,053$ pour le taux de réussite; $F(1, 27) = 0,849$, $p = 0,365$ pour l'erreur angulaire].

Puisque les analyses statistiques n'ont pas révélé un effet significatif du facteur « tâche principale », les résultats avec et sans tâche ont été combinés dans les descriptions qui suivent.

5.2.1.2 Taux de réussite et grandeur des erreurs

Le tableau 5 présente, pour les deux types d'alarmes, les statistiques descriptives pour le taux de réussite (sur 24 présentations par alarme pour chaque participant) et pour l'erreur angulaire moyenne, lorsque les données avec tâche et sans tâche sont combinées, avec l'ensemble des participants. L'alarme large bande y est nettement supérieure à l'alarme tonale en ce qui concerne la capacité des individus à localiser le signal dans l'espace. En effet, le taux de réussite moyen est presque doublé lorsque l'on compare la performance avec l'alarme large bande (82,6 %) à celle obtenue avec l'alarme tonale (42,2 %). De plus, la performance minimale de l'ensemble des participants avec l'alarme large bande, soit 58,3 %, excède la performance moyenne obtenue avec la tonale (42,2 %), en s'approchant de la performance maximale (75,0 %) pour cette alarme. Finalement, la performance est plus variable d'un individu à l'autre avec l'alarme conventionnelle tonale (écart-type de 13,8 % comparativement à 9,5 % pour l'alarme large bande). Des tendances similaires sont notées en ce qui concerne l'erreur angulaire moyenne, qui est plus que doublée lorsque l'on compare l'alarme tonale (48,7°) à l'alarme large bande (19,2°). Par ailleurs, l'erreur angulaire maximale notée avec l'alarme large bande (45,0°) est légèrement inférieure à l'erreur angulaire moyenne associée à l'alarme tonale (48,7°).

Tableau 5 : Statistiques descriptives pour le taux de réussite et pour l'erreur angulaire moyenne (données avec et sans tâche combinées) pour l'ensemble des participants.

Alarme	Statistique descriptive	Taux de réussite (%)	Erreur angulaire moyenne (degrés)
Tonale	Minimum	8,3	18,8
	Maximum	75,0	82,5
	Moyenne	42,2	48,7
	Écart-type	13,8	14,3
Large bande	Minimum	58,3	0,0
	Maximum	100,0	45,0
	Moyenne	82,6	19,2
	Écart-type	9,5	11,3

La figure 9 présente le taux moyen d'erreurs commises pour chaque grandeur d'erreur de localisation. La grandeur de l'erreur de localisation est exprimée en nombre de haut-parleurs (HP) qui séparent la cible (haut-parleur activé) et la réponse du participant. On note qu'en moyenne, les erreurs d'une grandeur d'un, de deux ou de trois haut-parleurs sont plus fréquentes pour l'alarme tonale que pour l'alarme large bande, alors que les erreurs de l'ordre de quatre haut-parleurs surviennent aussi fréquemment (environ 10 %) pour les deux types d'alarmes. Encore une fois, la variabilité notée dans les résultats est plus élevée pour l'alarme tonale. Afin d'explorer davantage le type d'erreurs de localisation, les confusions avant/arrière et gauche/droite ont été colligées.

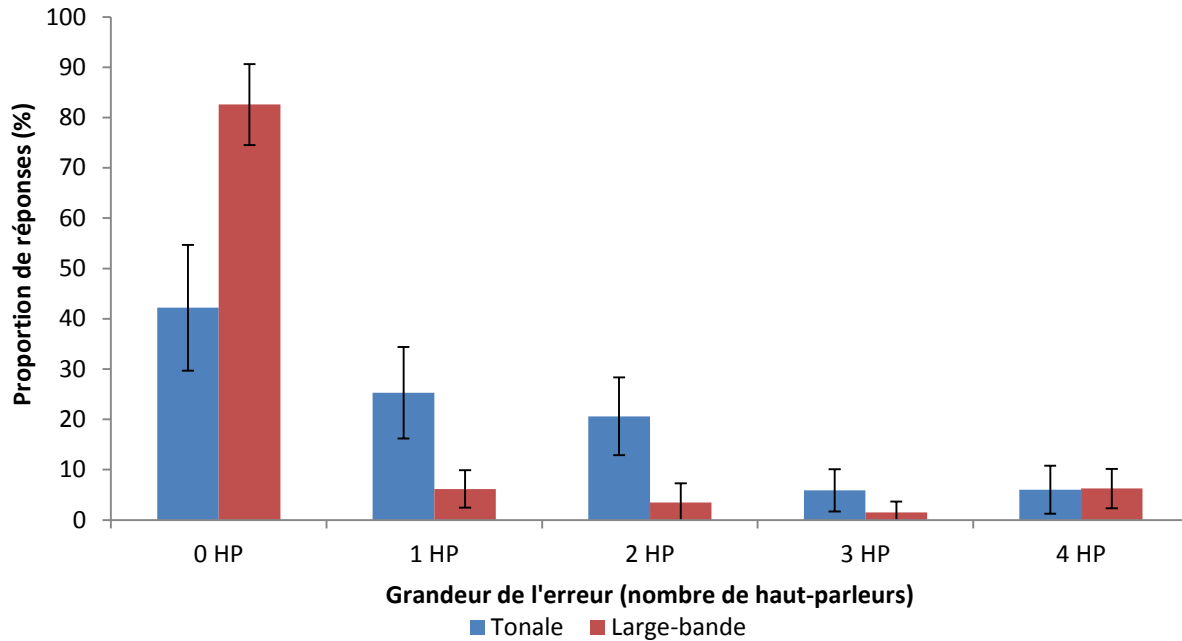


Figure 9 : Proportion de réponses (%) en fonction de la grandeur de l'erreur exprimée en nombre de haut-parleurs (HP) qui séparent la cible (haut-parleur activé) et la réponse donnée.

5.2.1.3 Confusions avant/arrière et gauche/droite

Les erreurs de localisation les plus compromettantes pour la sécurité des travailleurs œuvrant derrière les véhicules lourds sont les confusions avant/arrière et gauche/droite, comparativement aux erreurs qui mettent en jeu des haut-parleurs voisins. Pour définir ces deux types de confusion, on peut tracer, à la figure 7, deux lignes imaginaires; une sur l'axe horizontal qui relie les haut-parleurs 3 et 7 (séparation des quadrants avant et arrière), et l'autre sur l'axe vertical qui relie les haut-parleurs 1 et 5 (séparation des quadrants gauche et droite). Une confusion avant/arrière se produit lorsqu'un signal est émis dans le quadrant avant (délimité par les haut-parleurs 1, 2 et 8) et qu'il est perçu par l'individu comme émanant du quadrant arrière (délimité par les haut-parleurs 4, 5 et 6), ou vice-versa. Dans le même ordre d'idées, une confusion gauche/droite survient lorsque le signal est émis dans le quadrant gauche (délimité par les haut-parleurs 2, 3 et 4) et qu'il est perçu dans le quadrant droit (délimité par les haut-parleurs 6, 7 et 8), ou vice-versa.

Le tableau 6 présente, pour les deux types d'alarmes, les statistiques descriptives des taux de confusions avant/arrière et gauche/droite survenues pour l'ensemble des participants.

Tableau 6 : Statistiques descriptives pour la localisation d'une alarme de recul – taux de confusions avant/arrière et gauche/droite (données avec et sans tâche combinées).

Alarme	Statistique descriptive	Taux de confusions avant/arrière (%)	Taux de confusions gauche/droite (%)
Tonale	Minimum	8,3	0,0
	Maximum	50,0	12,5
	Moyenne	24,3	0,9
	Écart-type	10,5	2,3
Large bande	Minimum	0,0	0,0
	Maximum	37,5	4,2
	Moyenne	10,9	0,1
	Écart-type	7,6	0,6

Pour les deux types d'alarmes, les confusions avant/arrière sont nettement plus fréquentes que les confusions de type gauche/droite, qui ne surviennent que dans un faible pourcentage des présentations. Le taux moyen de confusions avant/arrière est également réduit d'au moins une moitié lorsque l'on compare l'alarme large bande (10,9 %) à l'alarme tonale (24,3 %). De plus, le taux moyen de confusions avant/arrière et gauche/droite est plus variable d'un individu à l'autre avec l'alarme tonale (écarts-types plus élevés) qu'avec l'alarme large bande.

La figure 10 présente la matrice de réponses de l'ensemble des participants et des conditions, pour l'alarme tonale (panneau du haut) et pour l'alarme large bande (panneau du bas). Le haut-parleur activé est identifié sur l'axe vertical alors que la réponse du participant se retrouve sur l'axe horizontal. Les cases vertes indiquent une bonne réponse alors que les confusions avant/arrière et gauche/droite sont représentées en rouge et en gris, respectivement. Les erreurs qui concernent les deux types de confusion sont en bleu, alors que les cases jaunes indiquent des erreurs d'une grandeur de un ou de deux haut-parleurs sans confusion avant/arrière ou gauche/droite.

source/ réponse	1	2	3	4	5	6	7	8
1	40	20	19	24	28	15	3	15
2	1	114	32	22	1	0	0	0
3	5	18	133	7	2	0	0	0
4	1	67	79	16	0	1	0	0
5	49	12	26	16	33	13	9	15
6	1	1	0	1	1	43	53	60
7	22	4	3	2	13	11	108	15
8	3	0	0	0	4	27	56	80

source/ réponse	1	2	3	4	5	6	7	8
1	85	0	0	3	68	11	0	5
2	4	145	15	3	0	0	0	0
3	1	2	159	2	0	0	0	0
4	3	18	18	128	0	0	0	0
5	15	0	0	8	146	4	2	0
6	3	1	0	0	2	124	17	18
7	1	0	0	0	0	0	158	0
8	0	0	0	0	0	4	6	165

Figure 10 : Matrice de réponses (données avec et sans tâche combinées) pour l'alarme tonale (panneau du haut) et pour l'alarme large bande (panneau du bas). Code de couleur : vert = bonne réponse, rouge = confusion avant/arrière, gris = confusion gauche/droite, bleu = combinaison des deux types de confusion, et jaune = erreur d'une grandeur de un ou deux haut-parleurs qui n'engendre pas de confusion avant/arrière ou gauche/droite.

Sur 1344 présentations [28 participants x 24 présentations x 2 conditions – (avec et sans tâche)] pour l'alarme tonale, on note une majorité de mauvaises réponses ($n = 777$), incluant 326 confusions avant/arrière, 11 confusions gauche/droite, 439 erreurs entre haut-parleurs qui n'engendraient pas de confusion avant/arrière ou gauche/droite, et une erreur faisant appel aux deux types de confusion. Cette dernière se rapportait au haut-parleur 6 comme cible avec une réponse de 2. Selon la matrice de réponses, reproduite à la figure 10, les confusions avant/arrière concernaient souvent les paires stimulus-réponse suivantes : 1-5, 2-4, 6-8, 4-2, 5-1 et 8-6, soient stimulus et son image miroir, en plus des paires 1-4, 1-6, 5-2 et 5-8. Il y a davantage de confusion de type arrière vers avant (cible derrière perçue devant; $n = 190$) que de type avant vers arrière (cible devant perçue derrière; $n = 121$). Quoique la paire stimulus-réponse 5-1 soit également impliquée, les paires 6-8 et 4-2 sont fréquemment une source de confusion. Finalement, pour les erreurs entre haut-parleurs qui ne produisaient pas de confusion avant/arrière ou gauche/droite, on retrouve un grand nombre d'erreurs entre haut-parleurs voisins ($n = 340$), mais aussi des erreurs de 90 degrés (séparation de deux haut-parleurs).

Pour un nombre identique de présentations, soit 1344, on note une majorité de bonnes réponses ($n = 1110$) dans le cas de l'alarme large bande, sans aucune confusion gauche/droite et une seule erreur faisant appel aux deux types de confusion. Tout comme pour l'alarme tonale, les deux types de confusion se rapportaient au haut-parleur 6 comme cible avec une réponse de 2. Les confusions avant/arrière ($n = 146$) sont plus fréquentes que les erreurs entre haut-parleurs qui ne produisent pas de confusion avant/arrière ou gauche/droite ($n = 87$). Selon la matrice de réponses, reproduite à la figure 10, les confusions avant/arrière sont souvent en lien avec les paires stimulus-réponse suivantes : 1-5, 4-2, 5-1 et 6-8, soient le stimulus et son image miroir, en plus de la paire 1-6. Par ailleurs, contrairement à ce qui était noté pour l'alarme tonale, il y a davantage de confusion de type avant vers arrière (cible devant perçue derrière; $n = 89$) que de type arrière vers avant (cible derrière perçue devant; $n = 57$). La principale erreur de ce type se rapporte à la paire stimulus-réponse 1-5. Finalement, pour les erreurs entre haut-parleurs qui n'engendrent pas de confusion avant/arrière ou gauche/droite, la quasi-totalité (83 sur 87) consiste en une erreur entre haut-parleurs immédiatement voisins, soit une erreur de 45 degrés.

5.2.2 Localisation de deux alarmes de recul

5.2.2.1 Analyses statistiques

Le plan expérimental consistait en un devis statistique de mesures répétées sur un seul facteur intrasujet, le type d'alarme (2 niveaux – alarme tonale et alarme large bande). Deux indicateurs de performance de localisation auditive ont été analysés pour chaque participant dans chacune des deux conditions expérimentales, soit le nombre de haut-parleurs identifiés correctement sur un total de 112 stimuli (56 paires d'alarmes) et le nombre de paires (sur un total de 56 paires) pour lesquelles les deux haut-parleurs, un seul haut-parleur et aucun haut-parleur n'ont été correctement identifiés.

Afin de déterminer si le type d'alarme a un effet significatif sur la localisation sonore de deux alarmes présentées simultanément ou quasi simultanément, un *test-t* à mesures répétées a été effectué séparément pour chacun des indicateurs de performance. Les résultats démontrent un effet significatif du type d'alarme sur le nombre de haut-parleurs identifiés correctement (la performance globale) [$t(27) = -20,148$, $p < 0,0001$] et sur le nombre de paires de haut-parleurs identifiés correctement [$t(27) = 24,71$, $p < 0,0001$]. De plus, l'indice *eta* carré indique une large taille de l'effet ($\eta^2 = 0,96$ pour le nombre de haut-parleurs identifiés correctement et $\eta^2 = 0,96$ pour le nombre de paires de haut-parleurs identifiés correctement).

5.2.2.2 Performance globale

Le tableau 7 présente, pour les deux types d'alarmes, les statistiques descriptives de l'ensemble des participants en ce qui concerne le taux de bonnes réponses sur la totalité des stimuli présentés et le taux de bonnes réponses au sein d'une paire.

Tableau 7 : Statistiques descriptives pour la localisation de deux alarmes de recul.

