

Étude de l'applicabilité de haut-parleurs paramétriques au développement de nouveaux concepts d'alarmes de recul

Olivier Robin
Alain Berry
Hugues Nélisse

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1117



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
2021
ISBN : 978-2-89797-140-3

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
Mars 2021

Étude de l'applicabilité de haut-parleurs paramétriques au développement de nouveaux concepts d'alarmes de recul

Olivier Robin¹, Alain Berry¹, Hugues Nélisse²

¹ Université de Sherbrooke

² IRSST

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1117



Avis de non-responsabilité

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

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

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



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs du rapport tiennent à remercier les membres du comité de suivi qui ont participé aux réunions et aux discussions au cours de cette étude.

Ils expriment leur considération à Mme Chantal Tellier pour son suivi lors des étapes administratives et à M. François Ouellet pour son aide à l'organisation générale des réunions de suivi.

Les auteurs tiennent enfin à reconnaître la précieuse contribution de Mme Tamara Krpic aux campagnes de mesures et à M. Patrick Lévesque pour son soutien technique. Le soutien de M. Dany Ducharme et de M. Jérôme Wubbolts lors des tests au CTA est également ici souligné.

SOMMAIRE

L'utilisation d'alarmes de recul est obligatoire sur une majorité de véhicules lourds et reste un moyen largement utilisé pour prévenir et alerter les personnes œuvrant à proximité de ces véhicules. Des études antérieures, réalisées par l'IRSST, ont montré les limites d'efficacité des alarmes utilisées en milieu de travail pour minimiser le risque à la sécurité des travailleurs. De plus, les alarmes de recul, par le son de niveau élevé et très typé qu'elles produisent, sont régulièrement une source de nuisance importante pour les travailleurs, et aussi pour les riverains. Ces problèmes de gêne et de perception sonore pour les travailleurs sont amplifiés lorsque ceux-ci œuvrent dans des milieux semi-ouverts ou complètement fermés (entrepôts, etc.). Dans ces environnements, de nombreuses réflexions sonores sur les murs, les planchers et les plafonds font augmenter le niveau de bruit de façon conséquente, et créent des réflexions parasites gênant la perception. Or, il n'existe pas de solutions éprouvées permettant de s'attaquer à tous ces problèmes.

L'étude proposée vise à explorer l'utilisation de la technologie du haut-parleur paramétrique pour la conception d'une alarme de recul directionnelle. Cette technologie existe depuis de nombreuses années pour des applications audio. Elle est récemment devenue plus accessible par sa miniaturisation et une baisse des coûts. Ce type de haut-parleur a la particularité de produire un champ sonore focalisé, pouvant être dirigé et concentré dans des directions ou des zones spécifiques. En dehors de ces zones, le son produit n'est pas ou peu perceptible, ce qui pourrait constituer une solution aux problèmes évoqués précédemment. Le travail présenté ici vise une preuve de concept pour laquelle le cas du chariot élévateur est considéré. L'utilisation de ces engins est courante dans des zones de chantier, et est très répandue dans des zones closes et réverbérantes (chargement de remorques, hangars).

En parallèle de l'étude de l'applicabilité de cette nouvelle technologie aux alarmes de recul, une comparaison étendue des deux types d'alarmes de recul commerciales, actuellement disponibles, est effectuée. En effet, l'alarme tonale, bien décrite par l'onomatopée « bip-bip », est source d'une gêne environnementale importante et souffre de plusieurs limitations comme des variations importantes de niveaux acoustiques en fonction de la distance. Un modèle d'alarme de type large bande, maintenant disponible sur le marché, peut être décrit par l'onomatopée « pschit-pschit ». Ce nouveau type d'alarme montre *a priori* des caractéristiques intéressantes en termes de directivité, d'homogénéité du champ de pression généré et de réduction de la gêne environnementale. Néanmoins, très peu d'études ont comparé les performances de ces deux types d'alarmes sur le terrain, et aucune étude comparative de laboratoire n'a été réalisée à ce jour.

Dans cette étude, les deux types d'alarmes commerciales et deux modèles de haut-parleurs paramétriques commerciaux de dimensions différentes sont d'abord testés de manière approfondie en laboratoire (mesure de directivité et d'atténuation en fonction de la distance). Des mesures tridimensionnelles du champ de pression acoustique rayonnée sont effectuées en fonction du type de signal de l'alarme (tonale ou large bande) et de l'environnement (semi-anéchoïque ou réverbérant). Les effets des conditions au sol et du montage sur une surface rigide sont également étudiés.

À la fin du projet, un prototype simplifié utilisant un haut-parleur paramétrique ainsi que les deux alarmes commerciales sont testés sur un chariot élévateur effectuant une manœuvre de recul dans un couloir industriel (milieu réfléchissant).

L'ensemble des résultats obtenus montrent que l'utilisation de haut-parleurs paramétriques est une voie prometteuse pour développer des alarmes de recul avec des avantages notables. Un premier avantage concerne la directivité très marquée qui n'est pas atteignable avec les alarmes commerciales actuelles et qui permet de circonscrire la diffusion d'un signal sonore à une zone précise. D'autres avantages découlent naturellement de cette directivité très importante, comme la limitation de l'exposition au bruit pour les conducteurs d'engins et les travailleurs environnants, ainsi qu'une gêne environnementale réduite.

Néanmoins, plusieurs limitations subsistent quant à une application immédiate. Une première limitation est le niveau acoustique peu élevé qui peut être atteint comparativement aux alarmes commerciales, qui est lié au fait que les haut-parleurs paramétriques utilisés ont été développés pour des applications audio et des signaux d'alimentation de faible tension (de l'ordre du volt). Ce point est facilement contournable par le développement d'un haut-parleur paramétrique dédié à l'application des alarmes de recul avec une alimentation de 5 à 10 volts. Une seconde limitation est la possible apparition d'une source sonore fictive par réflexion du faisceau directionnel sur une surface proche. L'étude a permis de suggérer une solution simple à ce problème, par la mise en place d'une grille perforée face au haut-parleur, qui résulte en une diffusion du signal émis et une réduction importante de cet effet adverse. La grille a de plus pour avantage de procurer une protection mécanique utile dans un contexte industriel.

Dans le cas des deux alarmes commerciales, l'étude permet également de mettre en lumière les performances généralement supérieures de l'alarme large bande par rapport à l'alarme tonale. En effet, l'ensemble des résultats collectés démontre que, comparativement à l'alarme tonale, l'alarme large bande est globalement moins sensible aux effets de sol, aux effets liés au local ou aux effets liés à la diffraction acoustique. Cette conclusion s'applique aussi bien au cas de mesures en laboratoire que lors des tests réalisés en conditions réalistes.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------------|
| REMERCIEMENTS | I |
| SOMMAIRE | III |
| LISTE DES TABLEAUX..... | IX |
| LISTE DES FIGURES | XI |
| LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS | XV |
| 1. INTRODUCTION | 1 |
| 2. ÉTAT DES CONNAISSANCES | 3 |
| 2.1 Problématique générale des alarmes de recul en milieu de travail..... | 3 |
| 2.2 L'alarme directionnelle : une solution potentielle ?..... | 5 |
| 2.2.1 Délimitation d'une zone de danger qui est fonction de la position de l'engin | 5 |
| 2.2.2 Limitation des effets de sol et des effets de réverbération..... | 6 |
| 2.2.3 Limitation de la gêne environnementale | 8 |
| 2.3 Systèmes d'alarme sonore directionnelle existants et développement proposé | 9 |
| 3. OBJECTIFS DE RECHERCHE..... | 13 |
| 3.1 Phase 1 : tester en laboratoire les transducteurs de manière individuelle | 13 |
| 3.2 Phase 2 : mettre en œuvre et tester en laboratoire un prototype optimisé en termes de performance et de directivité | 13 |
| 3.3 Phase 3 : tester sur chariot en conditions réalistes les alarmes de référence et le prototype..... | 13 |
| 4. MÉTHODOLOGIE | 15 |
| 4.1 Choix des alarmes de référence : alarme tonale et alarme large bande..... | 15 |
| 4.2 Choix des haut-parleurs paramétriques (HPP) de référence | 15 |
| 4.3 Mesure de la pression acoustique selon la norme SAE J994 | 16 |
| 4.4 Mesure de la décroissance spatiale et de la directivité en chambre semi-anéchoïque..... | 17 |
| 4.5 Mesures tridimensionnelles en chambre semi-anéchoïque et en chambre réverbérante | 19 |
| 4.6 Arrangement géométrique des haut-parleurs, utilisation de déflecteurs ou de grilles | 20 |
| 4.7 Mesures sur chariot élévateur en conditions réalistes..... | 22 |
| 4.7.1 Environnement de test..... | 22 |
| 4.7.2 Alarmes testées et installation sur le chariot élévateur..... | 23 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.7.3 | Position des microphones..... | 24 |
| 4.7.4 | Déroulement des essais | 27 |
| 5. | RÉSULTATS | 29 |
| 5.1 | Alarmes de référence : comparaison des signaux générés et conformité à la norme SAE J994 | 29 |
| 5.2 | Décroissance du niveau de pression acoustique en fonction de la distance : cas monodimensionnel..... | 30 |
| 5.2.1 | Décroissance théorique du niveau de pression acoustique pour une source ponctuelle omnidirectionnelle..... | 30 |
| 5.2.2 | Alarmes de référence..... | 32 |
| 5.2.3 | Haut-parleurs paramétriques (HPP) | 34 |
| 5.3 | Niveau de pression acoustique et directivité en fonction de l'angle | 35 |
| 5.3.1 | Alarmes de référence..... | 35 |
| 5.3.2 | Haut-parleurs paramétriques | 37 |
| 5.4 | Mesures tridimensionnelles en chambre semi-anéchoïque : cas des alarmes standards (alarmes de référence) | 38 |
| 5.4.1 | Environnement semi-anéchoïque avec condition de sol absorbant et de sol réfléchissant | 39 |
| 5.4.2 | Condition de sol réfléchissant avec montage sur une surface rigide..... | 41 |
| 5.5 | Mesures tridimensionnelles en chambre semi-anéchoïque : cas des HPP..... | 43 |
| 5.5.1 | Mesure en chambre semi-anéchoïque avec condition de sol absorbant..... | 43 |
| 5.5.2 | Conditions de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque, sans ou avec montage sur une surface rigide..... | 45 |
| 5.6 | Mesures tridimensionnelles en chambre réverbérante : cas des alarmes standards (alarmes de référence) | 49 |
| 5.7 | Mesures tridimensionnelles en chambre réverbérante : cas des HPP avec signal tonal ou large bande | 51 |
| 5.8 | Tests en laboratoire pour la modification de la directivité..... | 53 |
| 5.9 | Mesures sur chariot élévateur | 59 |
| 5.9.1 | Mesures statiques (chariot immobile) | 59 |
| 5.9.2 | Mesures dynamiques (chariot en mouvement)..... | 61 |
| 6. | DISCUSSION | 69 |
| 6.1 | Avantages et limites des alarmes commerciales actuelles | 69 |
| 6.2 | Avantages et limites du prototype utilisant un haut-parleur paramétrique du commerce..... | 69 |
| 7. | CONCLUSION..... | 71 |
| 7.1 | Principales conclusions concernant les alarmes commerciales tonale et large bande | 71 |

| | | |
|----------------------------|--|-----------|
| 7.2 | Principales conclusions sur l'utilisation de haut-parleurs paramétriques pour le développement d'alarmes de recul | 72 |
| 7.3 | Recommandations pour une poursuite de l'étude | 72 |
| BIBLIOGRAPHIE | | 75 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|------------|---|----|
| Tableau 1. | Position des microphones fixes | 25 |
| Tableau 2. | Positions des principaux creux du niveau acoustique en fonction de la distance, et réduction dans le cas d'un coefficient de réflexion unitaire..... | 32 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|------------|---|----|
| Figure 1. | Vue du dessus de la zone couverte par le signal audible généré par une alarme autour d'un véhicule en ligne droite ou oblique, et présence de deux travailleurs à proximité – (a) cas d'une alarme courante – (b) cas d'une alarme directionnelle. | 6 |
| Figure 2. | À gauche, chargement d'une semi-remorque avec un chariot élévateur – à droite, opération avec un chariot élévateur dans un hangar. | 6 |
| Figure 3. | Niveau de bruit (Leq : dB(A)) mesuré à l'arrière d'un véhicule pour différents types de signaux (alarme tonale, alarme large bande ou alarme multitonale) | 7 |
| Figure 4. | Illustration de la propagation sonore et de l'effet de la réverbération | 8 |
| Figure 5. | (a) Gêne environnementale générée dans le cas d'une alarme omnidirectionnelle (le travailleur en arrière du chariot reçoit le signal, mais c'est aussi le cas de toutes les autres personnes présentes, ainsi que le conducteur) - (b) Gêne environnementale générée dans le cas d'une alarme directionnelle (le travailleur en arrière du chariot reçoit le signal, mais pas les autres personnes présentes, ni le conducteur). | 9 |
| Figure 6. | Patron de directivité affiché par la compagnie ECCO pour leur alarme appelée SVX | 10 |
| Figure 7. | Illustrations des deux alarmes de recul commerciales testées dans l'étude | 15 |
| Figure 8. | Illustrations des deux HPP commerciaux testés dans l'étude | 16 |
| Figure 9. | Mesure selon la norme SAE J994 | 17 |
| Figure 10. | Mesure de la décroissance spatiale | 18 |
| Figure 11. | Illustration de la mesure de directivité en chambre semi-anéchoïque..... | 18 |
| Figure 12. | Mesure tridimensionnelle en conditions de laboratoire | 20 |
| Figure 13. | Résumé des configurations testées avec mise en place de déflecteurs, grilles et combinaisons de haut-parleurs. | 21 |
| Figure 14. | Illustrations de certaines des configurations testées | 22 |
| Figure 15. | Illustration de l'environnement de test pour les essais sur chariot élévateur | 23 |
| Figure 16. | Installation des alarmes à l'arrière du chariot élévateur. | 24 |
| Figure 17. | Position des microphones pour les essais statiques (a) et dynamiques (b)..... | 25 |
| Figure 18. | Photos montrant le positionnement des microphones pour les essais statiques (a) et dynamiques (b)..... | 26 |
| Figure 19. | Photo montrant le positionnement des deux microphones installés sur le chariot élévateur (cercles jaunes)..... | 27 |
| Figure 20. | (a) Signal généré par l'alarme tonale sur une durée de 1,5 seconde; (b) Signal généré par l'alarme large bande sur une durée de 1,5 seconde; (c) | |

| | | |
|------------|---|----|
| | Signal généré par l'alarme tonale sur une durée de 10 millisecondes; (d) Signal généré par l'alarme large bande sur une durée de 10 millisecondes..... | 29 |
| Figure 21. | Niveau de pression acoustique en dB(A) et par bandes de tiers d'octave mesurée selon la norme SAE J994 pour les deux alarmes de référence. | 30 |
| Figure 22. | Représentation schématique du problème..... | 31 |
| Figure 23. | Calcul théorique du niveau de pression acoustique en fonction de la distance .. | 32 |
| Figure 24. | Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de la distance pour les deux alarmes de référence, pour un sol absorbant..... | 33 |
| Figure 25. | Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de la distance pour les deux alarmes de référence, pour un sol réfléchissant..... | 33 |
| Figure 26. | Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de la distance pour les deux HPP avec excitation tonale et large bande, pour un sol absorbant..... | 35 |
| Figure 27. | Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de la distance pour les deux HPP avec excitation tonale et large bande, pour un sol réfléchissant..... | 35 |
| Figure 28. | Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de l'angle dans le plan horizontal (à gauche) et dans le plan vertical (à droite) pour les deux alarmes commerciales de référence. | 36 |
| Figure 29. | Directivité dans le plan horizontal et dans le plan vertical pour l'alarme tonale (à gauche) et pour l'alarme large bande (à droite). | 37 |
| Figure 30. | Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de l'angle dans le plan horizontal (à gauche) et dans le plan vertical (à droite) pour les deux HPP de référence et deux types d'excitation..... | 38 |
| Figure 31. | Condition de sol absorbant en salle semi-anéchoïque..... | 40 |
| Figure 32. | Condition de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque..... | 41 |
| Figure 33. | Condition de sol réfléchissant avec montage sur une surface rigide en salle semi-anéchoïque..... | 42 |
| Figure 34. | Condition de sol absorbant en salle semi-anéchoïque avec le signal tonal | 44 |
| Figure 35. | Condition de sol absorbant en salle semi-anéchoïque avec le signal large bande | 45 |
| Figure 36. | Condition de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque sans montage sur une surface rigide, avec le signal tonal | 46 |
| Figure 37. | Condition de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque sans montage sur une surface rigide, avec le signal large bande | 47 |
| Figure 38. | Condition de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque avec montage sur une surface rigide, avec le signal tonal | 48 |
| Figure 39. | Condition de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque avec montage sur une surface rigide, avec le signal large bande | 49 |
| Figure 40. | Test en chambre réverbérante | 50 |

| | | |
|------------|--|----|
| Figure 41. | Test en chambre réverbérante avec le signal tonal..... | 52 |
| Figure 42. | Test en chambre réverbérante avec le signal large bande | 53 |
| Figure 43. | Illustration du test réalisé et description du plan de mesure utilisé pour la représentation des figures 44 à 47..... | 54 |
| Figure 44. | Niveau de pression acoustique pour le HPP Acouspade seul | 55 |
| Figure 45. | Niveau de pression acoustique pour le HPP Acouspade avec grille perforée | 56 |
| Figure 46. | Niveau de pression acoustique pour le HPP Acouspade avec cylindre (déflecteur concave)..... | 57 |
| Figure 47. | Niveau de pression acoustique pour le HPP Acouspade avec cylindre inversé (déflecteur convexe)..... | 58 |
| Figure 48. | Niveau de pression acoustique pour le cas de l'utilisation de deux HPP SoundLazer | 59 |
| Figure 49. | Niveau de pression acoustique pour le cas de l'utilisation de deux HPP SoundLazer avec cylindre (déflecteur concave)..... | 59 |
| Figure 50. | Niveaux de bruit (L_{eq} (dBA)) aux microphones dans le couloir..... | 60 |
| Figure 51. | Processus de traitement des données dynamiques..... | 62 |
| Figure 52. | Exemple de résultats de L_{eq} en fonction du temps, obtenus avec l'alarme BBS-TEK 87 (signal large bande). | 62 |
| Figure 53. | Convention utilisée pour représenter le mouvement du chariot dans le temps lors des manœuvres dynamiques. | 63 |
| Figure 54. | Niveau de bruit « lissé » en fonction du temps aux microphones #5 (gauche) et #10 (droite) : alarme tonale Safe-T-Alert..... | 64 |
| Figure 55. | Niveau de bruit « lissé » en fonction du temps aux microphones #5 (gauche) et #10 (droite) : alarme large bande BBS-TEK 87..... | 64 |
| Figure 56. | Niveau de bruit « lissé » en fonction du temps aux microphones #5 (gauche) et #10 (droite) : HPP Acouspade avec grille et signal tonal. | 65 |
| Figure 57. | Niveau de bruit « lissé » en fonction du temps aux microphones #5 (gauche) et #10 (droite) : HPP Acouspade avec grille et signal large bande. | 65 |
| Figure 58. | Niveau de bruit sans lissage (gris) et son enveloppe (rouge), en fonction du temps, enregistré par le microphone fixé sur le chariot (gauche) et par le microphone #5 placé dans le couloir (droite) : alarme tonale Safe-T-Alert. | 66 |
| Figure 59. | Niveau de bruit sans lissage (gris) et son enveloppe (rouge), en fonction du temps, enregistré par le microphone fixé sur le chariot (gauche) et par le microphone #5 placé dans le couloir (droite) : alarme large bande BBS-TEK 87. | 67 |
| Figure 60. | Niveau de bruit sans lissage (gris) et son enveloppe (rouge), en fonction du temps, enregistré par le microphone fixé sur le chariot (gauche) et par le microphone #5 placé dans le couloir (droite) : HPP Acouspade avec grille et signal tonal. | 67 |

| | | |
|------------|--|----|
| Figure 61. | Niveau de bruit sans lissage (gris) et son enveloppe (rouge), en fonction du temps, enregistré par le microphone fixé sur le chariot (gauche) et par le microphone #5 placé dans le couloir (droite) : HPP Acouspade avec grille et signal large bande. | 68 |
| Figure 62. | Illustration des différences de niveau entre les zones éclairées et à l'ombre pour le HPP Acouspade : signal tonal (gauche) et signal large bande (droite)... | 68 |

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

HPP : Haut-parleur paramétrique

SPL : Niveau de pression sonore (*Sound Pressure Level*)

1. INTRODUCTION

L'utilisation des alarmes de recul, obligatoire sur une majorité de véhicules lourds, pose certains problèmes en milieu de travail. Notamment, l'alarme est utilisée principalement pour avertir, au moyen d'un son bien audible et distinct, de la présence d'un véhicule qui recule. Un niveau de bruit important est donc généré pour tenter d'assurer la sécurité des travailleurs ou piétons œuvrant près des véhicules. Cependant, ce bruit peut se propager bien au-delà de la zone de danger et être perçu par de nombreuses personnes n'ayant pas à répondre à ce message d'alerte, provoquant ainsi une gêne considérable. Les résidents vivant à proximité de milieux de travail où circulent un grand nombre de camions (chantiers de construction, zones de déchargement, cours de voirie, opérations de déneigement, etc.) sont particulièrement à risque d'être incommodés et dérangés par le bruit des alarmes de recul, à tel point qu'on rapporte souvent aux autorités compétentes de nombreuses plaintes de leur part. Les travailleurs œuvrant à proximité des camions équipés d'alarmes de recul sont aussi fort susceptibles d'être ennuyés et indisposés par le bruit des alarmes, puisqu'ils peuvent souvent être exposés à ce bruit sur de longues périodes durant leur quart de travail. Ces problèmes de gêne et de perception sonores sont amplifiés lorsque les véhicules circulent dans des milieux semi-ouverts ou complètement fermés (entrepôts, etc.), environnements où les nombreuses réflexions sonores sur les murs, les planchers et les plafonds font augmenter le niveau de bruit de façon conséquente, et créent des réflexions parasites gênant la perception du danger (localisation de la source sonore, perception de la distance).

Les divers intervenants en SST impliqués dans la sélection et l'utilisation des alarmes de recul font donc face à un dilemme : comment alerter de façon sécuritaire les piétons et travailleurs autour des véhicules tout en minimisant les niveaux de bruit nuisibles dans l'environnement? Il n'existe malheureusement pas de solution unique éprouvée permettant de s'attaquer à ces problèmes. Une alarme de recul est en fait un dispositif peu complexe. Elle consiste en un simple haut-parleur inséré dans un boîtier, le tout étant conçu de façon suffisamment solide et robuste pour supporter les rigueurs d'une utilisation sur des véhicules en milieu de travail (chocs, saletés, conditions météorologiques adverses). Les alarmes du commerce génèrent un son relativement omnidirectionnel et n'incluent, pour le moment, aucune technologie avancée permettant d'agir sur la répartition spatiale du son émis.

Ce rapport présente les résultats et les recommandations d'une étude visant à explorer l'utilisation de la technologie du haut-parleur paramétrique (HPP) pour la conception d'une alarme de recul directionnelle, c'est-à-dire une alarme qui pourrait émettre du bruit principalement dans une zone bien définie. Les HPP existent depuis plusieurs années, principalement dans le domaine audio et du divertissement. Ils ont la particularité de générer un champ sonore très focalisé, qui peut être orienté dans des directions ou zones bien spécifiques. En dehors de ces zones, le son généré est peu ou pas perceptible. C'est dans cette optique que cette étude vise à évaluer si cette technologie peut être utile pour le cas des alarmes de recul. Pour ce faire, le cas du chariot élévateur a été retenu. L'utilisation de ces engins est courante dans des zones de chantier, et très répandue dans des zones closes et réverbérantes (chargement de remorques, hangars, entrepôts). Par ailleurs, ses dimensions, plus modestes par rapport à des véhicules plus imposants, rendent le choix du chariot élévateur plus approprié pour une étude exploratoire effectuée en partie en laboratoire.

Dans cette étude, les caractéristiques et les performances de HPP ont été mesurées et comparées avec des alarmes du commerce : une alarme tonale (son « bip-bip ») et une alarme large bande (son « pschit-pschit »). Ces deux types d'alarmes ont déjà fait l'objet de projets antérieurs financés par l'IRSST. Ce rapport décrit en détail des essais effectués en laboratoire, mais aussi des essais effectués dans un environnement jugé plus réaliste, soit un long couloir où circule un chariot élévateur pour le déplacement de matériaux, de pièces et d'équipements. Diverses comparaisons permettant de statuer sur le potentiel de la technologie des HPP pour le développement d'une alarme directionnelle sont présentées.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 Problématique générale des alarmes de recul en milieu de travail

Des accidents, parfois mortels, impliquant des manœuvres de recul de véhicules lourds sont recensés chaque année, tant au Québec qu'un peu partout dans le monde (Laroche, Ross, Lefebvre et Larocque, 1995; Blouin, 2005; Murray, Mills et Moore, 1998; National Institute for Occupational Safety and Health, 2004; HSE, 2001) et ce, dans plusieurs secteurs d'activités (p. ex. : construction, transport, mines, municipalités). Bien qu'on préconise notamment une meilleure conception des plans de circulation et une réduction, voire l'élimination, des manœuvres de recul afin de réduire le nombre d'accidents de ce type, l'utilisation d'alarmes sonores de recul demeure obligatoire sur 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 réalisées par l'IRSST ont montré les limites d'efficacité des alarmes conventionnellement utilisées en milieu de travail (alarmes tonales générant un bruit décrit par l'onomatopée « bip-bip ») pour minimiser le risque à la sécurité des travailleurs (Vaillancourt, Nélisse, Laroche, Giguère, Boutin et Laferrière, 2012; Nélisse, Vaillancourt, Laroche, Giguère et Boutin, 2017).

D'un autre côté, les alarmes de recul, par le niveau sonore élevé et très typé qu'elles génèrent, sont très régulièrement une source de nuisance importante pour les riverains vivant à proximité d'environnements de travail dans lesquels on retrouve des véhicules susceptibles d'effectuer des manœuvres de recul. Un des avantages des avertisseurs sonores sur les avertisseurs visuels est qu'ils captent habituellement l'attention des individus, peu importe où est fixé leur regard.

Deux études récentes de l'IRSST ont porté sur l'étude des alarmes sonores de recul. Une première étude (#0099-7180), intitulée « Évaluation des alarmes de recul à large bande de fréquences – *Broadband alarm* » (Vaillancourt, Nélisse, Laroche, Giguère, Boutin et Laferrière, 2012), a permis de comparer l'alarme de type large bande (bruit décrit par l'onomatopée « pshit-pshit ») à l'alarme conventionnelle du point de vue de la sécurité des travailleurs. Il en ressortait notamment que l'alarme large bande est conforme à la norme en vigueur SAE J994 (Society of Automotive Engineers, 2009) et procure des avantages par rapport à l'alarme tonale conventionnelle au niveau de l'uniformité du champ sonore derrière les véhicules et d'une meilleure localisation sonore. Depuis la parution de ce rapport, une utilisation de plus en plus fréquente de l'alarme large bande est constatée au Québec (CBC News, 2016) au Canada (CTVNews, 2018; Times Colonist, 2016; CBC News, 2019) et dans d'autres pays (Burgess et McCarty, 2009), principalement en raison de sa sonorité jugée beaucoup moins agressive et dérangeante.

Plus récemment, l'étude #2012-0022, intitulée « Évaluation de la performance acoustique des alarmes de recul dans les milieux de travail ouverts en vue d'une utilisation optimale » (Nélisse, Vaillancourt, Laroche, Giguère et Boutin, 2017), a permis d'établir diverses conditions favorisant une utilisation optimale des alarmes dans les milieux ouverts. On y présente notamment quel serait le rapport signal sur bruit acceptable pour une bonne détection de l'alarme de même qu'on y discute de l'importance du positionnement de l'alarme sur la perception du bruit à l'arrière des véhicules. Le rapport final de cette étude formule des recommandations pratiques pour les intervenants en milieu de travail : 1) les alarmes devraient être placées dans une position

optimale, soit à l'arrière du camion et, être visibles directement par un travailleur se trouvant dans la zone de danger, à une hauteur entre 1 et 2 m; 2) la norme ISO 9533 (International Standard Organization, 2010) 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 signal sur bruit prescrit par la norme ISO 9533 et d'assurer un temps de réaction minimal de 2 secondes; 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.

Aussi instructives et riches d'enseignement ces études soient-elles pour la sécurité des travailleurs, la portée de celles-ci se bute souvent à un problème bien concret en milieu de travail : les alarmes de recul sont une source de gêne environnementale considérable, elles dérangent! Le bruit des alarmes de recul tonales émis dans le voisinage peut être entendu sur de longues distances par des résidents qui n'ont pas à y répondre. Il s'agit donc d'une pollution sonore dérangeante et inutile pour eux (Burgess et McCarty, 2009) et ceci peut mener à de nombreuses frustrations et plaintes, voire à des actions judiciaires. Dans les faits, c'est souvent les récriminations et les éventuels recours juridiques qui motivent les entreprises à changer leurs alarmes de recul, bien plus que la sécurité de leurs travailleurs. Le caractère imprévisible des alarmes de recul et le manque de contrôle ressenti sur cette source de bruit contribuent beaucoup à l'impact négatif sur l'environnement immédiat. Les alarmes tonales ont par ailleurs été citées comme une des six plus importantes sources de bruit pouvant générer des conséquences comportementales et émotionnelles dans un rapport publié par la National Academy of Engineering (2010). Elles ont aussi été identifiées comme un problème important de bruit de construction nocturne dans plusieurs états aux États-Unis (Schexnayder et Ernzen, 2004).

Par ailleurs, la nuisance générée par les alarmes ne touche pas uniquement les résidents à proximité, mais aussi les travailleurs eux-mêmes (Burgess et McCarty, 2009) qui peuvent alors désactiver ou endommager les alarmes jugées trop fortes et agressives (Haas et Edworthy, 1998). Cet effet de gêne pour les travailleurs est amplifié lorsque ceux-ci œuvrent dans des environnements semi-ouverts ou complètement fermés (entrepôts, quais de déchargement, intérieurs de remorques pour déchargement, etc.), environnements où les nombreuses réflexions sonores sur les murs, les planchers et les plafonds viennent faire augmenter le niveau de bruit de façon conséquente à cause de l'alarme, même si le niveau de bruit ambiant peut être relativement peu élevé.

Le problème du bruit des alarmes en milieu semi-fermé ou fermé a été régulièrement mentionné lors des rencontres avec les comités de suivi mis sur pieds pour les projets précédents (Nélisse, Vaillancourt, Laroche, Giguère et Boutin, 2012; Nélisse, Vaillancourt, Laroche, Giguère et Boutin, 2017). Des membres du comité ont particulièrement soulevé les problèmes de gêne importante pour les travailleurs lors de l'entrée/sortie de chariots élévateurs dans les camions pour le chargement et déchargement ainsi que le bruit incessant lors du recul des chariots élévateurs dans les entrepôts. Il a même été mentionné que dans certains cas, on préférerait débrancher l'alarme plutôt que d'avoir à la supporter.

À ces effets de gêne importants s'ajoute aussi le fait que pour ce type d'environnement, les nombreuses réflexions acoustiques peuvent compromettre de façon significative la localisation du véhicule qui recule par les travailleurs et piétons proches, localisation qui se fait notamment par la détection et la localisation du son émis par l'alarme.

