

Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-937



**Reproduction d'environnements sonores industriels
en vue d'applications aux études d'audibilité
des alarmes et autres signaux : preuve de concept**

*Alain Berry
Philippe-Aubert Gauthier
Hugues Néllisse
Franck Sgard*



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.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

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

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. Abonnement : preventionautravail.com

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2016
ISBN : 978-2- 89631-894-0 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
Août 2016

Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-937

Reproduction d'environnements sonores industriels en vue d'applications aux études d'audibilité des alarmes et autres signaux : preuve de concept

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.

*Alain Berry, Philippe-Aubert Gauthier,
Université de Sherbrooke
Hugues Nélisse, Franck Sgard,
IRSST*

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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 de ce rapport tiennent à remercier différentes personnes qui sont intervenues tout au long de cette étude et qui ont grandement facilité sa réalisation, tout en contribuant à son perfectionnement.

La contribution du stagiaire Philippe Rousseau mérite d'être soulignée en premier lieu, notamment pour son aide lors de la réalisation des mesures *in situ* sur les deux lieux de travail visités, mais aussi pour sa rigueur, pour la préparation et pour la fabrication, le cas échéant, des équipements de mesure nécessaires.

Un remerciement spécial est adressé à Anthony Bolduc et Pierre Lecomte qui ont offert un coup de main pour la réalisation des mesures *in situ*, une aide sans laquelle la logistique des mesures aurait été plus complexe.

Finalement, les auteurs et tous ceux impliqués de près ou de loin dans ce projet de recherche remercient et soulignent l'impressionnante qualité de l'accueil et de l'assistance technique qui fut réservée aux chercheurs et assistants lors des mesures sur les sites visités. De chez Graymont, nous tenons à remercier monsieur Yves Morissette et de chez Agrigratte, nous remercions monsieur Daniel Tassé.

SOMMAIRE

Les milieux industriels bruyants nuisent à l'audibilité des alarmes et avertisseurs sonores et compromettent donc la sécurité des travailleurs en présence de machineries en mouvement ou dangereuses.

Pourtant, dans plusieurs cas d'accident, les véhicules impliqués disposaient d'alarmes sonores de recul. On constate généralement que l'efficacité des alarmes sonores dépend de l'environnement sonore et qu'elles sont loin d'être infaillibles. La cause exacte est difficile à déterminer puisque la perception et la localisation sonores dans un environnement sonore complexe sont des phénomènes encore en grande partie mal connus et relativement peu étudiés. Même si des études de perception et de localisation des alarmes ont déjà été effectuées dans un contexte de santé et de sécurité du travail, ces études avec sujets humains sont difficiles à réaliser sur les sites de travail.

Cette étude avait comme objectif d'examiner la possibilité d'utiliser les méthodes actuelles de reproduction de champs sonores en vue de recréer, en laboratoire, des environnements sonores représentatifs d'environnements de travail, évitant de ce fait les problèmes multiples liés aux tests sur le terrain. La possibilité d'utiliser de telles techniques pour effectuer des essais avec sujets humains dans un futur rapproché est envisagée. Un exemple concret de tels essais serait l'étude de la localisation et de l'audibilité des alarmes de recul dans des environnements sonores simulés en condition contrôlée pour effectuer des études paramétriques détaillées avec des sujets humains.

Ce projet était divisé en deux grandes parties. Dans un premier temps, deux environnements sonores représentatifs (un intérieur et un extérieur) ont été mesurés avec une antenne de 85 microphones, afin de capter le paysage sonore, mais aussi la distribution spatiale du son pour bien reconstruire les directions d'arrivée de l'ensemble des sons qui forment l'environnement sonore. Deux sites ont été visités pour les captations : une carrière de chaux à ciel ouvert (Graymont, Bedford) et un atelier de fabrication et d'assemblage (Agrigratte, St-Jacques). Sur chaque site, des environnements sonores mettant en présence plusieurs types de sources sonores ont été captés pour obtenir plusieurs heures d'enregistrement.

Dans un deuxième temps, en laboratoire cette fois, les environnements sonores ont été reproduits sur la base de différents algorithmes qui ont été comparés. Ces reproductions furent effectuées avec le système de la *Wave Field Synthesis* (WFS) du Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS) qui est constitué de 96 haut-parleurs et de quatre caissons de grave. Ce système permet autant l'utilisation de techniques classiques de reproduction de champs sonores que le développement, comme ce fut le cas pour cette étude, de nouveaux algorithmes ou outils selon les besoins. Avant de réaliser les mesures et les évaluations physiques des environnements sonores reproduits en laboratoire, des simulations théoriques ont aussi été réalisées pour comparer les algorithmes, déterminer les meilleurs paramètres et visualiser les résultats pour trois cas simples : a) deux sources en champ libre, b) une source en mouvement, et c) un environnement diffus. Selon ces simulations, il a été observé que les deux meilleurs algorithmes sont : 1) les approches par problème inverse avec sources de reproduction sphériques et 2) le « lasso » avec sources de reproduction sphériques. Pour évaluer de façon objective la

reproduction, différentes métriques ont été utilisées et rapportées dans ce rapport : spectres au microphone de référence, niveaux de pression acoustique à l'antenne de microphones, cartographies acoustiques spatiales en fonction du temps et, dans le cas des simulations, champs de pression sonore instantanés. Il a été démontré que les méthodes proposées sont capables de reproduire les environnements sonores mesurés avec une antenne de microphones. De plus, différentes démonstrations ont été réalisées pour écoute lors des visites du GAUS. Le but de ces démonstrations est de fournir des exemples propices à l'écoute pour illustrer en pratique tout le potentiel des technologies et méthodes testées dans un contexte d'étude en relation avec la perception sonore dans le domaine de la santé et de la sécurité du travail.

Plusieurs conclusions émergent de cette étude. Premièrement, à l'heure actuelle, la mise en œuvre par méthode inverse avec sources de reproduction sphériques offre les meilleurs résultats en matière d'évaluation objective. Deuxièmement, cette approche, quoique physiquement correcte et valable, peut parfois donner une impression de diffusion excessive (sur la base d'écoutes informelles). L'algorithme du « lasso » a été testé pour potentiellement pallier ce problème en limitant simultanément le nombre de sources de reproduction actives. Malgré le fait que le « lasso » soit plus exigeant que l'approche par problème inverse en ce qui a trait aux ressources de calcul, plusieurs gains ont été observés : une grande capacité à resserrer l'image spatiale recréée et la possibilité de travailler avec moins de microphones pour la captation. L'algorithme du « lasso » pourrait grandement simplifier l'exercice de captations futures sur des sites souvent encombrés et fort achalandés.

La conclusion principale est que le système de la WFS du GAUS peut être utilisé pour la reproduction d'environnements sonores représentatifs des milieux de travail pour essais futurs avec sujets humains. Aussi, une des pistes de recherche pourrait être l'utilisation d'autres métriques physiques, ou psychophysiques, pour la réalisation de l'évaluation physique (sans sujet humain) de la qualité de reproduction ou pour la caractérisation des environnements cibles et reproduits. Ce sont des ouvertures pouvant conduire à des recherches technologiques futures. Les retombées de ce projet de recherche sont la création et la validation d'une plateforme de simulation acoustique des environnements sonores de travail qui est maintenant disponible pour la réalisation de vastes campagnes d'étude, avec sujets humains en différentes positions (debout, assis, en mouvement, et même avec plan d'écoute à différentes hauteurs), de perception et de localisation des alarmes et autres avertisseurs sonores, qui sont importants en matière de sécurité en milieu de travail. Il pourrait en émerger plusieurs conclusions et recommandations pratiques pour accroître la perceptibilité et la localisation de ces avertisseurs puisque des études avec paramètres d'environnement et de sources contrôlés pourront maintenant être réalisées de façon sécuritaire avec des travailleurs.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES FIGURES.....	XI
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique en bref	2
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES ET OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	5
2.1 État des connaissances.....	5
2.1.1 Environnements sonores et milieux de travail	5
2.1.2 Audibilité et localisation sonore en milieux de travail bruyants.....	7
2.1.2.1 Caractéristiques spatiales des sources et environnements sonores	8
2.1.2.2 Localisation sonore des sources et des environnements sonores	10
2.1.2.3 Audibilité et localisation des alarmes	12
2.1.3 Reproduction d'environnements sonores.....	14
2.1.4 Spatialisation sonore et synthèse des champs sonores.....	17
2.1.4.1 Techniques de spatialisation sonore.....	18
2.1.5 En bref, pour la localisation des alarmes	25
2.2 Objectif général.....	26
2.3 Objectifs spécifiques	26
3. MÉTHODOLOGIE.....	27
3.1 Schéma bloc du traitement représentant le projet de recherche.....	30
3.2 Description du système de <i>Wave Field Synthesis</i> du GAUS	31

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	33
4.1 Caractérisation acoustique de la plage d'efficacité du système de <i>Wave Field</i>	
<i>Synthesis</i> du GAUS	33
4.1.1 Niveau de bruit de fond de la salle WFS du GAUS	34
4.1.2 Fonctions de réponse en fréquence des transducteurs	34
4.1.3 Niveaux de pression sonore maximaux	35
4.1.4 Niveaux de pression en fonction de la distance des sources virtuelles.....	36
4.1.5 Plage d'efficacité du système de WFS de Sonic Emotion™.....	37
4.1.6 Résumé de la caractérisation de la salle de WFS du GAUS.....	41
4.2 Caractérisation générique des deux environnements sonores industriels visés	42
4.2.1 Équipements.....	42
4.2.2 Graymont	42
4.2.3 Agrigratte	43
4.3 Caractérisation et captations sonores de deux environnements sonores industriels visés.....	44
4.3.1 Conception de la géométrie de l'antenne.....	44
4.3.1.1 Restitution bidimensionnelle d'un espace tridimensionnel	44
4.3.1.2 Résolution angulaire	45
4.3.1.3 Limites des basses et hautes fréquences	45
4.3.1.4 Autres limitations possibles	46
4.3.1.5 Vérification de la capacité à reproduire un champ sonore cible.....	47
4.3.2 Méthode de captation et documentation	52
4.3.2.1 Installation des équipements.....	52
4.3.2.2 Documentation et annotations des enregistrements.....	53
4.3.3 Liste de la banque de captations disponibles	54
4.3.3.1 Site extérieur : mine à ciel ouvert	54
4.3.3.2 Site intérieur : atelier de fabrication et d'assemblage.....	56
4.3.4 Comparaison avec les gabarits.....	58
4.3.4.1 Site extérieur : carrière à ciel ouvert (Graymont)	58
4.3.4.2 Site intérieur : atelier de fabrication et d'assemblage (Agrigratte).....	62
4.4 Reproduction par WFS des deux environnements sonores mesurés	64
4.4.1 Méthodes comparées : WFS, problèmes inverses et algorithmes du « lasso » et de l'elastic-net.....	64
4.4.1.1 <i>Wave Field Synthesis</i>	64
4.4.1.2 Conversion des signaux microphoniques.....	64
4.4.2 Simulations théoriques.....	66
4.4.2.1 Cas 1 : Deux sources fixes	67
4.4.2.2 Cas 2 : Une source intermittente en mouvement	72
4.4.2.3 Cas 3 : Un environnement immersif	77
4.4.2.4 Cas 4 : Un environnement sonore mesuré sur site	80
4.4.2.5 Bilan des simulations théoriques	81

4.5	Évaluation objective des environnements sonores reproduits.....	82
4.5.1	Bilans des évaluations objectives.....	87
4.6	Création de démos pratiques et des modifications paramétriques d'environnements sonores.....	87
5.	CONCLUSION.....	89
5.1.1	Recommandations.....	90
5.1.2	Limites des conclusions apportées.....	90
5.1.3	Pistes et opportunités de recherche.....	91
	BIBLIOGRAPHIE.....	93
	ANNEXE A – ENDROITS DE CAPTATION CHEZ GRAYMONT.....	99
	ANNEXE B – ENDROITS DE CAPTATION CHEZ AGRIGRATTE.....	105