Alarme	Statistique descriptive	Taux global de réussite (sur 112 sources)	Performance en fonction du nombre de sources correctement identifiées dans une paire (sur 56 paires)		
			Aucune (% de paires)	1 seule source bien identifiée (% de paires)	2 sources bien identifiées (% de paires)
Tonale	Minimum	31,25	1,8	33,9	7,1
	Maximum	81,25	44,6	67,9	64,3
	Moyenne	57,7	17,2	50,3	32,5
	Écart-type	11,4	10,6	8,3	13,4
Large bande	Minimum	67,0	0,0	1,8	42,9
	Maximum	99,1	8,9	48,2	98,2
	Moyenne	92,2	1,4	12,8	85,8
	Écart-type	7,0	2,3	10,1	11,9

Il est à noter que pour la localisation de deux alarmes de recul, la durée de chaque signal était plus longue que celle utilisée dans l'expérimentation qui portait sur la localisation d'une seule alarme avec et sans tâche principale, facilitant ainsi l'accès aux indices fournis par les mouvements de la tête et du haut du corps. Par conséquent, les résultats des deux expérimentations (c.-à-d. une alarme c. 2 alarmes) ne peuvent être comparés.

Le tableau 7 indique que l'alarme large bande est de nouveau beaucoup plus facile à localiser dans l'espace que l'alarme tonale. En effet, le taux global moyen de réussite est 92,2 % pour l'alarme large bande, comparativement à seulement 57,7 % pour l'alarme tonale. Tout comme observé lors de la première expérimentation avec une seule alarme, la performance minimale de l'ensemble des participants avec l'alarme large bande, soit 67,0 %, excède la performance moyenne obtenue avec l'alarme tonale (57,7 %). Fait encore plus saillant, la performance moyenne obtenue avec l'alarme large bande dépasse le maximum obtenu de l'ensemble des participants avec l'alarme tonale. Finalement, la performance est beaucoup plus variable d'un individu à l'autre avec l'alarme tonale (écart-type de 11,4 % comparativement à 7,0 % pour l'alarme large bande).

La deuxième partie du tableau 7 fait état du nombre de sources sonores correctement identifiées dans une paire. En moyenne, les participants ont pu identifier correctement la provenance des deux stimuli dans 85,8 % des paires présentées pour l'alarme large bande, comparativement à seulement 32,5 % pour l'alarme tonale, mais ils ont rarement raté l'identification complète des sources dans une paire pour l'alarme large bande (seulement 1,4 % des paires présentées) alors qu'un tel résultat a été obtenu en moyenne dans 17,2 % des paires pour l'alarme tonale.

5.2.2.3 Performance par paires

Contrairement à l'expérimentation où une seule alarme était présentée, les confusions avant/arrière et gauche/droite, ainsi que les autres types d'erreurs ne peuvent être établis en raison du fait que les participants ont été avisés de déterminer la provenance des sources sonores perçues, sans accorder une importance à l'ordre dans lequel les deux alarmes étaient entendues. Afin d'explorer davantage les erreurs de localisation, la figure 11 montre la performance de chaque alarme pour chacune des 28 combinaisons de haut-parleurs possibles. Cette figure permet de constater que le taux de réussite d'identification des deux sources dans une paire est systématiquement plus élevé avec l'alarme large bande qu'avec l'alarme tonale. En fait, un taux de réussite d'au moins 50 % est obtenu pour toutes les paires de haut-parleurs avec l'alarme large bande, alors que ce score est atteint ou dépassé pour seulement 4 des 28 paires possibles avec l'alarme tonale.

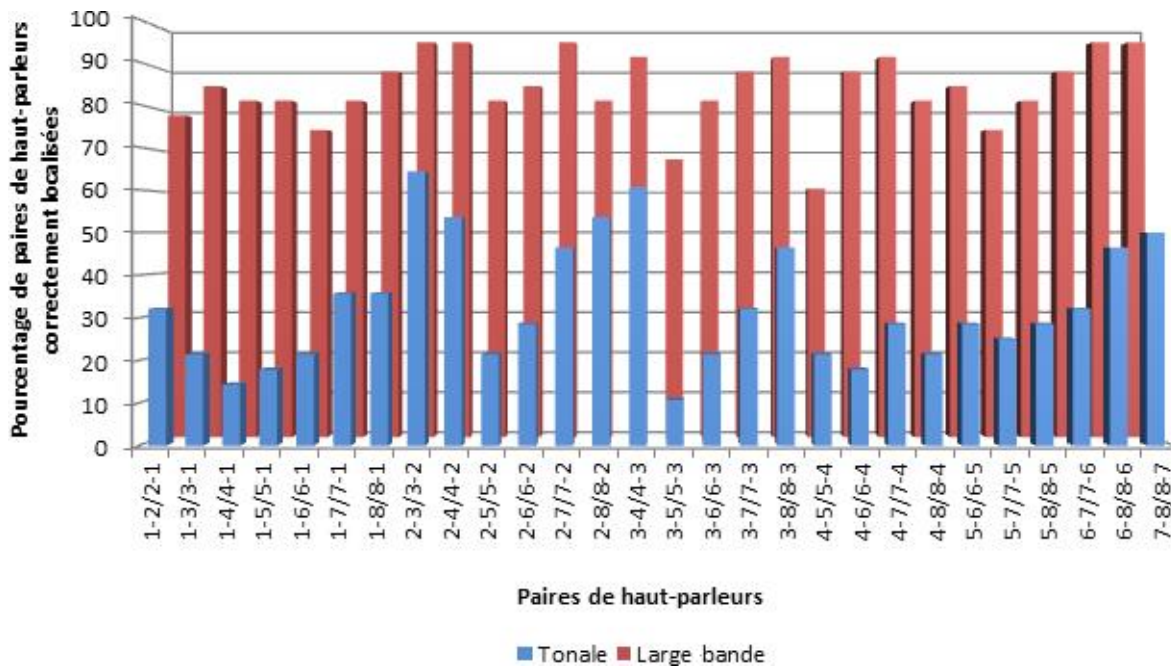


Figure 11 : Taux de réussite moyen d'identification des deux sources par paire possible de haut-parleurs, lors des présentations des alarmes tonale et large bande.

5.3 Discussion

Pour la localisation d'une seule alarme dont la durée est de moins d'une seconde, la tâche utilisée dans la présente expérimentation n'avait pas d'effet sur le taux global moyen de réussite ni sur l'erreur angulaire moyenne. Par contre, un effet du type d'alarme est noté, l'alarme large bande étant nettement supérieure. En fait, comparativement aux résultats obtenus avec l'alarme tonale, le taux moyen de réussite est presque doublé et l'erreur angulaire moyenne est réduite d'au moins la moitié avec l'alarme large bande. Le taux de confusion avant/arrière et gauche/droite est également réduit d'au moins la moitié avec l'alarme large bande comparée à l'alarme tonale.

Pour les deux types d'alarmes, les confusions avant/arrière sont nettement plus fréquentes que les confusions de type gauche/droite, qui ne surviennent que dans un faible pourcentage des présentations. Comme discuté dans l'étude précédente [7], les alarmes à large spectre sont, en théorie, plus faciles à localiser en offrant un nombre maximal d'indices à traiter (DIT, DII, indices spectraux), comparativement aux signaux tonaux ou à étendue spectrale limitée tels que les sirènes de véhicules d'urgence et les alarmes de recul conventionnelles. Celles-ci sont typiquement composées d'une fréquence dominante entre 1000 et 4000 Hz [30], région fréquentielle pour laquelle peu d'indices sont disponibles pour la localisation. Il est important de noter que la localisation a été étudiée dans un seul type de bruit. La littérature démontre que la localisation dans le plan gauche/droit est moins sensible au type de bruit que la localisation avant/arrière [31].

En ce qui concerne la localisation sonore de deux alarmes présentées simultanément ou quasi simultanément, le signal d'alarme utilisé était plus long (3 secondes), favorisant ainsi plus particulièrement l'utilisation des mouvements de la tête et du haut du corps, ce qui est reconnu pour aider à repérer la provenance des sources sonores. Malgré la présence de deux signaux d'alarme à localiser, une augmentation d'environ 10-15 % du taux global moyen de réussite a été obtenue, comparativement à celui obtenu avec une seule alarme, et ce, pour les deux types d'alarmes. Il semble donc que les mouvements de la tête et du haut du corps, comme attendu, permettent une meilleure localisation sonore. Toutefois, il est à noter que les participants étaient informés de la présence de deux alarmes, ce qui aurait pu les aider à les localiser. Dans la pratique, ce type d'information peut possiblement être déduit à partir d'indices visuels ou autres.

Conséquemment, en présence de situations de travail où de multiples véhicules effectuent des manœuvres de recul, les chances de localisation des différents véhicules en mouvement doivent être maximisées en limitant la vitesse de déplacement de ces derniers. Cela permettrait aux travailleurs de disposer de plus de temps pour réagir et d'utiliser la modalité visuelle pour mieux identifier la provenance du ou des dangers. Il est important de préciser que l'alarme tonale demeure particulièrement problématique, car en présence de deux alarmes de ce type, la capacité de les localiser toutes deux demeure faible, soit d'environ 33 % (comparativement à 86 % pour l'alarme large bande). En d'autres mots, une fois sur trois, un travailleur risque de ne pas localiser correctement la provenance des véhicules munis d'une alarme tonale, ce qui pourrait compromettre sa sécurité.

6. VOLET 3 : ALARMES À NIVEAU SONORE AUTOAJUSTABLE

6.1 Méthodologie

L'objet de ce volet est de développer, à l'aide de microphones, une méthode de mesure du niveau sonore généré par une alarme autoajustable dans un environnement où existe un bruit ambiant pouvant fluctuer. Afin d'être utilisable en milieu de travail, la méthode doit permettre de : i) reposer principalement sur la mesure microphonique; ii) détecter, dans le temps, quand l'alarme est en fonction; iii) isoler du bruit ambiant, le niveau généré par l'alarme seulement. Ce dernier élément pose un défi plus important, car le fait d'effectuer la mesure du niveau sonore avec l'aide d'un unique microphone ne permet pas de distinguer facilement la contribution de l'alarme par rapport à celle du bruit ambiant. La section suivante présente l'approche proposée et testée en laboratoire, et qui, par la suite, a été utilisée en laboratoire et sur le terrain pour comprendre comment se fait l'ajustement des alarmes.

Deux alarmes ont ensuite été testées : l'alarme tonale de marque Grote⁵, appelée « Avertisseur sonore de recul robuste Smart Alarm® » (modèle 73080) et l'alarme large bande de marque Brigade⁶, appelée « Alarme de recul intelligente à son blanc » (modèle SA-BBS-107).

6.1.1 Mesures en laboratoire : salle semi-anéchoïque



6.1.1.1 Caractéristiques des alarmes

Les principales caractéristiques techniques des alarmes testées, fournies par les manufacturiers, sont présentées au tableau 8. Après inspection du dispositif, l'alarme Grote ne semble pas contenir de microphone pour échantillonner le champ sonore ambiant. L'hypothèse que la membrane du haut-parleur est utilisée à cette fin lorsque l'alarme n'est pas en fonction est donc formulée. Dans le cas de l'alarme large bande, un microphone distinct, visible de l'extérieur et contrôlé par un circuit imprimé installé à l'intérieur du boîtier de l'alarme est utilisé pour échantillonner le champ sonore ambiant. Dans les deux cas, aucune mention n'est faite quant aux algorithmes et/ou méthodes utilisées pour mesurer le champ ambiant autre que celle indiquée dans le tableau ci-dessous.

⁵ Grote Industries, Inc., Indiana, USA - <http://fr.grote.com/products/73080-heavy-duty-backup-alarm-87-to-112-decibels-smart-alarm/>

⁶ Brigade Electronics Plc, UK - <http://brigade-electronics.com/>

Tableau 8 : Principales caractéristiques techniques des alarmes testées (comme affichées par les fabricants sur leur site Web).

	Grote 73080 	SA-BBS-107 
Gamme de niveaux sonores générée	87-112 dB	MAX 107 ± 4 dB(A) MIN 87 ± 4 dB(A)
Ajustement du volume	<i>Mesure l'intensité du bruit ambiant et s'ajuste instantanément, à au moins 5 décibels de plus</i>	<i>Ambient noise is monitored once every second and automatically adjusts the alarm volume 5-10 dB above the sampled noise level ⁷ (+ 5 ± 4 dB to external noise)</i>
Type de signal d'alarme	Tonal	Large bande (bruit blanc)
Norme	SAE J994	SAE J994

6.1.1.2 Montage expérimental

Le principe consiste à placer une alarme autoajustable dans une salle semi-anéchoïque en présence d'un bruit de fond généré par un haut-parleur. Ce dernier est utilisé pour générer différents scénarios de bruit afin d'étudier le comportement de l'alarme. La figure 12 illustre le montage utilisé. Comme schématisé dans le bas de la figure, le haut-parleur, le microphone à 1 m et l'alarme sont placés dans le même axe. En plus des deux microphones, une pince ampérométrique est utilisée pour mesurer le courant utilisé par l'alarme lors de son fonctionnement.

⁷ Traduction libre en français : Le bruit ambiant est monitoré chaque seconde et on ajuste automatiquement le volume de l'alarme 5-10 dB au-dessus du niveau du bruit échantillonné.