À l'heure actuelle, il n'existe malheureusement pas de solutions éprouvées permettant de s'attaquer à ces problèmes. Il est difficile également de prévoir ou d'appréhender les effets liés aux réflexions ou concernant les travailleurs environnants, car les patrons de directivité de ces alarmes sont rarement connus de manière précise (c'est-à-dire tout autour du véhicule et pour différentes hauteurs). Une norme comme la norme ISO9533 (International Standard Organization, 2010) implique une mesure en sept points uniquement en arrière du véhicule et à des hauteurs fixes, ce qui ne procure pas de connaissance permettant de prévoir l'effet des réflexions autres que celles sur le sol.

2.2 L'alarme directionnelle : une solution potentielle ?

Une avenue possible pour pallier les problèmes cités dans la section 2.1 est l'utilisation de signaux sonores directionnels, signaux qui seraient concentrés majoritairement vers l'arrière du véhicule, spécifiquement dans la zone de danger. Lorsqu'intégrés dans un dispositif de génération sonore approprié, on parle alors d'une alarme directionnelle. Trois intérêts majeurs apparaissent dans le développement de ce type de concept :

- Le premier est de permettre que le signal émis par une alarme de recul soit audible dans une zone précisément délimitée en arrière du véhicule, dans la zone de danger, et non modifiée lors de manœuvres de recul.
- Le second intérêt est de limiter les effets de réflexion par le sol ou les effets liés à la réverbération (réflexions acoustiques sur les surfaces avoisinantes), par exemple dans des hangars ou lors du chargement de remorques de camion.
- Le troisième intérêt est de limiter la gêne environnementale pour les autres travailleurs, pour le conducteur de l'engin, et pour les riverains.

Ces trois intérêts sont respectivement détaillés dans les paragraphes 2.2.1, 2.2.2 et 2.2.3.

2.2.1 Délimitation d'une zone de danger qui est fonction de la position de l'engin

Les alarmes usuelles, qu'elles soient tonales ou large bande, ont une certaine directivité (voir l'annexe C de Vaillancourt, Nélisse, Laroche, Giguère, Boutin et Laferrière, 2012). Ainsi, le bruit généré par celles-ci, partiellement masqué par le véhicule, est plus important derrière le véhicule, mais peut être aussi clairement perçu hors de la zone de danger. Cette large zone de couverture est alors relativement indépendante de la position de l'engin (Figure 1(a)). Que ce dernier recule en ligne droite ou en réalisant un virage, la zone spatiale couverte par le signal audible de l'alarme est globalement inchangée. Le signal émis ne véhicule donc pas de notion précise de position ou de mouvement dans l'espace. Un travailleur présent sur le côté du véhicule et un autre présent en arrière du véhicule percevront un signal d'alarme globalement similaire, et qui dépendra peu de la position de l'engin. Dans le cas d'une alarme directionnelle (Figure 1(b)), la zone de couverture de l'alarme varie alors en fonction de la manœuvre effectuée. Un travailleur présent

sur le côté du véhicule et un autre présent en arrière du véhicule percevront un signal d'alarme très différent, et qui dépendra de la position de l'engin. L'alarme transmet alors une information complémentaire. Pour ce type d'alarme, le niveau de bruit diminue énormément dès lors que l'on quitte la zone de couverture.

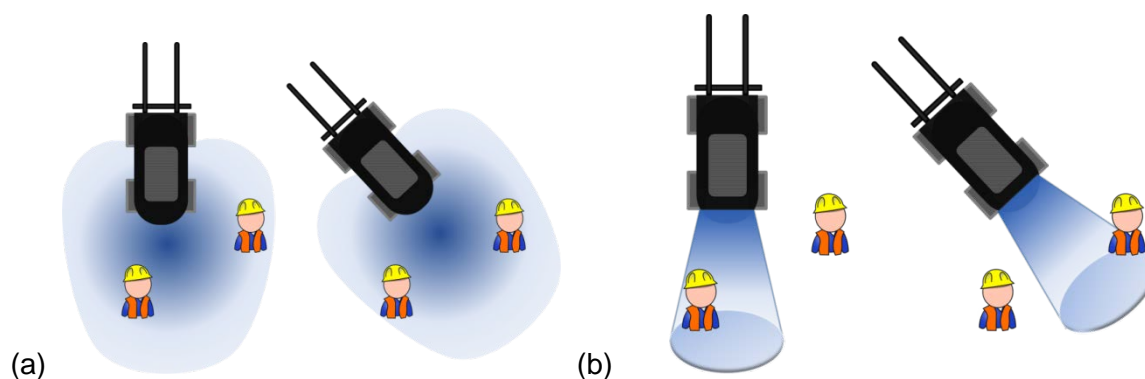


Figure 1. Vue du dessus de la zone couverte par le signal audible généré par une alarme autour d'un véhicule en ligne droite ou oblique, et présence de deux travailleurs à proximité – (a) cas d'une alarme courante – (b) cas d'une alarme directionnelle.

2.2.2 Limitation des effets de sol et des effets de réverbération

Les chariots élévateurs sont souvent utilisés lors du chargement de remorques de camion ou dans des hangars par exemple (Figure 2).

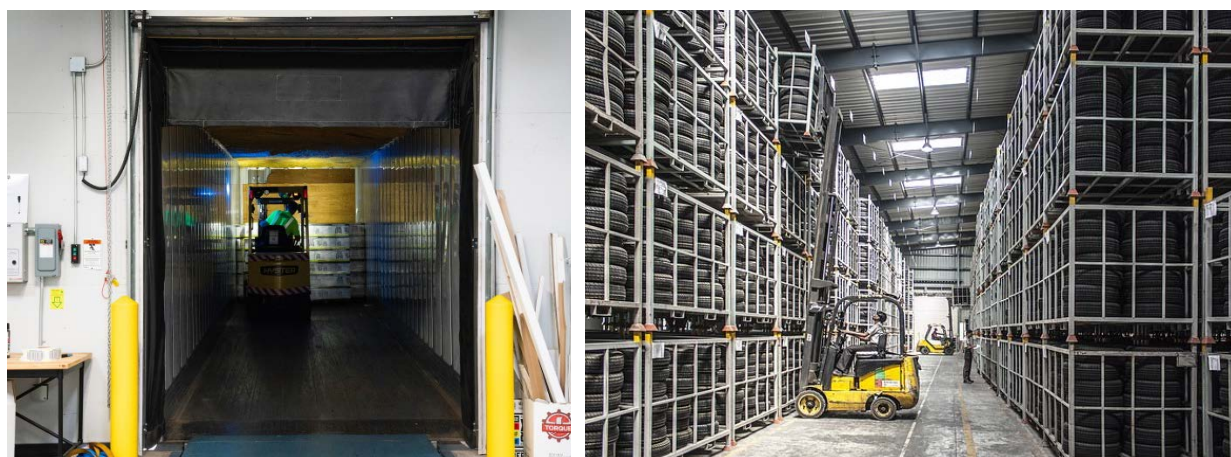


Figure 2. À gauche, chargement d'une semi-remorque avec un chariot élévateur – à droite, opération avec un chariot élévateur dans un hangar.

Dans le cas d'une alarme tonale, des phénomènes d'interférence acoustique dus aux réflexions par l'environnement sont présents et ont pour conséquence de générer de fortes variations du niveau acoustique en fonction de la distance comme l'ont notamment montré des études antérieures de l'IRSST (Figure 3) dans le cas des réflexions sur le sol. La détection de l'alarme de recul est alors très dépendante de la position du récepteur du signal à l'arrière de l'engin. A certaines distances (par exemple, 0,9 m, 1,4 m et 2,25 m dans le cas de la Figure 3), des baisses de niveau de plus de 10 dB sont constatées. Selon la position d'un travailleur, l'alarme sera soit audible, soit non audible si la réduction importante du niveau ne lui permet pas d'émerger du bruit de fond. En concentrant l'énergie acoustique dans une zone bien précise à l'arrière du véhicule, une alarme directionnelle devrait permettre de limiter les effets d'interférences acoustiques, effets néfastes pour la détection et la localisation de l'alarme. Ce concept est illustré à la Figure 4.

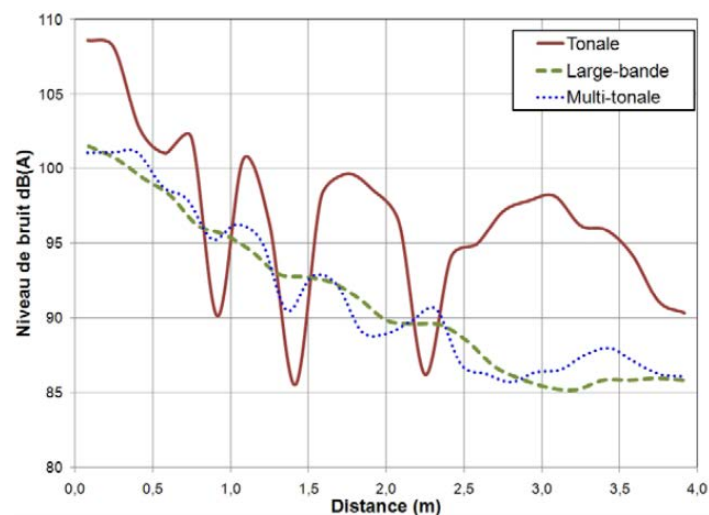


Figure 3. Niveau de bruit (Leq : dB(A)) mesuré à l'arrière d'un véhicule pour différents types de signaux (alarme tonale, alarme large bande ou alarme multitonale) – tiré de Vaillancourt, Nélisse, Laroche, Giguère, Boutin et Laferrière (2012).

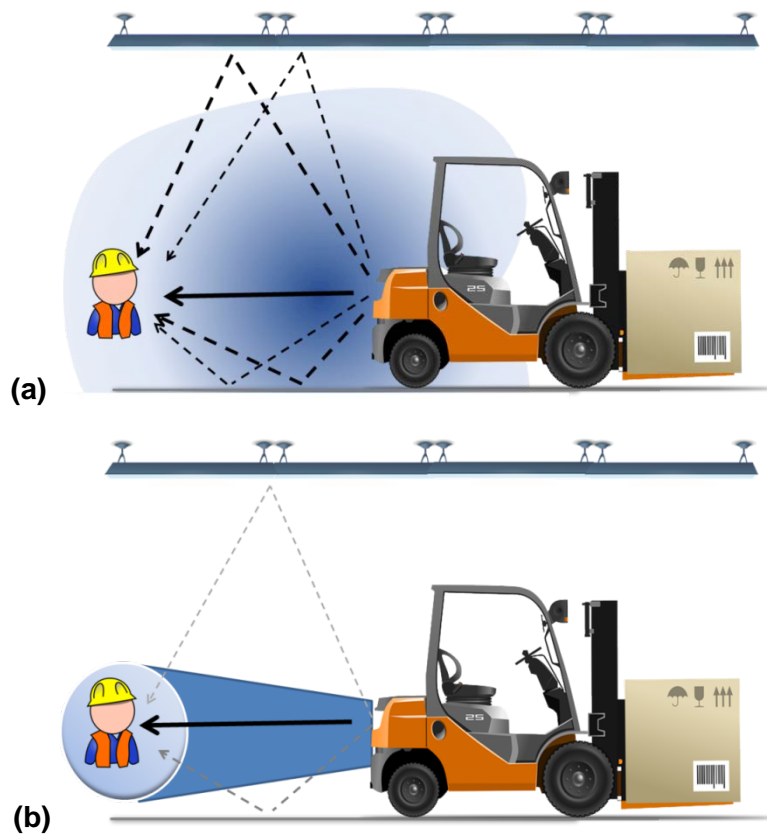


Figure 4. Illustration de la propagation sonore et de l'effet de la réverbération dans le cas (a) d'une alarme omnidirectionnelle standard (effet du plafond et du sol important) et (b) d'une alarme directionnelle (effet du plafond et du sol limité).

2.2.3 Limitation de la gêne environnementale

Avec le concept d'alarme directionnelle, il est facilement concevable que le bruit généré à l'extérieur de la zone de danger immédiate doive être minimisé considérablement (Figure 5). En d'autres termes, on devrait être en mesure de s'assurer que l'alarme de recul ne soit entendue que par ceux qui ont vraiment besoin de l'entendre. La gêne est alors minimisée pour les autres travailleurs, pour le conducteur de l'engin et pour les riverains.

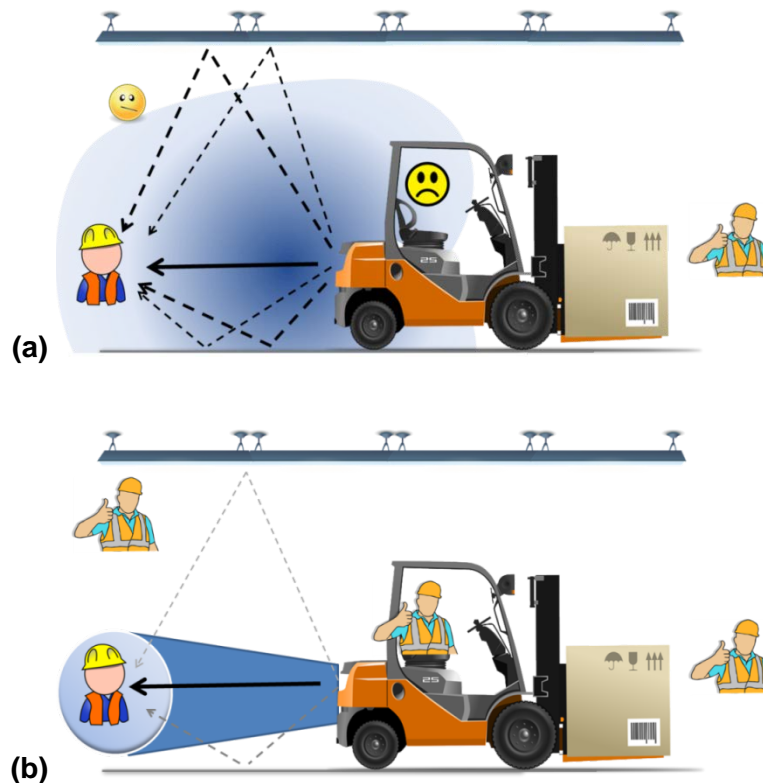


Figure 5. (a) Gêne environnementale générée dans le cas d'une alarme omnidirectionnelle (le travailleur en arrière du chariot reçoit le signal, mais c'est aussi le cas de toutes les autres personnes présentes, ainsi que le conducteur) - (b) Gêne environnementale générée dans le cas d'une alarme directionnelle (le travailleur en arrière du chariot reçoit le signal, mais pas les autres personnes présentes, ni le conducteur).

2.3 Systèmes d'alarme sonore directionnelle existants et développement proposé

Le concept d'alarme directionnelle est attrayant en théorie, mais difficile à mettre en œuvre en pratique. En effet, il est techniquement difficile de développer des dispositifs robustes et peu coûteux permettant de générer un bruit très directionnel assez puissant pour être utilisé sur des véhicules dans les milieux de travail. Les sociétés Brigade Electronics (créateurs de l'alarme large bande connue sous le vocable BBS) ou encore ECCO (www.eccoesg.com) proposent des alarmes permettant une certaine directivité du son émis par leurs dispositifs et mettent de l'avant cet aspect comme un avantage. Un exemple du type de patron de directivité obtenu pour une alarme ECCO est donné à la Figure 6. De tels résultats de directivité avancés par les manufacturiers ne sont cependant appuyés par aucune donnée scientifique ou terrain. Par ailleurs, lors de collectes de données réalisées précédemment (Nélisse, Vaillancourt, Laroche, Giguère et Boutin, 2012; Nélisse, Vaillancourt, Laroche, Giguère et Boutin, 2017), aucun avantage de la part de l'alarme large bande n'a été subjectivement observé puisqu'il était possible d'entendre celle-ci clairement en dehors de la zone de danger.

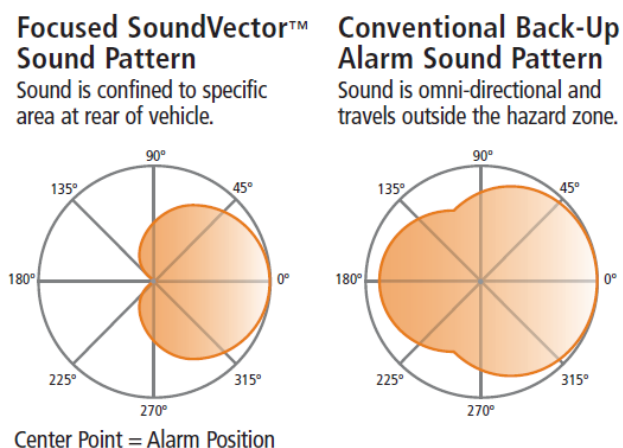


Figure 6. Patron de directivité affiché par la compagnie ECCO pour leur alarme appelée SVX - sound vector technology (tiré du catalogue de produits ECCO 2008).

Il est envisagé, dans cette étude, d'explorer une technologie qui permet l'obtention de sources sonores très directionnelles pouvant se propager sur des distances importantes : le haut-parleur paramétrique. Ce haut-parleur est alimenté par un signal ultrasonore de forte puissance modulé en amplitude par un signal audible, et ce champ dit primaire est émis dans l'air à l'aide d'un réseau de transducteurs ultrasonores. Les effets de propagation non linéaire dans l'air vont avoir pour conséquence une autodémodulation du champ primaire, et le signal audible est alors finalement restitué tout en ayant hérité des propriétés directionnelles de la porteuse ultrasonore.

Cette technique a été originellement développée dans les années 1960 pour des applications de type sonar, donc dans le cas de la propagation d'ondes acoustiques dans l'eau (Westervelt, 1963). Elle a été ensuite étudiée dans le cas d'une propagation dans l'air dans les années 1970 (Bennett et Blackstock, 1975) pour aboutir aux premiers concepts de haut-parleurs directionnels dans les années 1980 (Yoneyama, Fujimoto, Kawamo et Sasabe, 1983). Les applications dans le domaine de la recherche ont depuis majoritairement concerné le contrôle actif du bruit (Gan, Yang et Kamakura, 2012), la création de zones sonores 'privatives' (Donley, Ritz et Kleijn, 2016), l'écoute transaurale (Pokorny et Graf, 2014), ou encore le domaine de la performance artistique (Alunno et Botero, 2017). Malgré de nombreux avantages, un prix généralement très élevé a souvent limité les applications de cette technologie jusque récemment, où la miniaturisation et la réduction du prix de l'électronique ont permis une relative démocratisation de l'accès à ces sources sonores particulières. Des HPP sont maintenant proposés par plusieurs compagnies, très majoritairement pour des applications dans le cadre de systèmes de sonorisation utilisés dans les musées, ou encore les salons et colloques¹ (d'une manière plus générale, les endroits recevant du public afin de leur fournir une information 'localisée', face à une œuvre, à un stand). Les développements en termes de contrôle de la directivité (Olszewski *et al.*, 2005; Sayin et Guasch, 2013; Shi, Kajikawa et Gan, 2014) et de traitement du signal (Uemura, 2016) sont nombreux. Des alimentations électriques et des amplificateurs spécifiques sont même proposés pour ce type de haut-parleur (Kim *et al.*, 2015), ainsi que des approches récentes de super-focalisation (Ochiai *et al.*, 2015) pour augmenter encore la sélectivité spatiale du rayonnement acoustique généré.

¹ <http://ultrasonic-audio.com/>, <https://www.holosonics.com/>, <http://www.soundlazer.com>.

Peu de cas d'applications liées à des signaux de type alarmes existent, un exemple récent étant une étude concernant la génération d'un signal audio en avant d'un autobus afin de réduire le risque de collision entre l'autobus et les piétons aux croisements, lorsque l'autobus tourne (Burka, Qin et Teele, 2014). Une application plus originale consiste à utiliser cette technologie pour l'appliquer à un réveil-matin (Russell et Mitchell, 2016) qui dirige des signaux sonores et lumineux vers une seule personne². Une revue rapide des brevets existants a été effectuée au début de ce projet, et celui se rapprochant le plus du concept développé dans le cadre présent concerne un système d'alarme acoustique directionnelle (*'Directional acoustic alerting system'*) (Pompei, 2006). L'invention vise à diriger un signal en avant d'un véhicule pour éviter des collisions frontales avec des animaux.

La présente étude vise une preuve de concept pour l'application de la technologie des HPP pour l'application bien spécifique des alarmes de recul. Afin de bien circonscrire le problème, on s'intéresse principalement au problème d'une alarme de recul installée sur un chariot élévateur. Le choix du chariot élévateur est basé sur les considérations suivantes :

1. Le problème du bruit de l'alarme sur un chariot élévateur en milieu semi-fermé ou fermé est récurrent et répandu dans les milieux de travail;
2. Les faibles dimensions d'un chariot élévateur (par rapport à un camion par exemple) permettent de bien circonscrire et de définir la zone de danger derrière le véhicule, fournissant ainsi un environnement simplifié pour une recherche exploratoire;
3. Comme mentionné précédemment, nous croyons que les environnements semi-fermés et fermés avec forte réverbération, milieux dans lesquels circulent beaucoup de chariots élévateurs, sont particulièrement adaptés à l'utilisation d'alarmes directionnelles;
4. La puissance des HPP est pour l'instant limitée. Toutefois elle devrait être suffisante pour couvrir les besoins pour les chariots élévateurs, pour lesquels les niveaux de bruit ambiant sont régulièrement moins élevés que pour d'autres environnements de travail (p. ex. : chantiers, mines);
5. D'un point de vue logistique pour les besoins de l'étude, il est relativement facile d'avoir accès à un chariot élévateur et à un local représentatif pour réaliser les travaux de développement et les essais.

² <https://www.luceralabs.com/>

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif principal des travaux était d'établir une preuve de concept de l'utilisation de la technologie du haut-parleur paramétrique en développant un prototype d'alarme de recul directionnelle à l'aide de haut-parleurs paramétriques issus du commerce. Ce prototype est constitué par un arrangement ou une mise en œuvre optimale de sources sonores afin de générer un signal d'alarme en arrière d'un véhicule de type chariot élévateur, tout en limitant au maximum les effets de sol et de réverbération, et la gêne environnementale. Afin d'atteindre cet objectif, l'étude était scindée en trois phases dont l'approche méthodologique est résumée dans les paragraphes 3.1, 3.2 et 3.3.

3.1 Phase 1 : tester en laboratoire les transducteurs de manière individuelle

Afin de permettre une comparaison et une évaluation objectives du potentiel des HPP pour une application aux alarmes de recul par rapport aux modèles d'alarmes existants, le rayonnement acoustique en plusieurs dimensions de deux alarmes traditionnelles (une tonale et une large bande) et de HPP était d'abord caractérisé en laboratoire dans des conditions contrôlées. Des tests en chambre semi-anéchoïque ont permis de caractériser les sources sonores en termes de directivité et d'atténuation en fonction de la distance. Ces deux paramètres ont été évalués en fonction du type de signal (ton pur « bip bip », bruit blanc pulsé « pshit pshit ») et de leur contenu fréquentiel. L'effet de la condition au sol, soit acoustiquement absorbant ou réfléchissant, a également été étudié. Une mesure tridimensionnelle de la directivité des différentes sources acoustiques a enfin été réalisée dans des conditions acoustiques favorables (chambre semi-anéchoïque) ou très défavorables (chambre réverbérante).

3.2 Phase 2 : mettre en œuvre et tester en laboratoire un prototype optimisé en termes de performance et de directivité

Sur la base des connaissances acquises lors de la phase de test individuel, des arrangements de plusieurs haut-parleurs ou l'utilisation de déflecteurs ont été testés en chambre semi-anéchoïque afin de définir une configuration qui permet d'atteindre le meilleur compromis en termes d'efficacité. Pour simplifier la caractérisation, seul le cas d'un sol acoustiquement réfléchissant a été considéré.

3.3 Phase 3 : tester sur chariot en conditions réalistes les alarmes de référence et le prototype

Des tests ont finalement été réalisés sur un chariot élévateur dans le cadre d'une mise en marche des alarmes en condition statique (initiation de la manœuvre de recul). Un test dynamique a ensuite été réalisé pour le cas d'une manœuvre de recul simple en ligne droite. Pour les tests statique et dynamique, des microphones ont été placés dans le couloir où opère le chariot afin d'évaluer la réponse en fonction de la position du chariot dans le couloir et de la distance entre les microphones et le chariot. Des microphones additionnels ont été installés sur le chariot (à proximité de la tête de l'opérateur) afin d'évaluer son niveau d'exposition au bruit généré par les alarmes, mais également dans des locaux proches afin d'évaluer la gêne induite à proximité de la zone de manœuvre. Dans tous les cas de tests, la performance du prototype a été comparée avec celle des alarmes du commerce (tonale et large bande).

4. MÉTHODOLOGIE

4.1 Choix des alarmes de référence : alarme tonale et alarme large bande

Les deux alarmes de référence choisies respectent la norme SAE J994 (Society of Automotive Engineers, 2009) type D (soit un niveau de pression acoustique minimum de 87 dB(A), ne dépassant pas 97 dB(A), ce qui correspondrait alors à un type C). L'alarme tonale est un modèle SAFE-T-ALERT STA 20302 (Figure 7, à gauche), et l'alarme large bande est un modèle Brigade BBS-TEK 87 (Figure 7, à droite). Les deux sont alimentées à l'aide d'une alimentation continue stabilisée de 15 V³. Les deux alarmes utilisent des technologies standards de haut-parleur électrodynamique d'un diamètre de 2 pouces (5,1 cm), et leurs dimensions extérieures sont similaires.



Figure 7. Illustrations des deux alarmes de recul commerciales testées dans l'étude : alarme tonale Safe-T-Alert™ STA 20302 (à gauche) et alarme large bande BBS-TEK™ 87 (à droite).

4.2 Choix des haut-parleurs paramétriques (HPP) de référence

Deux modèles de HPP commerciaux ont été choisis. Celui qui a été jugé le plus souple en termes d'utilisation (le plus compact, non conditionné dans un boîtier fermé) et le moins cher est le SoundLazer Parametric Audio Amp kit (Figure 8, à gauche). La dimension de la carte rectangulaire comportant les transducteurs est de 128 mm x 64 mm. La partie amplification est par contre séparée de cette carte. Le second HPP choisi est le modèle Acouspade de la société Holosonics (Figure 8, à droite). Il diffère assez fortement du précédent, car dans son cas, l'électronique est directement intégrée dans la conception, avec une source sonore de forme circulaire d'un diamètre de 270 mm. Ces deux HPP utilisent une porteuse ultrasonore d'une fréquence de 40 kHz, et sont conçus pour être alimentés par des signaux sonores provenant de systèmes portatifs comme un téléphone ou un lecteur MP3.

³ Une alimentation de 12-24 V DC est suggérée par les constructeurs, mais il a été constaté que les niveaux de pression acoustique générés ne variaient pas de plus de 1 dB en fonction de la tension d'entrée, excepté lorsqu'elle était comprise entre 12 et 15 V



Figure 8. Illustrations des deux HPP commerciaux testés dans l'étude : SoundLazer (à gauche) et Acouspade (à droite).

4.3 Mesure de la pression acoustique selon la norme SAE J994

Afin de s'assurer que les alarmes de référence suivent bien les préconisations de la norme SAE J994, les niveaux de pression acoustique ont été mesurés dans un environnement de type semi-anéchoïque (murs absorbants et sol réfléchissant, dite « méthode de test 2 » dans la norme SAE J994). En suivant les instructions de la norme, une barrière acoustique a été construite (Figure 9), en utilisant des panneaux rigides en contreplaqué de 1,9 cm d'épaisseur (3/4 de pouce) et une couche de matériau absorbant⁴ d'une épaisseur totale de 10,2 cm (4 pouces). La mesure de la pression acoustique a été réalisée dans la chambre semi-anéchoïque de l'université de Sherbrooke en utilisant la barrière préalablement construite et des trépieds pour positionner l'alarme à tester et le sonomètre, comme prescrit dans la norme SAE J994. Un sonomètre Soft dB Piccolo de classe 2 a été utilisé, avec une intégration dite 'rapide' (temps de 125 ms) et une pondération acoustique de type « A ».

⁴ Laine de verre d'une densité de 26 kg/m³.

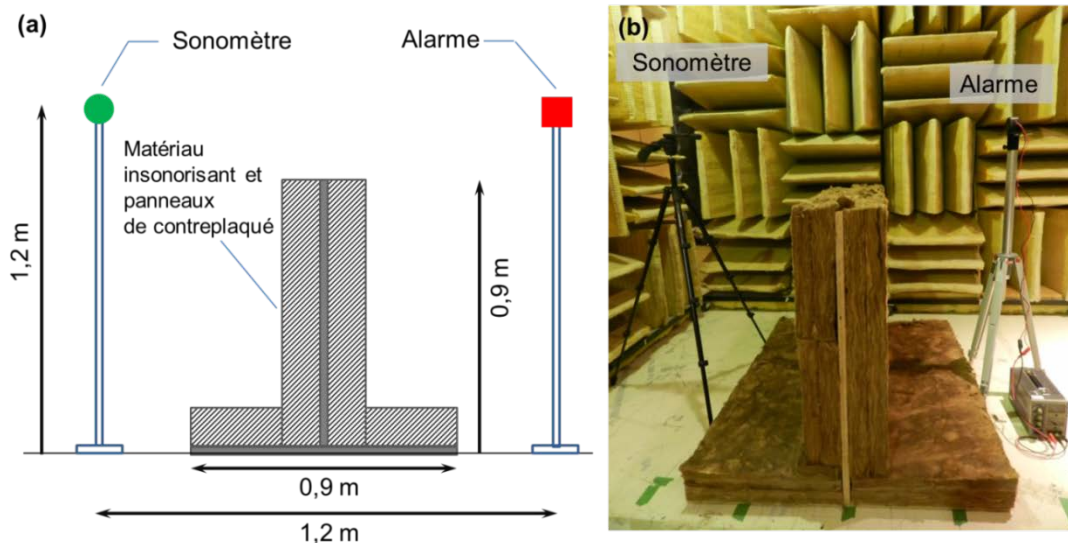


Figure 9. Mesure selon la norme SAE J994 – (a) Schéma de la mesure – (b) Photo d'une mesure réalisée en laboratoire dans le cadre de l'étude.

4.4 Mesure de la décroissance spatiale et de la directivité en chambre semi-anoïchoïque

La décroissance spatiale et la directivité ont été mesurées pour toutes les sources sonores considérées dans l'étude dans la chambre semi-anoïchoïque du Groupe d'acoustique de l'université de Sherbrooke (GAUS). La barrière utilisée dans le cadre de la mesure selon la norme SAE J994 a été retirée. Dans le cadre de la mesure de décroissance (Figure 10), l'alarme (référence ou HPP) et le sonomètre ont été placés tous les deux à une hauteur de 1,2 m, et la distance entre eux a varié, passant de 0,25 à 6 m, par incrément de 0,25 m. La condition de réflexion au sol était soit une condition de sol acoustiquement absorbant avec 5 cm d'épaisseur de laine de verre placée sur le sol (théoriquement pas de réflexion, Figure 10(a)), soit une condition de sol acoustiquement réfléchissant (Figure 10(b)).

Dans le cadre de la mesure de directivité, l'alarme (référence ou HPP) et le sonomètre étaient placés tous les deux à une hauteur de 1,2 m, et la distance entre eux était fixée à 1,2 m. La position du sonomètre était ensuite modifiée par pas angulaire de 15°. Avec 5 cm d'épaisseur de laine de verre placée sur le sol, il s'agit toujours d'une condition de sol acoustiquement absorbant (théoriquement pas de réflexion). Deux séries de mesures ont été réalisées. La première considérait l'alarme placée selon son sens normal de montage Figure 11(a)), et permettait de réaliser une mesure de directivité dans le plan azimutal. Pour la seconde série de mesures, l'alarme était tournée de 90°, correspondant alors à une mesure de directivité dans le plan de l'élévation (Figure 11(b)). Mentionnons que pour les mesures de directivité, les sources étaient considérées comme étant à symétrie cylindrique.