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Niveaux de pression typiques (minimaux et maximaux) issus de la littérature au sujet des milieux de travail de type industriel (incluant les activités de construction).....	6
Tableau 2 – Comparaison des technologies de reproduction spatiale du son selon différents critères ou nécessités propres à l'étude.	20
Tableau 3 – Évaluation du critère de bruit pour la salle WFS du GAUS.	34
Tableau 4 – Niveaux de pression acoustique maximaux pour cinq cas de sources virtuelles.	36
Tableau 5 – Niveaux sonores globaux (dB) moyens mesurés en différents endroits chez Graymont.....	43
Tableau 6 – Niveaux sonores globaux (dB) moyens mesurés à différents endroits chez Agrigratte.....	44
Tableau 7 – Liste des enregistrements et évènements captés chez Graymont	54
Tableau 8 – Liste des enregistrements et évènements captés chez Agrigratte.	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Système de WFS de 96 haut-parleurs et salle d'écoute du GAUS.....	2
Figure 2 – Hiérarchie des caractéristiques spatiales de l'impression auditive.	9
Figure 3 – Schéma bloc représentant les étapes de traitement du signal.	31
Figure 4 – Gain des fonctions de réponse en fréquence mesurées.....	35
Figure 5 – Niveau de pression acoustique en fonction de la distance.....	37
Figure 6 – Gabarit pour une onde sphérique focalisée à un mètre	39
Figure 7 – Gabarit pour une onde sphérique non focalisée à quatre mètres	39
Figure 8 – Gabarit pour une onde plane.....	40
Figure 9 – Gabarit pour huit ondes planes décorréelées.....	40
Figure 10 – Gabarit pour seize ondes planes décorréelées	41
Figure 11 – Photographies de différents endroits sur le site de Graymont.	42
Figure 12 – Géométrie de l'antenne de 85 microphones	47
Figure 13 – Champ de pression sonore instantané (Pa)	48
Figure 14 – Champ de pression sonore instantané (Pa)	49
Figure 15 – Champ de pression sonore instantané (Pa)	49
Figure 16 – Niveau efficace des commandes des 96 haut-parleurs pour les simulations	51
Figure 17 – Champ de pression sonore instantané (dB réf. 1).....	51
Figure 18 – Distribution des équipements et de l'antenne de microphones	52
Figure 19 – Exemple de projet Reaper™ annoté.....	53
Figure 20 – Captation : sous les fours.	56
Figure 21 – Captation : aire de chargement.....	56
Figure 22 – Captation : trafic.	56
Figure 23 – Captation : trafic et recul.....	56
Figure 24 – Captation : PLS.	56
Figure 25 – Captation : concasseur.	56
Figure 26 – Captation dans la grande salle.	58
Figure 27 – Captation à l'aire de peinture.....	58
Figure 28 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS.....	60
Figure 29 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS.....	60
Figure 30 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS.....	61
Figure 31 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit	61

Figure 32 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit	62
Figure 33 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS.....	63
Figure 34 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS.....	63
Figure 35 – Deux sources sonores, reproduction avec sources sphériques.....	68
Figure 36 – Deux sources sonores, reproduction avec sources sphériques.....	68
Figure 37 – Deux sources sonores, reproduction par WFS d'ondes planes et par PIT:	69
Figure 38 – Deux sources sonores, reproduction par WFS d'ondes planes et par PIT :	69
Figure 39 – Quatre instants du champ de pression cible (Pa)	70
Figure 40 – Quatre instants du champ de pression reproduit (Pa)	70
Figure 41 – Deux sources sonores, reproduction avec sources sphériques.....	71
Figure 42 – Deux sources sonores, reproduction avec sources sphériques.....	71
Figure 43 – Deux sources sonores, reproduction par WFS d'ondes planes	71
Figure 44 – Deux sources sonores, reproduction par WFS d'ondes planes	71
Figure 45 – Quatre instants du champ de pression reproduit (Pa).....	72
Figure 46 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec sources sphériques.....	73
Figure 47 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec sources sphériques.....	73
Figure 48 – Une source sonore en mouvement, reproduction par WFS d'ondes planes.....	73
Figure 49 – Une source sonore en mouvement, reproduction par WFS d'ondes planes.....	73
Figure 50 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec sources sphériques.....	74
Figure 51 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec sources sphériques.....	74
Figure 52 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec WFS d'ondes planes.....	75
Figure 53 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec WFS d'ondes planes.....	75
Figure 54 – Quatre instants du champ de pression cible (Pa)	75
Figure 55 – Quatre instants du champ de pression reproduit (Pa).....	76
Figure 56 – Quatre instants du champ de pression reproduit (Pa).....	76
Figure 57 – Un champ diffus, reproduction avec sources sphériques.....	78
Figure 58 – Un champ diffus, reproduction avec sources sphériques.....	78
Figure 59 – Un champ diffus, reproduction par WFS d'ondes planes	78
Figure 60 – Un champ diffus, reproduction par WFS d'ondes planes	78
Figure 61 – Un champ diffus, reproduction avec sources sphériques.....	79
Figure 62 – Un champ diffus, reproduction avec sources sphériques.....	79
Figure 63 – Un champ diffus, reproduction par WFS d'ondes planes	79

Figure 64 – Un champ diffus, reproduction par WFS d’ondes planes	79
Figure 65 – Un champ mesuré sur site, reproduction avec sources sphériques.....	80
Figure 66 – Un champ mesuré sur site, reproduction avec sources sphériques.....	80
Figure 67 – Un champ mesuré sur site, reproduction avec sources sphériques.....	81
Figure 68 – Un champ mesuré sur site, reproduction avec sources sphériques.....	81
Figure 69 – Mesure sur site, cas extérieur fixe, reproduction avec sources sphériques.....	83
Figure 70 – Mesure sur site, cas extérieur fixe, reproduction avec sources sphériques.....	83
Figure 71 – Mesure sur site, cas extérieur, source en mouvement, reproduction avec sources sphériques	84
Figure 72 – Mesure sur site, cas extérieur, source en mouvement reproduction avec sources sphériques	84
Figure 73 – Mesure sur site, cas extérieur, source en mouvement, reproduction avec sources sphériques	85
Figure 74 – Mesure sur site, cas extérieur, source en mouvement reproduction avec sources sphériques	85
Figure 75 – Mesure sur site, cas intérieur fixe, reproduction avec sources sphériques	86
Figure 76 – Mesure sur site, cas intérieur fixe, reproduction avec sources sphériques	86
Figure 77 – Mesure sur site, cas intérieur, source en mouvement, reproduction avec sources sphériques	86
Figure 78 – Mesure sur site, cas intérieur, source en mouvement reproduction avec sources sphériques	86
Figure 79 – Schéma (vue du haut, pas à l’échelle) de la captation sous les fours.	99
Figure 80 – Schéma (vue du haut, pas à l’échelle) de la captation à l’aire de chargement.	100
Figure 81 – Schéma (vue du haut, pas à l’échelle) de la captation à l’aire de trafic.....	101
Figure 82 – Schéma (vue du haut, pas à l’échelle) de la captation au PLS.	102
Figure 83 – Schéma (vue du haut, pas à l’échelle) de la captation au concasseur.	103
Figure 84 – Schéma (vue du haut, pas à l’échelle) de la captation dans la grande salle.	105
Figure 85 – Schéma (vue du haut, pas à l’échelle) de la captation dans la salle de peinture.	106

1. INTRODUCTION

Les milieux industriels bruyants nuisent à l'audibilité des alarmes et avertisseurs sonores et compromettent donc la sécurité des travailleurs en présence de machines en mouvement ou dangereuses.

Les pires cas provoquent des blessures graves, voire la mort de travailleurs : « Selon le US Bureau of Labor Statistics, 6 % de tous les accidents mortels (397 décès) dans le secteur de la construction en 2002 seraient dus à un écrasement par un véhicule en marche arrière », soit un total de 23 décès pour cette seule année aux É.-U. (Vaillancourt et coll. 2012). Selon le NIOSH (2004), aux É.-U., 106 travailleurs de la construction ont été tués à la suite d'un contact avec un véhicule en 2001. Du côté québécois, 25 accidents mortels causés par des véhicules en marche arrière sont survenus au Québec entre 1975 et 1991, dont 15 sur des chantiers de construction (Vaillancourt et coll. 2012). Ces statistiques témoignent de la nécessité de réduire les risques et les causes de ces accidents.

Pourtant ces véhicules disposent d'alarmes sonores de recul pour prévenir ces types d'accidents. À la lueur de ces statistiques, on constate néanmoins que ces alarmes sont loin d'être infaillibles et que leur efficacité dépend de l'environnement sonore. La cause exacte de ces failles est difficile à déterminer puisque la perception et la localisation sonores dans un environnement sonore complexe sont des phénomènes encore largement mal connus et relativement peu étudiés.

Même si des études ont déjà été conduites sur l'étude de l'audibilité des alarmes de recul sur les véhicules (Laroche et coll. 1991; Withington 2004; Blouin 2005; Vaillancourt et coll. 2012; Pichette 2013), on constate aisément la lourde logistique derrière la réalisation de tests *in situ* ou d'études avec variations contrôlées des paramètres de l'environnement sonore (par exemple, le nombre et la position des sources sonores interférant avec les signaux d'alarme, ou l'effet d'un environnement clos). Cette difficulté ne permet que péniblement la tenue de vastes études paramétriques (incluant des tests perceptifs avec sujets humains) pour tirer des conclusions plus générales. En effet, pour des raisons de sécurité, de contrôlabilité et de productivité des entreprises, il est difficilement envisageable d'étudier efficacement l'ensemble de ces paramètres sur le terrain.

Afin de contourner cette limitation, des études d'intelligibilité auditive de diverses alarmes effectuées en laboratoire ont été réalisées avec des systèmes de reproduction sonore rudimentaires (binauraux [casque d'écoute], stéréophonique [2 haut-parleurs], Surround 5.1 [5 haut-parleurs avec caisson de grave]) ou sur le terrain dans des conditions plus ou moins bien contrôlées, voire variables. Dans ce dernier cas de tests *in situ*, il est aussi difficile de trouver des espaces représentatifs sans interférer avec l'accomplissement de la tâche des travailleurs. Qui plus est, des tests perceptifs *in situ* rendent quasiment impossibles des études paramétriques (par exemple, une distribution de sources sonores à des positions précises, mais avec variation du niveau de bruit de fond).

Ces observations illustrent la problématique liée à la mise sur pied des vastes campagnes et études qui incorporent à la fois l'environnement sonore et le facteur humain (effet de l'âge, de la perte d'audition, de l'utilisation de protecteurs auditifs) sur la perception sonore globale.

Pourtant, Vaillancourt et coll. (2012) concluent précisément à la nécessité d'études dans cette direction au sujet de la sécurité des travailleurs en relation avec les phénomènes et environnements sonores. Les études reproduisant les environnements sonores de milieux de travail en laboratoire peuvent alléger les difficultés mentionnées plus haut, mais ces approches de reproduction ont rencontré leurs limites. En effet, il est établi que la distribution spatiale du son a un effet important sur le masquage auditif (*Spatial Release from Masking*) et donc sur la perception de signaux sonores utiles dans un environnement bruyant (Arbogast et coll. 2002). Il est donc impératif que ces études en laboratoire tiennent compte de la nature spatiale complexe et détaillée des environnements sonores. En conséquence, il n'est plus possible de limiter les études en laboratoire à des systèmes de reproduction sonore simples.

Le GAUS dispose d'une plateforme unique de reproduction de champs sonores à la fine pointe de la technologie dans le domaine de la spatialisation sonore, soit une plateforme de type *Wave Field Synthesis* (WFS), qui permet la recréation spatiale détaillée d'un environnement sonore (Figure 1). Ces technologies, issues du monde de l'audio et de la musique, n'ont pas encore été exploitées dans des contextes industriels comme décrit plus haut.

L'origine et l'originalité de l'étude se fondent donc sur la rencontre de la problématique mentionnée et de cette solution technologique qui pourrait éviter les difficultés décrites.