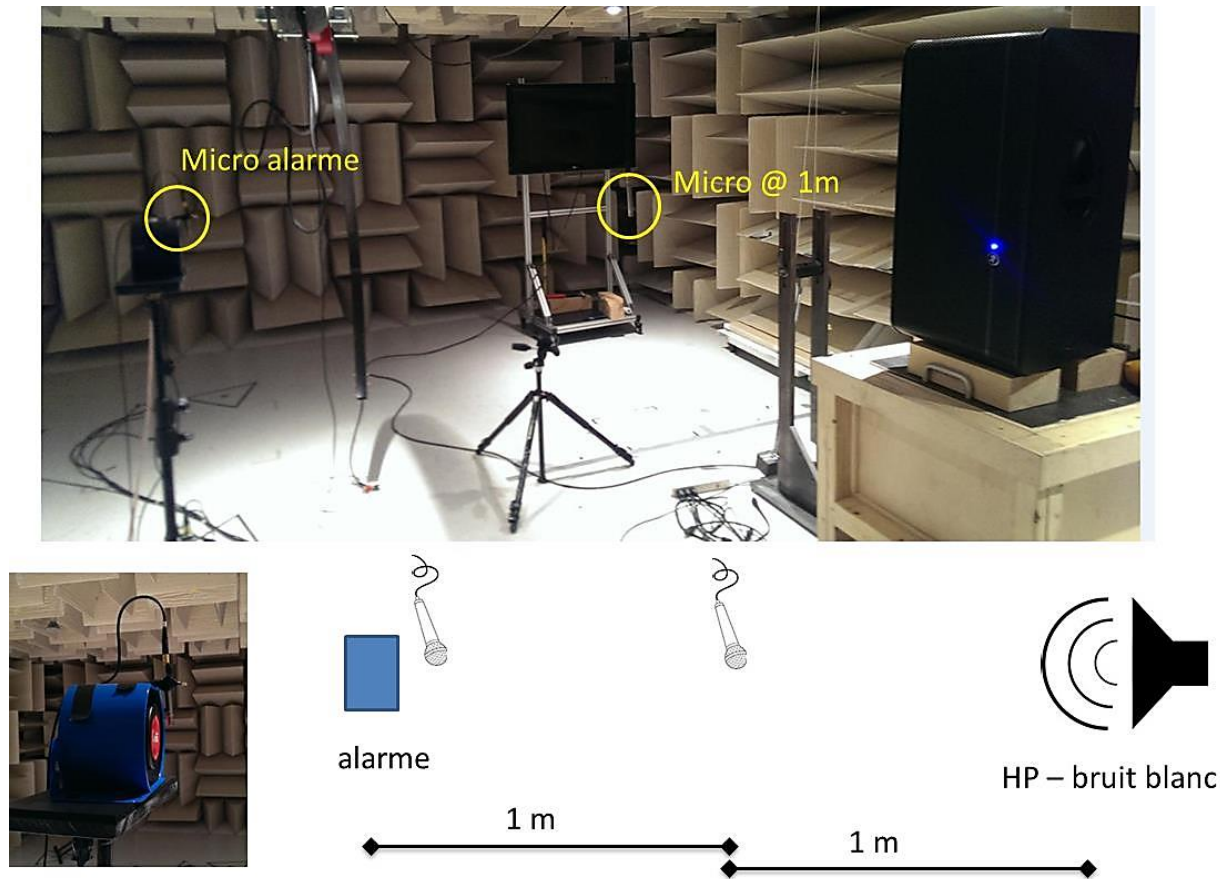


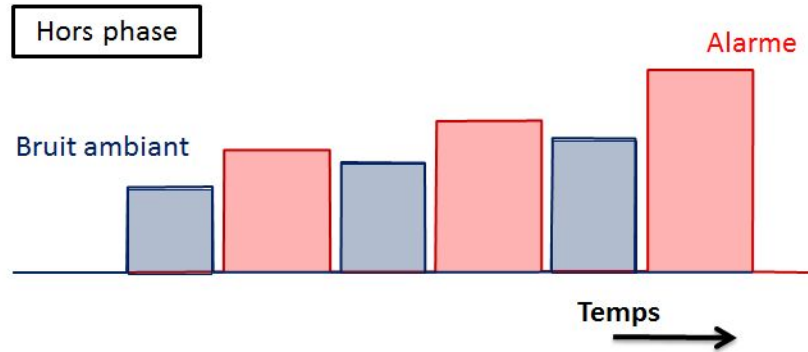
Figure 12 : Illustration du montage expérimental utilisé en laboratoire pour tester les alarmes autoajustables.

6.1.1.3 Génération du bruit ambiant

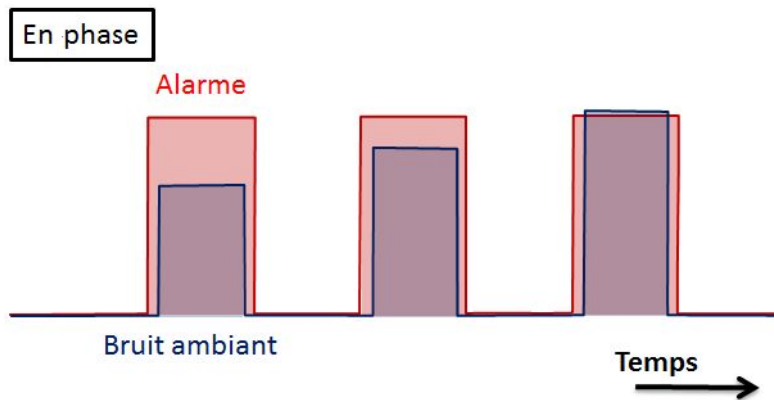
Afin d'examiner comment l'alarme ajuste son niveau sonore par rapport au bruit ambiant, deux scénarios de bruit ambiant sont utilisés, comme illustrés à la figure 13. Le premier (a), noté « hors phase », consiste à générer du bruit ambiant seulement lorsque l'alarme n'est pas en fonction, c'est-à-dire lors des portions dites 'off' (figure 14). Le deuxième (b), noté « en phase » consiste, à l'inverse, à ne générer du bruit ambiant que lorsque l'alarme est en fonction, c'est-à-dire lors des portions dites 'on' (figure 14). Dans les deux scénarios, le bruit ambiant est augmenté par paliers de 3 dB, d'une durée d'environ 10 secondes chacun. Pour chacun des scénarios, les signaux temporels aux microphones et à la pince ampérométrique sont mesurés. Ces signaux sont ensuite analysés à l'aide de routines développées sous MATLAB⁸ pour obtenir différents indicateurs (niveau de bruit L_{eq} , niveau à la crête $L_{crête}$, etc.) en fonction du temps. Plus particulièrement, une routine de calcul permettant de détecter automatiquement, à l'aide du

⁸ The Mathworks Inc., MA, USA - <https://www.mathworks.com/>

signal de la pince, quand l'alarme est en fonction ou non a été élaborée. Elle permet notamment de calculer avec précision les niveaux obtenus lorsque l'alarme est en fonction en comparaison avec les niveaux de bruit obtenus juste avant que l'alarme n'émette son signal.



(a)



(b)

Figure 13 : Illustration de l'évolution des niveaux de bruit ambiant générés et de l'alarme en fonction du temps pour deux scénarios : (a) « hors phase » : le bruit ambiant n'est pas émis lorsque l'alarme est en fonction; (b) « en phase » : le bruit ambiant n'est présent que lorsque l'alarme est en fonction.

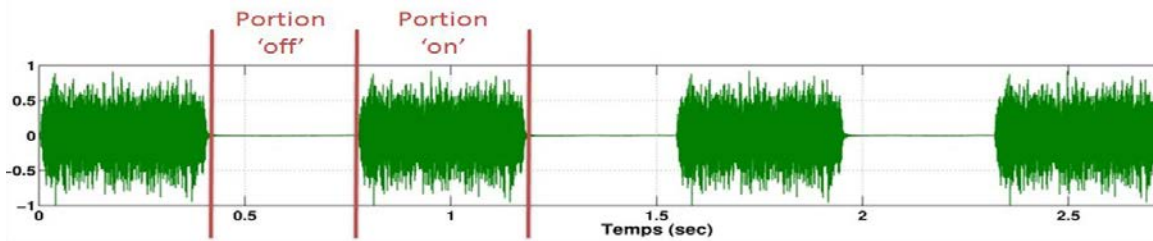


Figure 14 : Illustration de ce que représentent les portions ‘on’ et ‘off’ lorsqu’une alarme est activée. La figure montre le signal généré par l’alarme, en vert, en fonction du temps.

Le scénario de bruit ambiant « hors phase » permet d’obtenir, grâce à un microphone placé à 1 m, une lecture du niveau sonore généré uniquement par l’alarme puisqu’aucun bruit ambiant n’est émis durant les portions pour lesquelles l’alarme est en fonction. Il permet donc d’examiner comment le niveau de l’alarme augmente lorsque le niveau du bruit ambiant augmente, mais aussi d’établir, de manière isolée, la relation qui existe entre le courant utilisé par l’alarme et le niveau sonore généré par celle-ci. Cette relation peut être utilisée subséquentment, lors de mesures-terrains en milieu bruyant, pour obtenir un estimé du niveau équivalent « champ libre à 1 m » généré par l’alarme, c’est-à-dire le niveau qu’aurait produit l’alarme en condition idéale, en champ libre, à 1 m de celle-ci. En parallèle, le microphone placé sur l’alarme permet d’obtenir une lecture du bruit ambiant perçu par l’alarme en tout temps et, plus particulièrement, juste avant que celle-ci ne soit déclenchée.

Le scénario de bruit ambiant « en phase » permet de vérifier si le niveau sonore émis par l’alarme demeure à son minimum ou non lorsqu’on augmente le niveau du bruit ambiant. Dans ce scénario, l’hypothèse formulée est que l’alarme ne change pas son niveau, car le bruit ambiant échantillonné tout juste avant les portions ‘on’ est très faible.

6.1.2 Mesures-terrains

Le principe de mesure présenté à la sous-section 6.1.1 a été conçu pour pouvoir être utilisé sur des camions en fonction. Un microphone est placé sur l’alarme du camion tandis que la pince ampérométrique est accrochée au fils d’alimentation de l’alarme. Un second microphone est placé sur le camion, à l’arrière, afin d’obtenir une lecture du signal sonore à cet endroit (bruit ambiant et alarme), contrairement au microphone de l’alarme qui lui, mesure ce qui se passe directement au niveau de l’alarme. Les trois canaux (deux microphones + pince) sont branchés à un ordinateur disposant d’un système d’acquisition développé sous Labview⁹ permettant la mesure en continu des signaux temporels sur plusieurs heures.

Deux séances d’essais-terrains ont été réalisées. Pour la première séance, un camion de déménagement du même type que celui montré à la figure 15(a) a été utilisé par l’équipe de recherche afin de tester le système de mesure. Des allées et venues ont été faites sur un terrain en

⁹ National Instruments Corporation, Austin, Texas - <http://www.ni.com/labview/f/>

terre battue à aire ouverte. Les deux types d'alarmes, tonale et large bande, ont été testés. Le microphone placé à l'arrière du camion était installé sur le marchepied en treillis métallique donnant accès à la plate-forme d'entreposage, à peu près en position centrale. Même si ces mesures n'ont pas été prises en conditions réelles de travail, les résultats obtenus sont toutefois valables et peuvent être analysés.

Dans la deuxième séance d'essais, le véhicule testé était un tracteur semi-remorque du même type que celui apparaissant sur la figure 15(b). Pour ce véhicule, l'alarme est placée vers l'arrière du tracteur, tout près de l'endroit où vient s'ancrer la semi-remorque (figure 16). Compte tenu de la longueur de la semi-remorque (environ 54 pi), il n'a pas été possible de placer un microphone à l'arrière de celle-ci pour y mesurer le signal sonore. De plus, pour des raisons hors du contrôle de l'équipe de recherche, il n'a pas été possible de faire les essais avec l'alarme large bande avec ce type de tracteur. Seuls des résultats pour l'alarme tonale sont donc disponibles.



(a)



(b)

Figure 15 : Types de camions utilisés pour les essais-terrains sur les alarmes autoajustables : (a) camion de déménagement; (b) tracteur semi-remorque de transport.

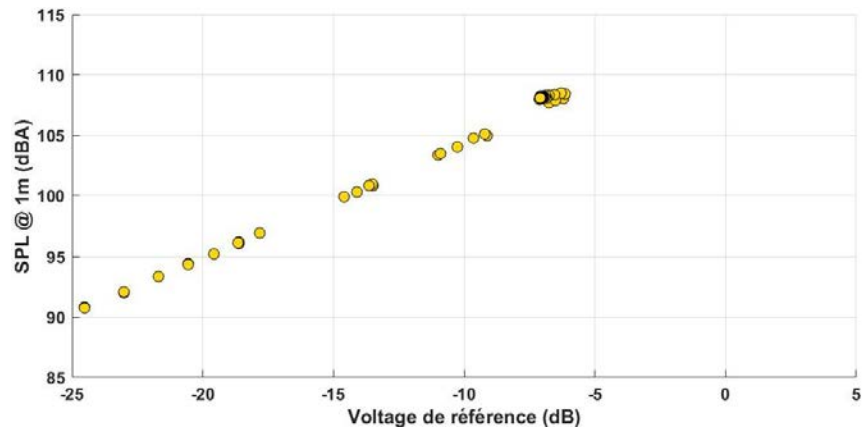


Figure 16 : Position de l'alarme autoajustable lors de la deuxième séance d'essais-terrains.

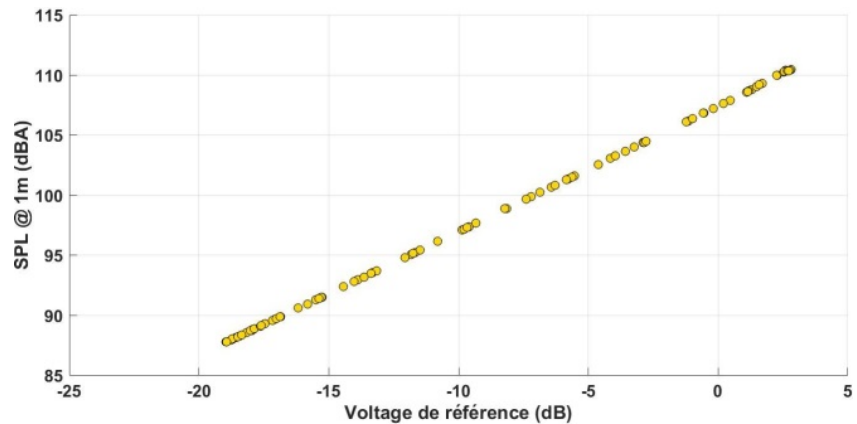
6.2 Résultats

6.2.1 Mesures en laboratoire

La figure 17 montre les résultats obtenus à l'aide de la pince ampérométrique dans le cas du scénario de bruit ambiant « hors phase » pour les deux alarmes testées. Le niveau sonore mesuré au microphone placé à 1 m de l'alarme est présenté en fonction du voltage mesuré par la pince ampérométrique, voltage que l'on appellera par la suite, voltage de référence. L'existence d'une relation linéaire simple entre le niveau sonore généré par l'alarme et le courant utilisé par celle-ci est constatée. C'est cette relation qui permet, lors d'essais-terrains, d'obtenir une estimation du niveau qui serait généré par l'alarme sans la présence du bruit ambiant, en utilisant le voltage de référence. Cette estimation est appelée l'estimé « champ libre à 1 m ».



(a)



(b)

Figure 17 : Niveau sonore à 1 m (SPL en dB[A]) en fonction du voltage de référence à la pince ampérométrique (dB re 1 V) pour l'alarme : (a) large bande; (b) tonale.

Les résultats du niveau de l'alarme suivants découlent de deux types de calcul :

- a. Pour chaque portion où l'alarme est en fonction (portion 'on'), l'estimé « champ libre à 1 m » du niveau généré par l'alarme à 1 mètre à l'aide de la mesure du voltage de référence est calculé. Chacune de ces portions dure environ 500 ms (alarme tonale) et 400 ms (alarme large bande). De plus, le niveau de bruit ambiant échantillonné est estimé en calculant, pour chaque portion où l'alarme est en fonction 'on', le niveau de bruit au microphone fixé sur l'alarme, mesuré pendant les 300 ms qui précèdent chaque portion. Au final, une estimation du niveau généré par l'alarme dans chaque portion où celle-ci est en fonction (portion 'on') est obtenue, ainsi qu'une estimation du bruit ambiant juste avant (~300 ms) le déclenchement de l'alarme.
- b. Les niveaux de bruit équivalent L_{eq} avec un temps d'intégration de 125 ms sur toute la durée de l'enregistrement sont calculés. Ainsi, une lecture des microphones à toutes les 125 ms est obtenue.