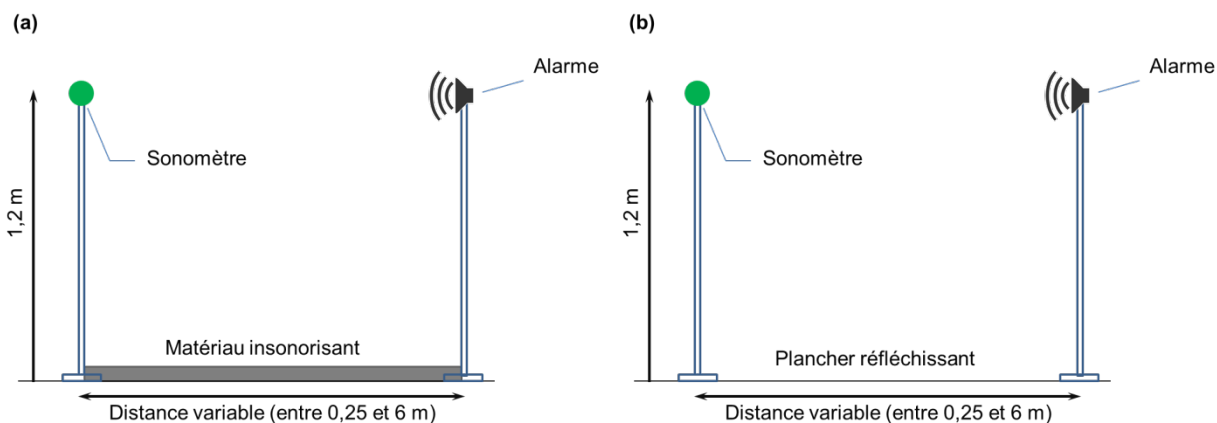


Figure 10. Mesure de la décroissance spatiale avec (a) condition de sol absorbant et (b) condition de sol réfléchissant.

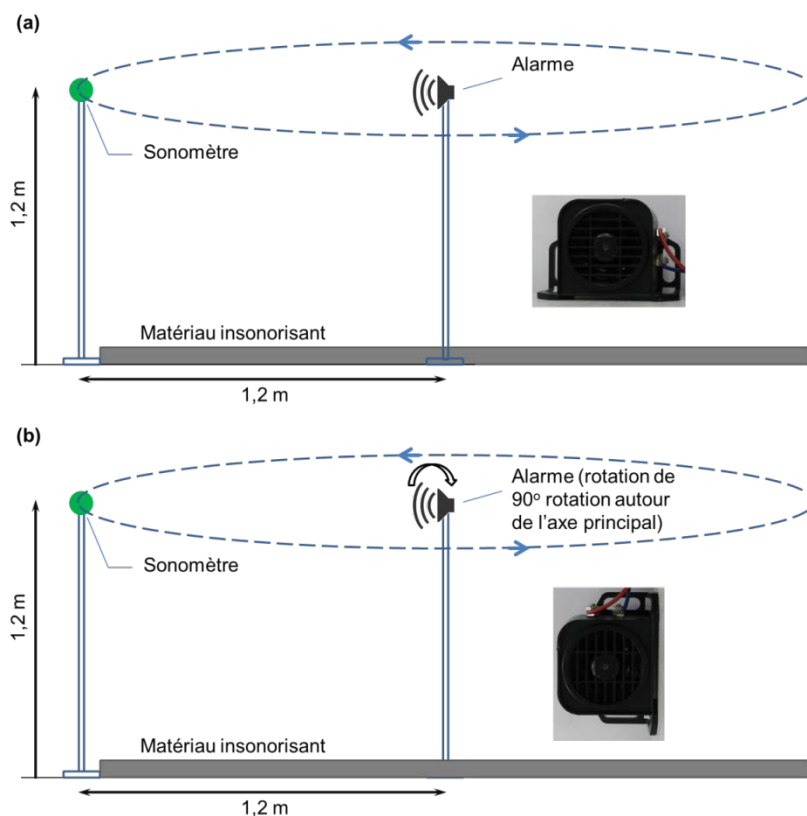


Figure 11. Illustration de la mesure de directivité en chambre semi-anéchoïque : (a) Mesure dans le plan de l'azimut; (b) Mesure dans le plan de l'élévation.

4.5 Mesures tridimensionnelles en chambre semi-anéchoïque et en chambre réverbérante

Les dimensions de la chambre semi-anéchoïque et de la chambre réverbérante utilisées pour ces essais étaient respectivement de 6,8 x 6,5 x 3 m³ (longueur par largeur par hauteur) et 7,5 x 6,2 x 3 m³. La chambre semi-anéchoïque a été utilisée pour caractériser le rayonnement intrinsèque de chaque alarme, et l'effet spécifique de la condition au sol ou encore du montage sur une surface rigide. La chambre réverbérante a été utilisée comme un cas limite afin d'estimer comment des surfaces réfléchissantes, typiquement présentes dans des hangars ou des usines, peuvent affecter le champ de pression rayonnée par chaque alarme testée. La chambre réverbérante avait un temps de réverbération moyen T_{rev} de 5,5 s sur la gamme fréquentielle comprise entre 200 et 1000 Hz.

Les mesures tridimensionnelles étaient basées sur l'utilisation d'une antenne de 7 x 7 microphones (microphones quart de pouce, modèle B&K 4957), espacés de 30 cm dans les deux directions (Figure 12(a)) pour le cas de la mesure en chambre semi-anéchoïque). Les montants métalliques de l'antenne étaient traités avec un matériau absorbant afin d'éviter toute réflexion parasite. La rangée de microphones la plus basse était située à une hauteur de 0,3 m (par rapport au sol) et la rangée la plus haute, à une hauteur de 2,1 m. L'antenne de microphones a été translaturée à différentes positions prédéfinies, similaires entre les deux chambres de test, afin de couvrir une zone 3D spatialement étendue. Cette zone s'étendait jusqu'à 3,6 m devant l'alarme, -0,6 m derrière et jusqu'à 1,8 m latéralement de chaque côté de l'alarme. La base de données obtenue comprend presque 1500 points de mesure. Un système B&K Connect a été utilisé pour le conditionnement des microphones et pour l'acquisition des signaux.

Afin de simuler les conditions de sol absorbant, des plaques de laine de verre de 7,5 cm d'épaisseur étaient disposées au sol entre l'alarme et l'antenne de microphones (Figure 12(b)). Par ailleurs, des essais ont aussi été effectués en montant les alarmes sur une surface rigide constituée d'une boîte en contreplaqué de dimensions 1,25 x 1,25 x 1,25 m³. Chaque alarme était placée en partie supérieure et au milieu d'une des faces de la boîte (Figure 12(c)). Ces essais avaient pour but d'étudier les effets de diffraction lorsque l'alarme est montée sur un véhicule (comme un chariot élévateur par exemple). Enfin, une illustration de l'antenne lorsque placée dans la chambre réverbérante est fournie à la Figure 12(d).

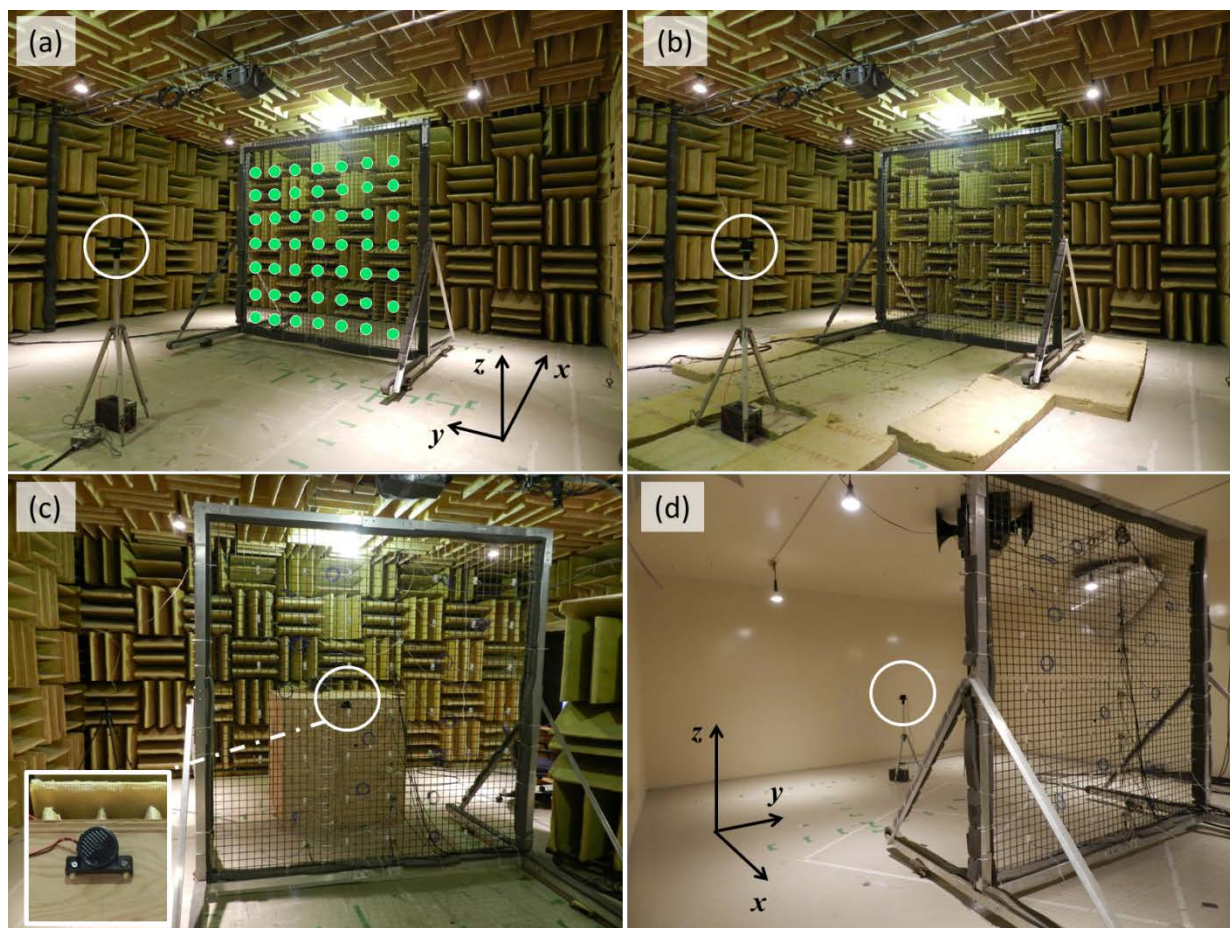


Figure 12. Mesure tridimensionnelle en conditions de laboratoire (la position de l'alarme est identifiée par un cercle blanc) ; (a) Salle semi-anéchoïque avec sol réfléchissant (les points verts illustrent les positions des microphones); (b) Salle semi-anéchoïque avec sol absorbant; (c) Salle semi-anéchoïque avec sol réfléchissant et alarme montée sur une surface rigide; (d) Salle réverbérante.

4.6 Arrangement géométrique des haut-parleurs, utilisation de déflecteurs ou de grilles

Afin d'évaluer s'il est possible d'influer sur la directivité des HPP, un arrangement géométrique de ceux-ci a été testé, ainsi que l'ajout de déflecteurs plans ou courbes, ou encore de grilles perforées. Les tests se sont déroulés dans la chambre semi-anéchoïque avec un sol réfléchissant, en utilisant de nouveau l'antenne de 7 x 7 microphones. À la Figure 13, les configurations testées, incluant la position de la source et les positions prises successivement par l'antenne mobile de microphones, sont décrites de manière schématique. La Figure 14 présente quelques photos des montages et des arrangements réalisés.

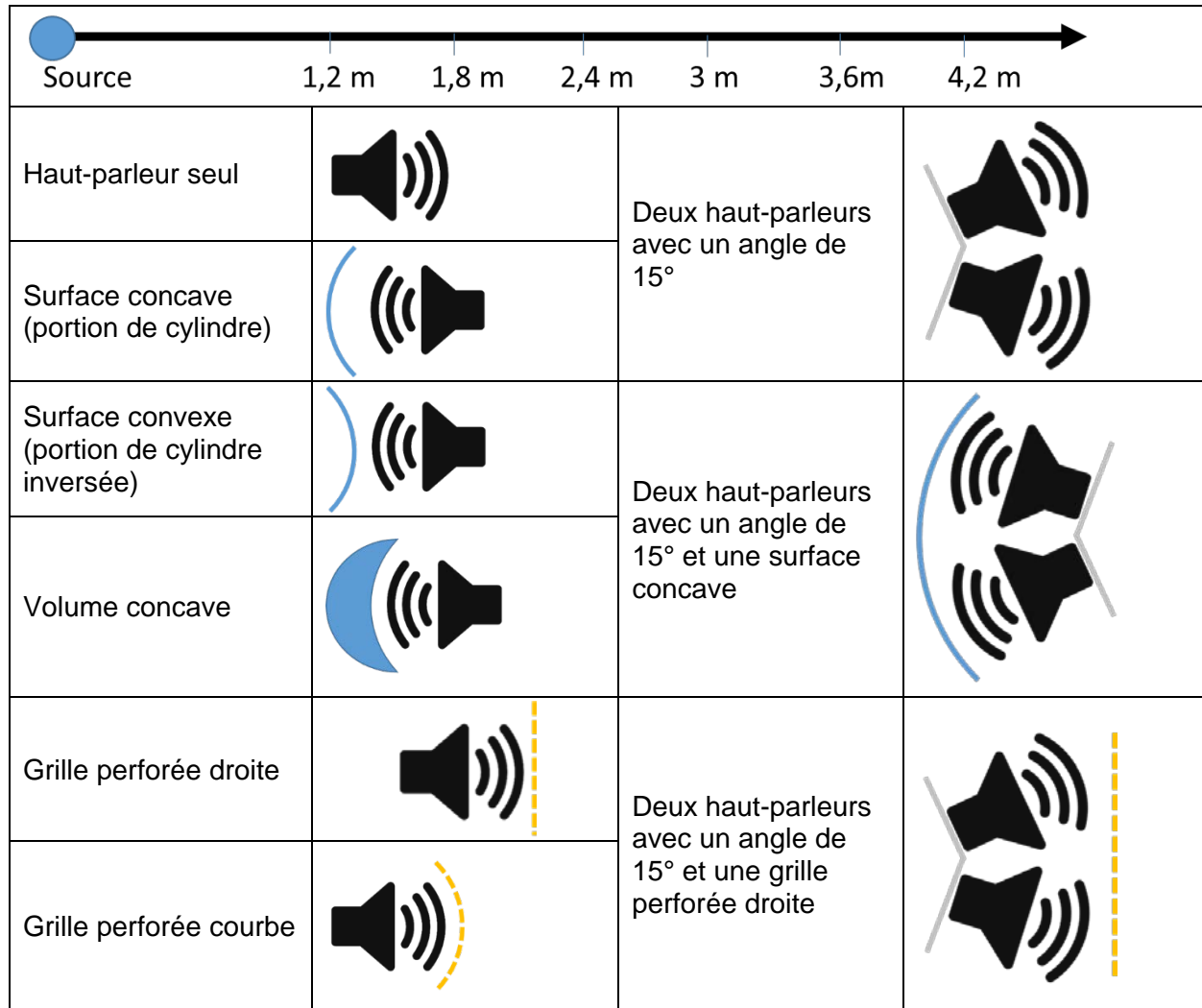


Figure 13. Résumé des configurations testées avec mise en place de déflecteurs, grilles et combinaisons de haut-parleurs.

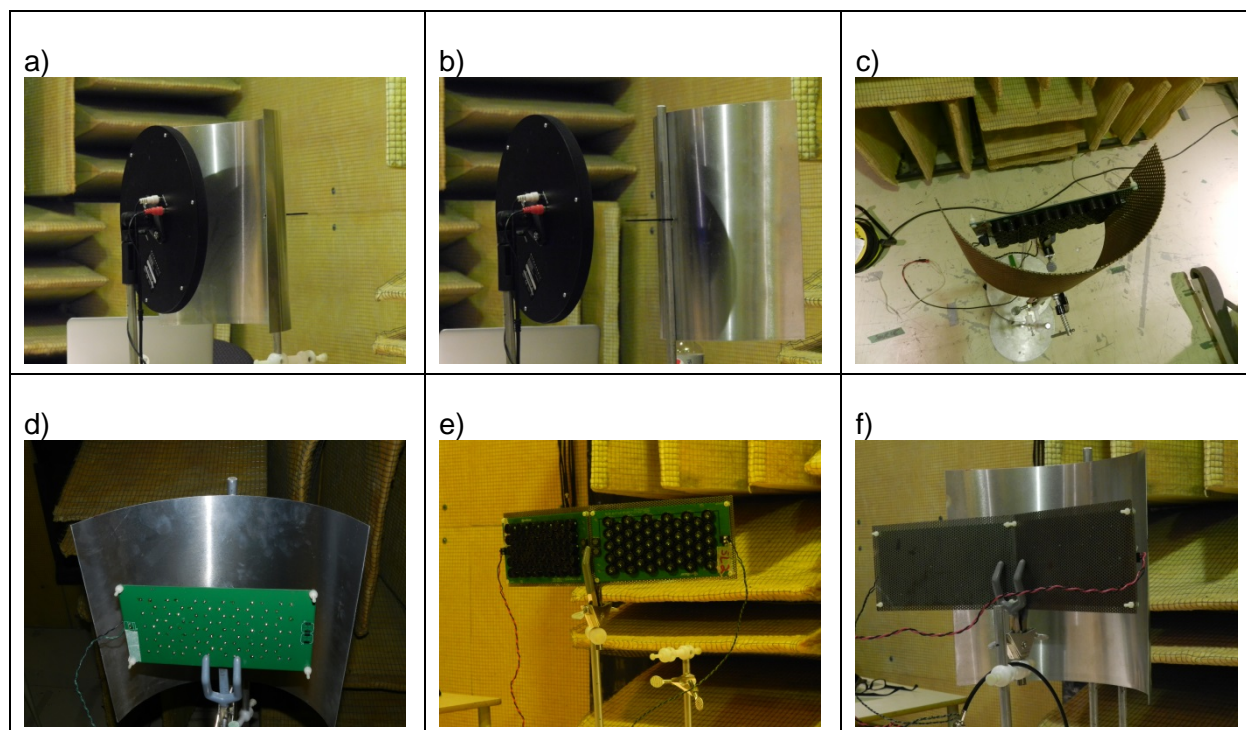


Figure 14. Illustrations de certaines des configurations testées : a) Haut-parleur Acouspade avec déflecteur concave; b) Haut-parleur Acouspade avec déflecteur convexe; c) Haut-parleur Soundlazer avec grille perforée ; d) Haut-parleur Soundlazer avec déflecteur concave; e) Combinaison de deux haut-parleurs Soundlazer; f) Combinaison de deux haut-parleurs Soundlazer avec déflecteur concave.

4.7 Mesures sur chariot élévateur en conditions réalistes

Les alarmes ont été testées en laboratoire, mais aussi dans un environnement plus représentatif de conditions de travail réelles. Le cas d'un chariot élévateur reculant dans un corridor réverbérant a été considéré. L'objectif était d'étudier la distribution du champ sonore dans le couloir, avec le chariot équipé des différentes alarmes, et ce, pour deux conditions d'opération du chariot : statique (chariot immobile) et dynamique (chariot en mouvement).

4.7.1 Environnement de test

Les lieux où se sont déroulés les essais consistent en un couloir permettant d'accéder à des laboratoires et ateliers (Figure 15). Ce couloir est régulièrement utilisé pour déplacer du matériel à l'aide d'un chariot élévateur dans les laboratoires et les ateliers. Le couloir a une largeur de ~3,7 m et une longueur de ~35 m. La hauteur du plafond est de 7 à 8 m. Les murs et le sol du couloir sont en béton peint, et le plafond en panneaux de tôle. Le chariot élévateur était placé à un bout du corridor et deux séries d'essais ont été réalisées : 1) essais statiques; 2) essais dynamiques. Pour les essais statiques, le chariot était immobile, moteur éteint, et l'alarme de recul était en fonction en continu. Une série de microphones permettait de mesurer le bruit à différentes positions dans l'environnement. Pour les essais dynamiques, le chariot était en mouvement, avec l'alarme de recul en fonction. Le chariot effectuait des allers-retours le long du

couloir à vitesse constante et des mesures de bruit aux différents microphones étaient effectuées en parallèle. La position des microphones et les conditions de tests sont présentées dans les sections suivantes.

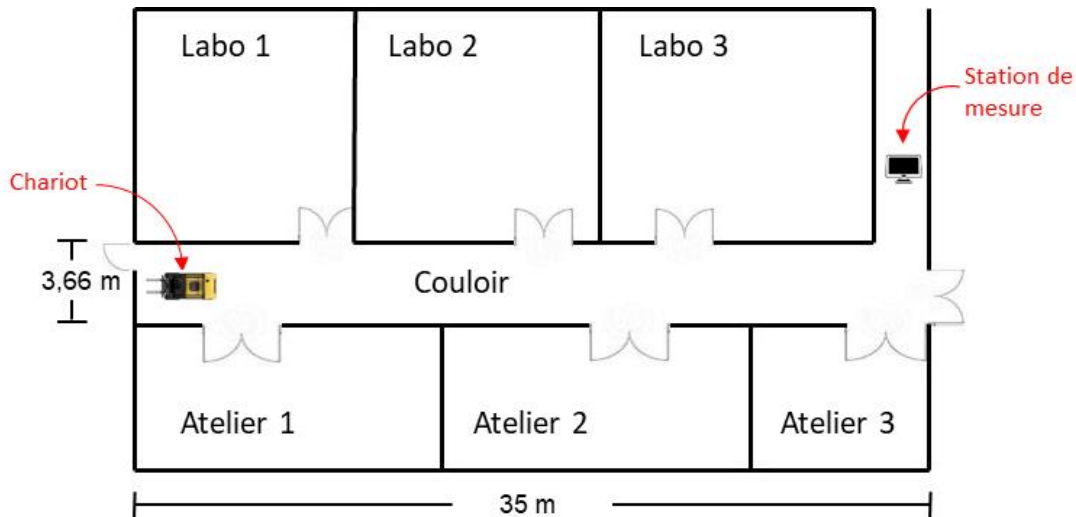


Figure 15. Illustration de l'environnement de test pour les essais sur chariot élévateur (les dimensions des laboratoires et des ateliers ne sont pas à l'échelle).

4.7.2 Alarmes testées et installation sur le chariot élévateur

À la suite de l'analyse des résultats obtenus en laboratoire, quatre alarmes ont été retenues pour les essais dans le couloir : les alarmes du commerce Safe-T-Alert™ (tonale) et BBS-TEK 87™ (large bande), et le concept de l'Acouspade™ avec grille, émettant soit un signal de nature tonale ou un signal large bande. Pour des questions d'optimisation du rapport signal sur bruit et des contraintes techniques d'alimentation électrique sur le chariot, l'utilisation de l'Acouspade™ a été préférée à celle du SoundLazer™ pour ce test en conditions réalistes.

Lors des essais, l'alarme d'origine venant avec le chariot était déconnectée et remplacée par celle à tester. L'alarme à tester était installée sur le dessus du chariot, centrée et pointée directement vers l'arrière. Elle était alimentée par une batterie externe et actionnée manuellement avant d'effectuer les essais. La Figure 16 montre les alarmes qui ont été testées, installées sur le chariot élévateur.

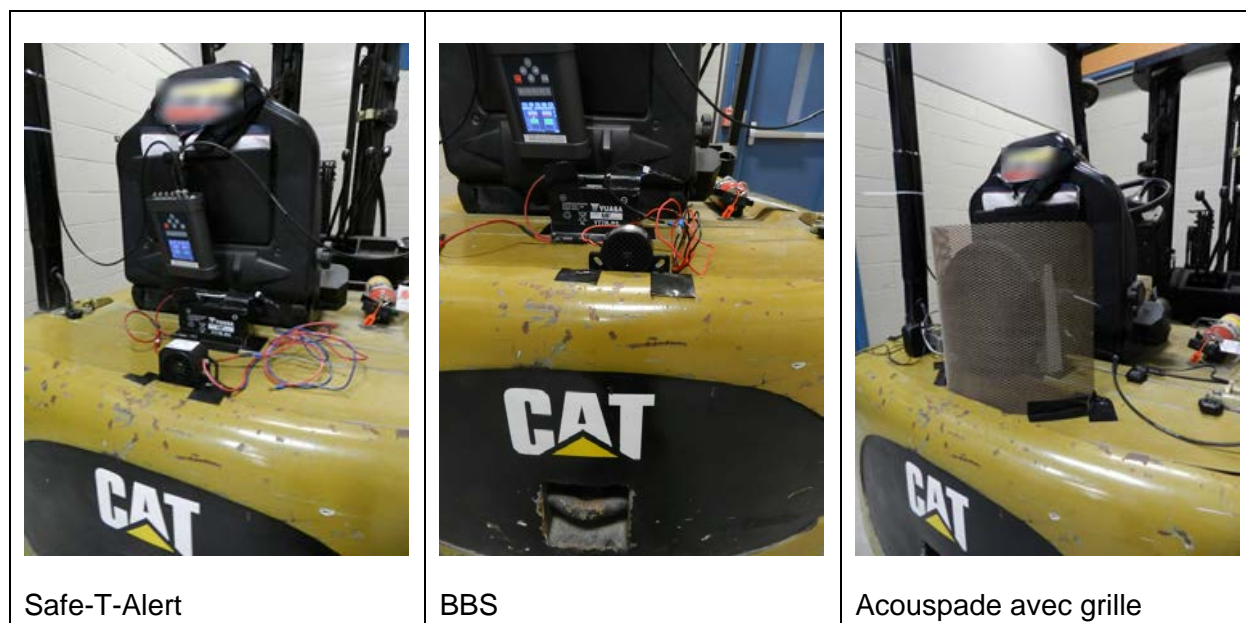


Figure 16. Installation des alarmes à l'arrière du chariot élévateur.

4.7.3 Position des microphones

Douze microphones fixes étaient disposés dans le couloir et dans deux laboratoires adjacents (Figure 17), tandis que deux microphones étaient attachés à l'armature de protection à l'arrière du chariot élévateur, approximativement à la hauteur de la tête du conducteur. Lorsque le chariot était immobile (ou juste avant de démarrer son mouvement), le premier microphone était situé à 1 m de celui-ci, les neuf microphones suivants étaient espacés de 3 m (Tableau 1). Lors des tests dynamiques, c'est-à-dire lorsque le chariot était en mouvement, les microphones #1 à #10 étaient déplacés sur le côté, afin de ne pas se trouver dans la trajectoire du chariot. Des photos du chariot et des microphones dans le couloir sont montrés aux Figure 18 et Figure 19. Les microphones fixes (#1 à #12) étaient posés sur des pieds et connectés au système d'acquisition de LMS Test.Lab (Siemens PLM Software), tandis que les deux microphones installés sur le chariot élévateur étaient connectés au système de mesure SQuadriga II (HEAD Acoustics GmbH).

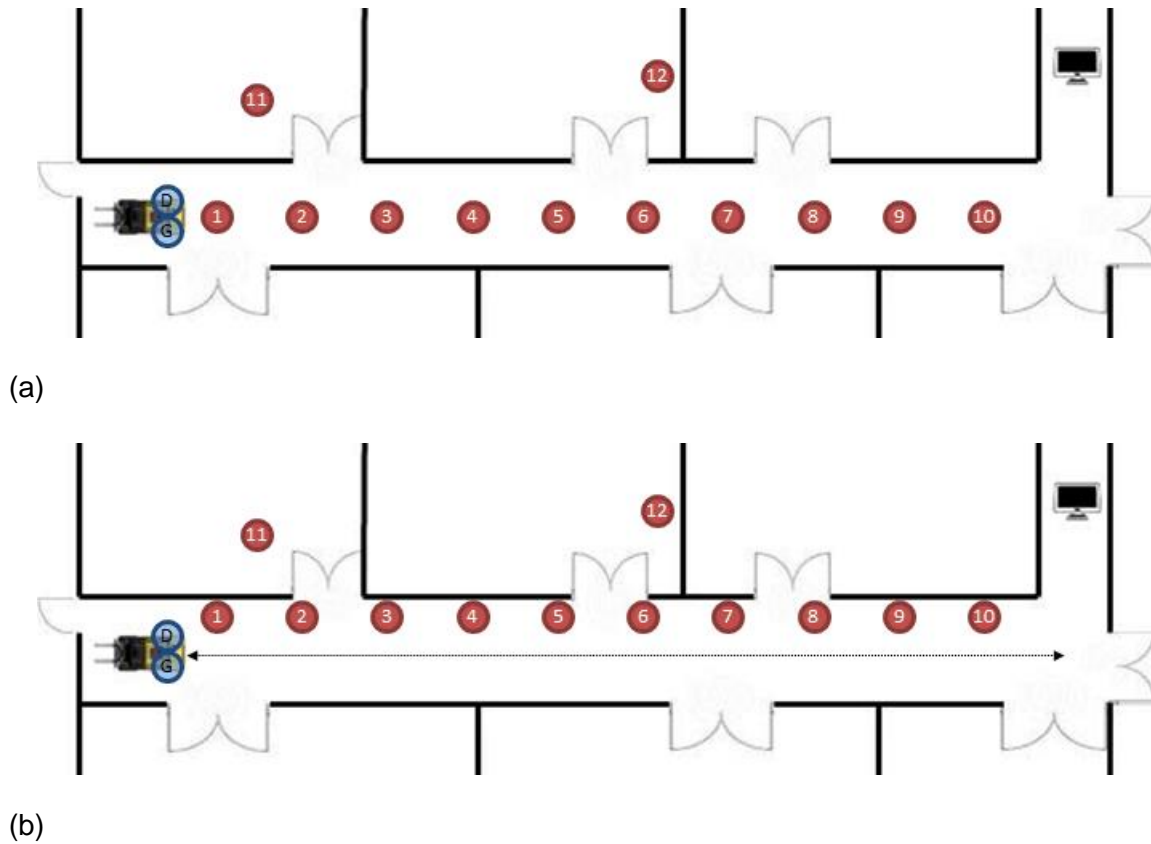


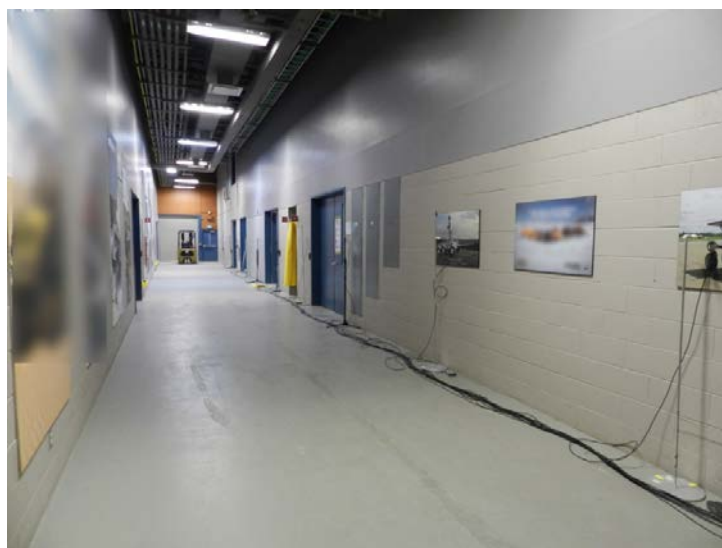
Figure 17. Position des microphones pour les essais statiques (a) et dynamiques (b). Les microphones notés G et D (en bleu sur la figure) sont fixés à l'armature protectrice du chariot élévateur.