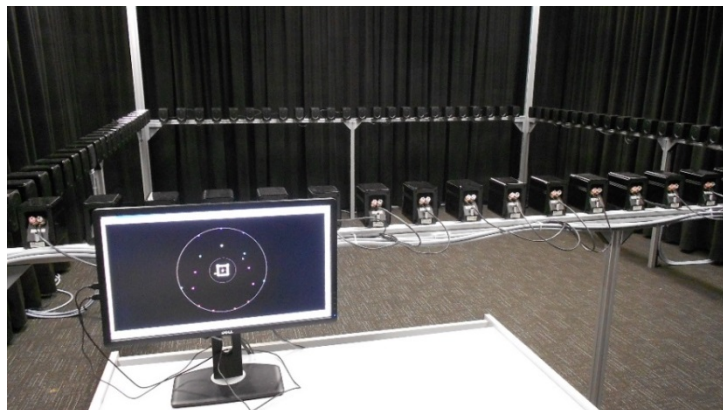


Figure 1 – Système de WFS de 96 haut-parleurs et salle d'écoute du GAUS.

1.1 Problématique en bref

- Une mauvaise audibilité (ou localisation sonore) des alarmes est cause d'accidents de travail.
- L'étude de la localisation sonore et de l'audibilité en environnements sonores complexes et réalistes représente de nombreux défis pour atténuer le risque d'accidents liés à une mauvaise audibilité des alarmes (de recul par exemple).
- Les mesures *in situ* avec auditeurs sont possibles, mais deviennent rapidement prohibitives et irréalisables lorsqu'il faut effectuer de vastes campagnes avec variation des conditions et des paramètres.

- La recreation d'environnements sonores en laboratoire pour l'étude d'audibilité et de localisation des alarmes est possible, mais elle pourrait maintenant bénéficier des nouvelles technologies de spatialisation.
- La reproduction de champs sonores (*Wave Field Synthesis*), pourrait permettre d'aller plus loin que les approches classiquement utilisées en laboratoire, en combinant des réseaux de haut-parleurs avec des réseaux de microphones pour effectuer la recreation spatialement détaillée, en laboratoire, d'environnements sonores captés sur le terrain, pour la réalisation d'études d'audibilité et de localisation des signaux d'alarme.
- Des questions de recherche naissent alors : jusqu'à quel point cette reproduction est-elle possible? Comment évaluer de façon objective sa qualité? Est-elle applicable dans le contexte visé? Et, finalement, est-il possible d'accroître les connaissances et dispositifs technologiques en spatialisation sonore à la lueur de cette problématique de santé et de sécurité du travail?

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

2.1 État des connaissances

Cette section présente une revue de la littérature thématique fondée sur les trois sujets liés à la définition de ce projet : 1) en matière de santé et de sécurité du travail, l'état des connaissances lié aux environnements sonores des travailleurs et à l'audibilité des alarmes et avertisseurs en milieu bruyant; 2) du côté des technologies et applications de l'audio, l'état des connaissances qui concerne la reproduction d'environnements sonores et 3) du côté des technologies de pointes et de la science, l'état des connaissances en synthèse de champs sonores (WFS) et en traitement du signal multicanal (exposé dans deux sous-sections). On examinera notamment comment ces avancées plus récentes peuvent alimenter cette étude.

2.1.1 Environnements sonores et milieux de travail

Dans cette section, les caractéristiques les plus générales des environnements sonores représentatifs de milieux de travail industriels sont définies afin de déterminer celles qui devront, en premier lieu, être reproduites adéquatement par le système et la méthode présentés dans ce rapport.

La littérature abonde d'études, de normes et de recommandations sur le bruit des environnements de travail (Bijsterveld 2008). La plus grande part des études portant sur les environnements sonores liés aux milieux de travail sont motivées par trois objectifs récurrents : 1) réduire les dommages auditifs chez les travailleurs, 2) accroître la productivité des travailleurs (augmenter l'intelligibilité, réduire la fatigue auditive, etc.) et 3) minimiser la nuisance pour le voisinage (industriel ou résidentiel). Au regard des méthodes les plus fréquentes, on retrouve : 1) la mesure des niveaux de pression sonore (SPL, *Sound Pressure Level*, dosimètre, etc.), 2) la cartographie des SPL et 3) les prédictions empiriques ou théoriques. Quant aux résultats typiques utilisés pour décrire les environnements sonores de travail, ils sont habituellement sous forme de : 1) cartographies de SPL, 2) puissances acoustiques des sources sonores¹, 3) courbes de décroissance spatiale², 4) doses de bruit³, 5) réverbération (temps de réverbération)⁴, 6) EDT (*Early-Decay-Time*)⁵, 7) fréquence de Schroeder⁶, 8) « réverbérance »⁷, etc.

¹ La puissance acoustique est le taux d'émission de l'énergie sonore par les sources, elle s'évalue en Watt ou décibel (dB).

² Les courbes de décroissance spatiale sont la représentation de la décroissance du niveau de pression acoustique (en dB) en fonction de la distance d'une source omnidirectionnelle.

³ Les doses de bruit évaluent l'exposition au bruit sur des périodes de temps données et sont typiquement mesurées avec un sonomètre spécial qui intègre les niveaux de pression acoustique dans le temps.

⁴ La réverbération est souvent caractérisée par le temps de réverbération, défini comme le temps (en seconde) nécessaire pour que le niveau de pression sonore chute de 60 dB après l'interruption d'une source acoustique dans un lieu. Souvent, un long temps de réverbération correspond à plus de réverbération et à une audibilité réduite.

⁵ Le EDT est une autre mesure du temps de réverbération; il correspond au temps nécessaire pour observer une chute de 10 dB du niveau de pression acoustique après l'interruption d'une source dans un lieu.

⁶ La fréquence de Schroeder est la fréquence de transition, pour un lieu ou pour une salle, entre une faible densité modale (avec moins de trois modes excités simultanément à une fréquence donnée) et une haute densité modale (avec plus de trois modes excités simultanément à une fréquence donnée). La fréquence de Schroeder fixe la

De ces quelques exemples issus de la littérature, il est possible de dégager des caractéristiques récurrentes déjà pressenties : 1) niveaux de pression sonore élevés, 2) espace architectural extérieur ou intérieur et 3) cohabitation de sources sonores fixes et de sources sonores en mouvement. À titre illustratif, le Tableau 1 présente la gamme de niveaux de pression sonore tirée de la littérature au sujet des environnements sonores des milieux de travail industriels.

Tableau 1 – Niveaux de pression typiques (minimaux et maximaux) issus de la littérature au sujet des milieux de travail de type industriel (incluant les activités de construction)

Référence	Description	Niveau de pression minimal rapporté	Niveau de pression maximal rapporté
Ali, 2011	Pour 15 types d'activités industrielles en Égypte en 2011	71,4 dB (niveau équivalent pour 10 minutes)	100,4 dB (niveau équivalent pour 10 minutes)
Sharma et coll. 1998	Pour l'industrie du charbon en Inde en 1998	80 dB	104 dB
Fernández et coll. 2009	Pour l'industrie de la construction en Espagne	72,1 dB (A) (niveau équivalent pour une journée)	111,9 dB (A) (niveau équivalent pour une journée)
Fernandez et coll. 2008	Pour différents outils	80,3 dB (A)	100,8 dB (A)
Guasch et coll. 2002	À partir de cartographies de SPL sur un site entier	55 dB (A)	107 dB (A)
Czuchaj et coll. 2001	Dans l'industrie alimentaire où peu de matériaux absorbants peuvent être utilisés	73 dB (A)	93 dB (A)
Wilkins et Martin, 1987	Sur un site industriel intérieur dense pour l'étude d'audibilité et de détection des alarmes	85 dB (A)	115 dB (A)
Marsh, 1976	Dans des raffineries	40 dB (A)	70 dB (A)
Utley et Miller, 1985	Sur des sites de construction	75 dB (A)	107 dB (A)
Williams et Yang, 1992		92,5 dB (A)	102 dB (A)

De ces observations et de ces caractéristiques issues de la littérature, il semble que le niveau de pression sonore le plus élevé observé dans un poste de travail soit de 115 dB (A). Considérant que c'est ce genre d'environnement qui doit être reproduit par des réseaux de haut-parleurs, il est d'emblée clair qu'un des défis sera la restitution de niveaux aussi élevés. Par ailleurs, cette problématique n'est pas de nature technologique, mais bien technique puisqu'elle peut être levée avec plusieurs haut-parleurs et plus de puissance; ce qui, au fond, n'est donc limité que par le budget et par les équipements disponibles. En ce sens, la voie de l'acoustique virtuelle pour les études de perception des milieux de travail bruyant n'est pas invalidée.

limite au-delà de laquelle le champ acoustique peut être considéré comme « diffus », c'est-à-dire uniforme et provenant de toutes les directions de l'espace.

⁷ La réverbérance est la perception de la réverbération.

De façon générale, toute tentative d'étude du bruit dans les milieux de travail fera face à deux problématiques majeures : complexité et spécificité. La complexité fait autant référence aux difficultés physiques des endroits et des sources concernés sur chaque site d'étude qu'aux législations et normes de mesure sur l'exposition du bruit pour les travailleurs. Face à ces complexités et à ces spécificités, il devient particulièrement difficile de tirer des conclusions et d'obtenir une vision globale sur le sujet. Un bon exemple est donné par Wilkins et Martin (1987) dans une revue de la littérature au sujet de l'influence du port de protecteurs auditifs sur la perception des alarmes sonores en milieu de travail bruyant. Cette revue tente de dégager des grandes lignes en se basant sur différentes études, réalisées dans différents contextes, avec différents niveaux de pression sonore, différents types d'alarme, etc. Ainsi, Wilkins et Martin notent que l'audition des alarmes n'est pas compromise par le port de protecteurs auditifs dans le cas d'utilisateurs dont l'écoute est saine. Par contre, des conditions spécifiques pour lesquelles le port de protecteurs auditifs devient une limitation de l'audibilité des alarmes sont établies : perte d'audition, etc. Les auteurs recommandent que les systèmes d'alarme sonore soient conçus en fonction de ces conditions potentiellement problématiques.

Dans un ouvrage récent, Bijsterveld (2008) discute des technologies, des cultures et des problèmes publics de bruit au XX^e siècle. La confusion culturelle autour des environnements bruyants et de leur contrôle a typiquement mené à une séparation des problématiques du bruit, maintenant contrôlées par des acousticiens équipés de méthodes et de théories peu accessibles aux travailleurs et citoyens. Encore une fois, ce constat replace l'auditeur humain au centre de la problématique.

En considérant donc ces complexités et ces spécificités, il devient évident que le centre de toute étude dans ce domaine doit être l'auditeur. Le facteur humain devrait être le centre de l'attention de futures études. Par contre, il est pratiquement impossible d'effectuer des campagnes de tests d'écoute dans des milieux de travail sans nuire à la productivité des espaces investis, tout en garantissant un contrôle des conditions. C'est pour cette raison que l'acoustique virtuelle et la reproduction de champs sonores, telles qu'abordées dans cette étude, peuvent être des solutions prometteuses pour régler ces problèmes, pour éviter les critiques citées et pour, à la fois :

1. créer un environnement sonore pour lequel le champ de pression acoustique est une copie de lieux réels;
2. permettre des variations de paramètres afin d'étudier les différents facteurs et niveaux ou pour des tests d'écoute basés sur des comparaisons de paires;
3. permettre la réalisation d'expériences en conditions contrôlées;
4. garantir une répétabilité de participant en participant et de scénario en scénario, étant donné le contrôle des conditions et la possibilité de rejouer des extraits sonores au besoin.

2.1.2 Audibilité et localisation sonore en milieux de travail bruyants

Le système auditif, de par son caractère normalement binaural⁸, dispose d'une grande capacité de résolution, de distinction et de localisation spatiale des sources sonores, des réflexions et des

⁸ L'adjectif binaural fait référence au fait de disposer de deux oreilles pour l'audition.

environnements sonores, et ce, avec seulement deux « capteurs » comme principaux fournisseurs d'information. Cette capacité de localisation exige des mécanismes physiques, biologiques et cognitifs complexes qui rendent la compréhension de la localisation sonore ardue. En plus de favoriser la localisation, l'audition binaurale permet et facilite la séparation de sources basée sur leurs positions relatives à l'auditeur. Cette séparation permet, quant à elle, une intelligibilité accrue en milieu bruyant ou réverbérant. On parle ici d'intelligibilité de la voix humaine aux fins de communication, mais aussi d'intelligibilité générale telle que requise, par exemple, lors de l'identification du danger et des risques en milieu de travail bruyant ou réverbérant. De plus, il est maintenant admis que l'audition binaurale accroît aussi la capacité de détection des signaux en milieux bruyants (Stern Jr. et Colburn, 1978). C'est précisément ce couplage indissociable entre localisation sonore et audibilité qui fait que toute étude d'audibilité des indicateurs et autres signalisations sonores ne peut être réalisée sans tenir compte du caractère spatial de l'audition, mais aussi des environnements sonores.