Les résultats du scénario de bruit ambiant « hors phase » sont montrés à la figure 18 (alarme large bande) et à la figure 19 (alarme tonale). Sur ces figures, les limites maximales affichées des alarmes sont désignées par les traits horizontaux noirs. On y observe que le niveau de l'alarme s'ajuste effectivement en continu à toutes les secondes, en fonction du bruit ambiant mesuré juste précédemment, et ce, pour les deux types d'alarmes. Comme prévu, le niveau de l'alarme atteint un maximum même si le bruit ambiant continu à augmenter. Par contre, l'ajustement au-dessus du bruit ambiant se fait différemment entre les deux types d'alarmes. L'alarme large bande atteint son maximum plus rapidement en fonction de l'augmentation du bruit ambiant, ce qui permet de maintenir un rapport signal/bruit (S/B : différence entre le niveau de l'alarme et le niveau du bruit ambiant) relativement important sur une plus grande gamme de niveaux de bruit ambiant. L'alarme tonale voit son niveau augmenter moins rapidement, ce qui donne des valeurs de rapport S/B moins importantes que dans le cas de l'alarme large bande.

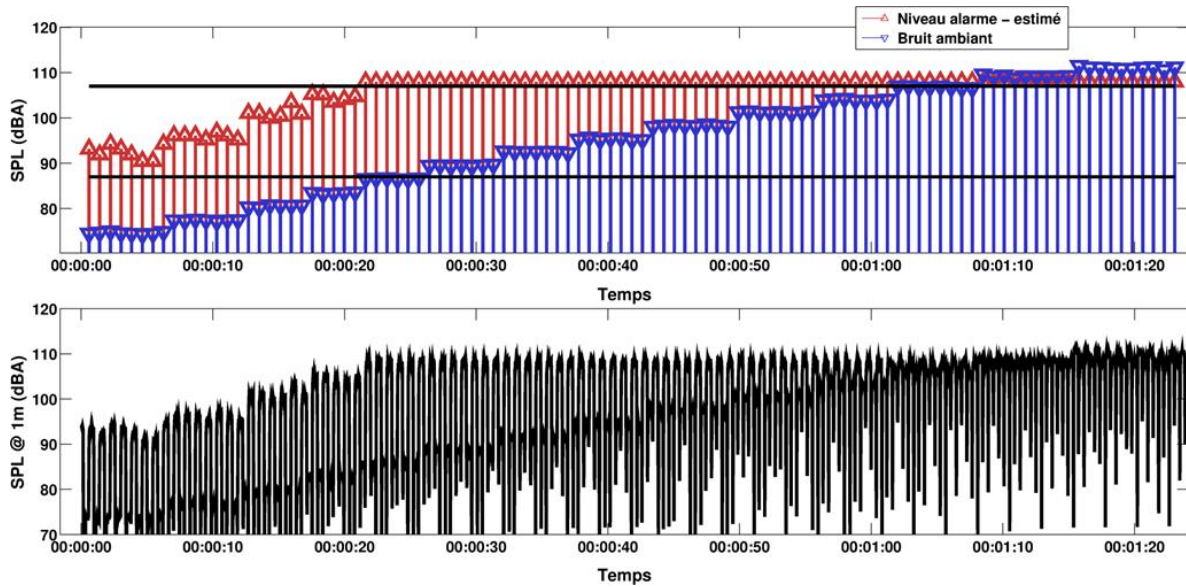


Figure 18 : Salle semi-anéchoïque - niveau de pression sonore pour l’alarme large bande, scénario de bruit « hors phase ». Haut : SPL « champ libre à 1 m » généré par l’alarme et SPL du bruit ambiant. À chaque paire de symboles « alarme/bruit ambiant » correspond une portion ‘on’ de l’alarme. Bas : SPL mesuré par le biais du microphone placé à 1 m de l’alarme. Traits horizontaux noirs : valeurs minimales et maximales du bruit généré par l’alarme, affichées par le manufacturier.

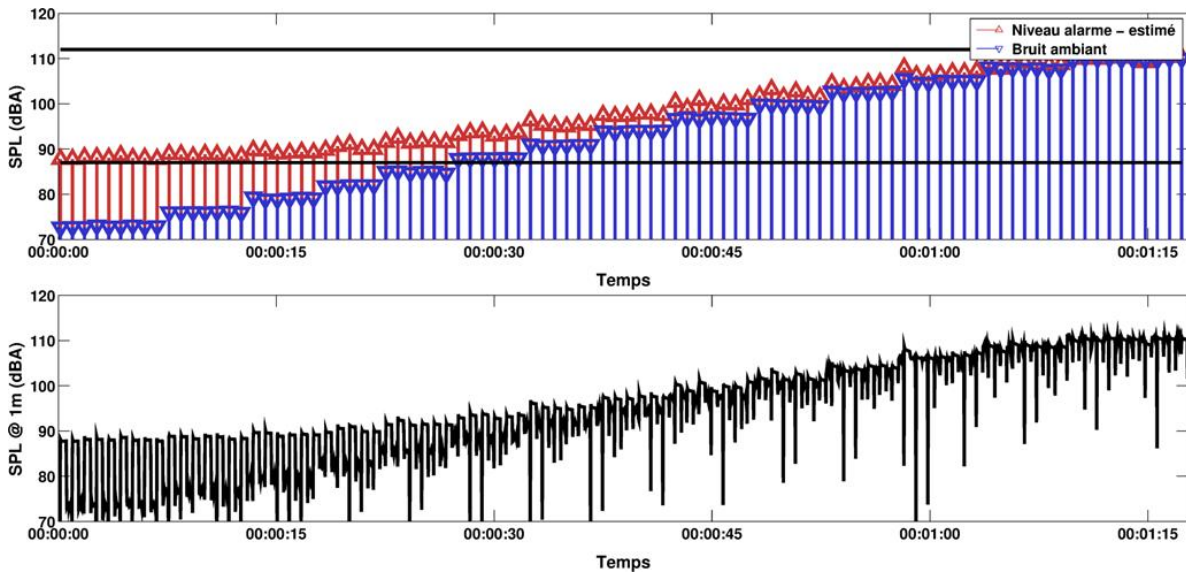


Figure 19 : Salle semi-anéchoïque - niveau de pression sonore pour l’alarme tonale, scénario de bruit « hors phase ». Haut : SPL « champ libre à 1 m » généré par l’alarme et SPL du bruit ambiant. À chaque paire de symboles « alarme/bruit ambiant » correspond une portion ‘on’ de l’alarme. Bas : SPL mesuré par le biais du microphone placé à 1 m de l’alarme. Traits horizontaux noirs : valeurs minimales et maximales du bruit généré par l’alarme, affichées par le manufacturier.

Les résultats du scénario de bruit ambiant « en phase » sont montrés à la figure 20 pour l'alarme tonale. Cette fois-ci, le bruit ambiant n'est généré que lorsque l'alarme génère du bruit (portions 'on'). Lors des portions 'off', donc juste avant qu'elle ne génère un signal, le bruit ambiant est uniquement dû au bruit de fond de la salle, soit essentiellement celui des équipements, mesuré autour de 45 dB(A). Le niveau de l'alarme ne change pas, même si le bruit ambiant, présent seulement lorsque l'alarme fonctionne, est augmenté progressivement. Cette hausse du bruit ambiant est observable par le biais du microphone placé à 1 m, microphone qui mesure tant ce qui est généré par l'alarme que le bruit ambiant (figure 20, panneau du bas). Des résultats tout à fait similaires ont été obtenus pour l'alarme large bande.

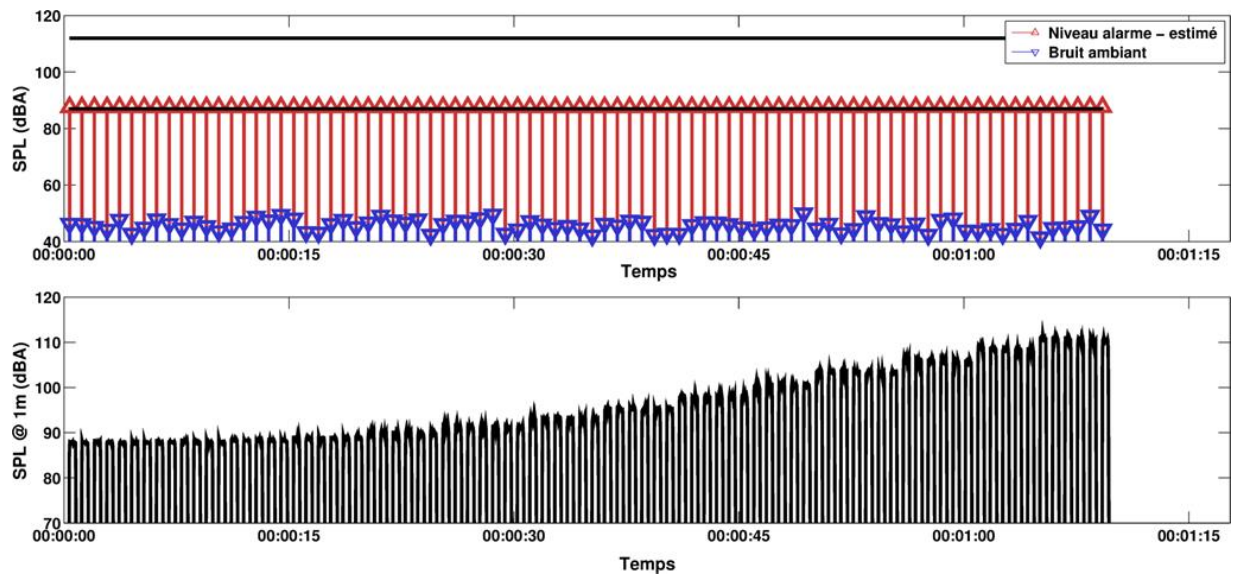


Figure 20 : Salle semi-anéchoïque - niveau de pression sonore (SPL) pour l'alarme tonale, scénario de bruit « en phase ». Haut : SPL « champ libre à 1 m » généré par l'alarme et SPL du bruit ambiant. À chaque paire de symboles « alarme/bruit ambiant » correspond une portion 'on' de l'alarme. Bas : SPL mesuré par le biais du microphone placé à 1 m de l'alarme. Traits horizontaux noirs : valeurs minimales et maximales du bruit généré par l'alarme, affichées par le manufacturier.

En plus des essais réalisés dans la chambre semi-anéchoïque, des tests ont été effectués dans une chambre réverbérante afin d'étudier le comportement de l'alarme autoajustable dans des conditions présentant beaucoup de réflexions acoustiques. Pour ces essais, l'alarme est simplement placée au centre de la chambre réverbérante et mise en fonction manuellement sans qu'aucun bruit ambiant ne soit généré par des haut-parleurs. Un microphone placé à 1 m devant l'alarme permet de mesurer les niveaux sonores générés. Pour cette configuration, la figure 21(a) montre les niveaux de l'alarme estimés « champ libre à 1 m » et de bruit ambiant, tandis que la figure 21(b) montre les niveaux sonores mesurés par le biais d'un microphone placé à 1 m de l'alarme, en fonction du temps. Lorsque l'alarme est mise en fonction, à ~3 min du début, elle génère le niveau minimum qui, par la suite, augmentera rapidement même si aucun bruit ambiant n'est généré par les haut-parleurs. Le niveau généré par l'alarme n'a en fait pas le temps de décroître suffisamment rapidement entre deux portions 'on' à cause de la réverbération. Ce

faisant, l'alarme échantillonne alors son propre signal comme bruit ambiant. Le niveau est alors ajusté au-dessus de ce bruit et le même processus est répété jusqu'à ce que l'alarme atteigne son niveau maximum. Cet effet d'autoamplification ne prend que 3-4 secondes et l'alarme atteint rapidement son maximum, malgré l'absence de bruit ambiant dans l'environnement d'essai. Une chambre réverbérante représente bien sûr un cas extrême peu probable d'être rencontré en pratique sur des véhicules. Il est toutefois concevable que des situations présentant un bon nombre de réflexions acoustiques soient présentes lorsqu'une alarme est placée sous certains véhicules dans des endroits où l'encombrement est important. Le phénomène d'autoamplification observé en chambre réverbérante pourrait donc s'y retrouver.

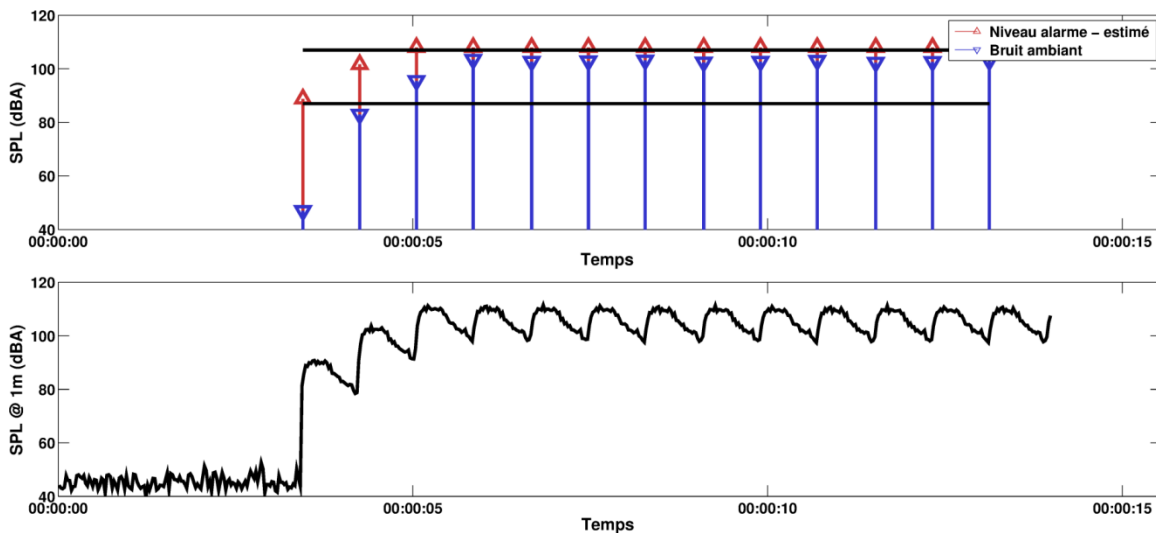
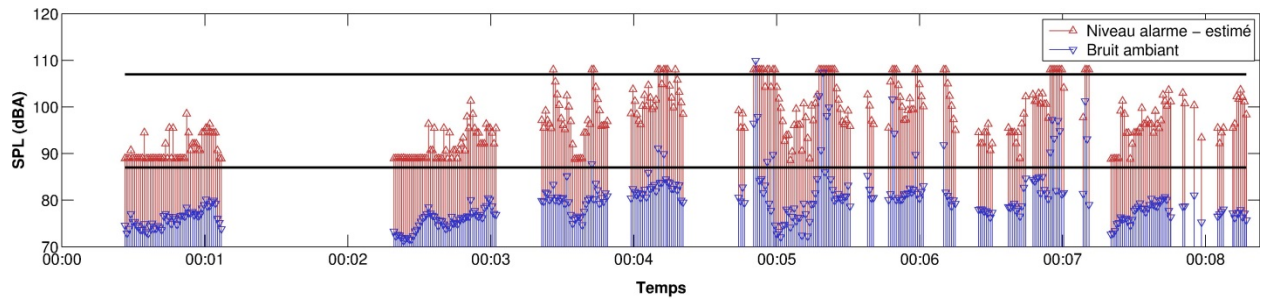


Figure 21 : Salle réverbérante - niveau de pression sonore (SPL) pour l'alarme large bande. Haut : SPL « champ libre à 1 m » généré par l'alarme et SPL du bruit ambiant. À chaque paire de symboles « alarme/bruit ambiant » correspond une portion 'on' de l'alarme. Bas : SPL mesuré par le biais du microphone placé à 1 m de l'alarme. Traits horizontaux noirs : valeurs minimales et maximales du bruit généré par l'alarme, affichées par le manufacturier.