Tableau 1. Position des microphones fixes

| Microphone | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------------------------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|--------|--------|
| Distance du chariot (m) | 1 | 4 | 7 | 10 | 13 | 16 | 19 | 22 | 25 | 28 | Labo 1 | Labo 2 |



(a)



(b)

Figure 18. Photos montrant le positionnement des microphones pour les essais statiques (a) et dynamiques (b).



Figure 19. Photo montrant le positionnement des deux microphones installés sur le chariot élévateur (cercles jaunes).

4.7.4 Déroulement des essais

Comme mentionné précédemment, pour chaque alarme, deux séries de tests ont été réalisées, soit les mesures statiques et les mesures dynamiques. Pour chaque série de mesures, quatre alarmes ont été testées : Safe-T-Alert (alarme tonale), BBS-TEK 87 (alarme large bande), Acouspade avec grille émettant un signal tonal et Acouspade avec grille émettant un signal large bande.

- Mesures statiques, bruit de fond et temps de réverbération

Pour les mesures statiques, le moteur du chariot était éteint, le chariot était immobile et l'alarme était mise en fonction manuellement. Une acquisition des signaux temporels sur une durée de 20 secondes était ensuite effectuée pour tous les microphones (couloir, laboratoires et chariot). Par ailleurs, le même genre de mesure a été effectué sans bruit d'alarme pour permettre d'obtenir une mesure de bruit de fond dans l'environnement. Finalement, des mesures de temps de réverbération ont été effectuées en utilisant deux blocs de bois frappés l'un contre l'autre comme source de bruit ponctuelle.

- Mesures dynamiques : chariot en mouvement

Pour les mesures dynamiques, l'alarme était d'abord mise en fonction manuellement avant le départ du chariot élévateur. Par la suite, le conducteur du chariot avait la consigne d'effectuer trois allers-retours le long du couloir à vitesse constante. Le chariot commençait donc par reculer jusqu'au bout du couloir pour ensuite revenir en marche avant, l'opération étant répétée deux fois en continu. Il est à noter que l'alarme était toujours en fonction, que l'on soit en marche arrière ou avant. La vitesse était maintenue approximativement entre 10 et 12 km/h. Les signaux temporels pour tous les microphones ont été enregistrés pour toute la durée de la manœuvre.

5. RÉSULTATS

5.1 Alarmes de référence : comparaison des signaux générés et conformité à la norme SAE J994

Les signaux temporels de pression acoustique d'une durée de 1,5 seconde générés par l'alarme tonale et l'alarme large bande sont respectivement présentés à la Figure 20(a) et (b), et mesurés à une distance arbitraire de 0,25 m. Les temps d'activation et d'arrêt sont similaires pour les deux alarmes, approximativement 0,3 seconde pour chaque phase. À la Figure 20(c) et (d), les mêmes données sont représentées sur une échelle temporelle réduite (10 millisecondes), ce qui permet de mieux apprécier les différences entre les signaux acoustiques générés. Le signal pour le cas de l'alarme tonale à la Figure 20(c) montre un comportement périodique (avec la présence d'un contenu harmonique) quand le signal présenté à la Figure 20(d) correspond à un signal de type aléatoire.

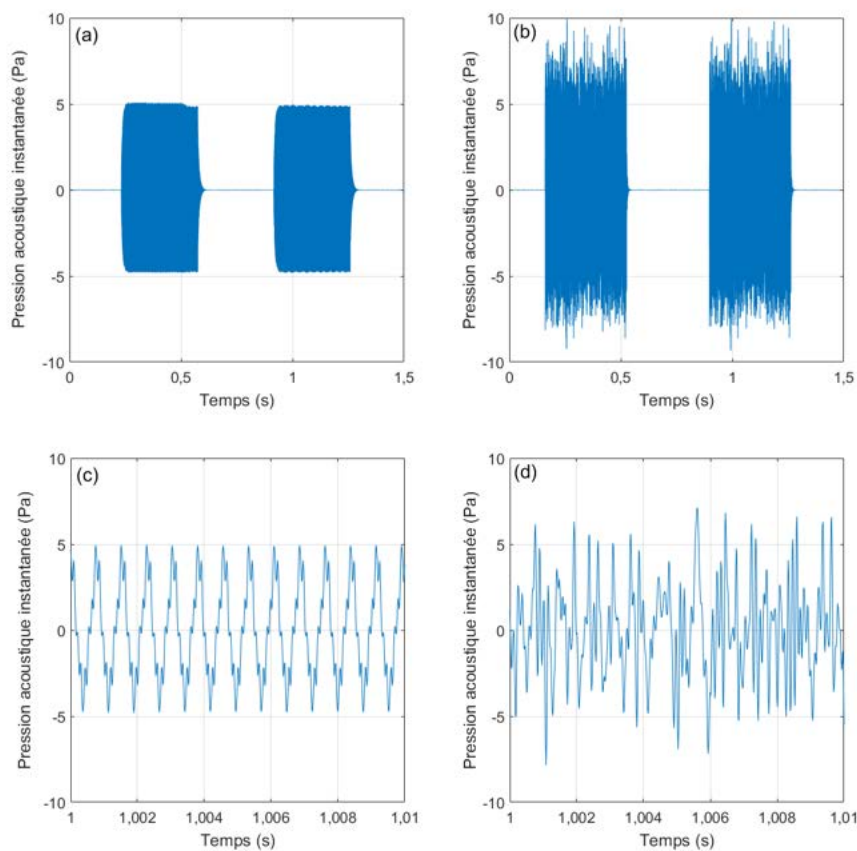


Figure 20. (a) Signal généré par l'alarme tonale sur une durée de 1,5 seconde; (b) Signal généré par l'alarme large bande sur une durée de 1,5 seconde; (c) Signal généré par l'alarme tonale sur une durée de 10 millisecondes; (d) Signal généré par l'alarme large bande sur une durée de 10 millisecondes.

Les spectres fréquentiels par bande de tiers d'octave obtenus suivant la norme SAEJ994 sont fournis à la Figure 21. Une amplitude maximale est obtenue dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale 1250 Hz pour l'alarme tonale (fréquence fondamentale de 1308 Hz), tandis qu'aucune émergence fréquentielle notable n'est visible dans le cas du résultat obtenu avec l'alarme large bande. Les valeurs de niveau équivalent L_{eq} (intégration rapide 125 ms, mesure d'une durée de 60 secondes) correspondant aux spectres fournis à la Figure 21 sont respectivement de 86,9 et 86,7 dB(A) pour l'alarme tonale et la large bande. Selon la condition de test et la durée de mesure, il a été identifié que ces niveaux pouvaient varier de 1,8 dB(A) au maximum. La tolérance sur les niveaux de pression acoustique dans la norme SAE J994 étant de ± 4 dB(A), les deux alarmes sont donc conformes aux exigences de la norme SAE J994 type D (voir section 4.1).

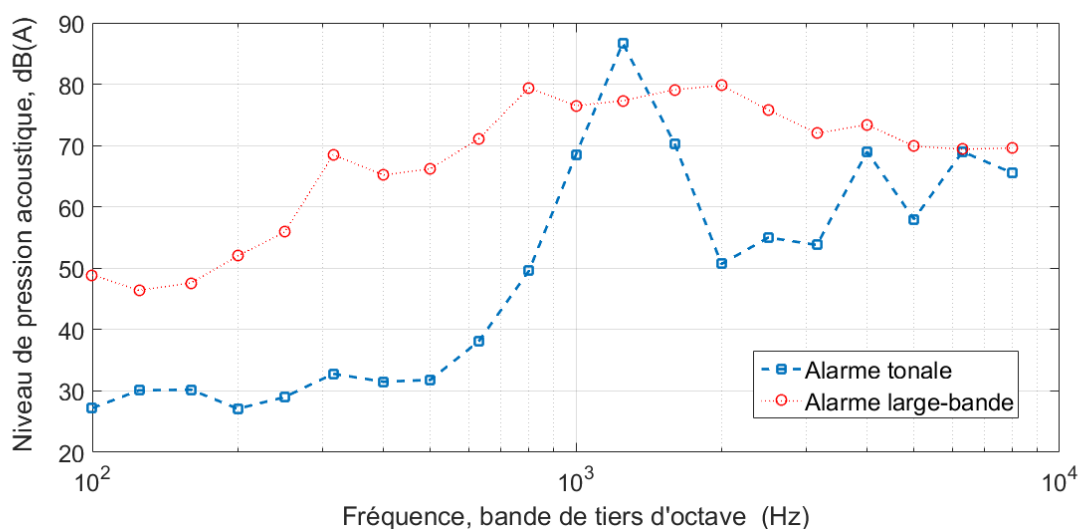


Figure 21. Niveau de pression acoustique en dB(A) et par bandes de tiers d'octave mesurée selon la norme SAE J994 pour les deux alarmes de référence.

5.2 Décroissance du niveau de pression acoustique en fonction de la distance : cas monodimensionnel

5.2.1 *Décroissance théorique du niveau de pression acoustique pour une source ponctuelle omnidirectionnelle*

Pour simuler de manière simplifiée le champ sonore généré par les alarmes, elles sont considérées comme ayant un comportement de source ponctuelle omnidirectionnelle. La méthode de la source image est utilisée pour calculer le champ de pression acoustique généré par l'alarme à une distance donnée, dans le cas d'un milieu semi-anéchoïque avec un sol acoustiquement absorbant ou réfléchissant. Dans le cadre général (champ libre) d'une source ponctuelle et omnidirectionnelle, la pression acoustique p due à cette source s'écrit :

$$p(\omega, r) = A \frac{e^{-jk_0 r}}{r}, \quad (1)$$

où A est l'amplitude de la source, k_0 est le nombre d'onde acoustique, j est l'unité imaginaire et r la distance entre l'alarme et le récepteur (Figure 22). Quand un sol parfaitement rigide (totalement réfléchissant) est présent, cette condition aux limites est équivalente à avoir une source dite image placée symétriquement par rapport au plan du sol (Figure 22(b) et (c)) et le coefficient de réflexion R dans l'équation 2 ci-dessous est unitaire. Dans le cas général d'un sol avec une condition variable (coefficient de réflexion R compris entre 0 et 1), la pression acoustique au receveur vaut la somme des pressions générées par deux sources séparées du receveur par des distances r et r' :

$$p(\omega, r) = A \left(\frac{e^{-jk_0 r}}{r} + R \frac{e^{-jk_0 r'}}{r'} \right). \quad (2)$$

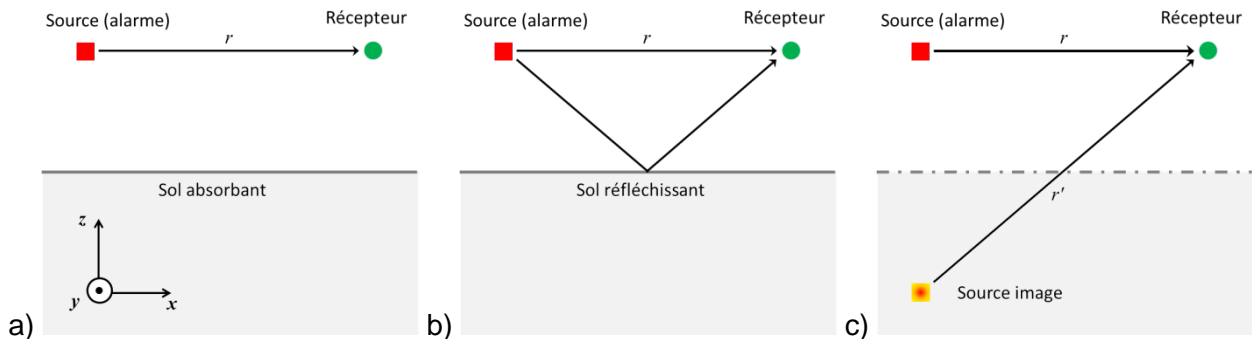


Figure 22. Représentation schématique du problème : a) cas d'une source avec sol totalement absorbant; b) cas d'une source avec sol totalement réfléchissant; c) le problème équivalent de la source image.

La Figure 23 présente le résultat d'un calcul théorique en supposant l'amplitude A du monopôle unitaire, pour une fréquence de 1308 Hz. Les hauteurs de la source et du récepteur sont identiques à celles utilisées dans les mesures, soit 1,2 m. L'espacement entre source et récepteur varie entre 0,1 et 6 m par pas de 0,05 m. Dans le cas de la condition de champ libre, la décroissance est constante, et correspond au résultat d'une diminution de 6 dB du niveau de pression acoustique par doublement de la distance entre source et récepteur. Avec la présence d'une réflexion au sol, la réponse s'éloigne progressivement de celle vue en condition de champ libre avec l'apparition d'augmentations et de diminutions de niveau, résultats des interférences constructives et destructives entre champ direct et champ réfléchi. Plus la valeur du coefficient de réflexion s'approche d'une valeur de 1, plus la réponse en fonction de la distance devient accidentée, avec l'apparition de réductions de niveau importantes. Le Tableau 2 précise les positions spatiales des principales chutes de niveaux ainsi que leur amplitude pour le cas d'un coefficient de réflexion unitaire.

Ces résultats illustrent clairement qu'une alarme tonale émettant au-dessus d'un sol réfléchissant crée des zones d'atténuation importante du niveau sonore, qui peuvent compromettre son audibilité ou sa localisation.

Tableau 2. Positions des principaux creux du niveau acoustique en fonction de la distance, et réduction dans le cas d'un coefficient de réflexion unitaire

| Distance (m) | 0,5 | 0,85 | 1,28 | 1,85 | 2,68 | 4,07 |
|--|------|------|------|------|-------|-------|
| Réduction de niveau par rapport au cas en champ libre (dB) | -1,8 | -3,5 | -5,6 | -8,3 | -11,9 | -17,2 |

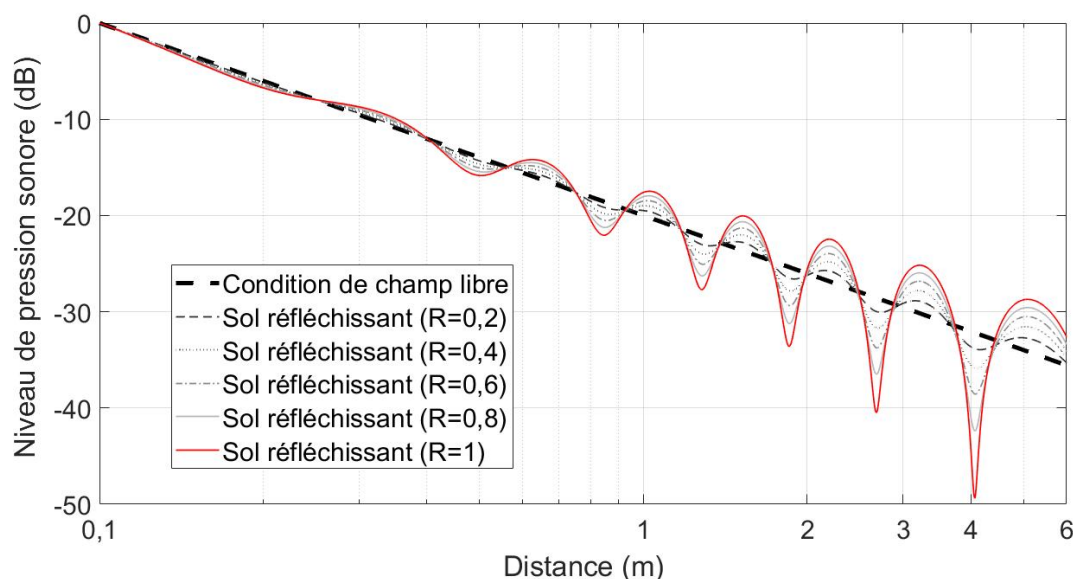


Figure 23. Calcul théorique du niveau de pression acoustique en fonction de la distance pour une condition de champ libre (sol totalement absorbant, ou $R = 0$), et pour un sol réfléchissant avec un coefficient de réflexion variant de 0,2 à 1, par pas de 0,2.

Note : l'échelle en x est tracée en mode logarithmique.

5.2.2 Alarmes de référence

Les niveaux de pression acoustique mesurés en fonction de la distance pour des conditions de sol absorbant et réfléchissant sont donnés respectivement dans la Figure 24 et la Figure 25. Pour chaque graphique, les niveaux de pression acoustique sont normalisés par rapport au maximum mesuré, soit à une distance de 0,25 m.

Dans le cas du sol absorbant et pour une distance de séparation supérieure à 0,5 m, les résultats obtenus dans le cas de l'alarme large bande sont en bon accord avec la décroissance de 6 dB par doublement de distance vue dans le cas d'un monopole idéal et pour des conditions de sol absorbant (Figure 23). Dans le cas de l'alarme tonale, la décroissance du niveau de pression acoustique en fonction de la distance est globalement cohérente avec la prédiction théorique, à l'exception des mesures faites pour des distances importantes (supérieures à 4 m). La condition de sol absorbant ayant été approximée par une couche de laine minérale de 7,5 cm d'épaisseur, il se peut que cette dernière n'ait pas été suffisante et uniforme pour assurer pleinement une condition d'absorption totale au sol. Néanmoins, au vu des résultats présentés à la Figure 23, il

est clair que les interférences sont plus visibles à grande distance pour un coefficient de réflexion R donné, ce qui est cohérent avec notre observation.

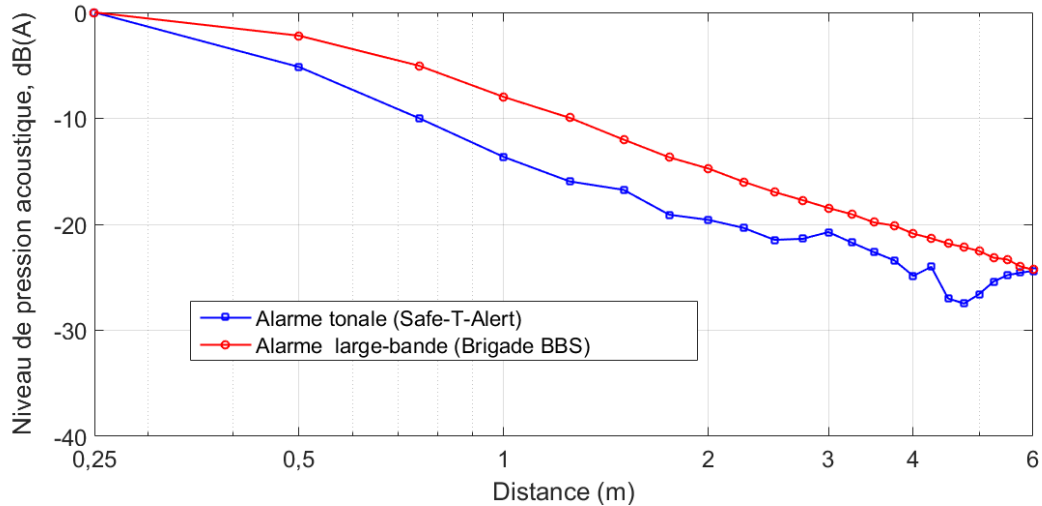


Figure 24. Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de la distance pour les deux alarmes de référence, pour un sol absorbant.

Dans le cas du sol réfléchissant, les résultats obtenus avec les deux alarmes diffèrent fortement. Dans le cas de l'alarme tonale, des variations importantes du niveau de pression acoustique sont constatées, en accord avec la littérature (Vaillancourt, Nélisse, Laroche, Giguère, Boutin et Laferrière, 2012) et avec le résultat présenté dans la Figure 3.

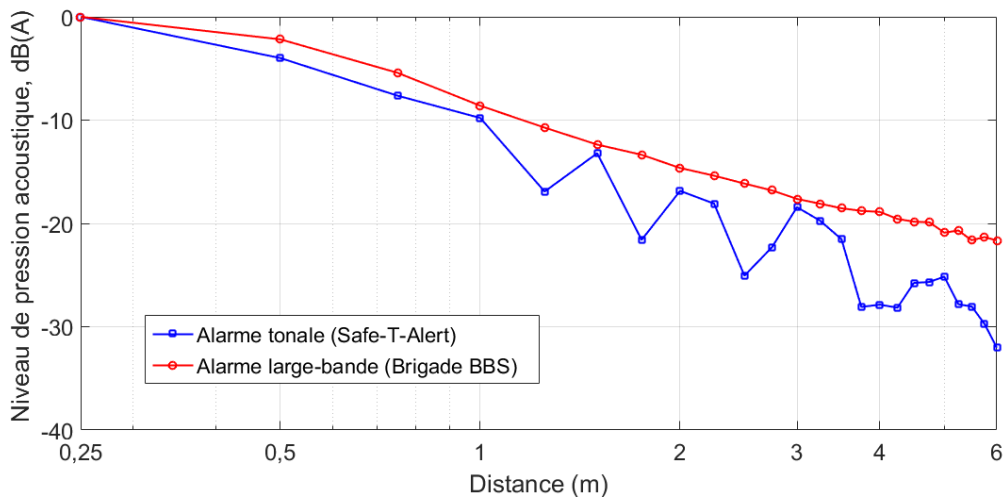


Figure 25. Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de la distance pour les deux alarmes de référence, pour un sol réfléchissant.

Les réductions importantes de niveaux de pression acoustique surviennent à des distances de 1,25, 1,75, 2,25 et 3,75 m de la source. Les réductions observées sont respectivement de 5, 7, 7 and 6,5 dB par rapport au cas du monopole idéal en champ libre. Même si l'échantillonnage spatial est très différent entre le résultat de calcul fourni à la Figure 23 (0,01 m) et le résultat de mesure présenté à la Figure 25 (0,25 m), l'adéquation entre calcul et mesure est néanmoins satisfaisante.

Les résultats obtenus dans le cas de l'alarme large bande sont remarquablement similaires entre les deux conditions de tests, indiquant que le champ de pression acoustique généré par l'alarme est très peu affecté par la condition au sol.

5.2.3 Haut-parleurs paramétriques (HPP)

Les niveaux de pression acoustique mesurés en fonction de la distance pour des conditions de sol absorbant et pour les deux HPP, selon le signal d'entrée (tonal ou large bande), sont donnés dans la Figure 26. De la même manière, les niveaux de pression acoustique mesurés en fonction de la distance pour des conditions de sol réfléchissant et pour les deux HPP, selon le signal d'entrée (tonal ou large bande), sont donnés dans la Figure 27. Pour chaque graphique, les niveaux de pression acoustique sont normalisés par rapport au maximum mesuré, soit à une distance de 0,25 m comme dans le cas de la section 5.2.2.

Que ce soit avec le plancher absorbant ou réfléchissant, le comportement observé est généralement très différent de celui vu à la section 5.2.2. Les éléments différenciant entre les alarmes de référence et les HPP sont les suivants :

- À l'exception du HPP Acouspade en excitation large bande, la décroissance spatiale présente généralement deux pentes. Une première pour laquelle la décroissance du niveau est faible (tout du moins plus faible que celle constatée pour un monopôle), et une seconde pente pour laquelle la décroissance s'accroît fortement;
- L'excitation tonale va généralement conduire à la décroissance la plus importante du niveau de pression acoustique, avec des niveaux mesurés à 6 m qui montre une diminution de plus de 30 dB du niveau de pression acoustique.

En résumé, dans les résultats présentés dans cette section, le HPP Acouspade avec excitation large bande se distingue clairement des autres cas testés. Avec l'utilisation de cette configuration, une décroissance relativement linéaire et proche d'une valeur de 6 dB par doublement de distance est obtenue. Néanmoins, il convient de garder à l'esprit dans l'analyse de ces résultats que la directivité est beaucoup plus marquée que pour les sources sonores précédentes. Ainsi, une petite erreur de positionnement du sonomètre avec l'accroissement de la distance entre la source et le sonomètre peut conduire à une erreur notable sur le niveau de pression mesuré. Ceci sera confirmé avec le cas des mesures tridimensionnelles présentées à la section 5.5, mesures qui permettent généralement de mieux estimer la décroissance spatiale du champ rayonné dans l'espace.

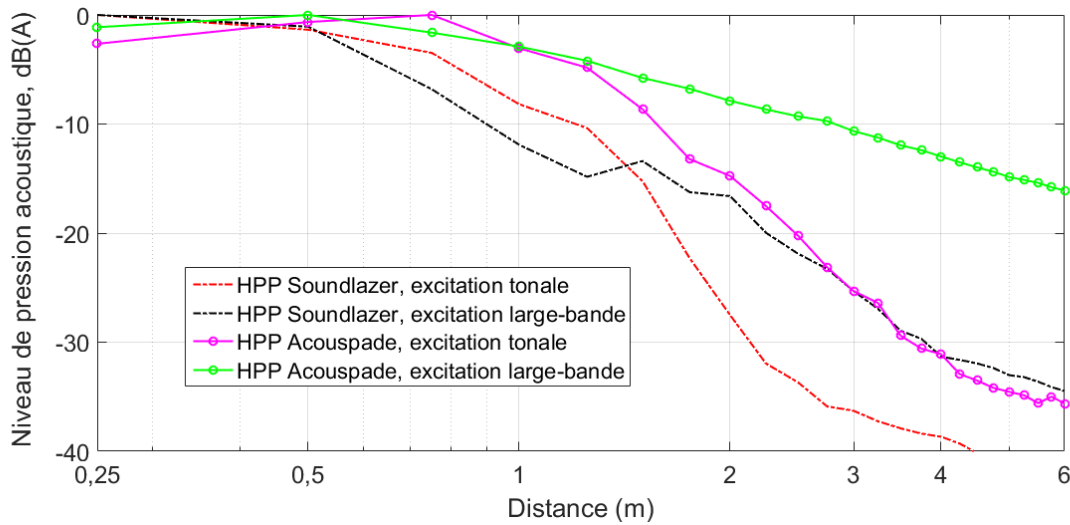


Figure 26. Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de la distance pour les deux HPP avec excitation tonale et large bande, pour un sol absorbant.

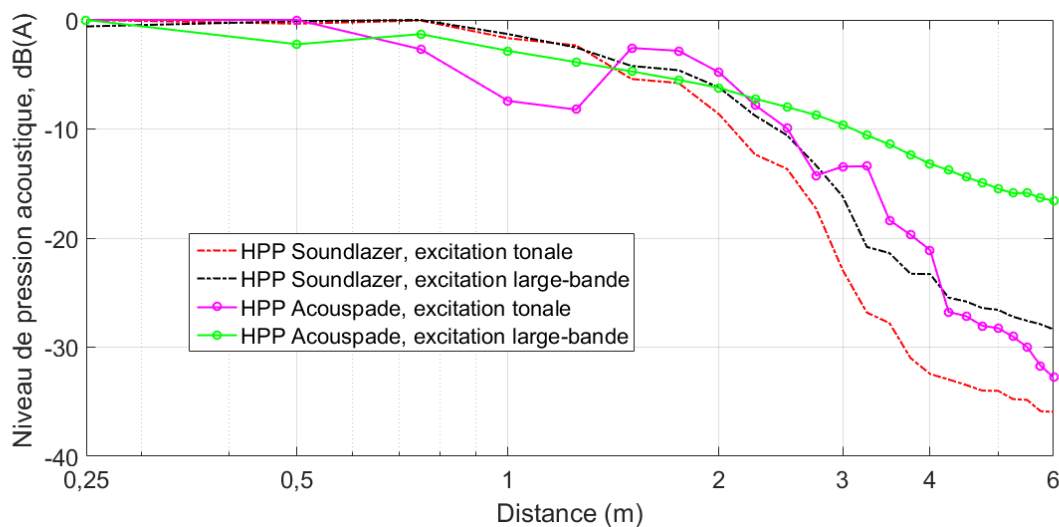


Figure 27. Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de la distance pour les deux HPP avec excitation tonale et large bande, pour un sol réfléchissant.

5.3 Niveau de pression acoustique et directivité en fonction de l'angle

5.3.1 Alarmes de référence

Les résultats en termes de niveaux acoustiques obtenus pour une séparation fixe entre l'alarme et le sonomètre, pour une position angulaire variable, sont fournis à la Figure 28. La partie gauche du graphique présente les niveaux dans le plan horizontal et la partie droite du graphique présente quant à elle les niveaux dans le plan vertical (voir la Figure 11 pour un rappel des orientations). Pour les alarmes de référence, ce type de représentation en termes de niveau absolu, avec une échelle de niveau relativement étendue (de 0 à 100 dB), ne fait pas apparaître de différence

majeure, même si l'alarme large bande semble générer un signal d'amplitude moindre dans le plan vertical.

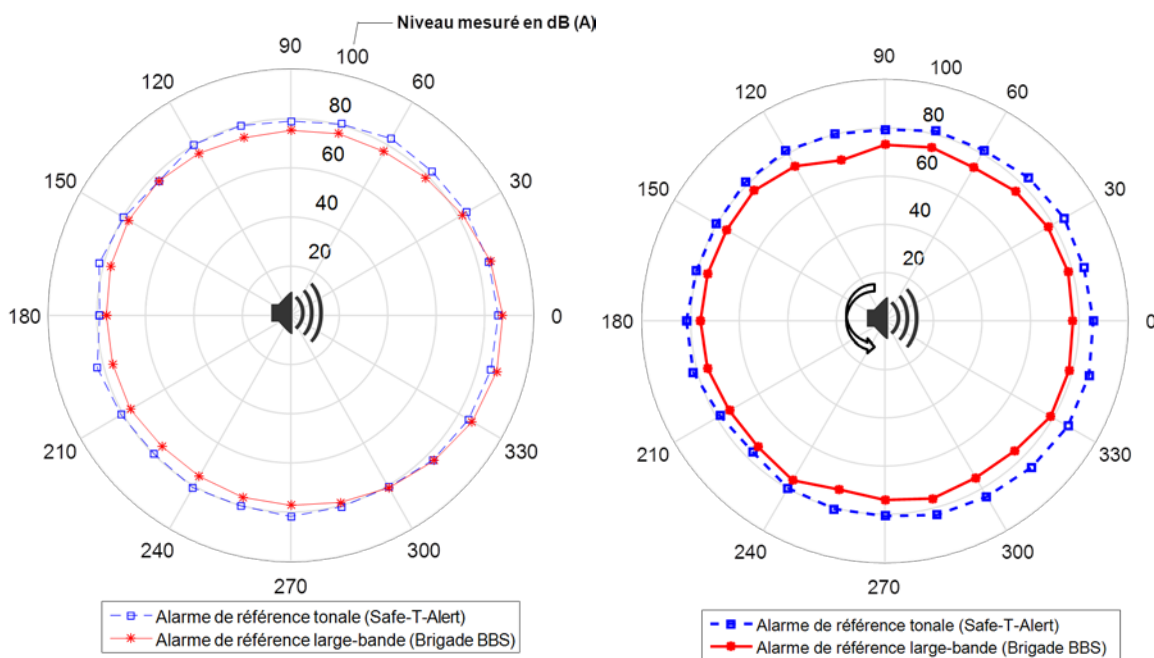


Figure 28. Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de l'angle dans le plan horizontal (à gauche) et dans le plan vertical (à droite) pour les deux alarmes commerciales de référence.

La Figure 29 présente donc les résultats des mêmes mesures, mais maintenant illustrés sous forme de directivité. La directivité présentée dans ce cas est la différence entre la valeur mesurée à l'angle considéré et la valeur pour un angle de 0° . Une différence signifie donc une diminution de niveau par rapport à cet angle (le maximum étant couramment obtenu dans l'axe de l'alarme). Dans notre cas, le maximum est obtenu pour un angle sensiblement supérieur. Les résultats fournis dans la Figure 29(a) montrent que pour des angles supérieurs à $\pm 90^\circ$ (par rapport à la position dans l'axe, soit 0°), le niveau de pression acoustique décroît en moyenne de 5,5 dB dans les directions horizontale et verticale (cette moyenne est une simple moyenne arithmétique pour des questions d'illustrations). La différence moyenne de niveau est, en considérant tous les points de mesure, de -4 dB.