2.1.2.1 Caractéristiques spatiales des sources et environnements sonores

Cette section présente un sommaire des caractéristiques spatiales des sources et des environnements sonores telles qu'initialement hiérarchisées par Mason et synthétisées par Rumsey (2001). Cette hiérarchie de caractéristiques ou d'attributs est montrée à la Figure 2 et sépare les attributs des sources de ceux de l'environnement. Cette hiérarchie, initialement proposée dans un contexte d'évaluation des qualités spatiales de la reproduction audio pour poser les bases de tests d'écoute, illustre toute la subtilité que peut prendre l'impression spatiale dans un scénario complexe comme ceux visés par ce projet. À titre informatif, en audio, la notion d'« enveloppement » fait référence à la qualité d'immersion, au sens d'être complètement encerclé par le son. Pour ce qui est des sources, les « dimensions perçues » résultent de la combinaison de la perception de la taille des sources et de leur « diffusion » (plus ou moins localisées).

Cette hiérarchie est utile pour distinguer deux approches et deux méthodes liées au problème de l'impression spatiale qui doit être créée. Les deux approches possibles sont la « captation/reproduction » et la « synthèse ». La « captation/reproduction » correspond au cas de mesure d'environnements réels et à la reproduction de la captation. Dans ce cas, la hiérarchie présentée est traitée comme une boîte noire, c'est-à-dire que tout est traité en bloc comme un seul champ acoustique donné. Cette approche, plus rigide, est garante de plus de « réalisme » et de détails. La « synthèse » fait plutôt référence à un processus artificiel spatial qui dispose des sources virtuelles simples dans un environnement virtuel (par exemple, utilisation de la WFS pour synthétiser des sources sonores industrielles par des sources sphériques ou des ondes planes). Dans ce cas, chaque élément de la hiérarchie peut être composé manuellement. Si cette approche offre plus de malléabilité et de possibilités paramétriques, elle offre des résultats plus artificiels en ce qui a trait à la richesse spatiale. Il est toutefois possible de combiner les deux approches. Par exemple, il est concevable de présenter un environnement capté et reproduit tel quel, dans lequel une source en mouvement virtuelle est superposée.

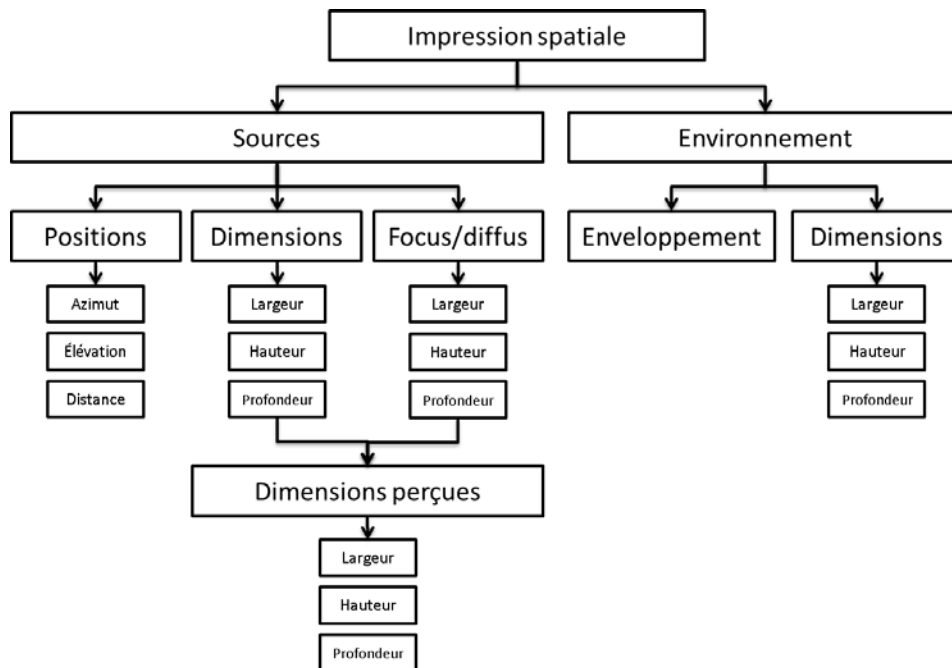


Figure 2 – Hiérarchie des caractéristiques spatiales de l'impression auditive.

Pour les méthodes, on différencie les méthodes « paramétriques » et les méthodes « non paramétriques ». Dans les cas paramétriques, la scène à reproduire est représentée par une forme de modèle dont les paramètres peuvent définir ou influencer la scène sonore sans pour autant agir précisément ou uniquement sur un des attributs de la hiérarchie. Dans les cas non paramétriques, la scène sonore à reproduire ou à reconstruire est représentée par des signaux (haut-parleurs ou microphoniques) captés ou synthétisés qui ne sont pas variables sur la base d'ajustement de paramètres isolés. Encore une fois, des scènes globales peuvent combiner des parties paramétriques avec d'autres non paramétriques. Voici quelques exemples illustratifs pour clarifier ces concepts :

1) Captation/reproduction non paramétrique

- Captation de signaux par antenne de microphones qui sont convertis en commandes haut-parleurs pour reconstruire le champ acoustique capté à l'antenne
 - Traitement de la hiérarchie comme une boîte noire découlant d'un lieu réel.

2) Synthèse paramétrique

- Réalisation classique de la WFS avec des signaux monophoniques enregistrés qui sont envoyés en entrée à des sources acoustiques simples (sphériques, planes) dans un espace virtuel de type champ libre
 - Composition additive des éléments de la hiérarchie
 - La WFS de Sonic Emotion^{MD} est de ce type.

3) Captation/reproduction paramétrique

- Post-traitement d'une captation par antenne de microphones pour en obtenir une représentation paramétrique (par exemple : analyse spatiale, séparation des sources, analyse directionnelle (Pulkki, 2007) [DiRAC, *Directional Audio Coding*], lasso [*least absolute shrinkage and selection operator*] (Lilis et coll. 2010), resynthèse spatiale, reproduction de champs acoustiques basée sur des localisations de sources disponibles (Koyama et coll. 2015), traitement par égalisation multicanal ou par formation de voies (Ramanana et coll. 2014))
 - Extraction et contrôle paramétriques d'attributs, issus d'une première représentation de type boîte noire de la hiérarchie.

4) Synthèse non paramétrique

- Reproduction de champs acoustiques sur la base de modèle acoustique ou vibratoire (éléments finis, SEA [*Statistical Energy Analysis*], tracé de rayon, etc.) (les modèles peuvent, eux, être paramétriques sans pour autant que la synthèse spatiale le soit) (par exemple, Bolduc et coll. 2014)
 - Traitement de la hiérarchie comme une boîte noire résultant d'un modèle théorique.

Dans le cadre de cette étude, un des objectifs est d'évaluer la capacité de reproduire des environnements mesurés sur des sites réels. Conséquemment, l'accent est d'abord placé sur l'approche de captation/reproduction non paramétriques par le biais de fonctions MATLAB^{MD} développées pour l'occasion. Par contre, comme montré plus loin, des recherches dans l'avenue de la captation/reproduction paramétriques ont aussi été investies. Qui plus est, des démonstrations et autres exemples d'applications qui combinent captation/reproduction avec synthèse ont aussi été mis sur pied dans le cadre de ce projet, par l'entremise des logiciels de la WFS classique de Sonic EmotionTM. Ces exemples sont décrits à la section 4.6.

À titre d'exemple, dans le contexte d'une étude de perception des alarmes sonores en milieu de travail bruyant, l'utilisation des technologies présentées dans ce rapport pourrait combiner la captation/reproduction non paramétrique pour créer un environnement d'arrière-plan avec la synthèse paramétrique pour la simulation de sources ou alarmes sonores en mouvement. Cette combinaison serait idéale en ce sens qu'elle garantirait, d'un côté, un environnement représentatif (mais dont le niveau et la directivité peuvent être adaptés au besoin) et, d'un autre côté, une flexibilité paramétrique pour, par exemple, étudier différents scénarios d'alarme et de déplacements avec des sujets humains dans des fenêtres de temps réduites.

2.1.2.2 Localisation sonore des sources et des environnements sonores

Une branche de la psychoacoustique est spécialement dédiée à l'étude de la localisation sonore chez l'humain. De cette science maintenant assez bien établie, il est possible de tirer certaines observations qui orientent la présente étude.

La théorie de la localisation sonore se fonde principalement sur trois modèles et mécanismes (Blauert, 1999; Stern Jr. et Colburn, 1978) :

1. Modèle duplex équivalent à deux capteurs de pression sonore ponctuels en champ libre (sans modèle de diffraction par la tête et le buste).
2. Indicateurs de localisation : ILD (*Interaural Level Difference*, différence interaurale de niveau), ITD (*Interaural Time Difference*, différence interaurale de temps) ou IPD (*Interaural Phase Difference*, différence interaurale de phase, dans le cas des tons purs), indicateurs surtout utiles pour la localisation latérale.
3. Modèle HRTF (*Head-Related Transfer Function*, fonction de transfert de la tête) qui tient compte des ILD, des ITD, mais aussi des colorations spectrales causées par la diffraction des sons incidents par la tête et par le buste (utile pour la résolution avant-arrière et pour la localisation des positions verticales).

Ces modèles sont typiquement formulés pour trois types de scénarios (Blauert, 1999; Stern Jr. et Colburn, 1978) :

1. Une seule source en champ libre;
2. Deux sources en champ libre ou une source avec une réflexion (effet de précedence, etc.);
3. Multiples sources ou sources distribuées (effet de précedence, masques, etc.).

Les deux premiers scénarios correspondent à des conditions contrôlées, rares en pratique, qui furent nécessaires pour la compréhension scientifique de la localisation sonore. Les règles, modèles et indicateurs de localisation qui en découlent, quoique fort utiles, principalement développés pour des signaux simples et contrôlés, sont donc plus difficilement transposables dans le cas des environnements complexes et bruyants caractérisés par, comme mentionné plus haut, plusieurs sources de grande taille et de fort niveau, des sources en mouvement, des lieux réverbérants, des signaux complexes, etc. De plus, selon la situation, selon le spectre fréquentiel, selon le contenu en fréquence de la source et selon la position relative de la source par rapport à un système de coordonnées centré à la tête de l'auditeur (et suivant son orientation), différents mécanismes de localisation (basés sur ceux mentionnés) seront plus ou moins actifs lors de la localisation. Cela complexifie d'autant plus la prédiction théorique de la localisation sonore perçue pour des cas de sources, de signaux et d'environnements complexes.

D'un autre côté, il est connu que la plupart des règles et indicateurs qui furent établis dans les recherches en psychoacoustique de la localisation sonore peuvent se transposer aux situations plus complexes sur la base de la théorie de l'« analyse de scènes auditives » (Bregman, 1990) qui montre que le système auditif crée des flux auditifs par ségrégation simultanée, flux pour lesquels, par la suite, les différents mécanismes de localisation sonore peuvent opérer.

Au fil du temps, avec le développement de la compréhension scientifique de la localisation sonore, une nouvelle tendance émerge en psychoacoustique : la modélisation informatique ou numérique de la localisation sonore dans le but que celle-ci soit prédite à partir de signaux binauraux enregistrés sur un mannequin binaural ou avec des microphones binauraux. C'est un thème de recherche actif, mais dont les modèles restent possiblement trop immatures pour être appliqués à d'autres contextes. Ces modèles sont maintenant néanmoins appliqués aux situations avec plusieurs sources concurrentes (Stern Jr. et Colburn, 1978); ce qui laisse présager une

applicabilité future. Par ailleurs, même si ces modèles sont utiles puisqu'ils permettent des études paramétriques, il n'en demeure pas moins que le caractère individuel des HRTF, l'utilisation de protecteurs auditifs, la réalisation de tâches liées au travail, la présence de sources sonores en mouvement, ne sont que quelques exemples de facteurs, potentiellement influents sur la localisation et l'audibilité des alarmes et autres signaux, qui peuvent restreindre l'applicabilité de tels modèles à des études dédiées aux risques auxquels sont exposés les travailleurs dans des milieux et espaces complexes.