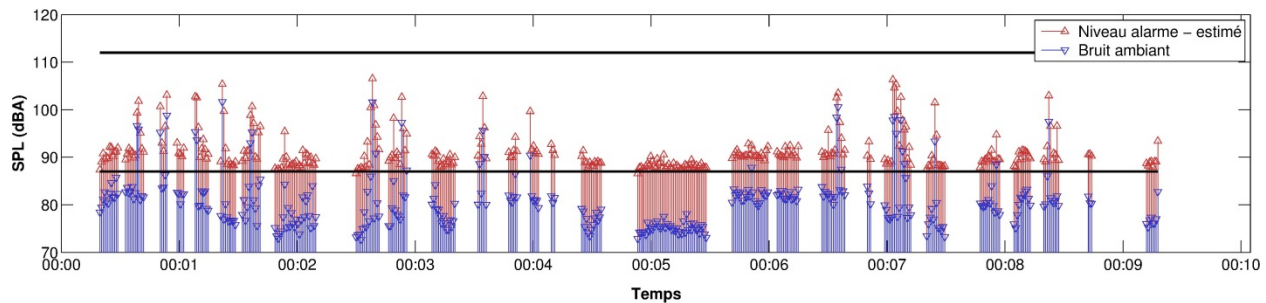
6.2.2 Mesures-terrains

6.2.2.1 Camion de déménagement

Les niveaux sonores de l'alarme estimés « champ libre à 1 m » et les niveaux de bruit ambiant en fonction du temps obtenus sur le camion de déménagement sont montrés à la figure 22. On note premièrement que les temps de recul sont souvent élevés (temps durant lesquels l'alarme est en fonction). En effet, puisque ces essais servaient particulièrement à tester le système de mesure développé, des manœuvres de recul prolongées ont été effectuées.



(a)



(b)

Figure 22 : Niveaux de pression sonore (SPL) de l'alarme estimés « champ libre à 1 m » et du bruit ambiant pour le camion de déménagement : (a) alarme large bande; (b) alarme tonale. À chaque paire de symboles « alarme/bruit ambiant » correspond une portion 'on' de l'alarme. Traits horizontaux noirs : valeurs minimales et maximales du bruit généré par l'alarme, affichées par le manufacturier.

Les niveaux sonores générés par les alarmes varient généralement avec le bruit ambiant, bien que certaines fois, ils peuvent être importants même si le niveau ambiant ne varie pas beaucoup (voir, par exemple, l'alarme large bande vers 3min 30 s). Le niveau des alarmes peut y être élevé et « suivre » le bruit ambiant échantillonné près de l'alarme (bruit sous le véhicule, appelé ici « bruit ambiant »), même si en pratique il est probable que le bruit dans la zone de danger derrière le véhicule soit différent du bruit sous le véhicule.

Une autre façon d'examiner les résultats est présentée à la figure 23 et à la figure 24. On y montre, sur les graphiques de gauche, les niveaux sonores du bruit ambiant et les niveaux estimés « champ libre à 1 m » et sur les graphiques de droite, les niveaux mesurés par le biais du microphone placé à l'arrière du véhicule durant les portions 'on' et 'off' de l'alarme. Pour toutes les figures, les niveaux sont placés par ordre décroissant du niveau du bruit ambiant.

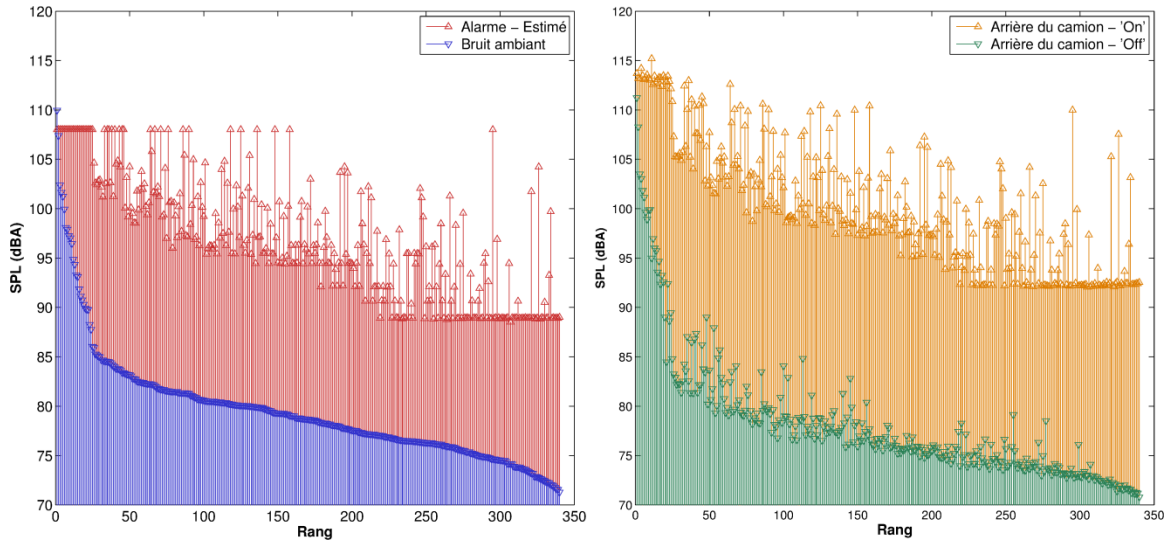


Figure 23 : Alarme large bande sur le camion de déménagement : bruit ambiant et estimé « champ-libre » (gauche); bruit capté par le microphone à l'arrière du camion (droite). Les niveaux sont tracés par ordre décroissant du niveau de bruit ambiant.

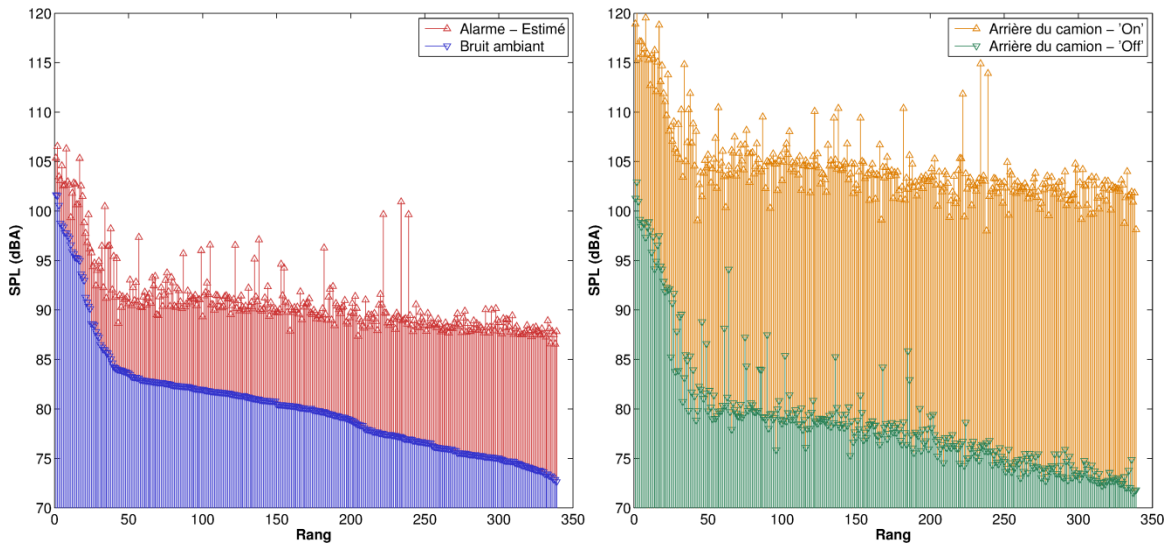


Figure 24 : Alarme tonale sur le camion de déménagement : bruit ambiant et estimé « champ-libre » (gauche); bruit capté par le microphone à l'arrière du camion (droite). Les niveaux sont tracés par ordre décroissant du niveau de bruit ambiant.

De ces résultats, les constats suivants peuvent être tirés :

- Sans surprise, les niveaux sonores, lorsque l'alarme ne fonctionne pas, sont légèrement plus faibles (~2-3 dB) à l'arrière du véhicule que sous le véhicule, près de l'alarme (ce qu'on appelle ici « bruit ambiant »). En effet, il n'y avait pas de sources de bruit significatives autres que celle attribuable au camion à l'endroit où les essais ont été effectués.

- Les niveaux de l'alarme, particulièrement pour celle à large bande, peuvent souvent être élevés, même si le bruit ambiant près du dispositif d'alarme ne l'est pas. Le même phénomène est observé pour l'alarme tonale, mais à plus petite échelle.
- Pour l'alarme large bande, les niveaux mesurés à l'arrière du camion sont plus élevés que les niveaux estimés « champ libre à 1 m ». Des différences de l'ordre de 5 dB sont observées. Ces résultats sont peu surprenants, car il est probable que le niveau sonore d'une alarme placée sous un camion soit amplifié du fait du confinement (réflexions au sol et sur le camion).
- Pour l'alarme tonale, les niveaux sonores mesurés à l'arrière du camion sont beaucoup plus élevés que les niveaux estimés « champ libre à 1 m », même significativement plus élevés qu'avec l'alarme large bande. Pour l'alarme tonale, des différences de l'ordre de 15 dB sont observées. Les niveaux sonores à l'arrière du camion surpassent toujours les 100 dBA, ce qui est bien au-dessus des niveaux de bruit ambiant mesurés lorsque l'alarme n'est pas en fonction. Ces différences notables entre les alarmes tonale et large bande sont compatibles avec les résultats obtenus sur le positionnement des alarmes (voir section 7).
- Les niveaux sonores élevés obtenus à l'arrière du véhicule semblent indiquer que même si les alarmes s'ajustent généralement comme prévu en fonction du bruit généré près d'elles, les niveaux mesurés dans la zone de danger derrière le véhicule peuvent être assez élevés.

6.2.2.2 Tracteur semi-remorque

Les niveaux de l'alarme estimés « champ libre à 1 m » et les niveaux de bruit ambiant en fonction du temps obtenu avec le tracteur semi-remorque sont montrés à la figure 25 pour une journée complète d'opération. On y constate notamment que le tracteur a reculé plus d'une vingtaine de fois au cours de la journée. Compte tenu de la longueur de la semi-remorque, il était impossible de placer un microphone à l'arrière de celle-ci et ainsi, d'estimer le bruit à cet endroit en particulier. La figure 25 montre toutefois aussi les niveaux sonores mesurés en continu par le biais du microphone positionné sur l'alarme ($L_{eq}(125\text{ ms})$). Cette dernière mesure permet de bien voir l'évolution des niveaux de bruit sous le véhicule, tout juste près de l'alarme, lors de la journée d'opération. De la même façon que précédemment, la figure 26 montre les niveaux sonores estimés de l'alarme et du bruit ambiant, mais cette fois, par ordre décroissant du niveau de bruit ambiant.

Les résultats présentés à la figure 26 sont similaires à ceux obtenus pour le camion de déménagement (voir figure 24). Les niveaux estimés de l'alarme peuvent notamment y dépasser les 100 dBA, même lorsque le bruit ambiant demeure relativement faible.

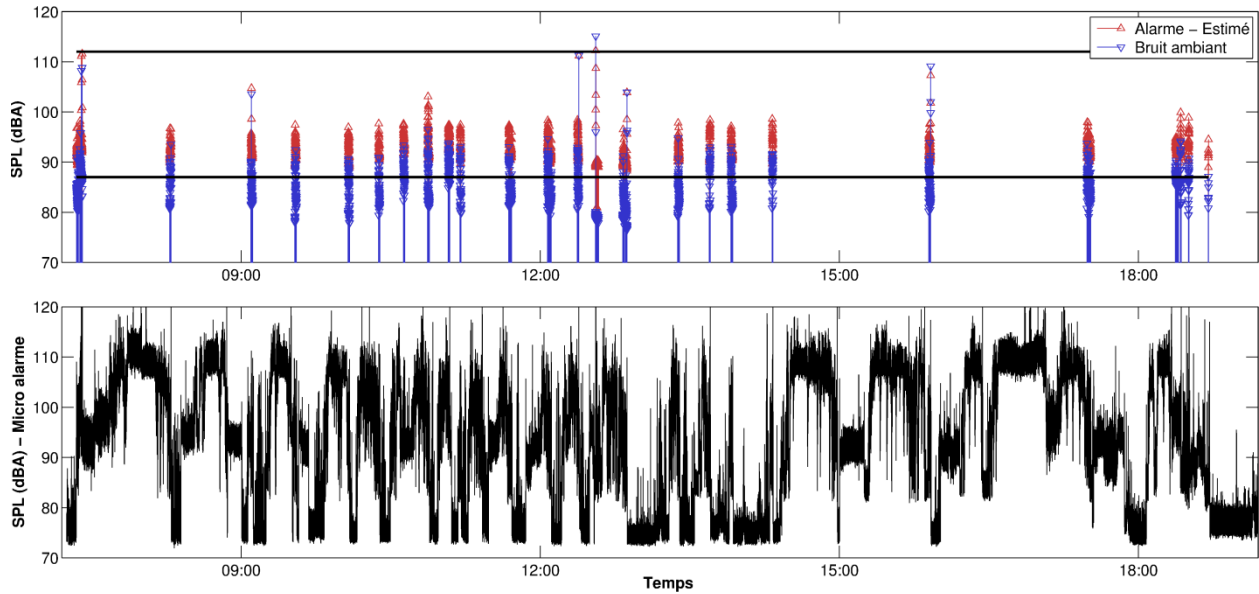


Figure 25 : Haut : Niveaux de pression sonore de l’alarme estimés « champ libre à 1 m » et du bruit ambiant pour le tracteur semi-remorque de transport en fonction du temps. Bas : Niveaux de pression sonore captés par le microphone placé sur l’alarme, à toutes les 125 ms. Traits horizontaux noirs : valeurs minimales et maximales du bruit généré par l’alarme, affichées par le manufacturier.