Contrairement au cas de l'alarme tonale, les résultats obtenus pour l'alarme large bande montrent une décroissance de niveau beaucoup plus importante pour les angles supérieurs à $\pm 90^\circ$, atteignant une valeur moyenne de -11,2 et -11,5 dB pour le plan horizontal et le plan vertical respectivement (moyenne calculée pour des angles entre 90° et 270°). La différence moyenne de niveau en considérant tous les points de mesure est de -8,6 dB. La légère asymétrie selon les directions angulaires n'a pas été expliquée.

Ces résultats montrent que l'alarme tonale tend à se comporter comme une source quasi omnidirectionnelle (même si une réduction du niveau hors axe est constatée), alors que l'alarme large bande a une directivité beaucoup plus prononcée et procure des réductions de niveau beaucoup plus importantes pour des positions de mesure hors axe.

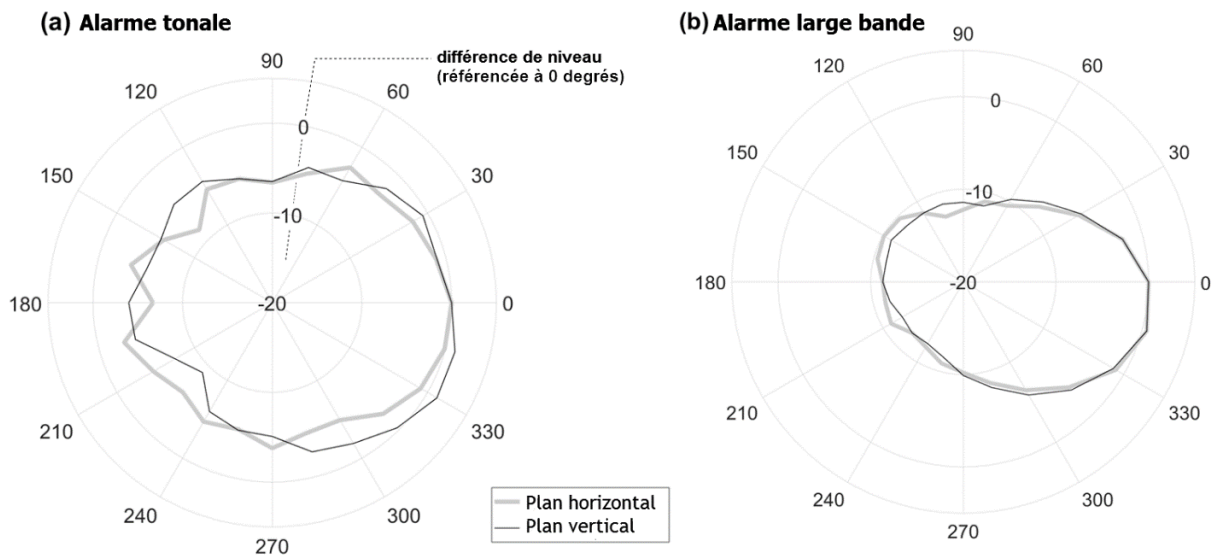


Figure 29. Directivité dans le plan horizontal et dans le plan vertical pour l'alarme tonale (à gauche) et pour l'alarme large bande (à droite).

5.3.2 Haut-parleurs paramétriques

Pour le cas des HPP, les niveaux sont uniquement illustrés en termes de valeur absolue, car les tendances sont différentes du cas précédent et beaucoup plus claires. Une première comparaison rapide de la Figure 28 avec la Figure 30 montre une différence flagrante dans la répartition angulaire des niveaux de pression. Dans l'axe principal du haut-parleur (position 0°), le niveau de pression sonore atteint toujours 80 dB quel que soit l'alarme, le haut-parleur ou le signal considéré. En dehors de l'axe principal, les tendances vues divergent fortement. Pour le cas des HPP :

- Le HPP Acouspade montre des répartitions angulaires de niveau de pression acoustique très similaires, que l'on considère une excitation large bande ou une excitation tonale. Cette conclusion s'applique dans le cas du plan horizontal et aussi dans celui du plan vertical. Les niveaux de pression acoustique sont réduits de plus de 40 dB dès qu'un angle de $\pm 90^\circ$ par rapport à l'axe principal (0°) est dépassé.
- Pour le HPP Soundlazer, la répartition de pression acoustique apparaît très différente de celle générée par le HPP Acouspade, que ce soit sur le plan considéré (horizontal ou vertical) que sur le type de signal. La décroissance du niveau de pression est très importante dès lors que la position angulaire dépasse $\pm 30^\circ$ par rapport à l'axe principal (0°). De plus, la directivité est encore plus marquée lorsque le signal tonal est utilisé. Ces résultats sont mieux explicités dans le cadre des mesures tridimensionnelles (section 5.4).

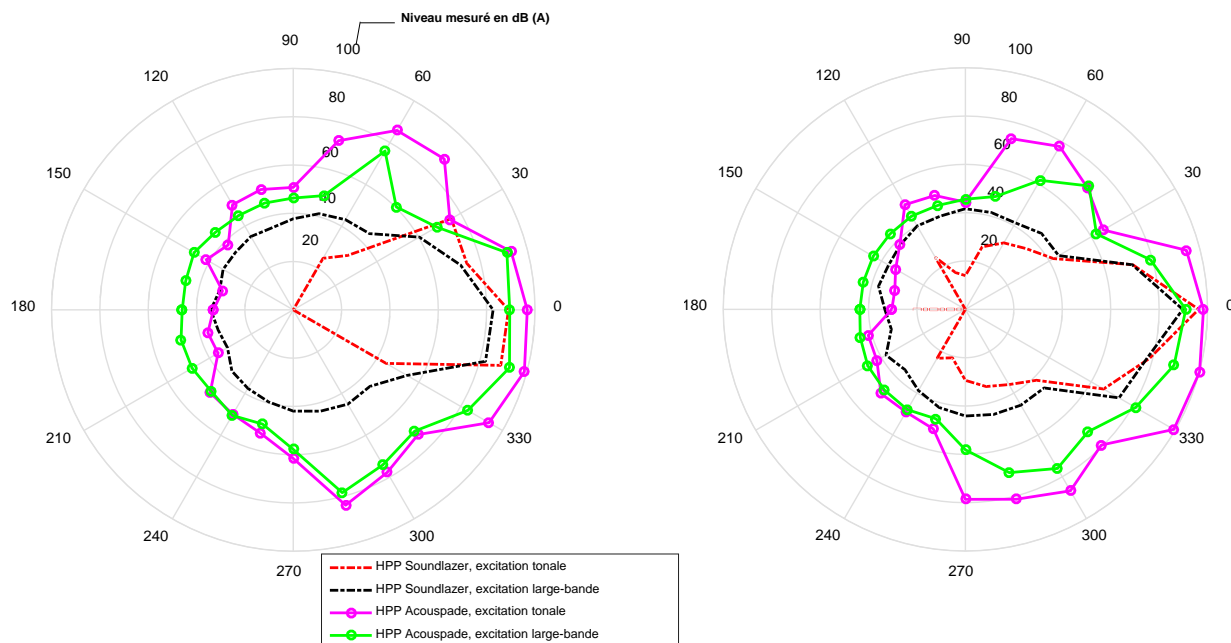


Figure 30. Niveau de pression acoustique mesuré en fonction de l'angle dans le plan horizontal (à gauche) et dans le plan vertical (à droite) pour les deux HPP de référence et deux types d'excitation.

5.4 Mesures tridimensionnelles en chambre semi-anéchoïque : cas des alarmes standards (alarmes de référence)

Dans cette section, les résultats obtenus pour chaque alarme standard sont comparés entre eux pour chaque condition de test. Il est rappelé que ces conditions concernent :

- Un environnement semi-anéchoïque avec sol absorbant et sol réfléchissant (section 5.4.1),
- Un environnement semi-anéchoïque avec sol réfléchissant et montage de l'alarme sur une surface rigide (section 5.4.2).

Les résultats sont présentés sous forme normalisée, c'est-à-dire que le niveau de pression acoustique indiqué est normalisé par rapport au niveau maximum mesuré. Ainsi, ces graphiques représentent une décroissance spatiale du niveau de pression acoustique en trois dimensions (il est précisé que les résultats sont interpolés pour faciliter la représentation). La position de la source est indiquée par un cercle rouge. Afin de simplifier la visualisation des résultats, ils sont présentés selon deux coupes, dans un plan horizontal et dans un plan vertical.

5.4.1 Environnement semi-anéchoïque avec condition de sol absorbant et de sol réfléchissant

La Figure 31 et la Figure 32 présentent les niveaux de pression acoustique obtenus pour chaque alarme, avec la condition de sol absorbant et la condition de sol réfléchissant, respectivement. Les résultats obtenus pour l'alarme tonale sont présentés en partie haute de chaque figure, et ceux concernant l'alarme large bande sont illustrés en partie basse.

Dans le cas du sol absorbant, les deux alarmes montrent une répartition relativement homogène du champ de pression acoustique rayonnée, celui obtenu dans le cadre de l'alarme large bande étant sensiblement plus uniforme. Néanmoins, les différences observées entre les deux types d'alarmes ne sont pas majeures.

Dans le cas du sol réfléchissant, les résultats diffèrent alors fortement en fonction du type d'alarme. Des variations abruptes du niveau sont vues dans le cas de l'alarme tonale, avec des différences de plus de 12 dB pouvant survenir sur des distances de l'ordre d'une séparation de microphones, soit 30 cm. Ces variations sont similaires à celles vues dans le cas des mesures unidimensionnelles (section 5.2.2). Il est précisé que ces mesures tridimensionnelles permettent de mettre en évidence que la variation du niveau sonore ne dépend pas uniquement de la séparation entre l'alarme et le récepteur pour une hauteur donnée (souvent fixée pour l'alarme, lorsque montée sur un véhicule). Les niveaux perçus dépendent également de la hauteur du récepteur (du travailleur) et de sa position latérale par rapport au chariot. Ainsi, une caractérisation à une distance fixe et à une hauteur fixe et avec une condition de sol absorbant, comme préconisée dans les normes (voir section 4.3), paraît extrêmement limitative quant à la performance de l'alarme en conditions réelles.

Dans le cas de l'alarme large bande, les résultats obtenus avec sol réfléchissant et sol absorbant sont comparables, et démontrent une sensibilité réduite à la condition de sol avec aucune variation spatiale importante du niveau de pression sonore, une caractéristique souhaitée pour garantir une bonne perception du signal généré par l'alarme.

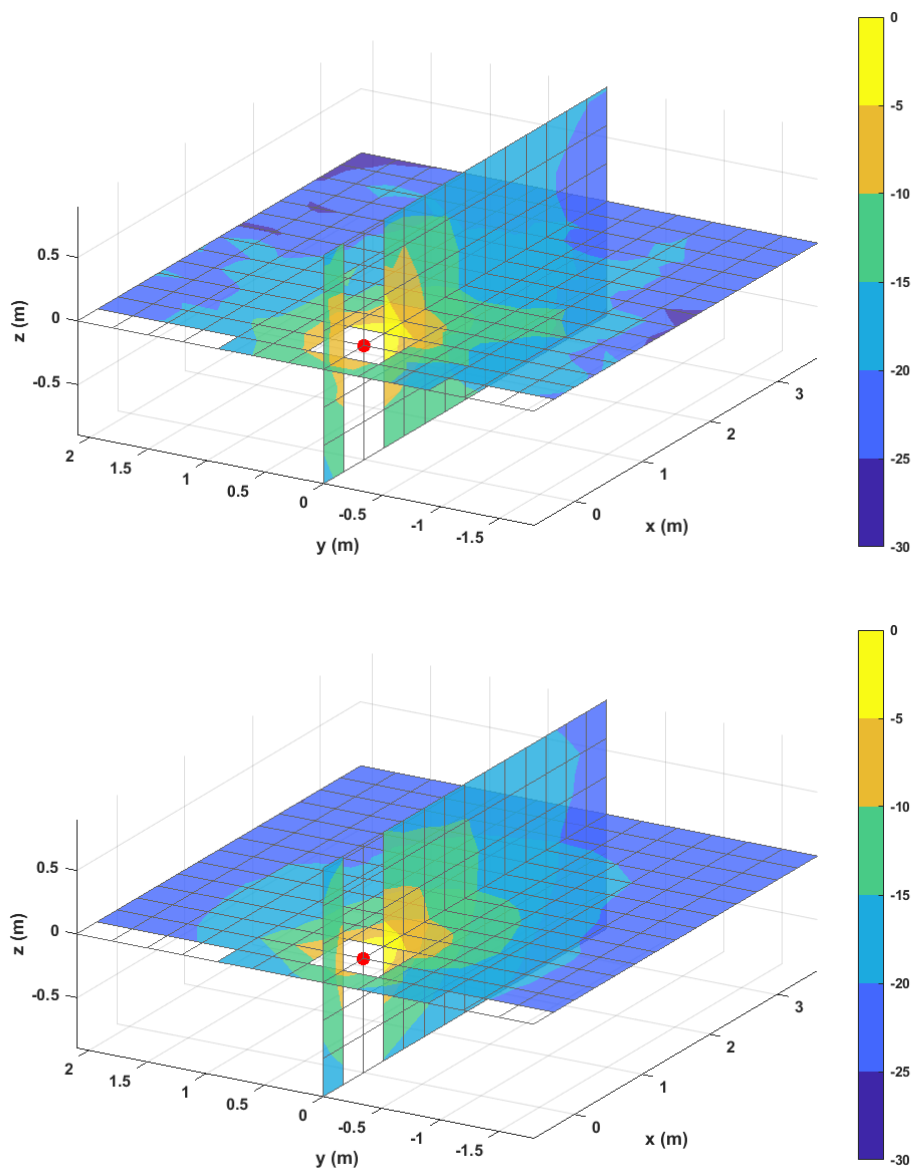


Figure 31. Condition de sol absorbant en salle semi-anéchoïque : Niveau de pression acoustique normalisé pour l'alarme tonale (haut) et l'alarme large bande (bas).

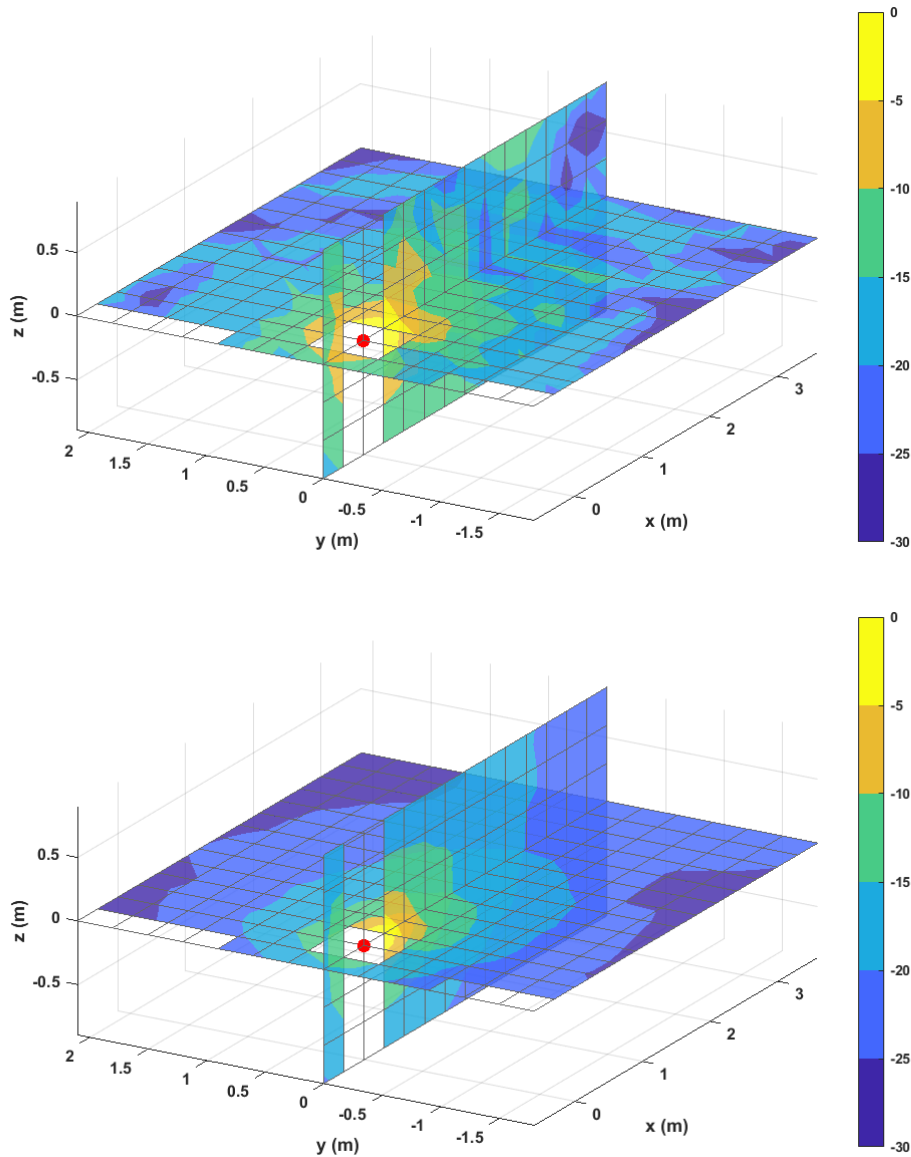


Figure 32. Condition de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque : Niveau de pression acoustique normalisé pour l'alarme tonale (haut) et l'alarme large bande (bas).

5.4.2 Condition de sol réfléchissant avec montage sur une surface rigide

Les résultats obtenus pour un sol réfléchissant avec un montage sur une surface rigide sont fournis pour l'alarme tonale (en partie haute) et l'alarme large bande (en partie basse) de la Figure 33. Il est précisé qu'aucun résultat de mesure n'est fourni pour les points proches de l'alarme, étant donné la présence physique de la boîte rigide.

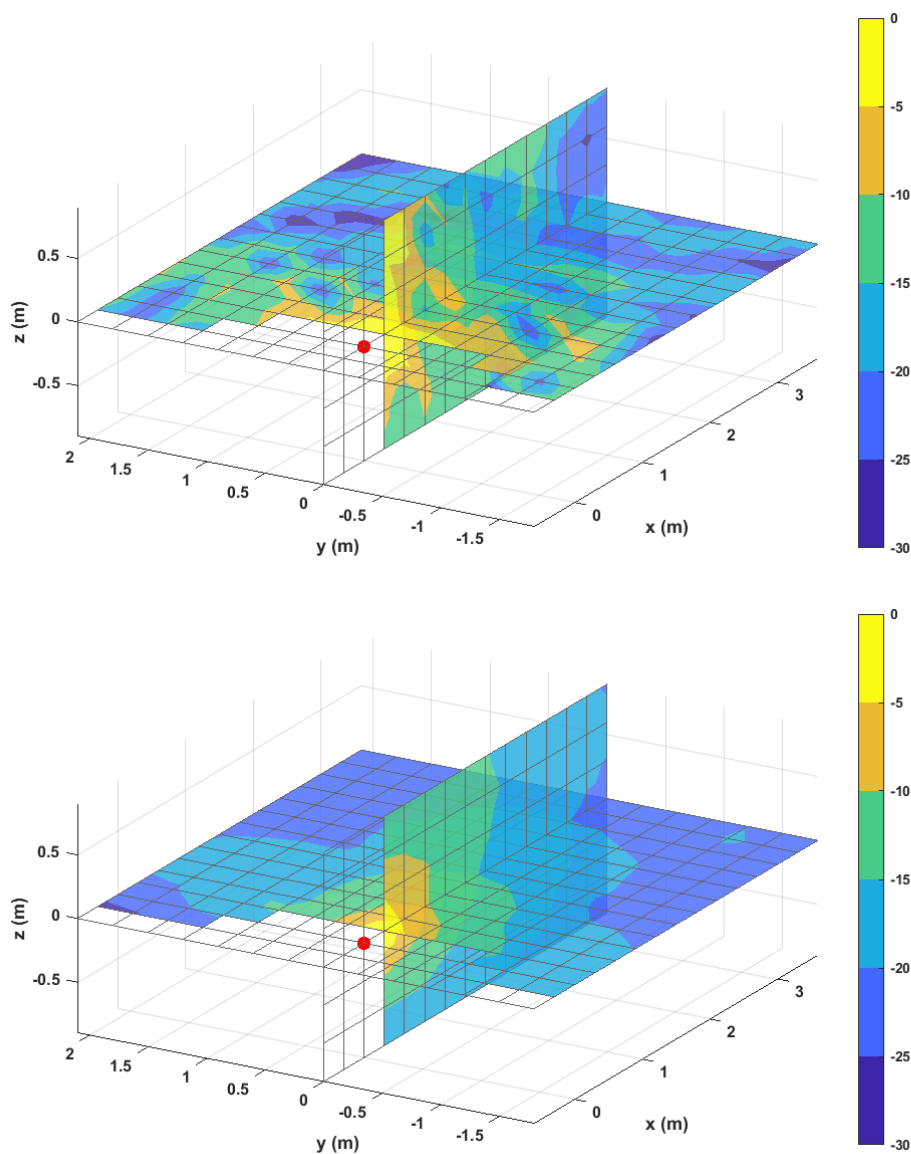


Figure 33. Condition de sol réfléchissant avec montage sur une surface rigide en salle semi-anéchoïque : Niveau de pression acoustique normalisé pour l'alarme tonale (haut) et l'alarme large bande (bas).

Les résultats obtenus pour le cas de l'alarme tonale montrent une augmentation des effets d'interférence avec le montage sur une surface. *A contrario*, le montage de l'alarme large bande sur le volume rigide ne semble pas altérer de manière significative la réponse spatiale. Le seul effet amené par la présence de ce volume rigide est une décroissance sensiblement moins marquée du niveau de pression acoustique dans la direction latérale ($\pm y$).

5.5 Mesures tridimensionnelles en chambre semi-anéchoïque : cas des HPP

5.5.1 *Mesure en chambre semi-anéchoïque avec condition de sol absorbant*

La Figure 34 présente les niveaux de pression acoustique obtenus pour une excitation tonale avec le HPP Soundlazer (partie haute) et avec le HPP Acouspade (partie basse) avec condition de sol absorbant. Dans les deux cas, et ce, même si on pouvait s'y attendre au vu des résultats précédemment obtenus, la répartition spatiale du champ de pression acoustique rayonnée est très différente de celle obtenue dans le cas des alarmes standards. Il est précisé que certains points de mesure ne sont pas inclus (comme dans la partie haute de la Figure 34), car n'apportant aucune information physique supplémentaire. La Figure 35 présente le niveau de pression acoustique pour une excitation large bande avec le HPP Acouspade (le cas du Soundlazer n'est pas illustré par souci de concision).

Comparativement aux niveaux de pression acoustique 2D présentés à la section 5.2.3, le résultat 3D permet d'apprécier le patron de directivité dans son ensemble. Il est facilement compréhensible qu'une petite erreur de positionnement du récepteur (le sonomètre dans la section 5.2.3) avec l'accroissement de la distance entre la source et le sonomètre puisse conduire à une erreur notable sur le niveau de pression mesuré. Avec l'utilisation de l'antenne, on aboutit à une cartographie plus homogène et plus facilement interprétable.

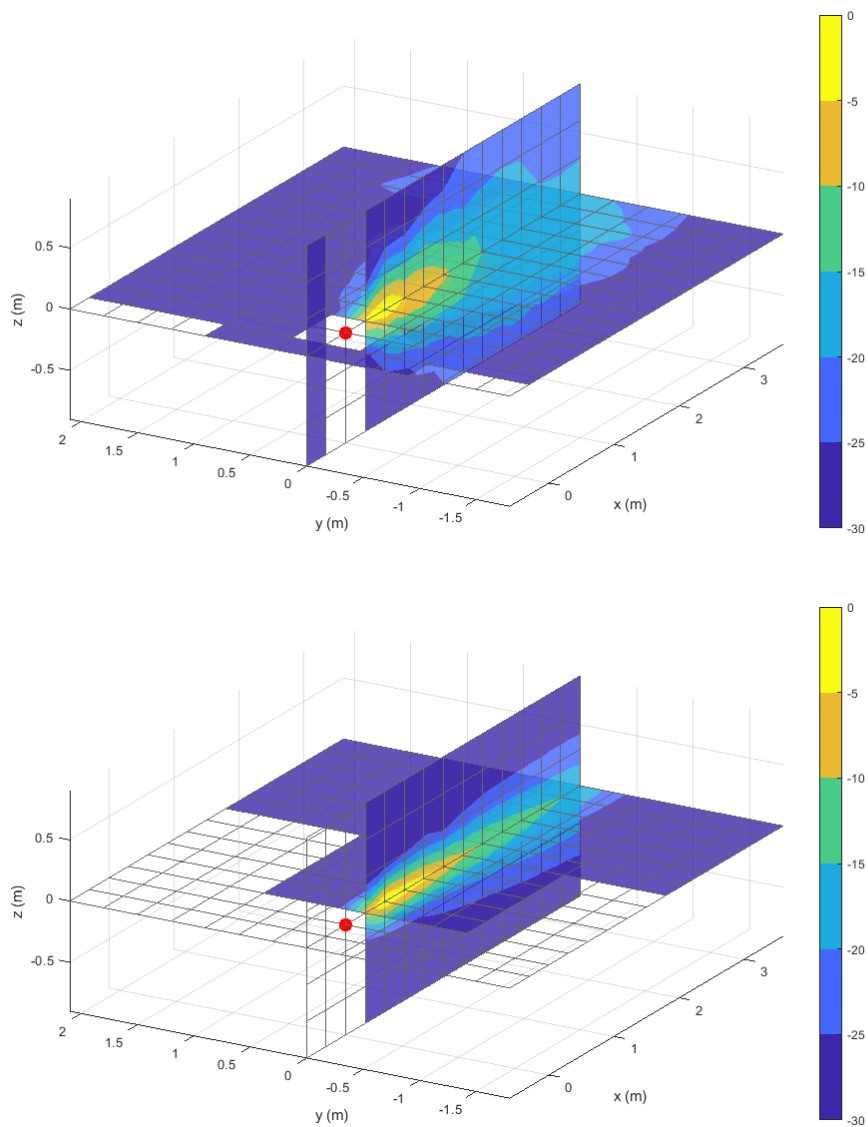


Figure 34. Condition de sol absorbant en salle semi-anéchoïque avec le signal tonal : Niveau de pression acoustique normalisé pour le HPP Soundlazer (haut) et pour le HPP Acouspade (bas).

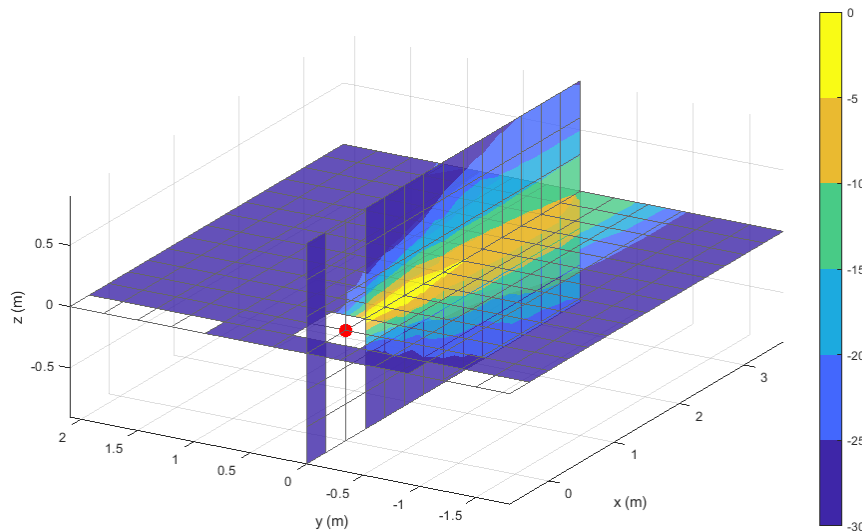


Figure 35. Condition de sol absorbant en salle semi-anéchoïque avec le signal large bande : Niveau de pression acoustique normalisé pour le HPP Acouspade.

5.5.2 Conditions de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque, sans ou avec montage sur une surface rigide

De manière similaire à la Figure 34, la Figure 36 présente les niveaux de pression acoustique normalisés obtenus pour une excitation tonale pour le HPP Soundlazer (partie haute) et le HPP Acouspade (partie basse), mais pour une condition de sol réfléchissant sans montage sur une surface rigide. Une comparaison des résultats illustrés dans ces deux figures montre une influence négligeable de la condition au sol.

À des fins d'illustration, la Figure 37 présente le résultat obtenu pour une excitation large bande avec le HPP SoundLazer (le cas du HPP Acouspade n'est cette fois pas illustré, toujours par souci de concision).

Un montage sur une surface rigide n'entraîne qu'un changement minime dans les niveaux de pression acoustique normalisés, comme présentés aux Figure 38 et Figure 39.

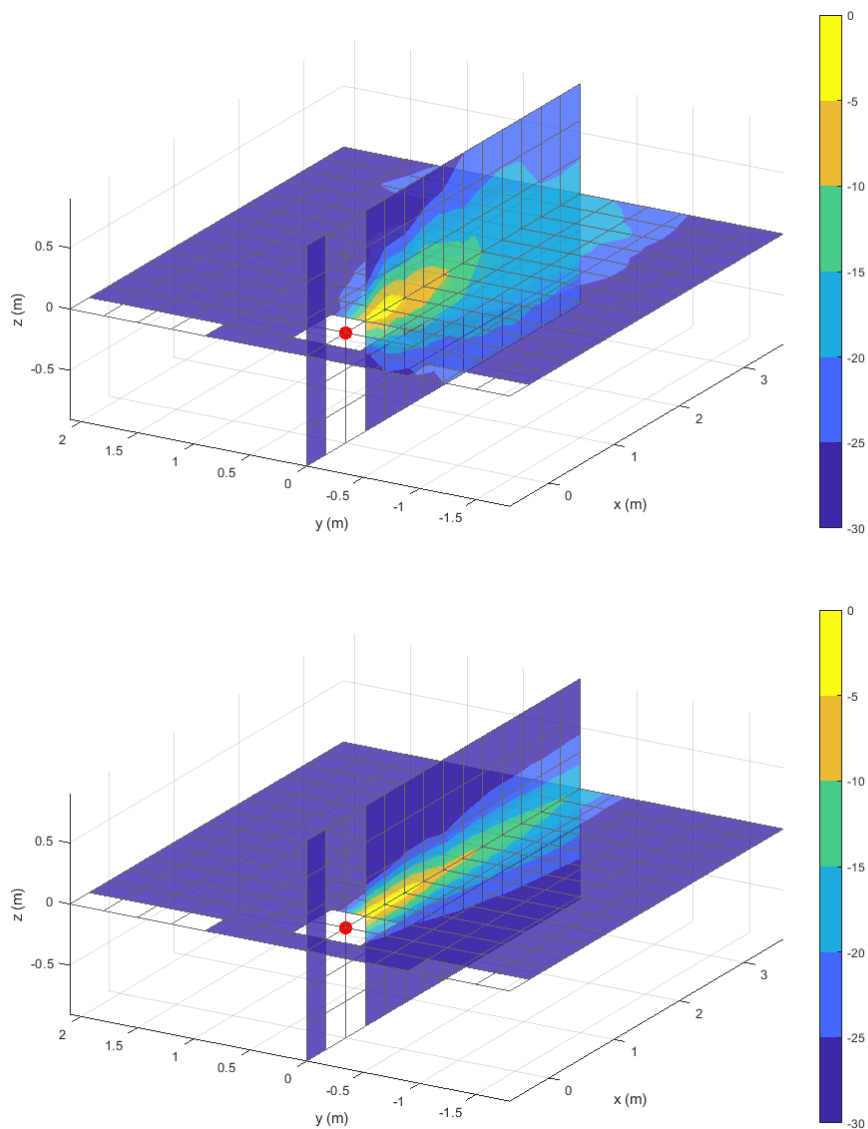


Figure 36. Condition de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque sans montage sur une surface rigide, avec le signal tonal : Niveau de pression acoustique normalisé pour le HPP Soundlazer (haut) et pour le HPP Acouspade (bas).