Aussi, dans ce contexte, la problématique de l'audibilité et de la localisation des alarmes est encore plus complexe, puisque la présence de masques potentiels causés par la nature bruyante des lieux typiquement concernés, soit pour des rapports signal-sur-bruit faibles ou très faibles, peut dégrader les seuils de résolution de la localisation sonore (Stern Jr. et Colburn, 1978). Cette dégradation est encore plus marquée lorsque, à rapport signal-sur-bruit égal, le masque est spatialement près de la source de signal significative (Stern Jr. et Colburn, 1978). Ce dernier cas correspond précisément aux véhicules ou autres machineries lourdes en mouvement qui disposent d'alarmes de recul, mais dont la direction d'arrivée, pour l'auditeur, sera toujours près de la source de bruit généré par le moteur ou par l'échappement du véhicule, par exemple.

Considérant l'ensemble de ces connaissances sur la localisation sonore et sur la nature des environnements sonores, et tenant compte du champ d'application visé pour ce projet, il est difficile de ne pas conclure que la réalisation d'études de perception d'alarmes en milieux de travail doit préférablement se faire dans des environnements sonores spatialisés complexes représentatifs de lieux réels.

2.1.2.3 Audibilité et localisation des alarmes

Au-delà des connaissances évoquées aux sections précédentes, la première motivation derrière cette étude concerne un potentiel d'application de la reproduction de champs sonores à la création d'un laboratoire virtuel pour évaluer l'audibilité et la perception des alarmes et autres avertisseurs sonores de danger.

Même si des études ont déjà été conduites sur l'audibilité des alarmes de recul sur les véhicules (Laroche et coll. 1991; Laroche et coll. 1995; Withington, 2004; Blouin, 2005; Vaillancourt et coll. 2012; Pichette, 2013) pour possiblement éviter les embûches évoquées à la section précédente, on constate aisément la lourde logistique derrière la réalisation de tests *in situ* ou d'études avec variations contrôlées des paramètres de l'environnement sonore (par exemple le nombre et la position des sources sonores interférant avec les signaux d'alarme, ou l'effet d'un environnement clos) (Wilkins, 1984). Cette difficulté ne permet que péniblement la réalisation de vastes études paramétriques (incluant des tests perceptifs avec sujets humains) pour tirer des conclusions plus générales. À titre d'exemples révélateurs, le rapport R-763 de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), portant sur l'évaluation de trois types d'alarmes sonores de recul, conclut à la nécessité de poursuivre des études dans les directions suivantes (Vaillancourt et coll. 2012): 1) Perception et localisation des alarmes à large bande (BSS) tenant compte des individus avec pertes auditives dans diverses conditions de protection auditive; 2) Effets des mouvements de la tête sur la capacité de détecter et de localiser l'alarme BSS en conditions réalistes de travail; 3) Effets des coquilles actives et passives sur la

perception et la localisation des alarmes de recul; 4) Perception des alarmes BSS en espace clos avec réflexions, réverbération, etc., et 5) Effets sur la localisation auditive des alarmes de recul lorsque plusieurs alarmes sont activées simultanément. Il est difficilement envisageable d'étudier efficacement l'ensemble de ces paramètres sur le terrain dans une fenêtre de temps raisonnable.

Par contre, comme mentionné plus haut, les études d'intelligibilité auditive de diverses alarmes effectuées en laboratoire ont été réalisées avec des systèmes de reproduction sonore simples (binauraux [casque d'écoute], stéréophoniques [2 haut-parleurs], Surround 5.1 [5 haut-parleurs avec caisson de grave]) ou sur le terrain dans des conditions plus ou moins bien contrôlées, voire variables (Wilkins, 1984). Dans ce dernier cas de tests *in situ*, il est aussi difficile de trouver des espaces représentatifs sans interférer avec l'accomplissement de la tâche des travailleurs. Qui plus est, des tests perceptifs *in situ* rendent quasiment impossibles des études paramétriques (par exemple, une distribution de sources sonores à des positions précises, mais avec variation du niveau de bruit de fond).

Ces observations illustrent la problématique liée à la mise sur pied des vastes campagnes et études qui incorporent à la fois l'environnement sonore et le facteur humain (effets de l'âge, de la perte d'audition, des protecteurs auditifs) sur la perception sonore globale. Pourtant, Vaillancourt et coll. (2012) concluent précisément à la nécessité d'études dans cette direction, soit au sujet de la sécurité des travailleurs en relation avec les phénomènes et environnements sonores.

Les études reproduisant les environnements sonores de milieux de travail en laboratoire peuvent alléger les difficultés mentionnées plus haut, mais ces approches de reproduction ont atteint leurs limites. En effet, il est établi que la distribution spatiale du son a un effet important sur le masquage auditif (*Spatial Release from Masking*) et donc sur la perception de signaux sonores utiles dans un environnement bruyant (Arbogast et coll. 2002). Il est donc impératif que ces études en laboratoire tiennent compte de la nature spatiale complexe et détaillée des environnements sonores. En conséquence, il est problématique de limiter les études en laboratoire à des systèmes de reproduction sonore simples. Il convient donc aux chercheurs de pousser plus loin les études sur le sujet et de se tourner vers des approches plus actuelles en reproduction spatiale du son et en reproduction d'environnements sonores.

Parmi les travaux fondateurs sur l'audibilité des alarmes en milieu de travail qui méritent d'être cités et brièvement expliqués, on trouve ceux de Wilkins et Martin (1987). Wilkins (1984) s'intéresse précisément à l'audibilité des alarmes sonores, et à d'autres indicateurs sonores de danger, en milieu bruyant et pour des travailleurs équipés de protecteurs auditifs. Il divise la perception des alarmes sonores en trois étapes distinctes qui clarifient la problématique et la terminologie : 1) l'audibilité (est-ce que l'alarme peut être entendue?); 2) la demande d'attention (est-ce qu'elle sera écoutée?); et 3) la reconnaissance (est-ce qu'elle sera comprise?). Dans ces travaux, dont une part fut réalisée en laboratoire, les chercheurs ont tenu compte des caractéristiques de directivité et de la réverbération de l'environnement. Des expériences *in situ* furent aussi réalisées afin de travailler dans un environnement sonore réel et immersif pour répondre aux critiques à propos des études de vigilance menées en laboratoire (Lucaccini, 1969). Résultats sur site et résultats de laboratoire furent comparés. Par contre, cette comparaison fut jugée périlleuse étant donné les grandes différences de conditions et de variables non contrôlées

entre les expériences de laboratoire et celles effectuées *in situ*. Par ailleurs, une des conclusions de la publication sur les mesures *in situ* avec sujet humain est directement liée à la difficulté de préserver un contrôle sur l'expérience *in situ*. À l'ère de la reproduction sonore spatialisée multicanal, plusieurs points critiques du passé liés au manque de réalisme sonore des laboratoires par rapport à la complexité des mesures *in situ* peuvent être potentiellement évités grâce aux technologies présentées dans ce rapport.

Plus tard, Wilkins et Martin (1987) proposent une revue de la littérature sur l'audibilité des alarmes et indicateurs sonores de danger en prenant soin d'aborder le problème dans le cadre qui relie : l'environnement, l'auditeur, la protection auditive et les signaux indicateurs. Ils montrent en fait qu'il est impossible de dissocier ces facteurs.

Un autre exemple d'intérêt est celui des travaux de Lee et Kong (2006). Les chercheurs traitent, eux aussi, le problème reliant alarme, environnement et protection auditive comme un tout. Leur but est de trouver, pour un environnement donné (postes de travail, bruit ambiant, bruit direct), ainsi que pour le port ou non d'équipement de protection auditive, le nombre, les positions et les niveaux sonores des alarmes optimaux. Les auteurs considèrent le problème de l'espace et des alarmes comme une écologie d'éléments inséparables.

En bref, l'acoustique virtuelle et la reproduction de champs sonores appliquées à la problématique de la reproduction d'environnements sonores peuvent potentiellement éviter l'ensemble de ces difficultés et aborder le problème comme un tout reliant environnement, travailleur, alarmes et équipement de protection auditive (s'il y a lieu). Le but de cette étude est de valider cette approche et de montrer le potentiel de ces technologies.

2.1.3 Reproduction d'environnements sonores

La reproduction d'environnements sonores captés ou synthétiques a occupé bon nombre de chercheurs depuis des décennies (Rumsey, 2001). Les applications principales les plus connues sont surtout liées à la musique, au cinéma et même aux jeux vidéo. Il est possible de distinguer deux classes de motivation. Pour la première, la reproduction ne vise pas une quelconque forme de fidélité. Par exemple, en musique ou en cinéma, la reproduction d'environnements sonores est surtout destinée à des fins créatives. Il n'en demeure pas moins que les travaux scientifiques et technologiques liés à ce champ d'application ont grandement participé à l'avancement des connaissances. Pour la seconde, la reproduction vise une forme de fidélité qui sera, typiquement, quantifiée soit sur la base d'évaluations perceptives, soit, plus rarement, sur la base d'évaluations physiques par des mesures acoustiques. Ce projet s'inscrit dans cette seconde classe.

Plus récemment, la reproduction d'environnements sonores a trouvé un nouveau champ d'application en ingénierie et en sciences. Quelques exemples : simulateurs de vol (Sheng et coll. 2013), simulation pour évaluation de la qualité sonore (Berckmans et coll. 2008), auralisation⁹ en architecture (Kleiner et coll. 1993), auralisation de véhicules virtuels (Vorländer, 2008), etc. Une

⁹ Le terme « auralisation » désigne toute tentative de rendre audible ce qui ne l'est pas, mais qui reste lié au son. Par exemple, il est possible de faire de l'auralisation de modèles acoustiques théoriques en architecture. Par contre, une conversion de données non liées au son, par exemple, des données météorologiques, qui seraient converties en données audio, n'est pas du ressort de l'auralisation mais bien de la « sonification ».

des questions de recherche les plus importantes en reproduction d'environnements sonores concerne l'arrimage de fondements physiques avec des considérations perceptives. Par exemple, comment effectuer une reproduction d'environnements sonores physiquement valable ou fondée selon tel ou tel critère physique tout en garantissant une perception jugée intéressante selon tel ou tel autre critère. Les présents travaux de recherche s'inscrivent dans cette voie.

Une des questions ouvertes qui concernent la reproduction d'environnements sonores pour fin d'études perceptives avec sujets humains est celle de l'écologie des sens et de la validité écologique de la reproduction des environnements sonores (Guastavino et Katz, 2004; Guastavino et coll. 2005). Par exemple : est-ce que la différence visuelle ou écologique entre le laboratoire où aurait lieu la reproduction d'environnements sonores et le lieu de travail visé pourrait influencer de façon significative les réactions et les comportements de participants à des tests d'écoute? Dans cette lignée, Begault (1999) discute, par l'entremise d'une revue de littérature, des facteurs auditifs et non auditifs qui influencent l'image acoustique virtuelle perçue et donc la localisation sonore (pour la reproduction sur casque d'écoute ou avec systèmes multicanaux). À la suite de cette revue de littérature, Begault (1999) suggère de minimiser ces facteurs en spatialisation sonore et en acoustique virtuelle : 1) présence de bruit de fond, 2) source de distraction visuelle et 3) incohérence entre audio et vidéo. Il suggère de maximiser ces facteurs : 1) possibilité d'avoir des mouvements de tête qui garantissent une cohérence avec la scène sonore et 2) approche environnementale de la scène sonore. Par ailleurs, Begault (1999) insiste judicieusement sur les études qui démontrent que les influences de localisation entre les modalités sensorielles dépendent aussi du contenu présenté. Ce qui, notamment, complexifie la possibilité de poser des conclusions ou règles générales qui s'appliqueraient à tous les scénarios et à toutes les technologies de reproduction d'environnements sonores. Par ailleurs, on notera que les deux facteurs à maximiser cités plus haut sont disponibles dans le cas de la WFS et plus difficiles d'accès pour les approches stéréophoniques (à deux canaux, ou plus) et binaurales (sans algorithme de poursuite de tête).