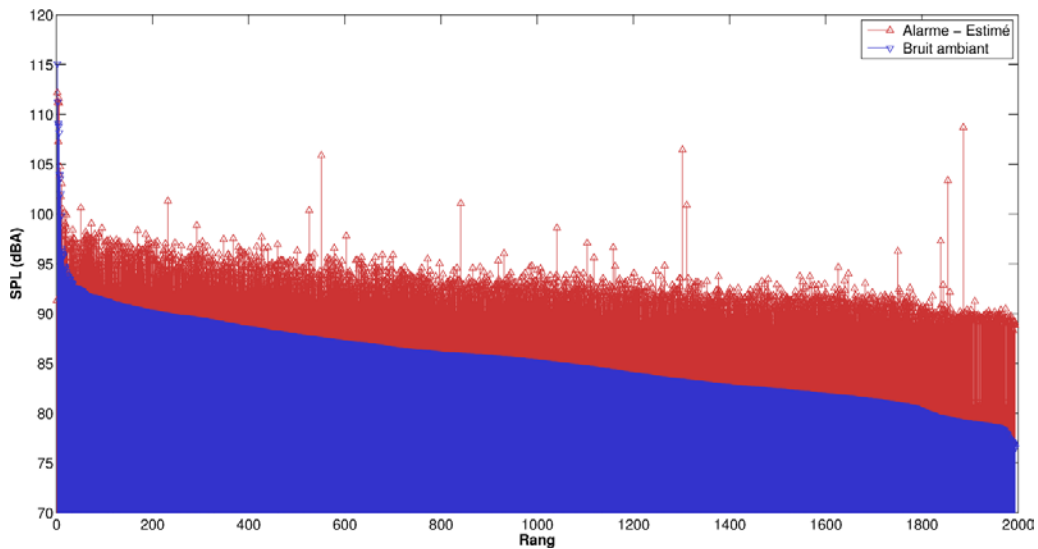


Figure 26 : Alarme tonale sur le tracteur semi-remorque de transport : bruit ambiant et alarme estimé « champ-libre à 1 m ». Les niveaux de pression sonore sont tracés par ordre décroissant du bruit ambiant.

6.3 Discussion

L'utilisation d'alarmes autoajustables est dictée, en pratique, par la volonté de réguler le niveau sonore qu'elles génèrent en fonction du bruit ambiant afin de minimiser la nuisance auprès des citoyens du voisinage, mais aussi auprès des travailleurs œuvrant autour des véhicules en fonction. À l'heure actuelle, l'échantillonnage du bruit ambiant se fait à l'aide de dispositifs (microphone ou autres) installés directement sur l'alarme. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent que le niveau sonore généré par l'alarme est ajusté à intervalle régulier, à chaque cycle 'on/off', lorsque celle-ci est en fonction. En pratique donc, lorsqu'un conducteur met son véhicule en mode de recul, le niveau sonore de l'alarme peut augmenter ou diminuer, de façon presque continue, jusqu'à ce que le conducteur arrête le véhicule. Est-il possible que cette variation du niveau sonore de l'alarme, conjuguée au mouvement de recul du véhicule, puisse engendrer certaines confusions pour un travailleur se trouvant derrière le camion? Le cas échéant, ne serait-il pas préférable de fixer le niveau sonore de l'alarme en se basant sur le bruit ambiant dès l'enclenchement du recul et de garder ce niveau sonore jusqu'à l'arrêt du véhicule plutôt que de laisser l'alarme s'ajuster à chaque cycle? Autrement dit, lors d'une manœuvre de recul, est-il préférable de tenter de maintenir un rapport signal/bruit constant, ce qui est le cas actuellement, ou encore de maintenir le niveau de l'alarme à une valeur fixe durant toute la durée de la manœuvre? Malheureusement, les résultats de cette étude ne permettent pas de répondre à cette question de façon simple.

Les résultats montrent que les niveaux sonores générés par l'alarme autoajustable peuvent non seulement varier considérablement de seconde en seconde, mais ils peuvent quelquefois atteindre des niveaux bien au-dessus du bruit ambiant, avec un rapport signal/bruit à 1 mètre bien plus élevé que les 5-10 dB affichés par les manufacturiers. De plus, les niveaux de bruit ambiant sur lesquels s'ajuste l'alarme sont ceux obtenus à l'endroit où est installée l'alarme, soit souvent dans des endroits confinés, sous les véhicules. À la lumière des résultats obtenus, on peut s'attendre à ce que ces niveaux de bruit soient supérieurs, ou du moins différents, à ceux mesurés dans la zone de danger à l'arrière des véhicules. Il peut donc en résulter des niveaux sonores d'alarme fortement supérieurs (plus de 15-20 dB) au bruit auquel sont exposés les travailleurs derrière le véhicule. Le cas échéant, l'utilité, ou encore l'efficacité, d'une alarme autoajustable s'en verrait fortement diminuée puisque celle-ci fonctionnerait régulièrement à fort niveau, malgré un bruit ambiant relativement peu élevé. Son efficacité à réduire la nuisance sonore environnementale s'en verrait évidemment aussi affectée.

Finalement, il est utile de mentionner que les deux types d'alarmes testés (large bande et tonale) s'ajustaient de façon différente. Bien que les deux alarmes parviennent généralement bien à ajuster leur niveau en fonction du bruit ambiant, celle à large bande atteignait son niveau maximal plus rapidement que l'alarme tonale. De plus, l'alarme large bande présentait plus souvent des variations instantanées importantes du rapport signal/bruit ($S/B > 15$ dB) que l'alarme tonale. Cet avantage apparent de l'alarme tonale est toutefois neutralisé par le caractère tonal de celle-ci, qui peut occasionner régulièrement des niveaux plus élevés à cause de phénomènes d'interférences destructives et constructives. Ce phénomène est notamment bien illustré à la section 7.

7. VOLET 4 : POSITIONNEMENT DES ALARMES

7.1 Pratiques courantes

Comme mentionné précédemment, une alarme devrait être positionnée le plus possible à l'arrière du véhicule, face à la zone de danger (espace directement derrière le véhicule) et devrait être visible par tout travailleur se trouvant dans cette zone, peu importe où il se trouve. Cette position, que l'on pourrait qualifier d'optimale, devrait permettre d'éviter le plus possible les effets de diffraction et de réflexion des ondes sonores et de maximiser la perception du signal de danger par les travailleurs. En pratique cependant, l'installation des alarmes sur les véhicules est la plupart du temps effectuée sans égard à la performance acoustique. En d'autres termes, les alarmes sont régulièrement installées à des endroits inappropriés d'un point de vue acoustique, que ce soit pour des raisons pratiques, liées à la maintenance ou autres, ce qui peut compromettre la sécurité des travailleurs.

Des photos prises sur le terrain dans le cadre de cette étude montrent des exemples typiques de différentes installations d'alarmes (figure 27). On y constate qu'effectivement, dans bien des cas, l'alarme n'est pas installée de façon optimale.

- Figure 27(a) : l'alarme est sous un capot, orientée vers le côté intérieur du véhicule.
- Figure 27(b) : l'alarme est sur le côté arrière du véhicule, pointée vers l'extérieur.
- Figure 27(c) : Bien que difficile à voir, l'alarme est placée sous le véhicule près des éléments de la suspension du camion, pointée vers l'arrière du camion.
- Figure 27(d) : l'alarme est placée à l'arrière du camion, sous celui-ci, sur le cadre de la plate-forme, orientée vers le devant du camion.
- Figure 27(e) : l'alarme est derrière la porte d'accès sur le côté, à l'intérieur du compartiment arrière. Elle pointe vers l'arrière du véhicule.
- Figure 27(f) : l'alarme est bien à l'arrière du véhicule, au centre, mais est placée derrière la plaque d'immatriculation et pointe vers le devant du véhicule.
- Figure 27(g) : l'alarme est correctement placée de façon visible, orientée vers l'arrière. Elle est par contre décalée par rapport au centre du camion.



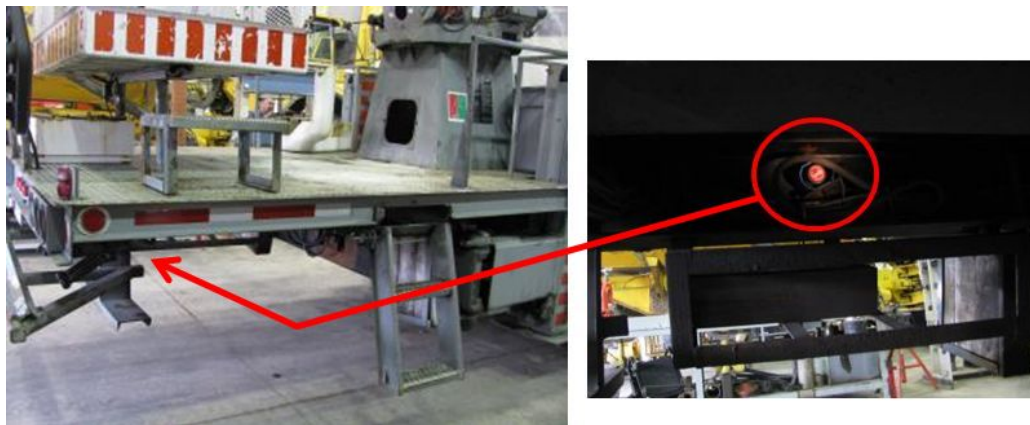
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Figure 27 : Exemples de positionnements d'alarmes comme observés sur le terrain.

Il importe tout de même de mentionner que des installations correctes (alarme visible, centrée, à l'arrière du véhicule et orientée vers l'arrière) ont aussi été observées sur de nombreux camions (voir un exemple à la figure 28). Il n'est toutefois pas possible d'estimer dans quelle proportion des installations « non appropriées » sont présentes, mais celles-ci sont observées régulièrement et ne représentent pas des exceptions.

**Figure 28 : Exemple d'un positionnement d'alarme jugé adéquat**

7.2 Méthodologie

L'objet de ce volet est de déterminer l'effet du positionnement de l'alarme sur la distribution des niveaux sonores derrière un véhicule. Deux alarmes à niveau sonore fixe ont été testées : une alarme tonale (Grote, modèle 73030) et une alarme large bande (Brigade Electronics, modèle BBS-107 Heavy duty). Le camion utilisé était un camion-benne de marque Caterpillar (figure 29).

Cinq positions ont été retenues. Une position dite optimale (position n°1 : alarme visible, centrée, à l'arrière du véhicule et orientée vers l'arrière) et quatre autres jugées représentatives de ce qui a été observé sur le terrain (positions n°2-5) (figure 30).



Figure 29 : Camion-benne utilisé pour les tests sur le positionnement des alarmes.

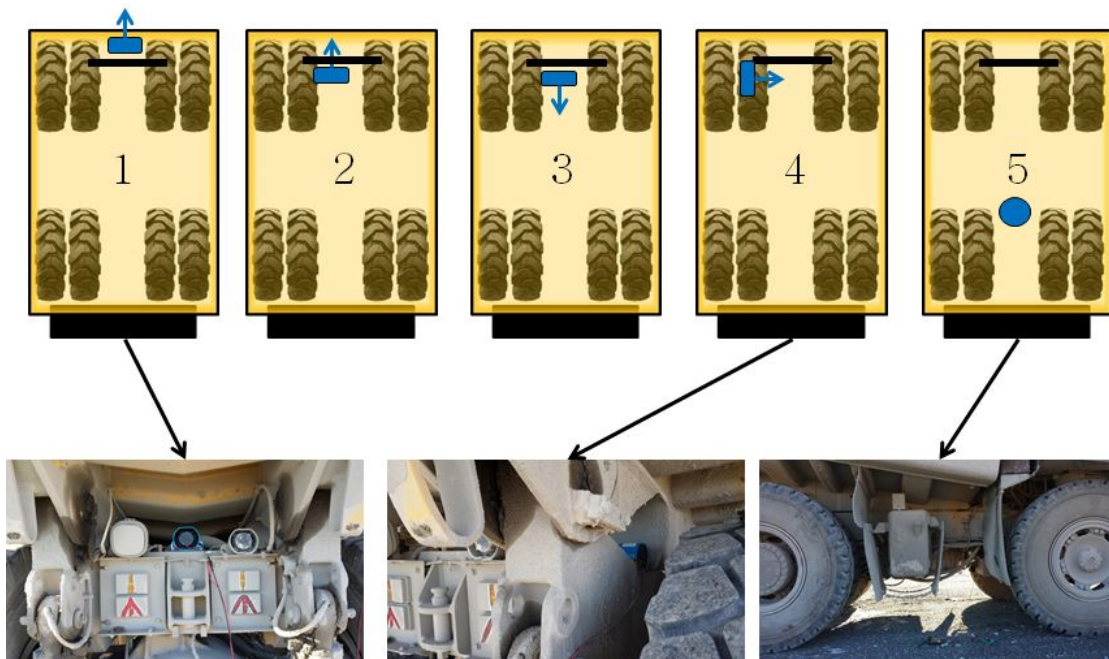


Figure 30 : Illustration des 5 positions d'alarme utilisées pour la mesure de la distribution sonore. L'alarme est illustrée en bleu et la flèche indique son orientation (pour la position 5, l'alarme est orientée vers le sol). Le trait horizontal noir à l'arrière dénote une traverse massive en acier du châssis du camion.

Pour mesurer le niveau sonore généré par l'alarme derrière le véhicule, un système de balayage microphonique automatisé a été développé (figure 31). Le système consistait en un microphone se déplaçant sur un rail d'une longueur de 4 m à l'aide d'un moteur. Afin d'échantillonner correctement le champ sonore, le microphone se déplaçait à une vitesse constante suffisamment faible pour que le contenu fréquentiel des alarmes soit bien couvert. Les vitesses de déplacement du microphone étaient de 2,83 cm/s pour l'alarme large bande et de 4,6 cm/s pour l'alarme tonale.

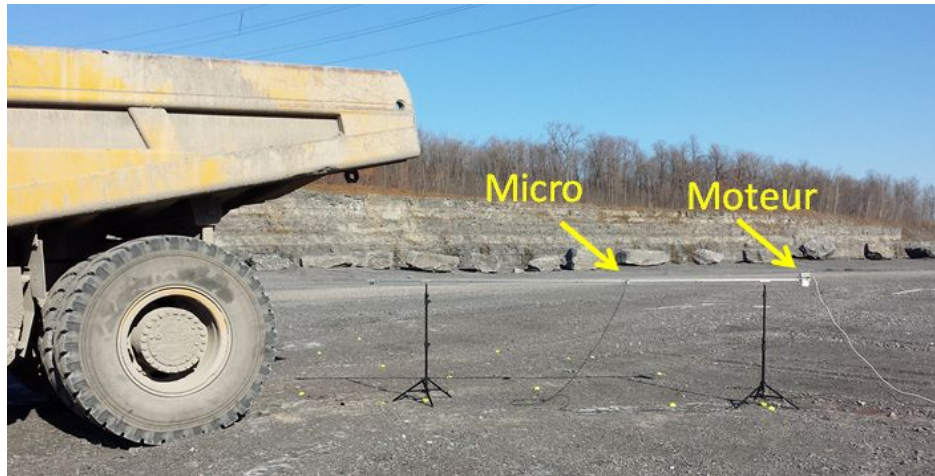


Figure 31 : Illustration du rail utilisé pour déplacer le microphone de mesure derrière le camion.