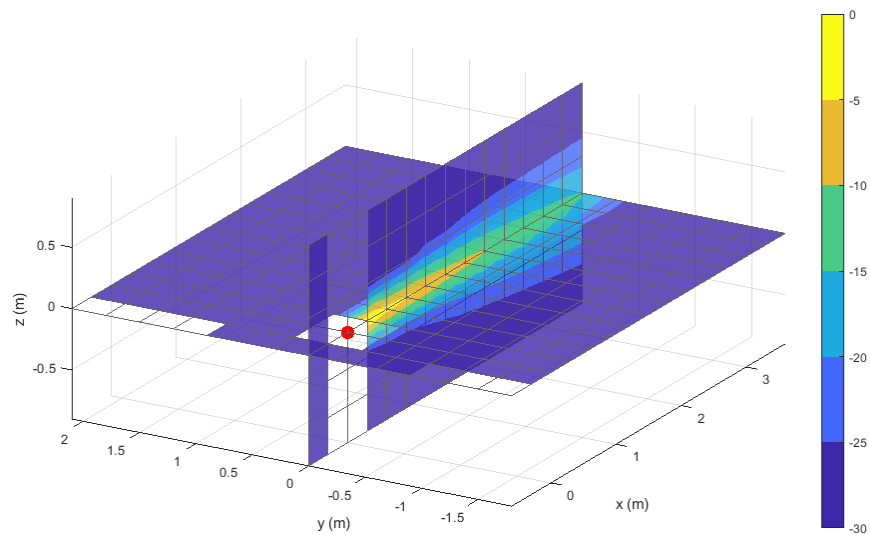


Figure 37. Condition de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque sans montage sur une surface rigide, avec le signal large bande : Niveau de pression acoustique normalisé pour le HPP Soundlazer.

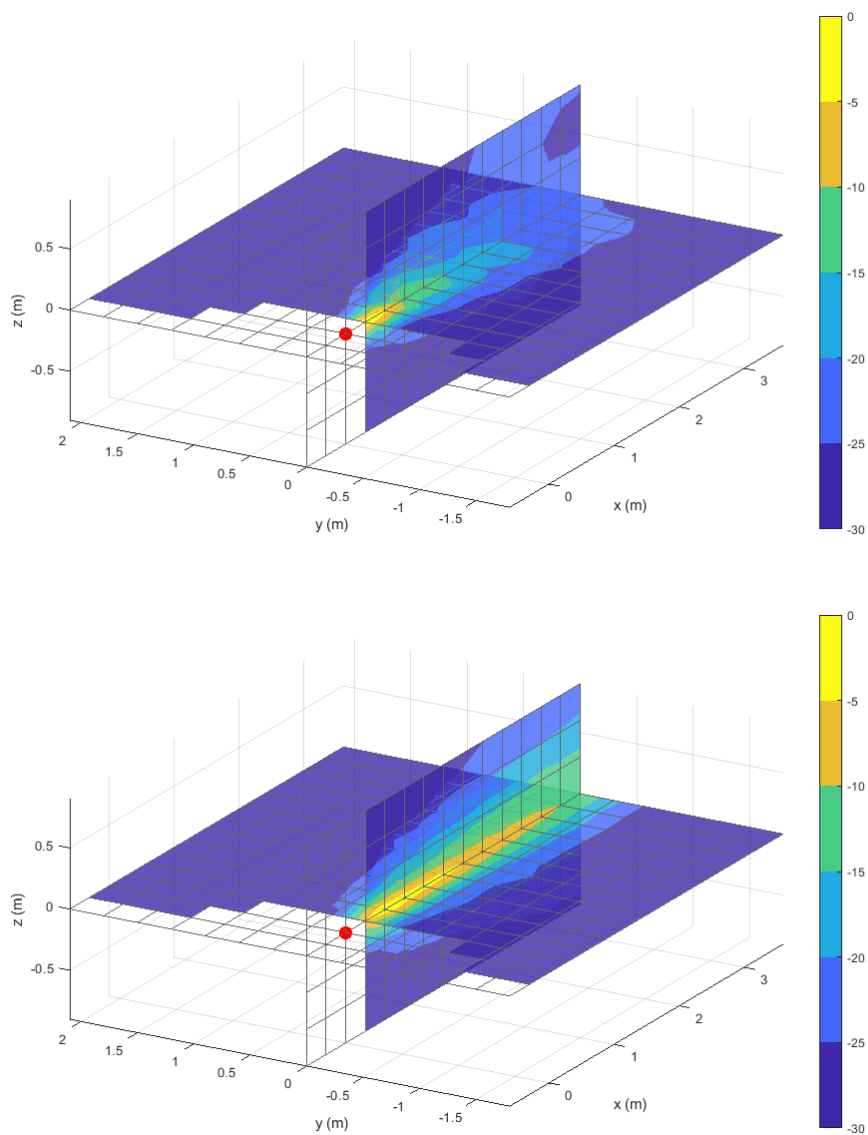


Figure 38. Condition de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque avec montage sur une surface rigide, avec le signal tonal : Niveau de pression acoustique normalisé pour le HPP Soundlazer (haut) et pour le HPP Acouspade (bas).

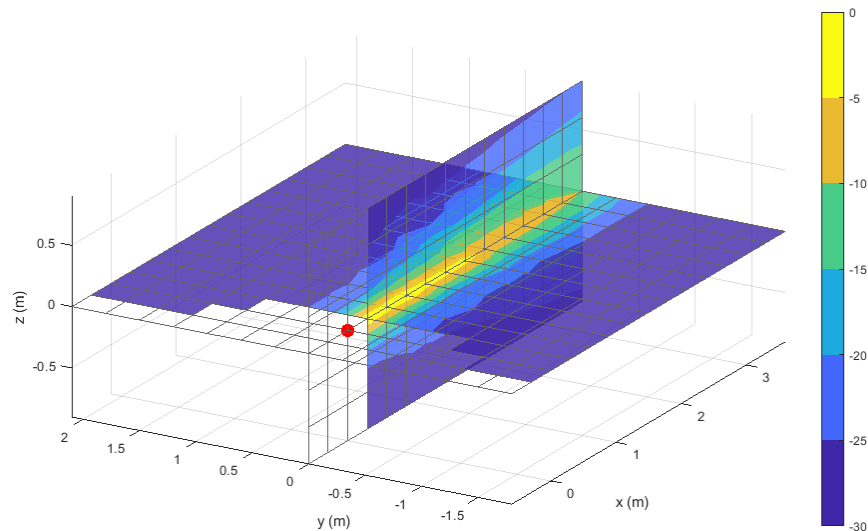


Figure 39. Condition de sol réfléchissant en salle semi-anéchoïque avec montage sur une surface rigide, avec le signal large bande : Niveau de pression acoustique normalisé pour le HPP SoundLazer.

5.6 Mesures tridimensionnelles en chambre réverbérante : cas des alarmes standards (alarmes de référence)

Les alarmes standards ont été placées dans la chambre réverbérante; aucun effet additionnel n'a été testé (modification de la condition au sol ou encore montage sur une surface rigide). Les résultats obtenus pour l'alarme tonale et l'alarme large bande sont respectivement donnés en partie haute et partie basse de la Figure 40.

Comme dans le cas des tests effectués avec un sol réfléchissant et un montage sur une surface rigide, le champ acoustique généré par l'alarme tonale présente des variations spatiales de niveau qui sont moins importantes que dans le cas de la salle semi-anéchoïque avec sol réfléchissant. Les réductions locales de niveau atteignent néanmoins de 10 à 15 dB. Ainsi, comme pour le cas d'une chambre semi-anéchoïque, des variations locales de niveau de pression acoustique sont notables pour une excitation tonale pour des conditions réverbérantes.

Concernant l'alarme large bande, le comportement observé est très différent. Aucune variation localisée du niveau de pression acoustique n'est observée, mais une zone de réduction de 5 dB est délimitée autour de l'alarme, pour une distance comprise entre 0,3 et 0,6 m. Pour tous les autres points de mesure, la combinaison des champs de pression direct et réfléchi procure un champ de pression acoustique plus uniforme. Le rayon de réverbération r_r (Kuttruff, 2017), pour lequel les amplitudes du champ direct et du champ réverbéré sont égales, vaut approximativement $0,057 \times (V/T_{rev})^{0.5}$, avec V le volume de la salle et T_{rev} le temps de réverbération. En se référant aux valeurs indiquées pour ces deux paramètres à la section 4.5, le rayon de réverbération r_r vaut 29 cm. Au-delà de cette distance, le champ sonore est en principe dominé par les réflexions sur les parois de la chambre et est approximativement uniforme. Ceci est en accord avec les observations expérimentales.

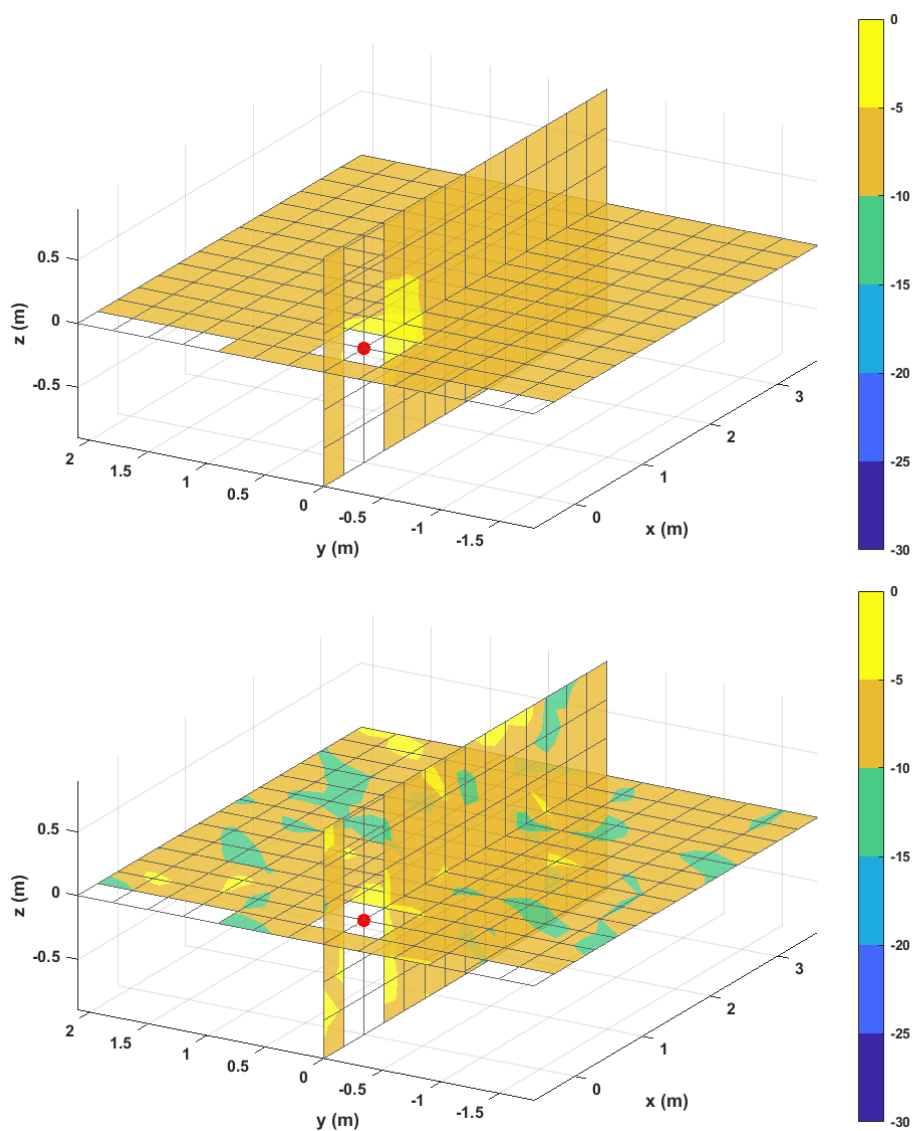


Figure 40. Test en chambre réverbérante : Niveau de pression acoustique normalisé pour le cas de l'alarme tonale (haut) et pour le cas de l'alarme large bande (bas).

5.7 Mesures tridimensionnelles en chambre réverbérante : cas des HPP avec signal tonal ou large bande

Comme dans le cas des mesures réalisées en chambre semi-anéchoïque, les résultats obtenus avec les HPP diffèrent fortement de ceux obtenus avec les alarmes de référence. Pour le cas du signal tonal (Figure 41), le modèle SoundLazer, avec sa forte directivité, génère un faisceau sonore directif, mais dont la décroissance de niveau est plus faible que celle vue dans le cas des mesures prises en chambre semi-anéchoïque. Ceci pourrait être lié à la réflexion importante se produisant sur la paroi lui faisant face. Pour le HPP Acouspade, des interférences sont visibles, mais le faisceau principal, même un peu plus large que dans le cas du SoundLazer, reste assez bien défini et s'étend sur une distance de plus d'un mètre. Ceci démontre que même dans ce cas critique, l'utilisation d'un HPP permet de bien circonscrire le signal dans une zone qui s'étend bien au-delà du rayon de réverbération. Les résultats présentés à la Figure 42, avec cette fois un signal large bande, illustrent l'immunité importante des deux HPP aux conditions très défavorables de ce local.

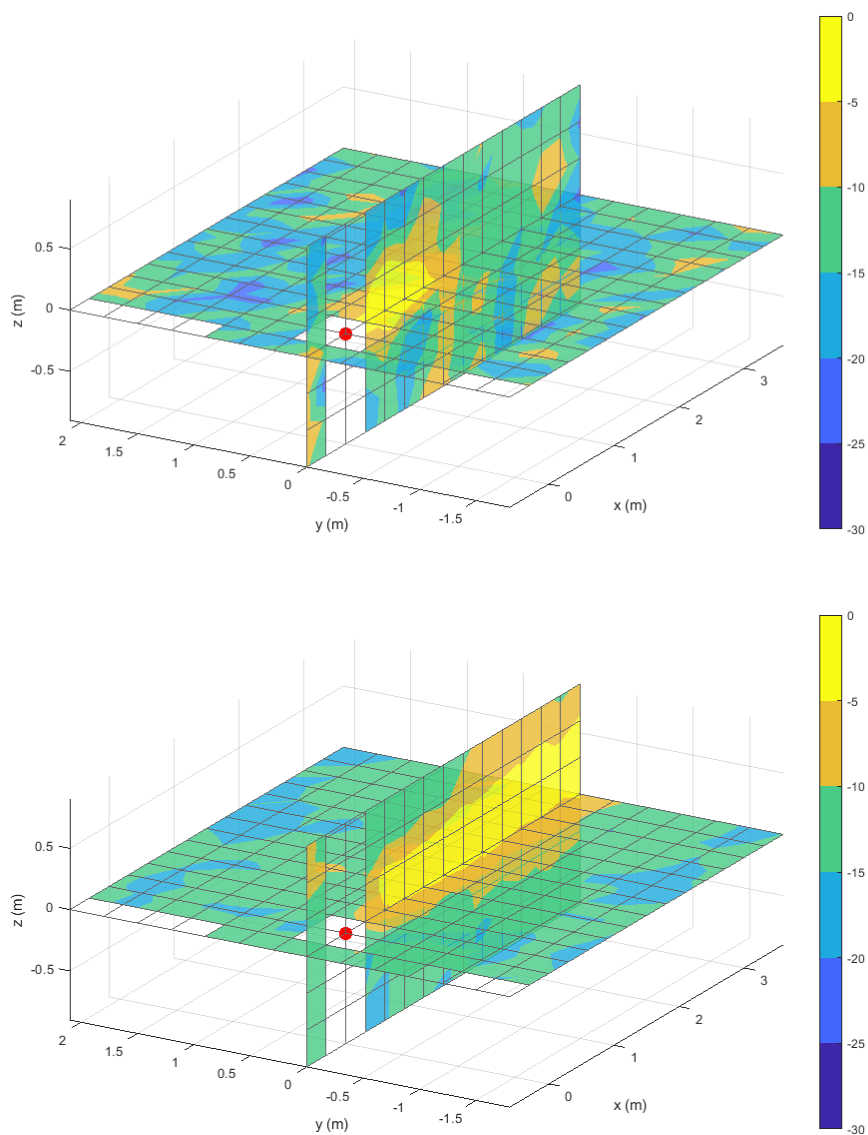


Figure 41. Test en chambre réverbérante avec le signal tonal : Niveau de pression acoustique normalisé pour le HPP Soundlazer (haut) et pour le HPP Acouspade (bas).

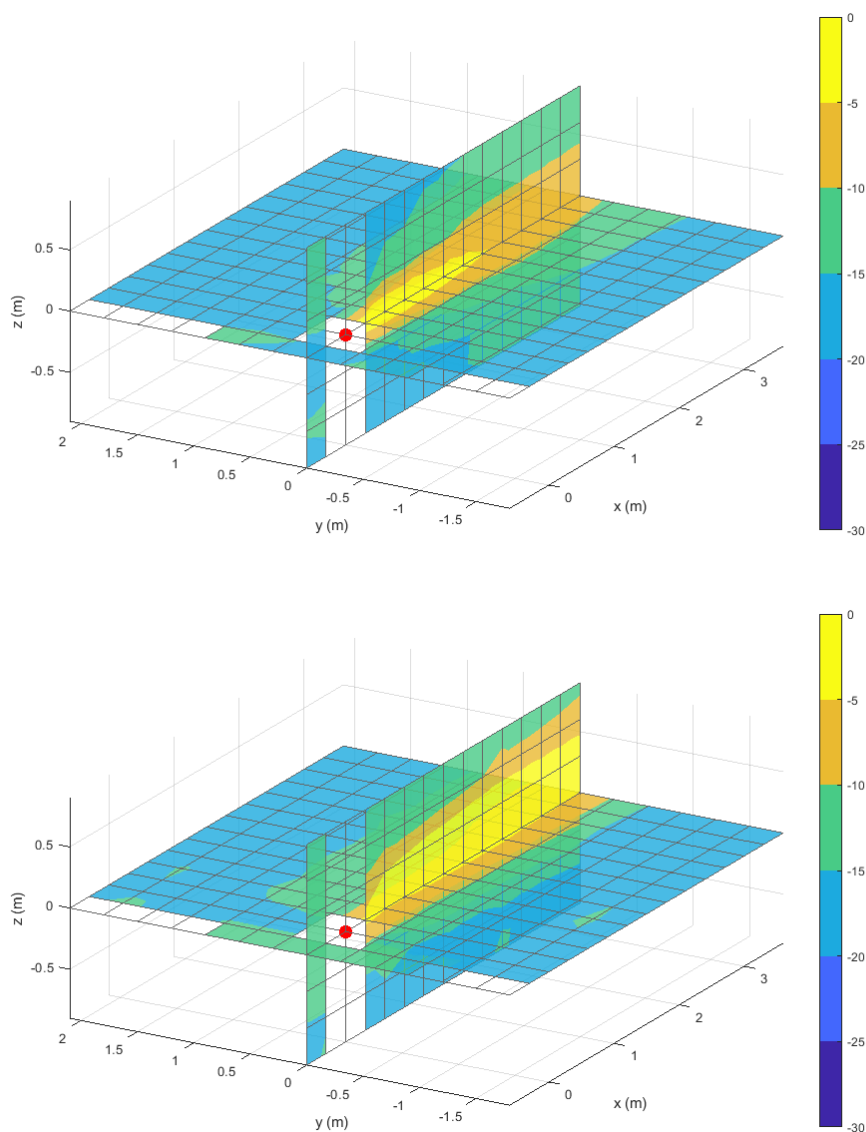


Figure 42. Test en chambre réverbérante avec le signal large bande : Niveau de pression acoustique normalisé pour le HPP Soundlazer (haut) et pour le HPP Acouspade (bas).

5.8 Tests en laboratoire pour la modification de la directivité

Pour la représentation des résultats de tests en laboratoire concernant la modification de la directivité, une coupe dans le plan horizontal est privilégiée, afin de mettre en évidence les variations de la répartition spatiale du champ de pression dans ce plan en fonction des arrangements testés. La Figure 43 décrit ces tests et la représentation spatiale utilisée.

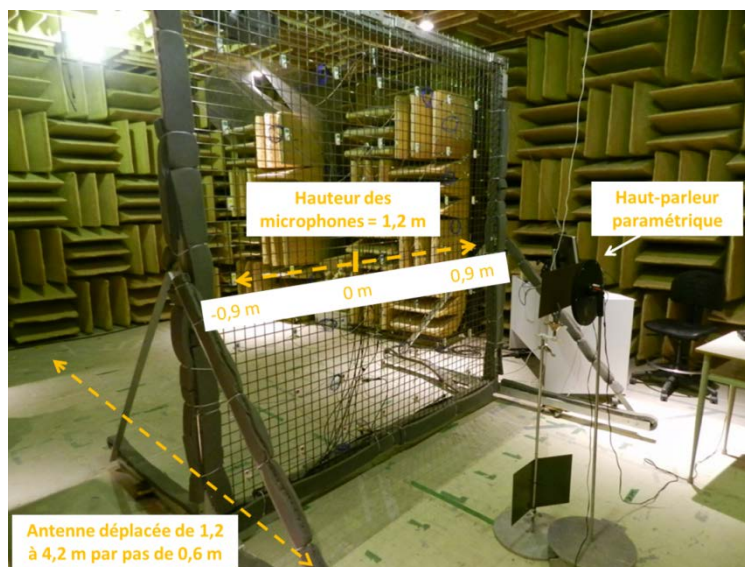


Figure 43. Illustration du test réalisé et description du plan de mesure utilisé pour la représentation des figures 44 à 47.

Les résultats obtenus les plus significatifs sont reportés dans les figures 44 à 49. À des fins de comparaison, les données sont représentées en termes de différence par rapport au maximum, et la gamme dynamique limitée à des valeurs de -20 à 0 dB. Ceci explique que dans le cas de la partie inférieure de la Figure 44 et de la Figure 45, des zones ne soient pas colorées (différences inférieures à -20 dB). Le cas du HPP Acouspade est majoritairement utilisé, ainsi que deux illustrations issues des tests sur le duo de HPP Soundlazer.

Dans l'ensemble, l'utilisation de déflecteurs courbes (portion de cylindre concave ou convexe) permet d'élargir la largeur du faisceau sonore généré, mais uniformise fortement les niveaux sur une distance d'environ 2 mètres. L'utilisation de ce type de déflecteurs procure certes un effet intéressant, mais il ne correspond pas à l'objectif recherché soit la génération de signaux d'alarme dans une zone délimitée correspondant typiquement à la zone de danger en arrière d'un véhicule (comme schématisé aux Figure 1, Figure 4 et Figure 5).

L'utilisation de deux HPP Soundlazer positionnés côte à côte permet l'obtention d'un double faisceau, mais ces faisceaux sont trop séparés pour procurer un effet intéressant dans le cas de notre étude. Une répartition de transducteurs sur une surface directement courbée et sans déflecteur semble être une piste intéressante.

Cette série de tests a finalement permis d'identifier la solution la plus prometteuse pour l'application des HPP à la problématique des alarmes de recul. En effet, la directivité marquée du faisceau peut avoir un effet non désiré et potentiellement perturbant pour la perception et la localisation du signal d'alarme : la création d'une source sonore fictive sur une surface réfléchissante. Cette perception est subjective (néanmoins identifiée par tous les membres de l'équipe de recherche); elle dépend beaucoup du cas de figure rencontré et également de la capacité de réflexion acoustique de la surface que le faisceau sonore rencontre. Néanmoins, il s'est avéré que cet effet était difficile à identifier de manière objective, c'est-à-dire sur les cartographies de pression acoustique obtenues.

La mise en place de grilles perforées permet de sensiblement homogénéiser la zone spatiale couverte par le faisceau, mais une conséquence directe de cette manœuvre est la diminution radicale de l'effet de 'source sonore fictive'. Par contre, cet effet est difficile à identifier lorsque les résultats présentés aux Figure 44 et Figure 45 sont comparés.

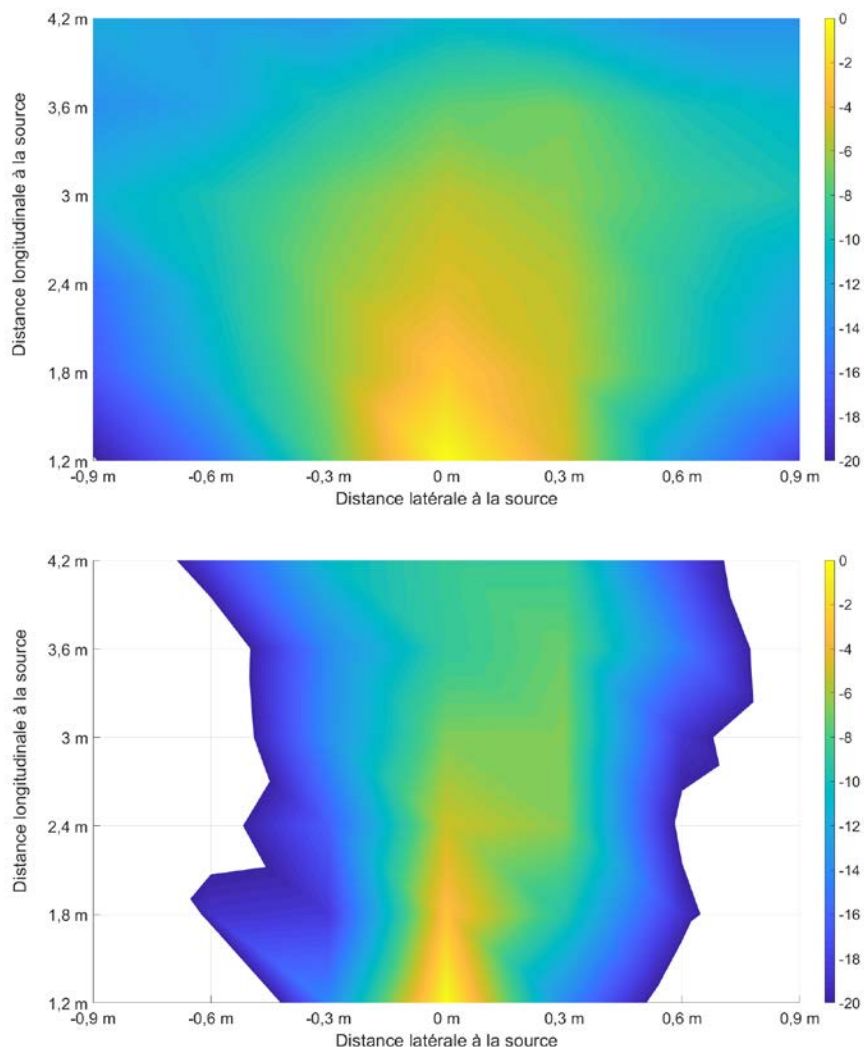


Figure 44. Niveau de pression acoustique pour le HPP Acouspade seul : excitation tonale (haut) et excitation large bande (bas).

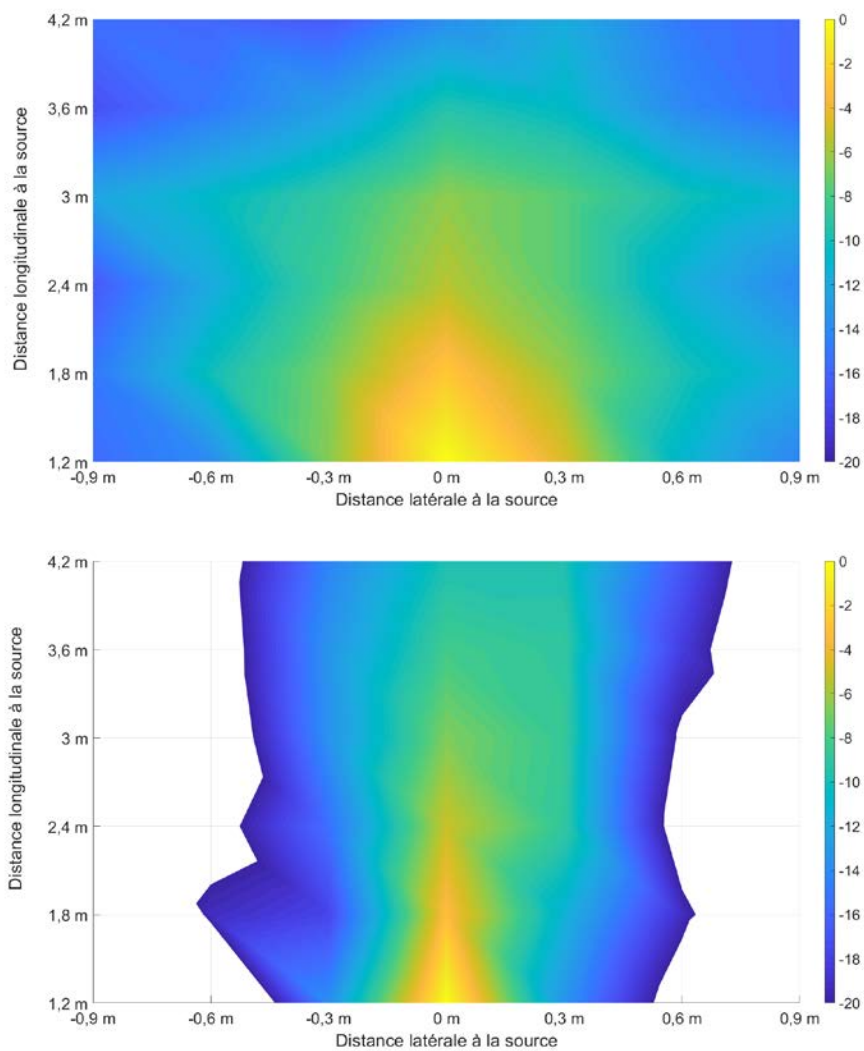


Figure 45. Niveau de pression acoustique pour le HPP Acouspade avec grille perforée : excitation tonale (haut) et excitation large bande (bas).