Toujours au sujet de la validité écologique de la récréation en laboratoire d'un environnement sonore de travail pour tests d'écoute ou d'études perceptives, et à titre d'exemple spécifiquement lié à la santé et à la sécurité en milieu de travail, Park et Casali (1991) ont comparé des résultats de laboratoire avec des résultats obtenus en milieu de travail pour l'étude empirique du confort offert par différents protecteurs auditifs. Les auteurs concluent que les résultats obtenus en milieu de travail ne sont pas cohérents avec les résultats obtenus en laboratoire. Par contre, un des problèmes majeurs de cette conclusion découle du fait que les deux plans d'expérience, en excluant évidemment la différence d'environnement, n'étaient pas en tout point identiques : les objectifs étaient différents, les facteurs étudiés n'étaient pas les mêmes (durées de port, installation et positionnement des protecteurs, profils des participants [travailleurs expérimentés et habitués aux protecteurs auditifs pour l'étude sur le terrain, personnes non habituées aux protecteurs auditifs pour l'étude en laboratoire]). Conséquemment, malgré le fait que ce travail de Park et Casali (1991) est un des seuls à aborder la question de l'équivalence de la réalisation de tests avec sujets humains sur le terrain ou en laboratoire avec application sonore dans le contexte de la santé et sécurité au travail, il est difficile d'adhérer aux conclusions des auteurs. De plus, comme mentionné dans la section précédente, Smith et Lucaccini (1969) avaient aussi comparé des études de vigilance réalisées dans un milieu de travail avec les mêmes expériences en laboratoire. Même si ces auteurs montrent qu'il n'y a pas de corrélation claire entre les

résultats des deux situations, ils mentionnent le fait que ceci est essentiellement causé par le manque de contrôle des conditions d'expérience en conditions de travail réelles.

Au-delà de cet exemple spécifique et discutable et des conclusions de Smith et Lucaccini (1969), la littérature plus récente sur le confort acoustique contient quelques études et expériences avec sujets humains qui furent réalisées en laboratoire dans des conditions simulées (Weber et coll. date inconnue; Guastavino et Katz, 2004; Guastavino et coll. 2005; Mellert et coll. 2008; Pheasant et coll. 2008, 2009; Valente et coll. 2012; Watts et Pheasant 2013, 2015). Ce qui porte à croire que ce type de tests avec sujets humains, réalisé en simulations dans des conditions de laboratoire, est au moins accepté par la communauté. Et ce, à défaut de disposer de meilleures solutions technologiques et expérimentales qui garantissent à la fois un contrôle des conditions d'expérience et une forme de fidélité de l'écologie sensorielle de l'environnement simulé.

De façon plus spécifique, Guastavino et coll. (2004, 2005) se sont penchés sur la validité écologique de la reproduction d'environnements sonores. La validité écologique fut introduite dans le cadre de l'étude de la perception visuelle et réadaptée pour la perception d'environnements sonores par Guastavino et coll. (2015). La validité écologique doit tenir compte des conditions environnementales et contextuelles de l'environnement sonore. Dans ces travaux, les auteurs comparent des réponses verbales de participants exposés à des environnements sonores réels (en condition *in situ*) et reproduits en laboratoire par ambisonie (en version bidimensionnelle et tridimensionnelle) et par technique stéréophonique. Une des conclusions des auteurs qui supporte les hypothèses derrière la présente étude est que les descriptions verbales obtenues dans le cas de la reproduction multicanale ambisonique étaient semblables aux descriptions verbales obtenues pour les expériences sur le terrain. Ce qui n'était pas le cas pour les systèmes de reproduction plus simples utilisés dans l'étude. Cette observation justifie donc l'utilisation de technique multicanale avancée pour la recreation d'environnements sonores en vue de tests perceptifs des éléments d'environnements sonores. Les auteurs concluent aussi que l'analyse linguistique de données verbales suivant des tests d'écoute peut être utilisée comme une mesure de la validité écologique des systèmes de reproduction (Guastavino et coll. 2005).

Ainsi, à la lueur de ces références, la question des influences entre les sens lors de présentation virtuelle reste complexe et ouverte. Par ailleurs, elle devrait être reconsidérée à chaque fois selon le scénario et le contexte d'application de la réalité virtuelle visés. Dans le cadre de ce projet, qui concerne surtout les approches physiques et une preuve de concept technologique, de telles questions sont reportées pour de futures recherches. Finalement, en tenant compte des références citées, il est convenu que, pour cette étude, la reproduction en laboratoire d'environnements sonores pour tests d'écoute ultérieurs au sujet de la perception des alarmes est une solution viable puisque, à défaut de fournir un environnement immersif multi sensoriel parfaitement représentatif des lieux de travail, elle permet de garantir : 1) un contrôle des paramètres d'expérience, ce qui est impératif pour une expérience fondée sur un plan d'expérience, 2) une répétabilité des conditions de tests et 3) une grande flexibilité pour la variation de paramètres acoustiques ou sonores dans le cadre d'un vaste plan d'expérience qui concernerait des tests de perception des alarmes de recul. En guise de résumé, pour comparer les technologies de reproduction d'environnements sonores et leurs capacités à respecter une forme de validité

écologique, dans le contexte visé par ce projet, le Tableau 2 présente une comparaison des différentes technologies de spatialisation sonore.

2.1.4 **Spatialisation sonore et synthèse des champs sonores**

Le but de la spatialisation sonore est de recréer, par des moyens artificiels, l'impression spatiale liée à une perception sonore. Une première catégorie de technologies vise uniquement l'illusion spatiale, c.-à-d. que le seul critère de design et de validation est la perception résultante. Cette catégorie n'est pas très utile - elle sera donc évitée dans cette étude - puisque la validité physique est un critère de prédilection en ingénierie. La deuxième catégorie de technologies se fonde justement sur des méthodes physiques. Par exemple, la reproduction de champs acoustiques (incluant la WFS) vise la reproduction de la pression sonore instantanée sur une vaste zone de l'espace pour ainsi élargir la zone d'écoute. C'est ainsi que, dans ce dernier cas, les formes détaillées des fronts d'onde doivent aussi être reproduites dans la zone de reproduction. Cette reconstruction physique d'un champ acoustique doit, en principe, garantir une bonne perception puisque tout le corps de l'auditeur (incluant le buste, la tête et l'oreille externe) est baigné dans un champ sonore qui ressemble physiquement à celui à reproduire. Ainsi, les diffracteurs acoustiques autour de l'auditeur, responsables des indices spectraux, seront bien reproduites.

Quelques explications techniques plus détaillées sont nécessaires pour mettre en perspective la WFS¹⁰ par rapport aux techniques plus conventionnelles. Les méthodes de reproduction sonore de type WFS (Berkhout et coll. 1993; Ahrens, 2012; Spors et coll. 2013) se distinguent des techniques stéréophoniques, binaurales ou même Surround 5.1, par leur capacité à physiquement recréer un environnement sonore complexe avec sources virtuelles lointaines, à proximité et focalisées dans une vaste zone d'écoute où l'auditeur peut bouger corps et tête sans nuire à la localisation sonore (Blauert, 1999; Rumsey, 2001; Bharitkar et Kyriakakis, 2006; Breebaart et Faller, 2007); soit un avantage identifié par Begault (1999) et cité plus haut au sujet de l'écologie entre les sens dans un contexte de réalité virtuelle. En effet, dans le cas de la stéréophonie (2 ou 5,1 canaux), ce sont des illusions de sources virtuelles entre les haut-parleurs qui sont produites. Ces illusions auditives sont créées par le biais d'une imitation partielle des indicateurs binauraux de localisation sonore. Ce sont donc des approches de « simulation de la perception » qui ne garantissent en rien la correspondance physique entre le champ de pression sonore à reproduire et celui reproduit dans l'espace d'écoute. Les techniques de reproduction de champs acoustiques de type WFS ne souffrent pas de cette hypothèse fondatrice et recréent, littéralement, le champ de pression sonore dans la zone circonscrite par les haut-parleurs.

Cette possibilité propre à la WFS est importante dans le cas de la localisation des alarmes et autres avertisseurs en milieux bruyants (Vaillancourt et coll. 2012). Avec la WFS, il y a cohérence entre le mouvement de l'auditeur et ses perception et localisation sonores, ce qui n'est pas le cas pour la reproduction sonore sur système de son stéréophonique ou binaural sans système de poursuite de tête (*head tracking*). Qui plus est, puisque la WFS classique se fonde sur la construction d'environnements sonores par le biais de l'assemblage de sources virtuelles

¹⁰ Dans ce rapport, une distinction est faite entre la WFS et le système de WFS du GAUS. La WFS désigne simplement la *méthode de WFS*. Par contre, le (ou un) *système de WFS* désigne le *matériel* (haut-parleurs, amplificateurs, ordinateurs, etc.) qui constitue un système de reproduction spatiale du son qui se base sur la synthèse de champs sonores (sur la WFS).

simples (ondes sphériques provenant de derrière ou de devant les haut-parleurs pour imiter des sources sonores en avant plan, ondes planes provenant de très grandes distances pour imiter le bruit ambiant ou le champ sonore réverbéré), il est possible de faire varier la construction d'un environnement sonore virtuel afin de paramétrer rapidement des scènes pour tests d'écoute avec sujets humains. Par ailleurs, la WFS classique de sources virtuelles simples peut aussi être combinée à la reproduction de champs acoustiques mesurés pour encore plus de flexibilité.

La littérature récente abonde de contenu lié à la reproduction de champs acoustiques ou à la WFS, mais, à la connaissance des auteurs, ces travaux ne furent jamais utilisés dans un contexte lié à la santé et à la sécurité des travailleurs.

Les questions de recherche les plus récentes en matière de WFS concernent la compréhension théorique de certains phénomènes (artéfacts de reproduction, repliement spatial, sources focalisées, etc.; Ahrens, 2012, Spors et coll. 2013) et le développement de systèmes utiles en contexte audio ou musical. Par contre, peu de publications investissent les champs d'application potentiels de la WFS dans d'autres contextes et rapportent des expérimentations. En tenant compte du fait que ces autres champs d'application, comme celui touché par ce projet, apporteront de nouvelles questions de recherche, il est aisé d'admettre que des innovations peuvent en résulter. Cette étude s'inscrit dans cette voie et vise des retombées qui vont au-delà de la WFS ou de la reproduction de champs acoustiques en elle-même.

La section suivante donne plus de détails bibliographiques quant à la comparaison des différentes techniques de spatialisation sonore dans le cadre de la récréation d'environnements sonores pour des applications potentielles liées à la santé et à la sécurité des travailleurs.

2.1.4.1 Techniques de spatialisation sonore

Dans le contexte de la présente étude, il aurait été idéal d'avoir accès à des études passées qui comparent toutes les techniques populaires de spatialisation sonore (par exemple : WFS, ambisonie, stéréophonie avec plusieurs haut-parleurs, synthèse binaurale, reproduction binaurale avec poursuite de tête, avec et sans couplage visuel, etc.) sur la base d'évaluations physiques et perceptives afin de déterminer quelle technologie de reproduction est la plus adéquate ou la plus performante. Malheureusement, à l'heure actuelle, des études qui comparent toutes ces méthodes ne sont pas disponibles. Par contre, certaines études dignes d'intérêt existent (Nakayama et coll. 1971; Pulkki et Hirvonen, 2005), mais elles se concentrent, par exemple, sur une sous-catégorie de technologie. Par ailleurs, il aurait été impossible d'avoir pu déployer une étude aussi vaste dans le contexte de ce projet. De plus, il faut noter qu'il est difficile de statuer sur l'existence d'une technologie plus performante puisque cette notion de performance dépend autant du contexte d'application que de la technologie en elle-même. Cette section présente néanmoins une brève revue de la littérature dédiée à la comparaison des techniques de spatialisation sonore afin d'éclaircir le sujet.