Pour chaque type et position d'alarme, 7 lignes de balayage placées directement derrière le camion ont été utilisées (figure 32). Pour chaque ligne, le signal temporel capté par le microphone était enregistré en continu pendant le déplacement de celui-ci pour être ensuite analysé à l'aide de routines de calcul développées sous Matlab¹⁰. Les niveaux sonores L_{eq} , intégrés sur 1 seconde et exprimés en dBA, ont été obtenus pour chacune des lignes.

¹⁰ Mathworks Inc., MA - <https://fr.mathworks.com/>

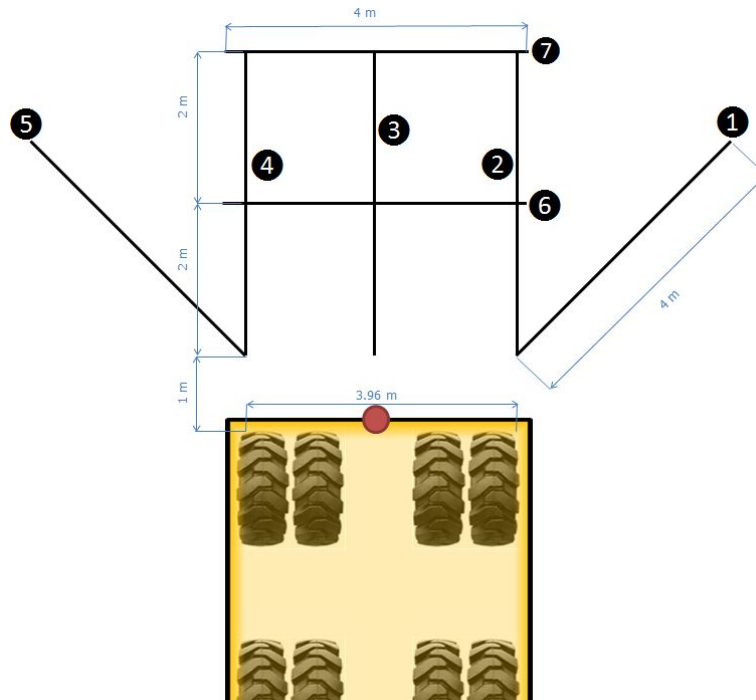


Figure 32 : Lignes de balayage utilisées pour la mesure de la distribution des niveaux sonores derrière le camion. Le point rouge indique un point de référence.

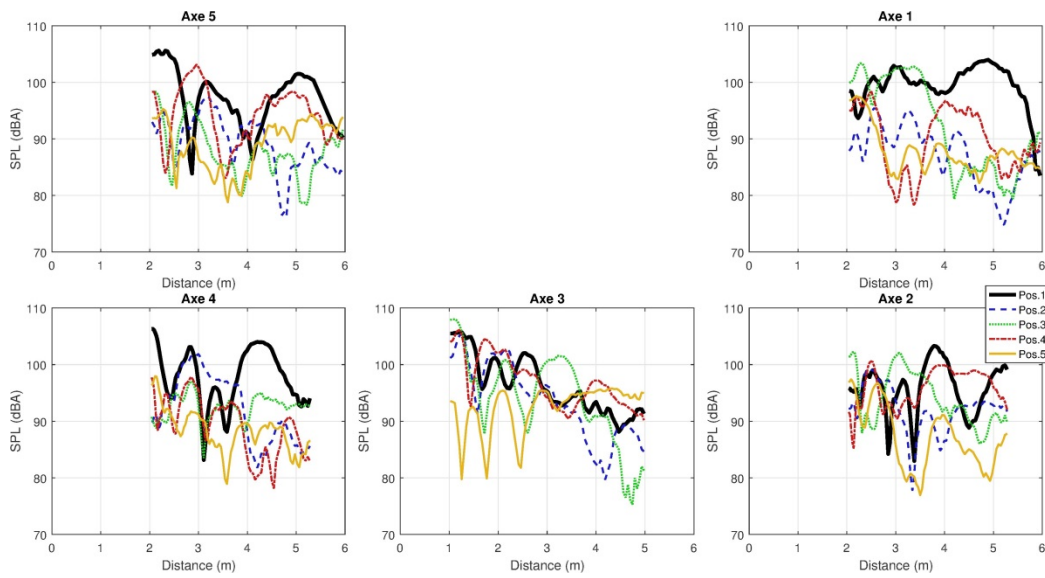
7.3 Résultats

Les niveaux sonores obtenus derrière le camion pour les alarmes dans cinq positions sont présentés à la figure 33 (alarme tonale) et à la figure 34 (alarme large bande). La courbe en trait noir plus épais représente les résultats obtenus dans le cas où l'alarme est positionnée de façon jugée optimale (position n°1).

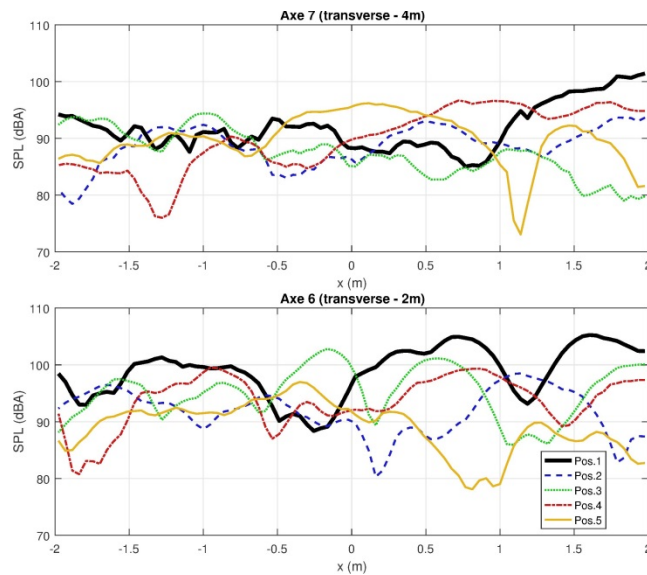
D'abord, les résultats pour l'alarme tonale confirment bel et bien ce qui avait déjà été mis en évidence par le passé (voir par exemple [7]), soit la variation importante du niveau sonore (jusqu'à 15-20 dB) sur de courtes distances de l'ordre de 20-30 cm. Même en s'éloignant du véhicule, le niveau sonore peut soudainement augmenter ou encore diminuer rapidement. Aussi, même en se déplaçant de façon transversale par rapport au camion (axes 6 et 7), des variations importantes du niveau sonore, que l'on soit à 2 m ou à 4 m du camion, sont observées. Par ailleurs, toujours pour l'alarme tonale, la distribution des niveaux sonores change de façon significative lorsque la position de l'alarme est modifiée. Même quand l'alarme est placée à l'avant du véhicule, pointée vers le sol (position n°5), il y a des endroits où le niveau sonore à l'arrière du camion est plus élevé que celui atteint avec la position optimale. Ces variations importantes et rapides du niveau sonore sont principalement dues au caractère tonal du signal, pour lequel les effets d'interférences constructives et destructives ainsi que les effets des multiples réflexions sur le sol et sur le camion sont magnifiés.

Pour l'alarme large bande, les effets d'interférences sont fortement atténués par le fait que l'alarme génère un signal sonore sur un large spectre fréquentiel. C'est effectivement ce qu'on

observe à la figure 34, et qui confirme les résultats obtenus dans le passé. Pour cette alarme, les niveaux sonores décroissent de façon monotone lorsqu'on s'éloigne du camion, comme désiré. Aussi, les niveaux sonores varient peu lorsqu'on se déplace le long des axes transversaux (6 et 7). Toutefois, en éloignant l'alarme de sa position optimale, les niveaux sonores chutent de façon significative. La chute est de l'ordre de 5 dB pour les positions où l'alarme est placée à l'arrière du véhicule, mais mal orientée ou placée derrière un élément du châssis (positions n°2, 3 et 4). Pour la position n°5, plus à l'avant du véhicule et orientée vers le sol, la chute des niveaux de pression sonore est de plus de 10 dB par rapport au niveau obtenu dans la position optimale.

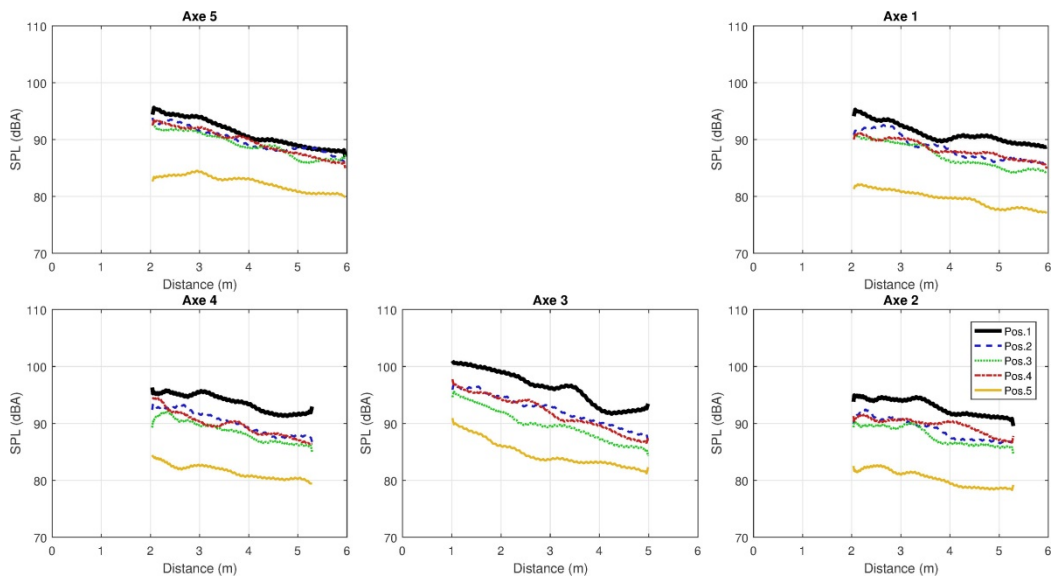


(a)

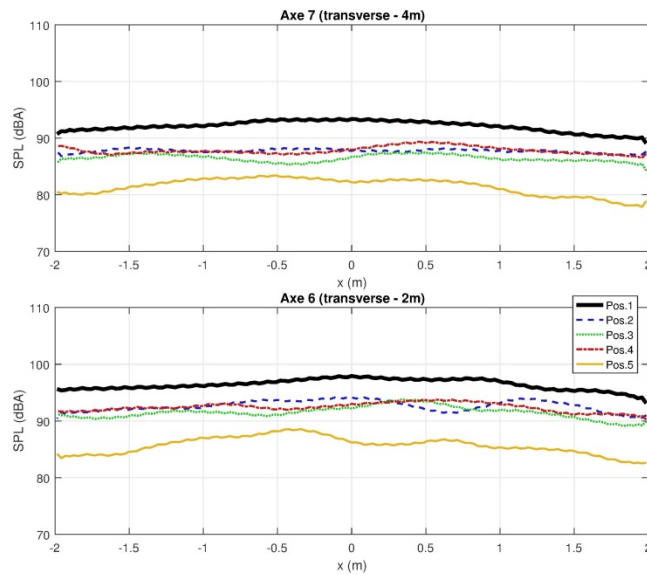


(b)

Figure 33 : Alarme tonale - niveaux de pression sonore derrière le camion pour différentes positions d'alarme : (a) axes 1 à 5 (abscisse : distance par rapport au point de référence); (b) axes transverses 6 et 7 (abscisse : distance par rapport à l'axe 3 [axe central]).



(a)



(b)

Figure 34 : Alarme large bande - niveaux de pression sonore derrière le camion pour différentes positions d’alarme : (a) axes 1 à 5 (abscisse : distance par rapport au point de référence); (b) axes transverses 6 et 7 (abscisse : distance par rapport à l’axe 3 [axe central]).

7.4 Discussion

Comme le montrent les résultats, l'effet du positionnement d'une alarme est bien différent selon que celle-ci soit de type tonal ou à large bande. Pour l'alarme tonale, les niveaux de pression sonore varient spatialement de façon considérable derrière le véhicule et d'une position d'alarme à l'autre à cause des phénomènes d'interférences constructives et destructives. Il devient alors très difficile de prédire la distribution du niveau sonore derrière les véhicules et d'estimer quel sera l'impact du choix d'une position de l'alarme et ainsi, de faire des recommandations précises. De plus, à cause des phénomènes d'interférence, on peut supposer que le signal sonore émis par une alarme tonale positionnée sous un véhicule ou derrière une structure sera propagé de façon complexe. Rappelons par ailleurs les résultats obtenus sur les alarmes autoajustables, lesquels montraient une amplification considérable des niveaux de pression sonore derrière les véhicules avec l'alarme tonale lorsque celle-ci était placée sous le châssis, ce qui pourrait engendrer un accroissement de la gêne environnementale. En ce qui concerne la localisation d'une telle alarme, les résultats présentés à la section 5 illustrent à quel point il peut être difficile de localiser une ou deux alarmes tonales dans des conditions optimales de laboratoire. Sur le terrain, un travailleur situé derrière le véhicule éprouvera donc fort possiblement des difficultés à localiser l'alarme. À ce sujet, les travaux d'Heckman et coll. [22] suggèrent d'éviter de positionner l'alarme trop en hauteur ou sous le châssis du véhicule. Ainsi, afin de minimiser les problèmes de localisation auditive et d'assurer le plus possible la sécurité avec les alarmes tonales, il semble de mise de recommander que de telles alarmes soient placées à la position optimale, soit à l'arrière du camion, visible directement par un travailleur se trouvant dans la zone de danger, à une hauteur entre 1 et 2 m par rapport au sol.

En ce qui concerne l'alarme large bande, à la lueur des résultats sur le positionnement et ceux portant sur la localisation auditive en laboratoire, l'effet attendu du positionnement de l'alarme sur la localisation auditive devait être moins important que dans le cas de l'alarme tonale. Malgré tout, des baisses appréciables des niveaux de pression sonore mesurés derrière les véhicules ont été observées lorsqu'on s'éloigne de la position optimale, ce qui pourrait engendrer des problèmes de détection, d'estimation de la distance ou d'interprétation du signal de danger. Ainsi, il est recommandé de toujours placer l'alarme large bande dans une position optimale afin de minimiser les impacts négatifs.

Un problème important demeure d'actualité. Il concerne le positionnement des alarmes sur les tracteurs semi-remorques. Pour ces véhicules, l'alarme est généralement placée à l'arrière du châssis, tout près de l'endroit où est ancrée la semi-remorque. Lorsque le tracteur tire une semi-remorque, l'alarme est donc située loin de l'arrière du véhicule, très loin de la zone de danger. Il est alors fort probable que les niveaux sonores soient tout à fait différents dans la zone de danger par rapport à l'arrière du camion, d'autant plus que l'alarme peut se retrouver assez confinée sous la semi-remorque lorsqu'elle celle-ci est ancrée au tracteur. Des dangers peuvent donc être pressentis pour les individus, travailleurs ou piétons se trouvant derrière des semi-remorques (mauvaise localisation auditive, mauvaise interprétation de la distance, problème de détection, etc.). Idéalement, il semble préférable qu'une alarme soit placée directement à l'arrière de la semi-remorque et que celle-ci soit mise en opération, au lieu de celle du camion, lorsque la semi-remorque est ancrée à celui-ci. Ce n'est toutefois pas ce qui est observé en pratique actuellement sur le terrain. Les données obtenues dans la présente étude ne permettent cependant pas de faire

des recommandations plus poussées quant à l'utilisation des alarmes avec des tracteurs semi-remorques. Ce problème demeure entier et devrait faire l'objet de plus de recherches dans le futur.