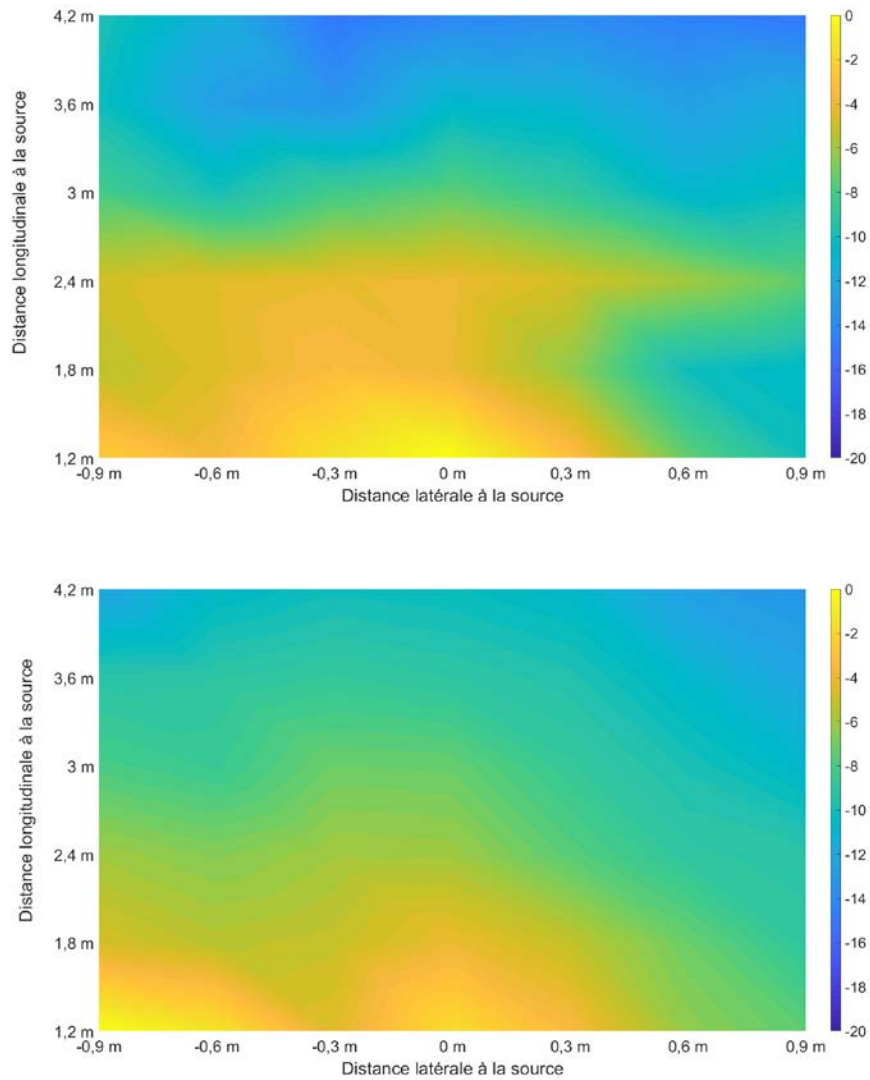


Figure 46. Niveau de pression acoustique pour le HPP Acouspade avec cylindre (déflecteur concave) : excitation tonale (haut) et excitation large bande (bas).

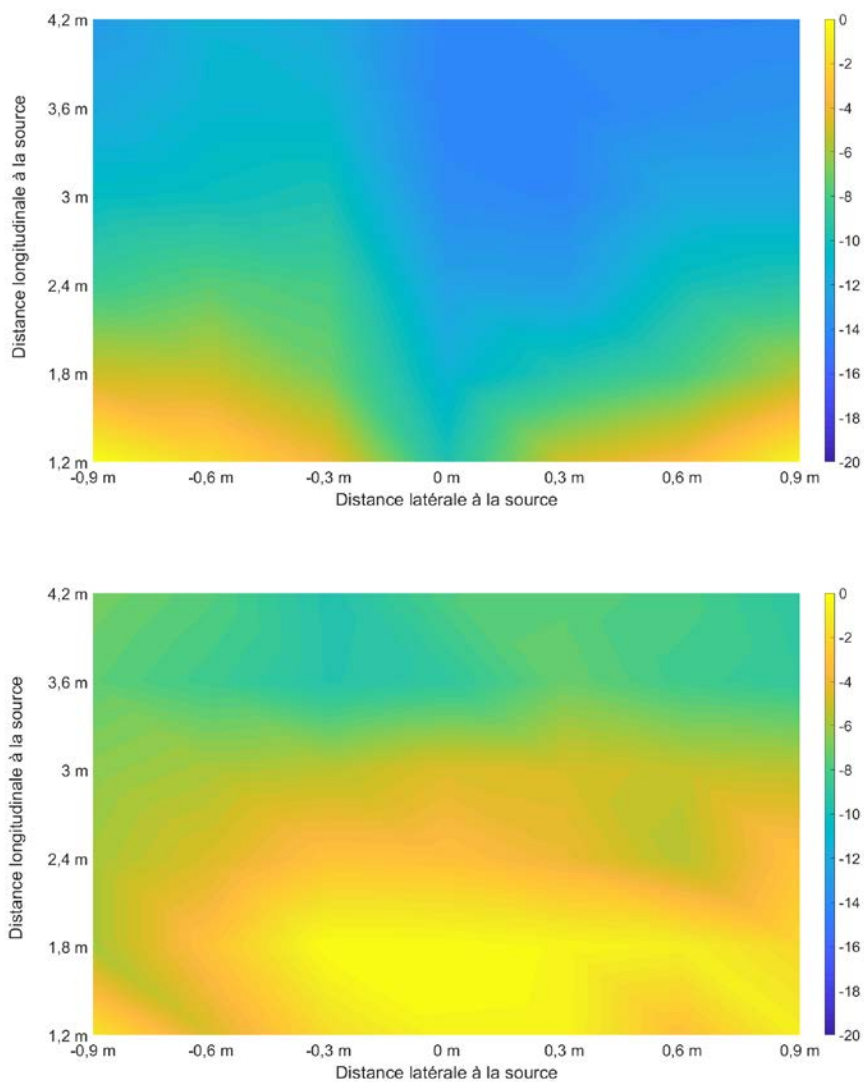


Figure 47. Niveau de pression acoustique pour le HPP Acouspade avec cylindre inversé (déflecteur convexe) : excitation tonale (haut) et excitation large bande (bas).

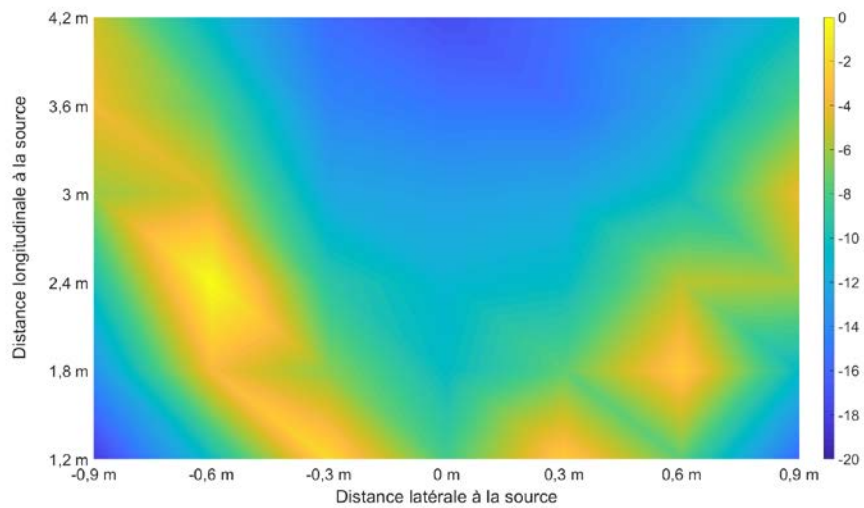


Figure 48. Niveau de pression acoustique pour le cas de l'utilisation de deux HPP SoundLazer : excitation tonale.

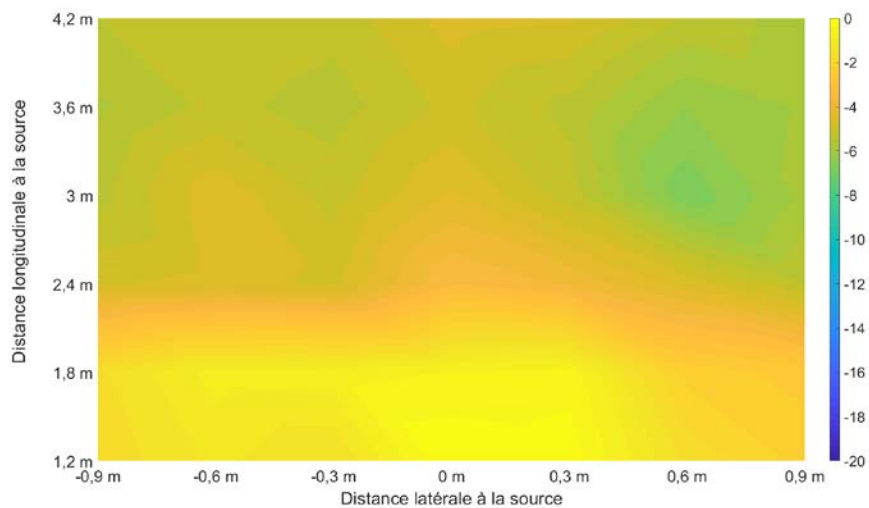


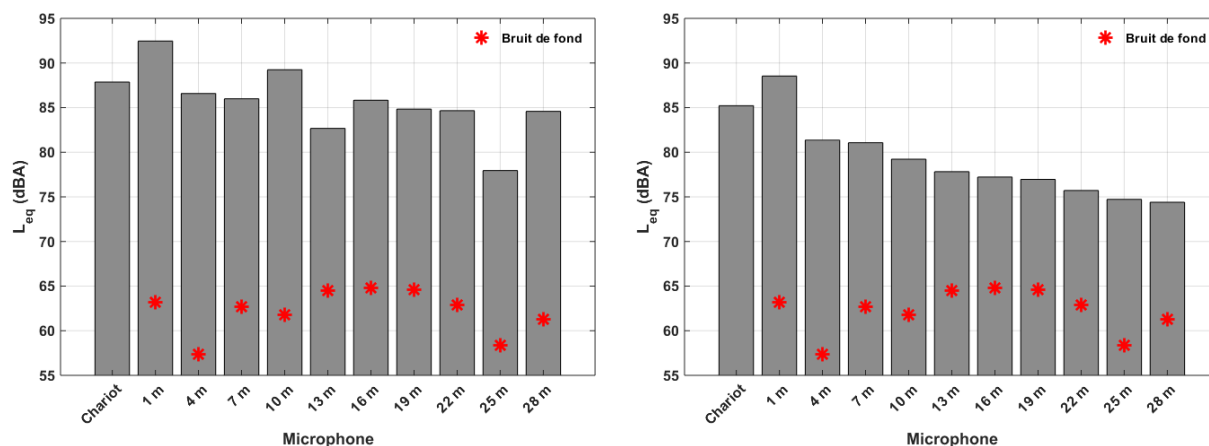
Figure 49. Niveau de pression acoustique pour le cas de l'utilisation de deux HPP SoundLazer avec cylindre (déflecteur concave) : excitation large bande.

5.9 Mesures sur chariot élévateur

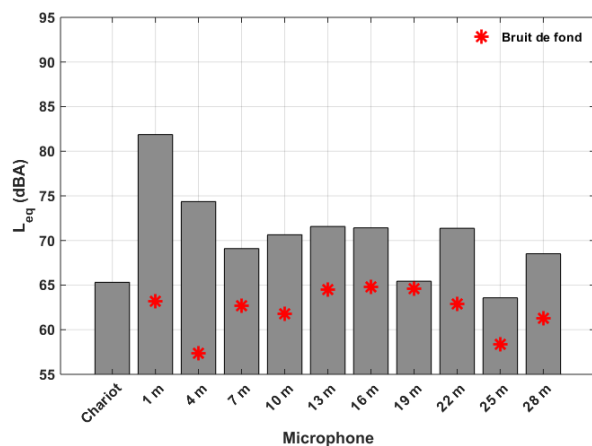
5.9.1 Mesures statiques (chariot immobile)

La Figure 50 montre les niveaux de bruit obtenus aux microphones dans le couloir et sur le chariot lorsque l'alarme est mise en fonction (barres grises) et hors fonction, soit le bruit de fond (étoiles rouges). Les niveaux de bruit montrés sont les niveaux L_{eq} avec pondération A, intégrés sur la durée du signal (20 s), mesurés juste avant de mettre les alarmes en fonction. Les niveaux de bruit de fond sont présentés à titre indicatif. Ils varient d'un microphone à l'autre, mais peuvent

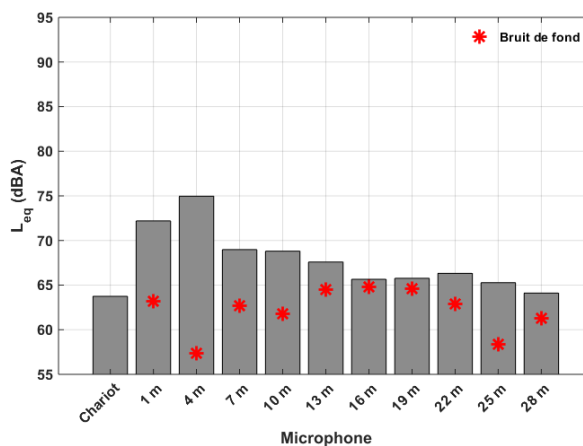
aussi varier dans le temps, en fonction des activités se déroulant dans les ateliers et les laboratoires voisins.



Safe-T-Alert – signal tonal



BBS-TEK 87 – signal large bande



Acouspade avec grille – signal tonal

Acouspade avec grille – signal large bande

Figure 50. Niveaux de bruit (L_{eq} (dBA)) aux microphones dans le couloir. Barres grises : alarme en fonction; étoiles rouges : bruit de fond.

On constate d'abord que les niveaux obtenus avec le HPP Acouspade sont sensiblement moins élevés que ceux obtenus avec les alarmes « classiques » du commerce. Que ce soit avec le signal tonal ou le signal large bande, les niveaux générés avec le HPP Acouspade excèdent tout juste les niveaux de bruit de fond lorsqu'on se trouve à plus de 10 m du chariot élévateur. On

rappelle toutefois que le haut-parleur Acouspade n'a pas été conçu pour être utilisé comme alarme de recul⁵, et donc pour générer des niveaux de bruit aussi importants.

Par ailleurs, la différence de niveau de pression acoustique entre les microphones placés devant l'alarme (donc dans son axe principal) et les microphones fixés au chariot (placés derrière l'alarme) est plus importante avec le HPP, comparativement aux alarmes du commerce. La chute est de l'ordre de 10-15 dB avec le HPP, tandis qu'elle est de l'ordre de 4-5 dB avec les alarmes Safe-T-Alert et BBS-TEK. Ces résultats sont en accord avec les résultats de directivité obtenus en laboratoire (section 5.3).

Finalement, tout comme en laboratoire, on observe une décroissance plus régulière du niveau le long du couloir avec le signal large bande qu'avec le signal tonal, que ce soit avec les alarmes du commerce ou avec le HPP Acouspade. Pour le signal tonal, on observe des variations importantes de niveau, fort probablement causées par les effets d'interférence dus aux réflexions au sol, au plafond et sur les murs. Il est à noter que la décroissance obtenue dans le couloir avec le signal large bande est de l'ordre de 3-4 dB par doublement de distance, ce qui est différent de la décroissance obtenue dans la chambre semi-anéchoïque (~6 dB par doublement de distance).

5.9.2 Mesures dynamiques (*chariot en mouvement*)

Pour les mesures dynamiques, il a été constaté que le bruit de fond généré par le chariot élévateur lors de son opération pouvait être important, voire même supérieur au bruit de l'alarme lors de l'utilisation du HPP, en particulier pour les fréquences inférieures à 1000 Hz. Afin de limiter son importance pour l'analyse des résultats, il a été convenu de filtrer les signaux avec un filtre passe-haut ayant une fréquence de coupure de 900 Hz, plutôt que d'utiliser une pondération A comme pour les mesures statiques. Par ailleurs, le signal temporel à chaque microphone a été découpé en tranches de 250 ms pour lesquelles on a calculé le niveau équivalent L_{eq} , afin d'obtenir une trace temporelle des niveaux de bruit en fonction du temps. Finalement, puisque l'alarme a un cycle de fonctionnement « marche/arrêt » d'environ 1 s, les traces temporelles ont été lissées à l'aide de la fonction « movmax » de Matlab (The MathWorks Inc., Natick, MA). Cette fonction permet d'obtenir le maximum local à l'aide d'une fenêtre glissante dans le temps. Une fenêtre à quatre points (1 seconde de durée totale) a été utilisée. Le lissage permet d'éviter de voir les variations très rapides du signal dues au cycle « marche/arrêt » de l'alarme. Le processus de traitement des données dynamiques est illustré à la Figure 51.

La Figure 52 montre un exemple des variations rapides du niveau (L_{eq}) en fonction du temps dues au cycle de fonctionnement « marche/arrêt », obtenues pour l'alarme large bande BBS-TEK 87. On y montre aussi la courbe lissée obtenue avec la fenêtre glissante selon le traitement illustré à la Figure 51. Ces résultats montrent qu'il peut être difficile d'interpréter les résultats si aucun lissage n'est utilisé. Le lissage proposé ici (fonction « movmax ») revient essentiellement à tracer la partie supérieure de l'enveloppe de la courbe de L_{eq} non lissée.

⁵ Les HPP utilisés dans le cadre de cette étude sont conçus pour être alimentés par une source de type lecteur MP3 ou téléphone cellulaire avec une tension de sortie limitée, nommée 'niveau ligne' qui a un maximum de 1,23 V en valeur efficace.

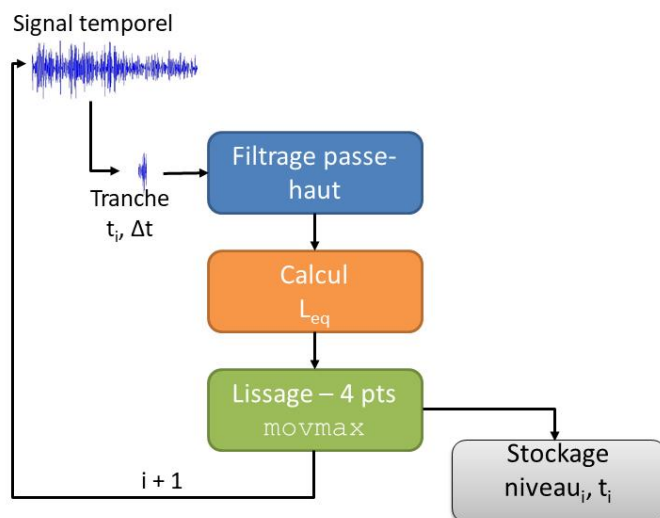


Figure 51. Processus de traitement des données dynamiques. En sortie, on obtient un niveau « lissé » en fonction du temps, exprimé en dB.

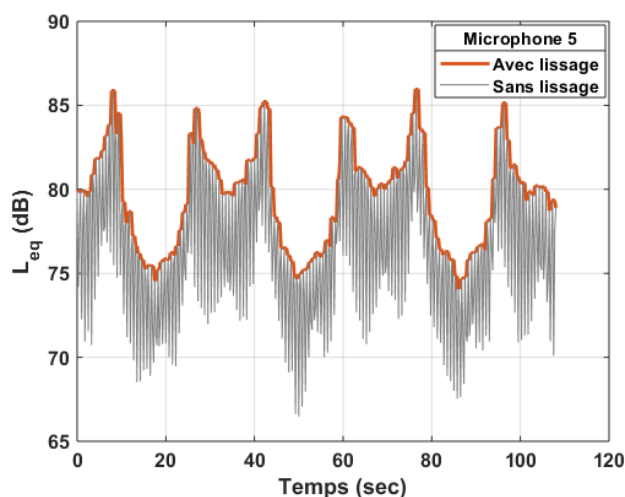


Figure 52. Exemple de résultats de L_{eq} en fonction du temps, obtenus avec l'alarme BBS-TEK 87 (signal large bande). Le pas temporel est de 250 ms.

Afin de bien illustrer le mouvement du chariot dans le temps sur les prochaines figures, la convention montrée à la Figure 53 a été retenue. Cette convention indique que le chariot commençait sa course au début du couloir (rond bleu) en marche arrière jusqu'à la fin du couloir (rond rouge), pour ensuite revenir en marche avant jusqu'au début du couloir. Le même processus était ensuite répété deux fois, pour un total de trois allers-retours. Il est important de noter que pour les besoins des tests, l'alarme était toujours en fonction, que l'on soit en marche arrière ou avant. C'est la raison pour laquelle on observe une fluctuation constante des niveaux de pression acoustique, visible à la Figure 52.



Figure 53. Convention utilisée pour représenter le mouvement du chariot dans le temps lors des manœuvres dynamiques.

Les traces temporelles obtenues à l'aide du processus de lissage pour les microphones #5 et #10 (voir tableau 1) sont montrées aux Figure 54, Figure 55, Figure 56 et Figure 57, pour les quatre alarmes testées. Le niveau de bruit enregistré par un des microphones fixés au chariot, obtenu à l'aide du même processus de calcul, est également montré.

Notons premièrement que les résultats diffèrent sensiblement pour les deux alarmes « standards » du commerce, l'alarme tonale Safe-T-Alert et l'alarme large bande BBS-TEK 87. On observe, globalement, une diminution ou une augmentation du niveau de bruit aux deux micros dans le couloir (#5 et #10), en fonction de leur position par rapport au chariot élévateur. Cependant, le niveau obtenu avec l'alarme tonale peut fluctuer rapidement d'un instant à l'autre, ou autrement dit, en fonction de la position du chariot. Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus en laboratoire et laissent supposer, encore une fois, qu'ils sont dus aux effets d'interférence causés par les réflexions sur le plancher, les murs et le plafond. Les résultats obtenus avec l'alarme large bande varient de façon beaucoup plus monotone et ne semble dépendre que de la distance entre le microphone et le chariot, en accord encore une fois avec les résultats obtenus en laboratoire. Par ailleurs, les niveaux obtenus au microphone fixé sur le chariot fluctuent aussi beaucoup pour l'alarme tonale, alors qu'ils sont très constants pour l'alarme large bande, renforçant l'importance des effets d'interférence causés par les réflexions sur les murs pour l'alarme tonale.

Un autre résultat illustré sur la Figure 54 (Safe-T-Alert) et la Figure 55 (BBS-TEK 87) avec le micro #5 est que lorsque celui fait face à l'alarme (notée zone « éclairée »), le niveau de bruit est plus important que lorsque le micro est derrière l'alarme (notée zone « à l'ombre »). Par exemple, pour les deux figures, les zones éclairées sont situées aux environs des intervalles [0-10] s, [25-45] s et [60-75] s. Cette chute de niveau n'est pas surprenante compte tenu du patron de directivité des alarmes. Par contre, elle est moins prononcée et, encore une fois, beaucoup moins nette avec l'alarme tonale, compte tenu des phénomènes d'interférence causés par les diverses réflexions. Pour l'alarme large bande (BB-TEK 87), on semble observer une baisse d'environ 5 dB lorsqu'on passe de la zone éclairée à la zone à l'ombre.

Les résultats obtenus avec le HPP Acouspade équipé d'une grille perforée sont plus difficiles à interpréter. En effet, comme constaté sur les mesures statiques, le HPP Acouspade peine à générer des niveaux importants. Ainsi, que ce soit avec le signal tonal (Figure 56) ou large bande (Figure 57), il est difficile de différencier ce qui est dû au bruit du chariot en mouvement (moteur, roulement, etc.) de ce qui est dû à l'alarme seule. En d'autres termes, le rapport signal/bruit (bruit

de l'alarme par rapport au bruit du chariot intrinsèque à son fonctionnement) est faible. Malgré tout, on note tout de même des niveaux plus chahutés avec le signal tonal qu'avec le signal large bande, tout comme avec les alarmes commerciales. Il est par contre difficile de se prononcer quant à la chute éventuelle du niveau lorsqu'on passe de la zone éclairée à la zone d'ombre. Toutefois, globalement, l'utilisation de ces haut-parleurs insonifie moins le chariot (le conducteur) qu'avec les alarmes commerciales.

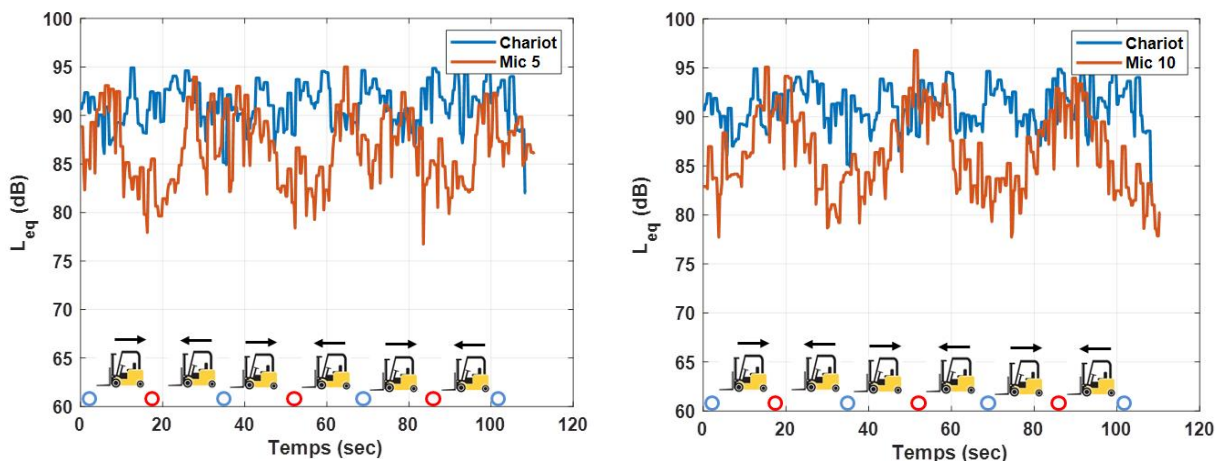


Figure 54. Niveau de bruit « lissé » en fonction du temps aux microphones #5 (gauche) et #10 (droite) : alarme tonale Safe-T-Alert.

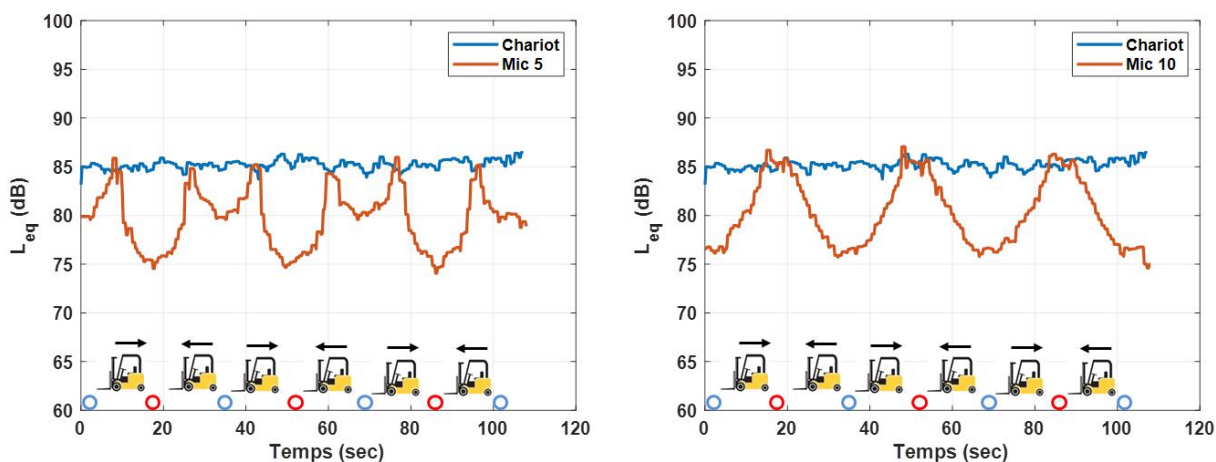


Figure 55. Niveau de bruit « lissé » en fonction du temps aux microphones #5 (gauche) et #10 (droite) : alarme large bande BBS-TEK 87.

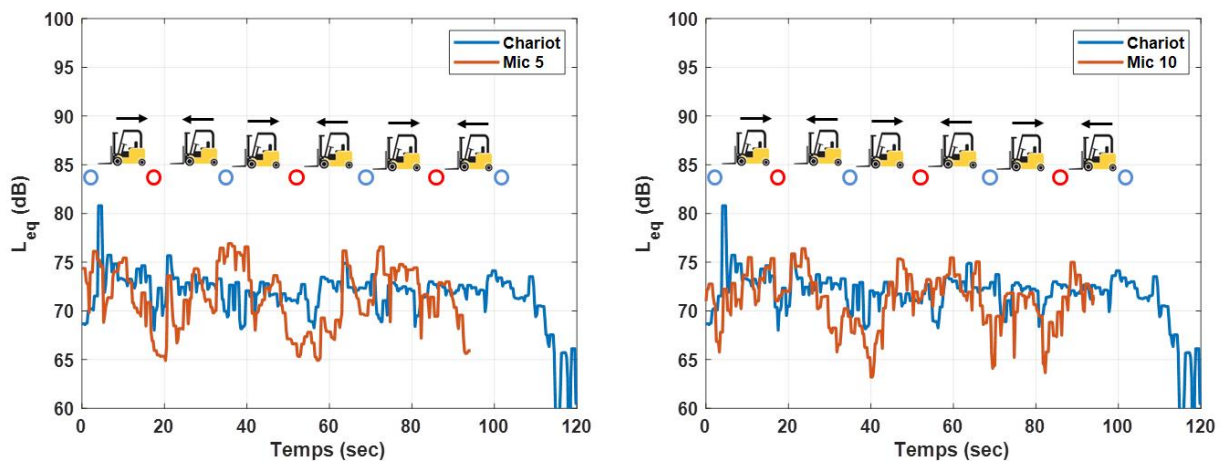


Figure 56. Niveau de bruit « lissé » en fonction du temps aux microphones #5 (gauche) et #10 (droite) : HPP Acouspade avec grille et signal tonal.

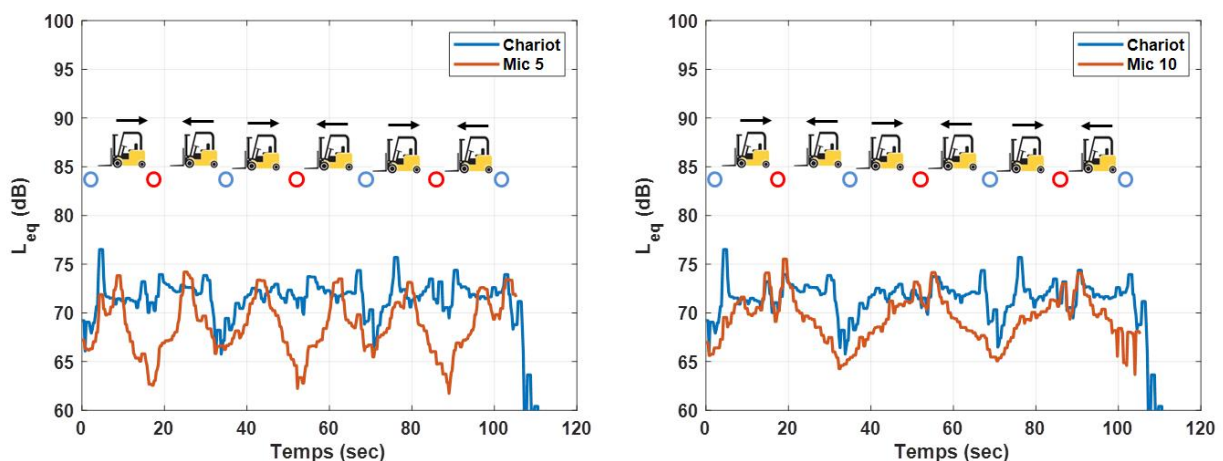


Figure 57. Niveau de bruit « lissé » en fonction du temps aux microphones #5 (gauche) et #10 (droite) : HPP Acouspade avec grille et signal large bande.