D'un point de vue historique, c'est la stéréophonie avec deux canaux qui, de par son âge, a reçu le plus d'attention lors d'études perceptives variées (Moore, 1961; McCoy, 1961; Ceoen, 1972; Harvey et Schroeder, 1961; Sakamoto et coll. 1982). De ces études, il est généralement retenu qu'il est possible de créer des sources virtuelles entre les haut-parleurs, mais que la localisation

n'est adéquate qu'à la position d'écoute optimale. Il est aussi possible d'étendre, avec une certaine prudence, ces conclusions aux systèmes multicanaux.

En ce qui concerne la reproduction sonore spatialisée par reproduction ou synthèse binaurale, Begault et coll. (2001) proposent une comparaison perceptive de différentes améliorations à la technique binaurale de base. La reproduction (ou synthèse) binaurale se fonde sur deux hypothèses simples : 1) seuls les signaux aux tympans, qui sont notamment filtrés par la diffraction acoustique causée par la tête et l'oreille externe, déterminent la localisation sonore et 2) la connaissance des fonctions de transfert binaurales (HRTF) entre une position de source acoustique et les deux tympans permet la simulation artificielle de l'écoute binaurale naturelle. Typiquement, la reproduction binaurale est présentée sur casque d'écoute. Les améliorations considérées sont : 1) la poursuite de tête, 2) l'ajout de réverbération binaurale et 3) l'utilisation de HRTF individualisée. Pour les erreurs d'azimut et d'élévation, seul l'ajout de réverbération améliore les résultats. Pour les erreurs de localisation devant derrière, la solution avec poursuite de tête améliore les résultats.

En ce qui concerne la stéréophonie avec plusieurs haut-parleurs, les références les plus notables s'intéressent au nombre total de canaux ou à l'immersion et à la localisation des sources (Hiyama et coll. 2002; Soulodre et coll. 2003; Pulkki et Hirvonen, 2005). De ces études, il est généralement retenu que : 1) la sensation d'immersion peut être recréée avec 16 à 24 sources de reproduction; 2) il faut un minimum de cinq sources de reproduction pour créer une impression de champ diffus; et 3) il est possible de positionner des sources localisées entre les haut-parleurs, mais cette localisation est très sensible à la position de l'auditeur (il ne doit pas quitter la zone de reproduction centrale).

Une comparaison de certaines techniques de spatialisation sonore fut proposée par Jot et coll. (1999). Les techniques comparées incluent alors : 1) ambisonie et 2) mouvement horizontal par intensité (*Intensity-based panning*). Les techniques sont comparées sur la base de prédiction physique de la localisation auditive, de reconstruction des différences interaurales de temps et des fonctions de transfert binaurales (HRTF). Les auteurs montrent que chacune de ces techniques souffre de différentes erreurs de reproduction. Erreurs dont le type varie selon les techniques. Difficile donc de statuer de façon générale sur l'existence d'une technologie supérieure. D'emblée, les auteurs remarquent que chacune des méthodes considérées représente des compromis entre différents critères. Ainsi, les auteurs reconnaissent qu'il est difficile de déterminer quelle technologie est, dans l'absolu, la plus adéquate, puisque les critères d'évaluation peuvent varier. Les critères mentionnés sont : 1) la fidélité de la direction et du timbre reproduit; 2) la complexité technologique (notamment par l'entremise du nombre de canaux); et 3) la liberté de mouvement de l'auditeur. Selon les auteurs, et il est possible d'étendre ces recommandations au cas considéré par cette étude, le choix de la technologie dépend donc principalement de l'application visée.

Une récente revue de littérature complète de la spatialisation sonore avec haut-parleurs (WFS, ambisonie et stéréophonie à plusieurs canaux) aborde autant les volets physiques et perceptifs de ces technologies de spatialisation sonore (Spors et coll. 2013). Cette revue est notamment utilisée au Tableau 2. De cette revue de littérature, on retient, au sujet de la WFS et en relation avec le sujet de ce projet, ces quelques points distinctifs en termes de perception : 1) plus le réseau de

haut-parleurs est dense, meilleure sera la localisation d'une seule source et 2) avec un réseau de haut-parleurs suffisamment dense, la localisation de la source perçue dépend aussi de la position de l'auditeur (ce qui est cohérent avec des conditions d'écoute naturelle, et donc souhaitable).

Pour résumer les avantages, inconvénients, limitations et possibilités de chaque technologie selon des critères et nécessités propres aux études de perception auditive des indicateurs de danger en milieu de travail, le Tableau 2 présente les quatre technologies abordées dans cette revue de littérature : WFS, ambisonie, stéréophonie et reproduction binaurale. En considérant ce tableau résumé, l'intérêt de la WFS est plus facile à identifier, notamment par sa capacité à offrir une vaste zone d'écoute qui permet le mouvement de l'auditeur sans effondrement de la perception spatiale du son, et par sa capacité à laisser suffisamment de place pour l'inclusion de plusieurs sujets humains simultanément ou même d'un poste de travail.

Tableau 2 – Comparaison des technologies de reproduction spatiale du son selon différents critères ou nécessités propres à l'étude.

Technologies de reproduction spatiale du son				
Critère ou nécessité	WFS	Ambisonie	Stéréophonie (deux canaux ou plus)	Reproduction binaurale
Mouvement de l'auditeur (zone de reproduction étendue)	<p><u>Possible</u> : uniquement limité par la taille du réseau de haut-parleurs utilisé (par exemple 4 m par 4 m au GAUS).</p> <p><u>Avantage</u> : la localisation et la « perspective » seront bonnes puisque la WFS est une approche globale, qui n'est pas centrée sur l'auditeur.</p> <p><u>Limitation possible</u> : dans le cas de captation d'environnements sonores avec antenne de microphones, peut aussi dépendre de la taille de l'antenne.</p> <p><u>Limitation possible</u> : difficile à mettre en œuvre pour des réalisations tridimensionnelles, il faut faire un compromis dans ce cas.</p>	<p><u>Possible</u> : limité par l'ordre de la représentation ambisonique et par le contenu fréquentiel.</p> <p><u>Limitation possible</u> : habituellement, l'ordre reste souvent sous cinq, et la taille de la zone de reconstruction de champ est limitée, elle ne permet que très rarement un mouvement de plus de 10 ou 20 centimètres. En dehors, il peut y avoir de la coloration (Spors et coll. 2013).</p> <p><u>Désavantage</u> : l'approche est centrée sur l'auditeur supposé au centre du réseau de haut-parleurs.</p>	<p><u>Impossible</u> : les approches stéréophoniques à deux haut-parleurs ou plus ne disposent que d'une position d'écoute efficace fort limitée en taille (sauf pour les cas où les sources virtuelles sont localisées sur des positions de haut-parleurs). Pour y arriver, il faut grandement accroître le nombre de haut-parleurs et, indirectement, converger vers les techniques de reproduction de champs acoustiques comme l'ambisonie ou la WFS.</p>	<p><u>Impossible par défaut</u> : l'enregistrement binaural ou la synthèse binaurale sur casque d'écoute n'est pas adapté à cet usage et au changement de perspective en fonction du mouvement de l'auditeur dans l'espace.</p> <p><u>Possible</u> : mais impliquerait des modifications importantes à la technologie, par exemple : poursuite de la position de l'auditeur, fonctions de transfert qui dépendent de l'incidence, mais aussi de la distance, mesures binaurales en plusieurs points, interpolation des fonctions de transfert et des signaux, etc.</p> <p><u>Désavantage</u> : technologiquement difficile et contraignant.</p>

Technologies de reproduction spatiale du son				
Critère ou nécessité	WFS	Ambisonie	Stéréophonie (deux canaux ou plus)	Reproduction binaurale
Mouvement de la tête de l'auditeur	Possible : puisque le champ acoustique est reproduit dans une zone étendue, il peut y avoir translation et/ou rotation de la tête de l'auditeur.	Possible : puisque le champ acoustique est reproduit sur la base des harmoniques sphériques autour de la tête de l'auditeur, il peut y avoir rotation de la tête de l'auditeur.	Possible, mais limité : en principe possible, mais peu étudié ou quantifié en pratique.	<p>Impossible par défaut : l'enregistrement binaural ou la synthèse binaurale sur casque d'écoute n'est pas adapté à cet usage et au changement de perspective en fonction du mouvement de l'auditeur dans l'espace.</p> <p>Possible : avec algorithme et technologie de poursuite de tête pour la mesure en temps réel de l'angle de la tête de l'auditeur. L'utilisation de la poursuite de tête n'est pas garante de localisation parfaite, c.-à-d. sans erreur (du moins pour les cas documentés d'étude de localisation de la voix) (Begault et coll. 2001).</p>
Installation d'un poste de travail	<p>Possible : uniquement limité par la taille du réseau de haut-parleurs utilisés (par exemple 4 m par 4 m au GAUS).</p> <p>Avantage : puisque la WFS effectue une reproduction ou une synthèse globale de champ sonore dans la zone de reproduction, la diffraction et la réflexion acoustiques qui pourraient être causées par le poste de travail seront plus proches de la diffraction et de la réflexion qui seraient causées par ce même poste dans l'environnement réel imité.</p>	<p>Possible : pour l'ambisonie bidimensionnelle.</p> <p>Impossible : ou très difficile pour l'ambisonie tridimensionnelle classique puisque le réseau de haut-parleurs est une sphère. Il faudrait adapter l'ambisonie sphérique à une mise en œuvre avec un dôme et réviser la mise en œuvre du traitement du signal.</p> <p>Désavantage : technologiquement difficile et contraignant.</p>	Possible : en supposant que l'auditeur ne se déplace pas trop par rapport au poste de travail.	Possible : en supposant que l'auditeur ne se déplace pas trop par rapport au poste de travail.

Technologies de reproduction spatiale du son				
Critère ou nécessité	WFS	Ambisonie	Stéréophonie (deux canaux ou plus)	Reproduction binaurale
Création d'une sensation d'immersion	Possible : tant que le réseau de haut-parleurs entoure la zone d'écoute, il est possible de créer autant de sources virtuelles que nécessaire sur 360 degrés. Selon la littérature scientifique, de 16 à 24 ondes provenant de 360 degrés peuvent être suffisantes pour créer une sensation d'immersion (Hiyama et coll. 2002). En ajouter plus n'est pas nécessaire.	Possible : tant que le réseau de haut-parleurs entoure la zone d'écoute, il est possible de créer autant de sources virtuelles que nécessaire sur 360 degrés (ou sur 4π stéradians dans le cas de l'ambisonie tridimensionnelle). Selon la littérature scientifique, de 16 à 24 ondes distribuées sur 360 degrés peuvent être suffisantes pour créer une sensation d'immersion (Hiyama et coll. 2002).	Possible : pour des configurations avec plus de deux haut-parleurs et avec des signaux non cohérents. Ou avec des signaux forts et distribués spatialement pour les sons tardifs (Soulodre et coll. 2003). Selon la littérature scientifique sur le sujet, il faut un système avec au moins cinq haut-parleurs (par exemple <i>Surround 5.1</i>) (Hiyama et coll. 2002, Nakayama et coll. 1971). Aussi possible avec modifications technologiques majeures (Hamasaki et coll. 2004).	Possible : avec la reproduction binaurale, il est possible de créer autant de sources virtuelles que nécessaire sur 360 degrés. Selon la littérature scientifique, de 16 à 24 ondes étalées sur 360 degrés peuvent être suffisantes pour créer une sensation d'immersion complète (Hiyama et coll. 2002). Pour offrir une sensation d'immersion, les fonctions de transfert binaurales doivent inclure une réverbération (phénomène illustré pour de la voix humaine dans la littérature [Begault et coll. 2001]).