8. CONCLUSION

Ce rapport fait état de travaux portant sur l'analyse de la propagation sonore, l'audibilité et la localisation auditive des deux grands types d'alarmes de recul (conventionnelle [« bip-bip »] et large bande [« pshit-pshit »]) pour un ensemble de situations typiques des milieux de travail en vue de favoriser une utilisation optimale de ces dispositifs et de minimiser les risques d'accident liés au recul des véhicules lourds. Les travaux de recherche comportaient quatre parties distinctes : i) la détermination de l'ajustement optimal du niveau des alarmes; ii) la localisation auditive des alarmes; iii) le fonctionnement des alarmes autoajustables; iv) l'effet du positionnement des alarmes sur la distribution sonore à l'arrière des camions. Les deux premières parties nécessitaient la participation de sujets humains en laboratoire qui avaient tous une audition normale sans protecteurs auditifs et œuvraient dans des milieux ouverts. Les deux dernières exigeaient plutôt des mesures de bruit en laboratoire et sur le terrain sur des véhicules.

8.1 Constats

8.1.1 Ajustement optimal du niveau des alarmes

Les alarmes demeurent audibles à des niveaux bien inférieurs à celui du bruit ambiant et induisent une réaction à des niveaux légèrement inférieurs au bruit ambiant. Bien que les seuils de détection des alarmes puissent dépendre des caractéristiques spectrales et temporelles du bruit ambiant, il est intéressant de noter que les seuils de réaction sont moins sensibles à celles-ci. Il semblerait donc qu'un rapport S/B (différence entre le niveau émis par l'alarme et le niveau du bruit ambiant) de 0 dB serait adéquat pour permettre aux individus de facilement détecter les alarmes et d'y réagir. Ce rapport S/B de 0 dB présenterait l'avantage de permettre l'ajustement des alarmes à des niveaux sonores beaucoup moins élevés que la pratique courante dans plusieurs milieux de travail et ainsi limiter la nuisance environnementale. L'établissement de ce rapport de 0 dB peut se faire sur la base des méthodes tiers d'octave ou octave de la norme ISO 7731 ou plus facilement, par la méthode préconisée par la norme ISO 9533, à la condition d'intégrer toutes les sources de bruit présentes dans l'environnement dans la mesure du bruit ambiant à l'arrière du véhicule.

Le temps de dégagement est relativement insensible au type d'alarme, avec une valeur moyenne de 2,8 secondes pour les deux types d'alarmes. Pour assurer un temps de dégagement qui respecte la valeur du temps de réaction préconisée par la norme SAE J1741, soit 2 secondes, il semblerait qu'une alarme ajustée à un rapport S/B de 0 dB à 7 m, conformément à la norme ISO 9533, soit adéquate en autant que la vitesse de recul du véhicule ne dépasse pas 12,6 km/h.

8.1.2 Localisation auditive des alarmes

Pour la localisation auditive d'une seule alarme, la tâche utilisée dans l'expérimentation n'avait pas d'effet sur le taux global moyen de réussite. Par contre, un effet du type d'alarme, l'alarme large bande étant nettement supérieure à l'alarme tonale. En fait, le taux moyen de réussite est presque doublé et l'erreur angulaire moyenne est réduite d'au moins la moitié avec l'alarme large bande. Par ailleurs, le taux de confusion avant/arrière et gauche/droite est également réduit d'au moins la moitié pour l'alarme large bande comparée à l'alarme tonale. Pour les deux types

d'alarmes, les confusions avant/arrière sont nettement plus fréquentes que celles de type gauche/droite, qui ne surviennent que dans un faible pourcentage des présentations. Les confusions avant/arrière sont généralement celles pouvant entraîner le plus d'entraves à la sécurité des travailleurs.

En ce qui concerne la localisation sonore de deux alarmes présentées simultanément ou quasi simultanément, un net avantage de l'alarme large bande est toujours observé. Le nombre de paires bien identifiées était supérieur (86 % : large bande c. 33 % : tonale) de même que le taux global de réussite (92 % : large bande c. 57 % : tonale). Autrement dit, en présence de deux véhicules munis d'alarmes tonales, une fois sur trois un travailleur risque de ne pas localiser correctement leur provenance, ce qui pourrait compromettre sa sécurité.

Par ailleurs, lors des expérimentations avec deux alarmes, on note que dans 17 % des cas aucune des deux alarmes tonales n'a pu être localisée correctement (c. 1 % pour l'alarme large bande).

8.1.3 Alarmes autoajustables

Le niveau des alarmes autoajustables testées (une large bande et une tonale) s'ajuste automatiquement d'un cycle à l'autre en se basant sur une mesure du bruit ambiant obtenu juste avant chaque cycle. Le rapport S/B obtenu peut varier de façon importante sur de très courtes périodes de temps. Il peut donc en résulter des variations importantes du bruit généré par les alarmes sur un court laps de temps, même si le bruit ambiant varie peu. En fait, des valeurs de S/B supérieures à 15 dB ont été obtenues dans la pratique. Bien que les deux types d'alarmes voient leur niveau s'ajuster en fonction du bruit ambiant, les principes algorithmiques qui contrôlent l'ajustement sont différents d'un modèle à l'autre. Finalement, l'utilisation d'alarmes autoajustables dans des environnements présentant beaucoup de réverbération (p. ex. nombreuses réflexions) peut mener à des niveaux sonores élevés.

8.1.4 Effet du positionnement des alarmes

Les observations en milieu de travail montrent, qu'en pratique, les alarmes sont souvent placées dans des endroits inappropriés d'un point de vue acoustique, que ce soit pour des raisons fonctionnelles, liées à la maintenance ou autres, ce qui peut compromettre la sécurité des travailleurs.

Les résultats des présents travaux pour cinq positions différentes d'alarmes montrent que la distribution sonore derrière les véhicules dépend significativement de la position de l'alarme. La distribution sonore est beaucoup plus uniforme avec l'alarme large bande, pour laquelle une décroissance régulière des niveaux est observée lorsqu'on s'éloigne du véhicule. Par contre, l'amplitude des niveaux sonores est affectée sensiblement lorsqu'on s'éloigne de la position optimale. Pour l'alarme tonale, les effets d'interférence constructive et destructive sont si importants que des distributions sonores allant un peu dans tous les sens sont obtenues, peu importe la position de l'alarme.

Les résultats sur le positionnement des alarmes portaient essentiellement sur la distribution sonore derrière les véhicules. À la lumière de ces résultats, conjugués à ceux de Heckman et coll.

[23], il est de mise de s'interroger sur l'effet de positionner une alarme ailleurs qu'en position optimale sur la localisation auditive de celle-ci, et donc sur la perception de la position du véhicule qui recule.

8.2 Recommandations

La meilleure prévention des accidents dus aux manœuvres de recul demeure de limiter au maximum l'utilisation de telles manœuvres, ainsi que de restreindre le plus possible la présence de piétons près des véhicules appelés à reculer, à l'aide de plans de circulation efficaces.

Malgré tout, l'alarme de recul demeure un moyen utilisé pour prévenir les individus se trouvant autour des véhicules. Les résultats obtenus dans ce projet avec les deux types d'alarmes (tonale et large bande) permettent de formuler quelques recommandations qui peuvent mener à une utilisation plus sécuritaire ou, à tout le moins, optimale :

- Dans la mesure du possible, les alarmes doivent être placées dans une position optimale, soit à l'arrière du camion, visibles directement par un travailleur se trouvant dans la zone de danger, à une hauteur entre 1 et 2 m à partir du sol.
- La norme ISO 9533, à laquelle on ajoute une condition : l'inclusion de toutes les sources de bruit autour du véhicule lors de la mesure du bruit ambiant, doit être utilisée pour ajuster le niveau sonore d'une alarme.
- La vitesse maximale de recul des véhicules doit être fixée à 12,6 km/h afin de garantir le bon rapport S/B prescrit par la norme ISO 9533 et d'assurer un temps de réaction minimal de 2 secondes (conforme à la norme SAE J1741).
- L'utilisation des alarmes large bande et la limitation de la vitesse de recul des véhicules doivent être privilégiées dans des situations lors desquelles un ou plusieurs véhicules circulent dans l'aire de travail et que les travailleurs ne peuvent prédire leurs déplacements.
- La procédure d'ajustement automatique des niveaux de pression sonore des alarmes autoajustables doit être revue. Dans ce sens, l'équipe de recherche pourrait soutenir les organismes de normalisation pour une mise à jour des normes.

Finalement, les recommandations formulées sont basées sur des résultats obtenus avec des auditeurs dont la capacité d'audition est normale (sujets sans pertes auditives), ne portant pas de protecteurs auditifs ou de casques de protection et œuvrant en milieux ouverts. L'effet de ces conditions sur la perception et la localisation auditives des alarmes reste à être étudié.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Direction des communications et des relations publiques, Commission de la santé et de la sécurité du travail., « Revue de presse. Le vendredi 9 septembre 2011. », (2011).
- [2] C. Laroche, M.-J. Ross, L. Lefebvre, et R. Larocque, *Détermination des caractéristiques optimales des alarmes de recul*, Montréal, Canada: Études et recherches / Rapport R-117 / IRSST, (1995).
- [3] S. Blouin, *Bilan de connaissances sur les dispositifs de détection de personnes lors des manoeuvres de recul des véhicules dans les chantiers de construction*, Montréal, Canada: Études et recherches / Rapport B-067 / IRSST, (2005).
- [4] W. Murray, J. Mills, et P. Moore, *Reversing accidents in UK. transport fleets 1996-97*, UK: Transport and Logistics Research Unit, University of Huddersfield, (1998).
- [5] NIOSH, *The Worker Health Chartbook 2004*, NIOSH Publication 2004-146, (2004).
- [6] Health and Safety Executive, *Improving the safety of workers in the vicinity of mobile plant*, HSE Report number 358, (2001).
- [7] V. Vaillancourt et al., *Sécurité des travailleurs derrière les véhicules lourds: Évaluation de trois types d'alarmes sonores de recul*, Montréal, Canada: Études et recherches / Rapport R-763 / IRSST, (2012), p. 111.
- [8] SAE, « Alarm – Backup – Electric Laboratory Performance Testing », *Society of Automotive Engineering, SAE J994*, (2009).
- [9] ISO, « Ergonomics — Danger signals for public and work areas — Auditory danger signals », *International Standards Organization, ISO 7731*, (2003).
- [10] ISO, « Earth-moving machinery -- Machine-mounted forward and reverse audible warning alarm -- Sound test method », *International Standards Organization, ISO 9533*, (2010).
- [11] P.A. Wilkins et A.M. Martin, *The effects of hearing protectors on the perception of warning and indicator sounds - a general review*, University of Southampton: Technical report No. 98, Institute of Sound and Vibration, (1978).
- [12] R.D. Patterson, « Guidelines for auditory warning systems in civil aircraft », (1982).
- [13] G.J. Coleman et al., *Communication in noisy environments*, Edimburgh: Final report on CEC contract 7203/00/8/09, Institute of Occupational Medicine, (1984).
- [14] C. Laroche, H.T. Quoc, R. Héту, et S. McDuff, « 'Detectsound': A computerized model for predicting the detectability of warning signals in noisy workplaces », *Applied Acoustics*, **32** (3), p. 193-214, (1991).
- [15] Y. Zheng et al., « A psychoacoustical model for specifying the level and spectrum of acoustic warning signals in the workplace », *Journal of occupational and environmental hygiene*, **4** (2), p. 87-98, (2007).
- [16] C. Giguère, C. Laroche, A. Osman, et Y. Zheng, « Optimal installation of audible warning systems in the noisy workplace », *Proceedings of the 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN)*, Mashantucket, USA: (2008), p. 197-204.
- [17] T.G. Dolan, « Perception of train horns », *2006 Western regional grade-crossing safety training conference*, Vancouver, Washington, USA: (2006).
- [18] SAE, « Discriminating back-up alarm system », *Society of Automotive Engineering, SAE J1741*, (1999).
- [19] M.S. McDaniel, D.C. Copley, et D.E. Zimmermann, « Application of a self-adjusting audible warning device as a backup alarm for mobile earthmoving equipment »,

- Proceedings of the 2005 SAE Commercial Vehicle Engineering Conference*, Rosement, IL, USA: (2005).
- [20] M. Burgess et M. McCarty, *Review of alternatives to « beeper » alarms for construction equipment*, Report AVU 0129, Acoustics & Vibration Unit, School of Aerospace, Civil & Mechanical Engineering, UNSW, Canberra, Australia, (2009), p. 68.
- [21] C.J. Schexnayder et J.J. Ernzen, *Mitigation of Nighttime Construction Noise, Vibrations, and Other Nuisances*, Transportation Research Board, (1999).
- [22] C.J. Schexnayder et J. Ernzen, « Effective Noise Control During Nighttime Construction », « Making Work Zones Work Better » *Workshops Series*, USA: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, (2004).
- [23] G.M. Heckman, R.S. Kim, F.S. Khan, C. Bare, et G.T. Yamaguchi, *Auditory Localization of Backup Alarms: The Effects of Alarm Mounting Location*, Warrendale, PA: SAE International, (2011) ; <http://papers.sae.org/2011-01-0086/>.
- [24] C. Faller et J. Merimaa, « Source localization in complex listening situations: Selection of binaural cues based on interaural coherence », *The Journal of the Acoustical Society of America*, **116** (5), p. 3075-3089, (2004).
- [25] N. Merat et J.A. Groeger, « Working-memory and auditory localization: demand for central resources impairs performance », *The Quarterly journal of experimental psychology. A, Human experimental psychology*, **56** (3), p. 531-549, (2003).
- [26] E. Christian, *The detection of warning signal while wearing active noise reduction and passive hearing protection devices*, Master of Science thesis, Industrial and Systems Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, (1999).
- [27] P.A. Gosselin et J.-P. Gagné, « Use of dual-task paradigm to measure listening effort », *Canadian Journal of Speech-Language Pathology and Audiology*, **34** (1), p. 43-51, (2010).
- [28] F.N. Martin et J.G. Clark, *Introduction to audiology*, Boston: Allyn and Bacon, (2003).
- [29] ANSI, « Methods for Manual Pure-Tone Threshold Audiometry », *American National Standard, ANSI S3.21-2004 (R2009)*, (2009) .
- [30] C. Laroche et L. Lefebvre, « Determination of optimal acoustic features for reverse alarms: field measurements and the design of a sound propagation model », *Ergonomics*, **41** (8), p. 1203-1221, (1998).
- [31] M.D. Good et R.H. Gilkey, « Sound localization in noise: the effect of signal-to-noise ratio », *The Journal of the Acoustical Society of America*, **99** (2), p. 1108-1117, (1996).