Afin d'analyser plus en détail les résultats obtenus avec le HPP Acouspade, les traces temporelles des niveaux de bruit sans lissage, accompagnées de leur enveloppe, sont présentées aux Figure 58, Figure 59, Figure 60 et Figure 61. Pour les alarmes conventionnelles, les variations rapides du niveau à toutes les ~300 ms, causées par le bruit de l'alarme, sont observées, et ce, tant au microphone placé sur le chariot que pour le microphone dans le couloir. Par contre, pour le HPP Acouspade, ces variations sont beaucoup moins importantes (l'enveloppe est plus étroite) du fait du rapport signal/bruit beaucoup plus faible. Toutefois, les oscillations dues à l'alarme, enregistrées au microphone #5 sont plus importantes lorsque le micro se trouve en zone dite 'éclairée' ([0-10] s, [25-45] s et [60-75] s), qu'en zone d'ombre. Pour le microphone fixé au chariot, qui est en tout temps placé derrière l'alarme (donc dans une zone d'ombre), ces oscillations dues à l'alarme sont faibles (enveloppe très étroite) ce qui suggère

beaucoup moins de bruit venant de l'alarme, même si ce microphone est physiquement très proche de l'alarme. Ce type de comportement n'est pas observé avec les alarmes conventionnelles ce qui suggère que le HPP Acouspade permet bien de réduire le bruit hors de la zone de danger.

Pour terminer, la Figure 62 présente un zoom sur 45 s de la Figure 60 et de la Figure 61 pour illustrer les différences de niveau entre les zones éclairées et à l'ombre pour le micro #5 avec le HPP Acouspade. Il semble que lorsque le microphone « voit » l'alarme, celle-ci est beaucoup plus perceptible que lorsque le microphone est situé derrière elle, ce qui est le résultat recherché. Ces résultats sont cependant à prendre avec précaution compte tenu du faible rapport signal/bruit obtenu avec le HPP.

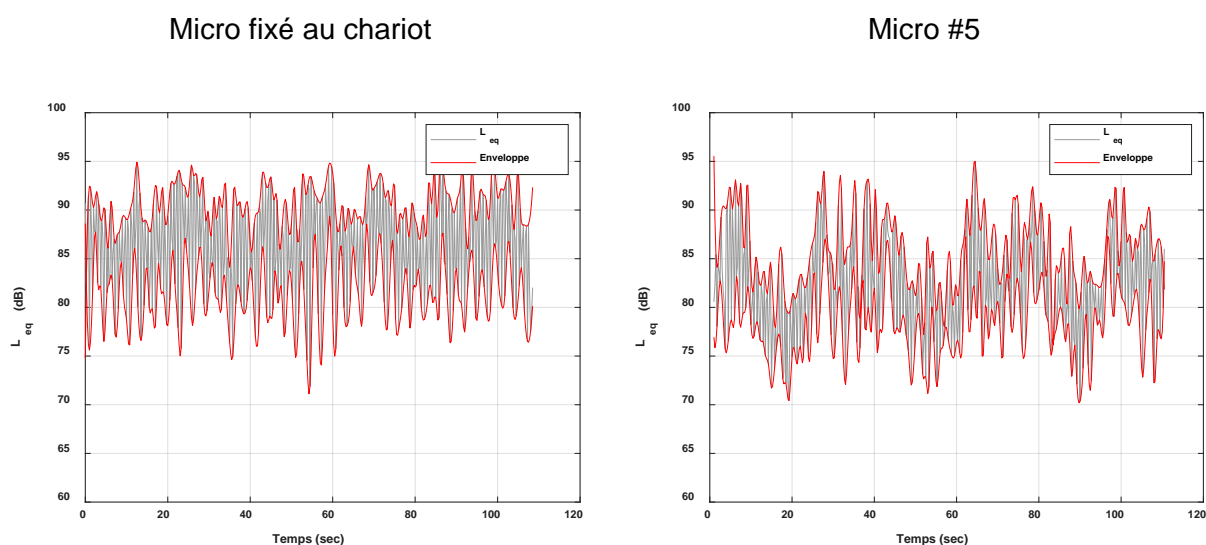


Figure 58. Niveau de bruit sans lissage (gris) et son enveloppe (rouge), en fonction du temps, enregistré par le microphone fixé sur le chariot (gauche) et par le microphone #5 placé dans le couloir (droite) : alarme tonale Safe-T-Alert.

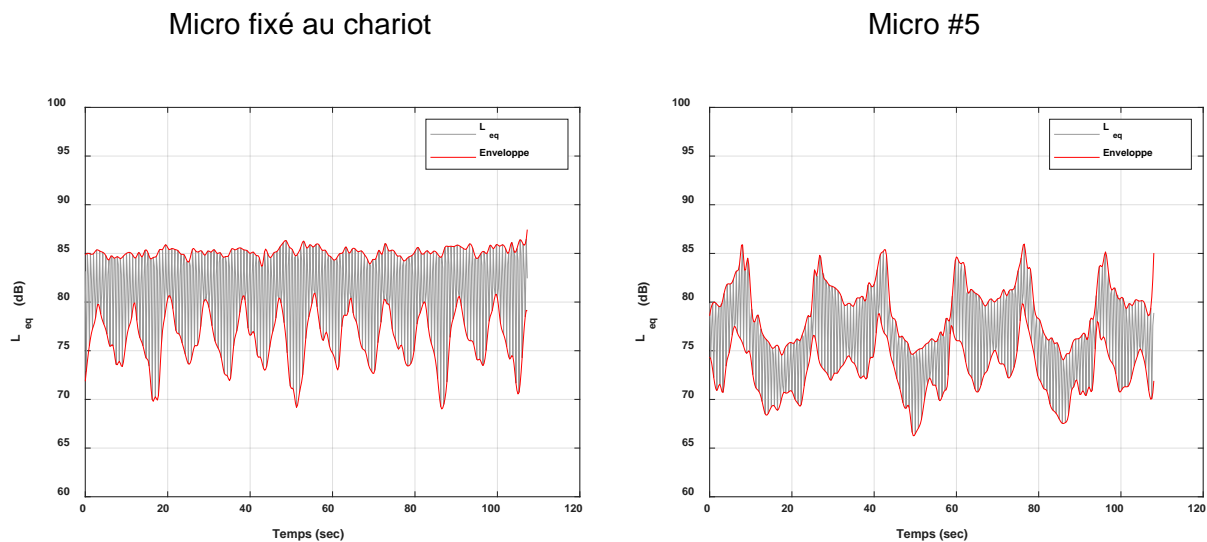


Figure 59. Niveau de bruit sans lissage (gris) et son enveloppe (rouge), en fonction du temps, enregistré par le microphone fixé sur le chariot (gauche) et par le microphone #5 placé dans le couloir (droite) : alarme large bande BBS-TEK 87.

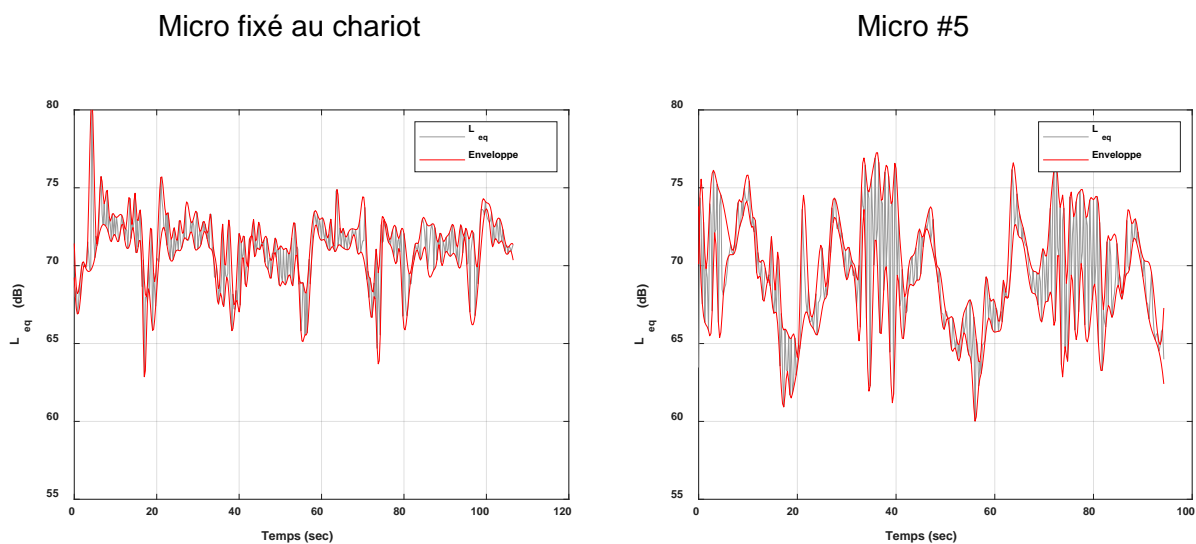


Figure 60. Niveau de bruit sans lissage (gris) et son enveloppe (rouge), en fonction du temps, enregistré par le microphone fixé sur le chariot (gauche) et par le microphone #5 placé dans le couloir (droite) : HPP Acouspade avec grille et signal tonal.

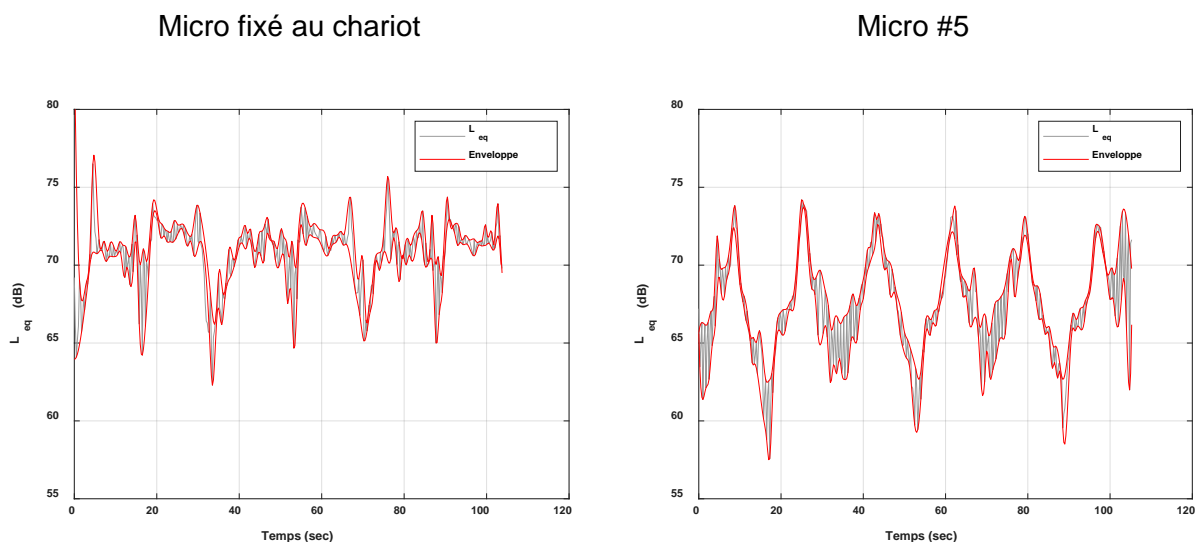


Figure 61. Niveau de bruit sans lissage (gris) et son enveloppe (rouge), en fonction du temps, enregistré par le microphone fixé sur le chariot (gauche) et par le microphone #5 placé dans le couloir (droite) : HPP Acouspade avec grille et signal large bande.

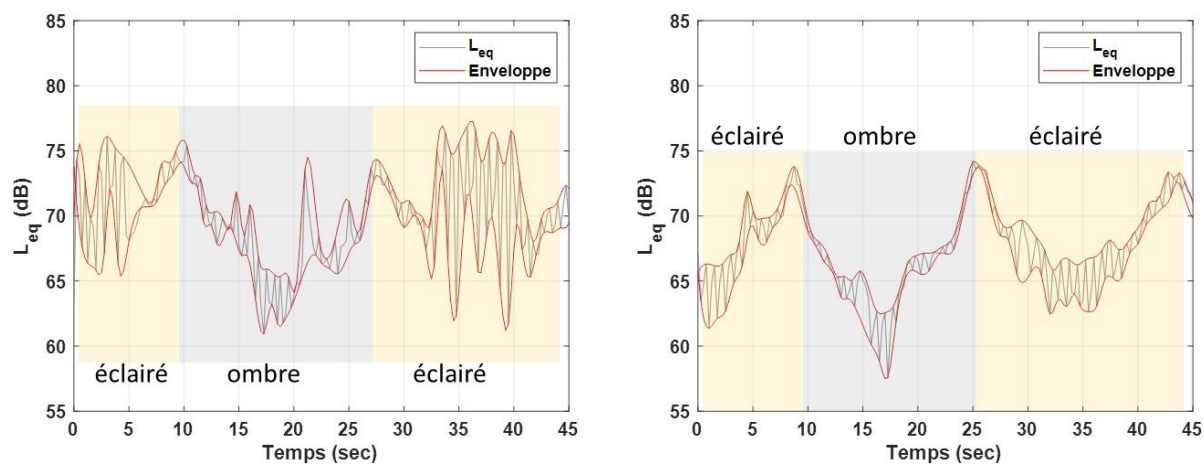


Figure 62. Illustration des différences de niveau entre les zones éclairées et à l'ombre pour le HPP Acouspade : signal tonal (gauche) et signal large bande (droite).

6. DISCUSSION

6.1 Avantages et limites des alarmes commerciales actuelles

La comparaison étendue réalisée dans le cadre de cette étude, concernant les deux types d'alarmes de recul commerciales actuellement disponibles, a permis de mettre en évidence de nombreux faits objectifs.

Il apparaît tout d'abord au travers des résultats présentés que les performances de l'alarme tonale sont très dépendantes de l'environnement dès lors que ce dernier n'est pas exempt d'écho. Ainsi, en dehors du cas très spécifique d'une chambre complètement anéchoïque, l'alarme tonale génère un champ de pression sonore comportant des fluctuations spatiales de niveau qui peuvent être très importantes, et qui peuvent typiquement atteindre des variations de 10 à 20 dB sur des distances de moins de 0,5 m. De plus, le montage de l'alarme sur une surface rigide, systématiquement réalisé en pratique, tend à exacerber ces variations spatiales du niveau sonore qui peuvent être préjudiciables à la bonne perception d'un signal d'alarme sonore. En effet, il est admis que le niveau sonore de l'alarme doit être au moins supérieur à celui du niveau du bruit du fond pour que le signal émis par celle-ci soit correctement perçu.

Contrairement au cas de l'alarme tonale, les résultats obtenus pour l'alarme large bande démontrent que ce type d'alarme permet d'obtenir une robustesse importante par rapport à l'environnement acoustique et au montage sur une surface rigide.

De manière générale, tous les résultats obtenus en laboratoire sont confirmés par les résultats en conditions réelles pour un chariot réalisant une manœuvre de recul. Les niveaux de pression acoustique mesurés dans le cadre des manœuvres du chariot montrent des variations très importantes du niveau, alors que ceux mesurés avec l'alarme large bande montrent une concordance nette avec le mouvement du chariot.

6.2 Avantages et limites du prototype utilisant un haut-parleur paramétrique du commerce

L'avantage majeur procuré par les haut-parleurs paramétriques réside dans leur directivité très marquée, bien illustrée par l'ensemble des résultats obtenus et présentés dans ce rapport. Le signal audible est confiné dans une zone précise, et la réduction du niveau de bruit en dehors de cette zone est très importante (comparativement aux alarmes dites traditionnelles). D'autres avantages découlent naturellement de cette directivité très importante, comme la limitation de l'exposition au bruit pour les conducteurs d'engins et les travailleurs environnants, ainsi qu'une gêne environnementale réduite.

Néanmoins, plusieurs limitations subsistent quant à une application immédiate de ces HPP. La plus importante est le niveau acoustique peu élevé qui peut être atteint comparativement aux alarmes commerciales, lié au fait que les HPP utilisés ont été développés pour des applications audio et des signaux d'alimentation de faible tension (de l'ordre du volt). La majorité des HPP commerciaux sont destinés à de telles applications. Néanmoins, ce point est facilement contournable par le développement d'un HPP dédié à l'application des alarmes de recul avec une alimentation de 5 à 10 volts. Une seconde limitation est la possible apparition d'une source sonore

fictive par réflexion du faisceau directionnel sur une surface proche. L'étude a permis de suggérer une solution simple à ce problème, par la mise en place d'une grille perforée face au haut-parleur, ce qui résulte en une diffusion du signal émis et une réduction importante de l'effet adverse de cette source sonore fictive. La grille a de plus pour avantage de procurer une protection mécanique utile dans un contexte industriel.

Un point qui peut également poser un souci dans l'applicabilité directe de cette technologie concerne la faible diminution voire l'absence de diminution de niveau généralement constatée sur une distance alarme-récepteur de 1 m à 1,5 m. Il serait important de statuer sur le fait que cette diminution très faible ne pose de problème de perception (si le niveau ne change pas lorsque le véhicule bouge, cela pourrait-il donner l'impression que celui-ci ne recule pas?).

Enfin, l'encombrement du HPP Acouspade utilisé dans les tests effectués sur le chariot élévateur peut être également vu comme une limitation actuelle, mais qui peut facilement être contournée par une mise en œuvre différente des transducteurs ultrasonores.

7. CONCLUSION

7.1 Principales conclusions concernant les alarmes commerciales tonale et large bande

Dans le cas de deux alarmes de recul commerciales, la présente étude a permis de mettre en lumière de manière documentée les performances généralement supérieures de l'alarme large bande par rapport à l'alarme tonale, notamment en ce qui concerne la répartition spatiale du bruit généré par celles-ci. L'ensemble des résultats collectés démontre que l'alarme large bande est globalement moins sensible aux effets de sol, de local ou de diffraction. Cette conclusion s'applique aussi bien au cas de mesures en laboratoire que lors des tests réalisés en conditions réalistes. Ceci permet de fournir une base de comparaison objective concernant les performances de ces deux types d'alarmes et de combler un manque de connaissance. En effet, très peu d'études ont jusqu'à présent comparé les performances des alarmes tonales et large bande sur le terrain, et aucune étude comparative de laboratoire n'avait été réalisée à ce jour.

La réalisation de cette étude a également mis en évidence le fait que le test normatif couramment réalisé (norme SAE J994, définissant une mesure à hauteur et distance fixe, avec barrière acoustiquement absorbante) permet de vérifier la conformité à un niveau de pression acoustique, mais pas d'apprécier de nombreux points critiques survenant lorsque l'alarme est utilisée dans des conditions réelles. Ceci est spécialement vrai dans le cas de l'alarme tonale. Une évolution de la norme actuelle pourrait être envisagée afin de mieux prendre en compte ces effets qui ne sont pas traduits lors d'une mesure avec une distance de séparation fixe entre alarme et récepteur, et une condition absorbante au sol.

Dans le développement de futures alarmes de recul, une méthodologie de test similaire à celle mise en œuvre dans ce rapport pourrait être utilisée en laboratoire. En effet, une caractérisation à distance et hauteur fixées et avec une condition de sol absorbant, comme préconisée dans les normes (voir section 4.3), paraît extrêmement limitative quant à la performance de l'alarme en conditions réelles. Une mesure tridimensionnelle demande néanmoins une mise en œuvre lourde et paraît difficilement généralisable.

Par contre, une caractérisation bidimensionnelle avec un sonomètre est simple à réaliser, et l'inclusion de variations de la distance de séparation et de la position angulaire permet d'acquérir des informations précieuses et pertinentes pour la caractérisation des alarmes de recul.

Une phase de simulation semble également une voie de travail intéressante, car comme illustrée dans ce rapport, l'utilisation de modèles simplifiés permet de prédire de manière efficace la répartition spatiale du champ de pression sonore en fonction de la distance pour une alarme tonale (et peut être facilement étendu au cas d'une alarme large bande). En résumé, une caractérisation 2D en laboratoire pourrait servir de base à une modélisation 3D.

7.2 Principales conclusions sur l'utilisation de haut-parleurs paramétriques pour le développement d'alarmes de recul

L'ensemble des résultats obtenus montrent que l'utilisation de haut-parleurs paramétriques est une voie prometteuse pour développer des alarmes de recul avec des avantages notables. Un premier avantage concerne la directivité très marquée, qui n'est pas atteignable avec les alarmes commerciales actuelles, et qui permet de bien circonscrire la diffusion d'un signal sonore à une zone précise.

On s'attend à ce que d'autres avantages découlent naturellement de cette directivité très importante, comme la limitation importante de l'exposition au bruit pour les conducteurs d'engins et les travailleurs environnants, ainsi qu'une gêne environnementale réduite. Un point à ajouter ici est que cette réduction de la gêne pourrait être généralement atteinte, quel que soit le type de signal utilisé, soit tonal ou large bande. Dans le cas des alarmes commerciales, seule l'alarme large bande, par le signal qu'elle procure, possède un avantage de réduction de la gêne environnementale.

7.3 Recommandations pour une poursuite de l'étude

La principale recommandation pour une poursuite de l'étude concernant l'utilisation de HPP pour une application aux alarmes de recul est le développement d'une source spécifiquement dédiée et pensée pour cet objectif, évitant ainsi d'utiliser une source initialement développée pour une application audio. Ainsi, il conviendrait de partir d'un cahier des charges pour la création d'une source dédiée à cette application spécifique, et donc conçue pour permettre de lever les limitations rencontrées, incluant :

- La possibilité de générer de manière aisée des niveaux sonores pouvant typiquement varier entre 77 dB(A) au minimum, correspondant à une alarme de type E selon la norme SAE J994, et 97 dB(A) au maximum, correspondant à une alarme de type C;
- Une forme permettant de la rendre compacte, et intégrant une forme de contrôle de la directivité géométrique par la courbure de la plaque agissant comme support des transducteurs;
- L'inclusion d'une grille de protection qui assure également une diffusion du faisceau, ayant pour conséquence de limiter la formation d'une source sonore fictive. Une alternative pourrait consister en une focalisation en des points plus précis suivant certains travaux récents (Ochiai *et al.*, 2017).

Concernant le niveau d'alimentation en tension qui devrait être pris en compte, il serait possible de s'inspirer de travaux récents concernant le développement d'alimentations électriques et d'amplificateurs de signal dédiés spécifiquement à cette application (Kim *et al.*, 2015).

En parallèle de ces points techniques, il sera important de considérer la conformité avec les valeurs couramment admises pour l'exposition à des ultrasons de forte puissance (Howard *et al.*, 2005). La mise à jour des normes est actuellement à l'étude, car de nombreux systèmes autres que les HPP utilisent des ultrasons de moyenne et de forte puissance. Une édition spéciale en 2018 du « Journal of the Acoustical Society of America » présente clairement ces avenues avec

des systèmes récents (Duck et Leighton, 2018; Leighton, 2018). La fréquence de la porteuse ultrasonore jouera un rôle sur ce point. Un compromis peut certainement être trouvé entre l'efficacité du haut-parleur et le niveau ultrasonore, mais il conviendra de vérifier l'adéquation avec les normes d'exposition. Il faut savoir que de nombreux HPP sont maintenant utilisés dans des espaces privés ou grand public⁶. Une autre possibilité réside dans une focalisation supplémentaire comme suggérée par certains auteurs (Ochiai *et al.*, 2017), qui diminue l'exposition générale aux ultrasons.

Enfin, il serait potentiellement intéressant d'étudier le couplage de cette alarme fournissant un faisceau sonore directionnel avec une alarme comportant un faisceau lumineux également directionnel.

⁶ <https://www.holosonics.com/>

BIBLIOGRAPHIE

- Alunno, M. et Botero, A. Y. (2017). Directional landscapes: Using parametric loudspeakers for sound reproduction in art. *Journal of New Music Research*, 46(2), 201-211. doi: 10.1080/09298215.2016.1227340
- Bennett, M. B. et Blackstock, D. T. (1975). Parametric array in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 57(3), 562-568. doi: 10.1121/1.380484
- Blouin, S. (2005). *Bilan de connaissances sur les dispositifs de détection de personnes lors des manœuvres de recul des véhicules dans les chantiers de construction* (Rapport n° B-067). Montréal, QC: IRSST. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/B-067.pdf>
- Burgess, M. et McCarty, M. (2009). *Review of alternatives to « beeper » alarms for construction equipment* (Rapport n° AVU 0129). Canberra, Australie: UNSW Canberra.
- Burka, A., Qin, A. et Lee, D. D. (2014). *An application of parametric speaker technology to bus-pedestrian collision warning*. Communication présentée au 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Qingdao, Chine. doi: 10.1109/ITSC.2014.6957811
- CBC News. (30 novembre 2016). Turcot construction vehicles feature quieter reverse sound. Neill, B. Tiré de <https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/turcot-construction-truck-noise-beep-1.3873905>
- CBC News. (21 février 2019). Bye-bye, beep-beep: New backup signal coming to a snowplow near you. CBC News. Tiré de <https://www.cbc.ca/news/canada/ottawa/new-back-up-alarm-snow-removal-1.5027996>
- CTV News. (5 avril 2018). Ban the beep?: Victoria may seek alternatives to noisy back-up alarm of city trucks. CTV News. Tiré de <https://vancouverisland.ctvnews.ca/ban-the-beep-victoria-may-seek-alternatives-to-noisy-back-up-alarm-of-city-trucks-1.3872926>
- Donley, J., Ritz, C. et Kleijn, W. B. (2016). *Reproducing personal sound zones using a hybrid synthesis of dynamic and parametric loudspeakers*. Communication présentée à 2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference, Jeju, Corée du Sud (p. 1-5). doi: 10.1109/APSIPA.2016.7820904
- Duck, F. et Leighton, T. (2018). Frequency bands for ultrasound, suitable for the consideration of its health effects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(4), 2490-2500. doi: 10.1121/1.5063578
- Gan, W., Yang, J. et Kamakura, T. (2012). A review of parametric acoustic array in air. *Applied Acoustics*, 73(12), 1211-1219.
- Haas, E. C. et Edworthy, J. (1998). The perceived urgency and detection time of multitone auditory signals. Dans N. A. Stanton et J. Edworthy (Édit.), *Human factors in auditory warnings*. Londres, Angleterre: Taylor & Francis.
- Health and Safety Executive. (2001). *Improving the safety of workers in the vicinity of mobile plant* (Rapport n° 358). Londres, Angleterre: HSE. Tiré de https://www.hse.gov.uk/research/crr_pdf/2001/crr01358.pdf
- Howard, C., Hansen, C. H. et Zander, A. C. (2005). A review of current ultrasound exposure limits, *The Journal of Occupational Health and Safety of Australia and New Zealand* 21(3), 253-257.
- International Standard Organization. (2010). *Earth-moving machinery: Machine-mounted audible travel alarms and forward horns: Test methods and performance criteria*. Norme ISO 9533:2010. Genève, Suisse: ISO.

- Kim, J. Y., Choi, S. S. Kim, I. D. et Moon, W. (2015). *Design of compact and high-efficiency power supply and power amplifier for parametric array transducer*. Communication présentée à 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference, Taipei, Taïwan (p. 2–6). doi 10.1109/IFEEEC.2015.7361542
- Kuttruff, H. (2017). *Room acoustics* (6^e éd.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Laroche, C., Ross, M.-J., Lefebvre, L., Larocque, R. et Sonométric Inc. (1995). *Détermination des caractéristiques optimales des alarmes de recul* (Rapport n° R-117). Montréal, QC: IRSST. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-117.pdf?v=2020-04-29>
- Leighton, T. G. (2018). Ultrasound in air: Guidelines, applications, public exposures, and claims of attacks in Cuba and China, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(4), 2473-2489. doi: 10.1121/1.5063351
- Murray, W., Mills, J. et Moore, P. (1998). *Reversing accidents in UK transport fleets 1996-97*. Huddersfield, Angleterre: University of Huddersfield.
- National Academy of Engineering. (2010). *Technology for a quieter America*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/12928
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2004). *The worker health chartbook, 2004*. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2004-146/pdfs/2004-146.pdf>
- Nélisse, H., Vaillancourt, V., Laroche, C., Giguère, C. et Boutin, J. (2012). *Évaluation des alarmes de recul à large bande de fréquences (« Broadband alarm »)* (Rapport n° R-963). Montréal, QC: IRSST.
- Nélisse, H., Vaillancourt, V., Laroche, C., Giguère, C. et Boutin, J. (2017). *Évaluation de la performance acoustique des alarmes de recul en milieu ouvert en vue d'une utilisation optimale dans les environnements de travail* (Rapport n° R-977). Montréal, QC: IRSST. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-977.pdf>
- Ochiai, Y., Hoshi, T. et Suzuki, I. (2017). *Holographic whisper: Rendering audible sound spots in three-dimensional space by focusing ultrasonic waves*. Communication présentée à CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Denver, CO (p. 4314–4325). Tiré de https://digitalnature.slis.tsukuba.ac.jp/wp-content/uploads/2017/05/HolographicWhisper_CHI2017.pdf
- Olszewski, D., Prasetyo, F. et Linhard, K. (2005). Steerable highly directional audio beam loudspeaker. Dans International Speech Communication Association (Édit.), *Interspeech 2005: Proceedings of 9th European Conference on Speech Communication and Technology* (p. 137-140). Baixas France: ISCA. Tiré de <https://pdfs.semanticscholar.org/8a00/0d155803f4a8437da7645cb34f781b7bf432.pdf?qa=2.74501586.1561160319.1588181916-740217158.1588181916>
- Pokorny, F. B. et Graf, F. (2014). Akustische Vermessung parametrischer Lautsprecherarrays im Kontext der Transauraltechnik. Dans Hearing4all (Édit.), *Proceedings of Annual meeting of the German Acoustical Society DAGA 2014* (p. 1-2). Oldenburg, Allemagne : Hearing4all. Tiré de http://pub.dega-akustik.de/DAGA_2014/data/articles/000129.pdf
- Pompei, F. J. (2006). *Brevet américain n° US 7106180 B1*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Russell, W. S. et Mitchell, A. T. (2016). *Brevet américain n° US 9513602 B1*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Sayin, U. et Guasch, O. (2013). Directivity control and efficiency of parametric loudspeakers with horns. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(2). doi: 10.1121/1.4812446

- Schexnayder, C. J. et Ernzen, J. (2004). *Making work zones work better: Effective noise control during nighttime construction*. Washington, DC: FHWA.
- Shi, C., Kajikawa, Y. et Gan, W.-S. (2014). An overview of directivity control methods of the parametric array loudspeaker. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 3, e20. doi: 10.1017/ATSIP.2014.18
- Society of Automotive Engineers. (2009). *Alarm: Backup: Electric laboratory performance testing*. Norme SAE J994-200903. Warrendale, PA: SAE.
- Times Colonist. (17 décembre 2016). Bye-bye to the beep: White noise a kinder, gentler backup alert. *Times Colonist*. Tiré de <https://www.timescolonist.com/news/b-c/bye-bye-to-the-beep-white-noise-a-kinder-gentler-backup-alert-1.4791983>
- Uemura, R., Fukumori, T., Nakayama, M. et Nishiura, T. (2016). *A study on near-field sound propagation based on delay-filtering for carrier and sideband waves using curved-type parametric loudspeaker*. Communication présentée à International Congress on Acoustics ICA 2016, Buenos Aires, Argentine (p. 1-8). Tiré de <http://www.ica2016.org.ar/ica2016proceedings/ica2016/ICA2016-0306.pdf>
- Vaillancourt, V., Nélisse, H., Laroche, C., Giguère, C., Boutin J. et Laferrière, P. (2012). *Sécurité des travailleurs derrière les véhicules lourds : évaluation de trois types d'alarmes sonores de recul* (Rapport n° R-763). Montréal, QC: IRSST. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PublIRSST/R-763.pdf>
- Westervelt, P. J. (1963). Parametric acoustic array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35(4), 535-537. doi: 10.1121/1.1918525
- Yoneyama, M., Fujimoto, J., Kawamo, Y. et Sasabe, S. (1983). The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 73(5), 1532-1536. doi: 10.1121/1.389414