Technologies de reproduction spatiale du son				
Critère ou nécessité	WFS	Ambisonie	Stéréophonie (deux canaux ou plus)	Reproduction binaurale
Création de sources sonores localisées	<p>Possible : tant que le réseau de haut-parleurs entoure la zone d'écoute, il est possible de créer autant de sources virtuelles que nécessaire sur 360 degrés. Aussi, en fonction de la parcimonie du réseau de haut-parleurs : un réseau plus dense accroît la précision de la localisation de sources ponctuelles (Spors et coll. 2013). Il faut aussi une distance entre les haut-parleurs d'au plus 22 cm (Spors et coll. 2013) (ce qui est plus que le système de WFS du GAUS).</p> <p><u>Avantage</u> : seuls les haut-parleurs entre la source virtuelle et la zone d'écoute sont actifs, il y a donc un risque atténué d'erreur de localisation ou de confusion devant derrière (ce qui n'est plus toujours le cas, lorsque basé sur des mesures avec antennes de microphones).</p> <p><u>Limitation</u> : lorsque l'auditeur est trop proche du réseau de haut-parleurs, la source sonore perçue s'accroche sur le haut-parleur le plus proche (il faut typiquement rester à plus de 30 cm des haut-parleurs).</p>	<p>Possible en principe : tant que le réseau de haut-parleurs entoure la zone d'écoute, il est possible de créer autant de sources virtuelles que nécessaire sur 360 degrés. Ce qui est uniquement efficace en matière de perception pour des ordres plus élevés et pour des distributions uniformes de haut-parleurs (Pulkki et Hirvonen 2005, Bertet et coll. 2007).</p> <p><u>Désavantage</u> : même pour la création de sources sonores localisées, tous les haut-parleurs sont typiquement actifs en ambisonie. Ce qui (par observation pratique et par expérience) peut mener à une localisation un peu floue ou à effet de magnétisme (selon la position de l'auditeur, la source sonore perçue peut s'accrocher au haut-parleur le plus proche).</p>	<p>Possible en principe : sur la base de la stéréophonie d'intensité de décalage temporel (Pulkki et Hirvonen 2005).</p> <p><u>Limitation</u> : Par contre, l'image virtuelle localisée est dépendante de la position de l'auditeur (voir point plus haut).</p> <p><u>Limitation</u> : impossible de créer des sources à l'arrière dans le cas stéréophonique classique à deux voies (Spors et coll. 2013).</p>	<p>Possible : en utilisant les fonctions de transfert adéquates ou un enregistrement binaural.</p> <p><u>Limitation</u> : L'utilisation de fonctions de transfert individuelles peut donner une localisation précise (Moller et coll. 1996). Mais la nécessité d'utiliser des fonctions de transfert individuelles complexifie tout test perceptif avec plusieurs sujets humains.</p>

Technologies de reproduction spatiale du son				
Critère ou nécessité	WFS	Ambisonie	Stéréophonie (deux canaux ou plus)	Reproduction binaurale
Création de sources sonores à différentes distances	<p>Possible : dans le cas paramétrique, les sources virtuelles peuvent être derrière les haut-parleurs ou même devant les haut-parleurs pour créer des sources focalisées. Aussi possible de façon automatique pour les environnements mesurés.</p> <p><u>Avantage</u> : puisque la courbure du front d'onde est aussi reproduite par la WFS dans une zone étendue, l'auditeur peut tourner autour d'une partie de la source virtuelle.</p> <p><u>Limitation</u> : dans le cas de sources focalisées très proches du centre de la zone de reproduction, la zone de validité de reproduction est limitée (sa position et sa taille dépendent de la position de la source virtuelle et du réseau de haut-parleurs).</p>	<p>Possible : lorsque l'ambisonie se base sur la NFC-HOA (<i>Near-Field-Compensated Higher-Order Ambisonics</i>), ambisonie d'ordre élevée avec compensation de champ proche).</p>	<p><u>Difficile</u> : ne peut être effectué que de façon illusoire en jouant avec le niveau sonore global et la simulation de réflexions ou d'atténuation des hautes fréquences (simulation de l'amortissement atmosphérique avec la distance).</p>	<p><u>Difficile</u> : il faut avoir accès aux fonctions de transfert de la tête qui dépendent de la distance en plus de l'angle d'arrivée du son. Possible de le faire de façon illusoire comme pour le cas de la stéréophonie.</p>
Validité écologique (de l'environnement sonore)	<p><u>Avantage</u> : puisque la WFS est une technologie de reproduction de champs acoustique globale (c.-à-d. pour une zone étendue) l'auditeur en mouvement bénéficie d'une perspective sonore qui a toutes les chances d'être cohérente avec son mouvement en présence de plusieurs sources sonores (localisées, focalisées ou non, ou distribuées).</p>	<p><u>Avantage</u> : la reproduction de type ambisonie étant une méthode de reproduction de champs acoustiques fondée sur la représentation par fonctions harmoniques sphériques, les fronts d'onde peuvent être reproduits et combinés pour garantir une cohérence de perspective pour la zone efficace de reproduction (fonction de l'ordre et du contenu fréquentiel).</p> <p><u>Démontré</u> : illustrée par Guastavino et Katz (2004).</p>	<p><u>Difficile (ou incertain)</u> : puisque la stéréophonie se base sur la simulation des indicateurs de localisation de type IID et ITD (<i>Interaural Intensity Difference</i> - différence interaurale d'intensité, <i>Interaural Time Difference</i> - différence interaurale de temps), il est difficile de statuer sur la validité écologique d'un environnement sonore qui combinerait sources localisées et sources distribuées.</p> <p><u>Possible</u> : démontré possible avec plusieurs canaux dans le cas d'environnements sonores enregistrés (Guastavino et Katz 2004). Par contre, dans ce cas, démontré de façon holistique.</p>	<p><u>Possible</u> : en principe par accumulation de sources virtuelles. Pas de démonstration ou de vérifications issues de la littérature.</p>

Technologies de reproduction spatiale du son				
Critère ou nécessité	WFS	Ambisonie	Stéréophonie (deux canaux ou plus)	Reproduction binaurale
Notes ou spécificités d'importance pour le projet de recherche	<p><u>Avantage</u> : la forte densité des réseaux de haut-parleurs en WFS réduit l'effet de filtre en peigne (effet de coloration du timbre ou du spectre perçu) pour les auditeurs en mouvement (Spors et coll. 2013). Il fut montré que pour une séparation de 12.5 cm entre les haut-parleurs, l'effet de coloration est jugé négligeable (Spors et coll. 2013).</p>	<p><u>Limitation</u> : pour une seule source virtuelle, tous les haut-parleurs sont toujours actifs en ambisonie. Qui plus est, ils émettent tous en même temps des variantes du signal visé. Conséquemment, si l'auditeur n'est pas parfaitement au centre du réseau de haut-parleurs, il sera, dans un premier temps, exposé à un front d'onde qui ne provient pas de la direction (ne serait-ce qu'approximativement) de la direction de la source virtuelle. Par effet de précedence (Blauert, 1999), la source perçue correspondra au haut-parleur le plus proche.</p> <p><u>Limitation</u> : la plus faible densité des haut-parleurs (typiquement moindre que pour la WFS) est telle que l'effet de filtre en peigne (effet de coloration du timbre ou du spectre perçu) est accru (effet de coloration du timbre ou du spectre perçu) aux environs de la zone d'écoute. Cet effet est plus complexe que dans le cas de la stéréophonie (Spors et coll. 2013). Même si la localisation sonore peut être adéquate, cet effet de coloration altère significativement le timbre perçu.</p>	<p><u>Limitation</u> : la faible densité des haut-parleurs (typiquement moindre que pour la WFS et que pour l'ambisonie) est telle que l'effet de filtre en peigne (effet de coloration du timbre ou du spectre perçu) est accru pour les auditeurs en mouvement dans des salles d'écoute peu réfléchissantes (effet de coloration du timbre ou du spectre perçu). Même si la localisation sonore peut être adéquate, cet effet de coloration altère significativement le timbre perçu.</p>	<p><u>Difficulté</u> : peu pratique pour la réalisation de tests avec plusieurs participants qui doivent interagir ou communiquer.</p> <p><u>Limitation</u> : l'utilisation d'un casque d'écoute peut nuire au naturel de l'ergonomie de l'expérience.</p> <p><u>Limitation</u> : peu efficace pour certains auditeurs, effet de localisation intracrânienne (en l'absence de poursuite de tête) connu, risque de confusion avant arrière pour certains auditeurs (Begault et coll. 2001).</p> <p><u>Limitation</u> : le caractère individualisé des fonctions de transfert de la tête peut parfois réduire l'efficacité de l'effet si les fonctions de transfert ne sont pas individualisées (Moller et coll. 1996, Begault et coll. 2001).</p>

2.1.5 En bref, pour la localisation des alarmes

En résumé, cette revue bibliographique a établi que l'amélioration de l'environnement sonore en milieu de travail passe par des études perceptives. L'audibilité et la localisation de signaux utiles (conversation, alarmes) en milieu bruyant sont encore mal maîtrisées, de par la complexité des environnements sonores en cause et la difficulté de conduire des tests *in situ*. L'acoustique virtuelle, qui consiste à reproduire en laboratoire, dans des conditions contrôlées, des environnements sonores réels, est une solution qui permet de s'affranchir de tests *in situ* et de

contrôler facilement les paramètres de ces environnements sonores. Compte tenu qu'audibilité et localisation spatiale dépendent fortement des caractéristiques « spatiales » des environnements sonores en cause, les technologies de reproduction mises en œuvre doivent le mieux possible recréer le caractère spatial de ces environnements.

2.2 Objectif général

L'objectif de ce projet de recherche est l'évaluation physique de la capacité du système de reproduction sonore *Wave Field Synthesis* (WFS) (96 haut-parleurs, 4 caissons de grave) du GAUS (voir Figure 1) à reproduire des environnements sonores industriels mesurés *in situ*.

L'évaluation physique du système de WFS consiste à valider sa capacité à reproduire les niveaux sonores, le contenu fréquentiel et la distribution spatiale du champ acoustique. En effet, les environnements sonores industriels posent, par comparaison avec les scènes sonores musicales, des défis particuliers tels que des niveaux sonores élevés à recréer et des particularités des sources à reproduire, pouvant différer de simples ondes planes ou sphériques (comme celles retrouvées dans les mises en œuvre paramétriques classiques de la WFS).

2.3 Objectifs spécifiques

- Caractériser les capacités acoustiques du système WFS du GAUS.
- Caractériser et établir sommairement l'acoustique des environnements sonores visés par cette étude.
- Statuer sur la capacité du système WFS du GAUS à reproduire en laboratoire les caractéristiques acoustiques des environnements sonores visés.
- Capter (avec antenne de microphones) et caractériser deux environnements sonores industriels réels (un intérieur et un extérieur) pour reproduction ultérieure.
- Évaluer, par des mesures objectives, la reproduction de ces environnements sonores industriels, sur la base des techniques de WFS et déterminer si la cible de reproduction est atteinte.

3. MÉTHODOLOGIE

Cette section présente l'ensemble de la méthodologie déployée pour atteindre les objectifs mentionnés plus haut. Des problématiques et des découvertes très spécifiques qui sont survenues lors de la réalisation de la recherche sont aussi définies dans cette méthodologie. Chaque grande étape est décrite en détail dans la liste qui suit, en associant les objectifs spécifiques et les actions qui y sont rattachées.

1. Caractérisation acoustique de la plage d'efficacité (fréquences, niveau de pression sonore) du système *Wave Field Synthesis* (WFS) du GAUS.

Le but de cette étape était de connaître le niveau sonore maximal qui peut être reproduit avec le système WFS de Sonic Emotion™ (de type synthèse paramétrique comme défini plus haut). Aussi, cette étape permettait de déterminer les fréquences les plus basses et les plus hautes qui peuvent être reproduites. Les activités détaillées associées étaient :

- a. Mesure des fonctions de réponse en fréquence (haut-parleurs et caissons de grave). Ces mesures ont permis d'établir la bande de fréquences efficace des haut-parleurs et de quantifier la coloration des haut-parleurs.
- b. Mesure des niveaux de pression sonore maximaux pour : haut-parleurs individuels, synthèse d'une onde plane seule, d'une onde sphérique seule, de 8 et 16 ondes planes décorréliées. Avec ces mesures, il a été possible de fournir un gabarit des niveaux de pression sonore reproduits maximaux pour chacun de ces environnements virtuels.
- c. Calibration des caissons de grave par rapport aux haut-parleurs. Suivant les réponses en fréquence mesurées en 1.a, les sensibilités et gains des caissons de grave ont été ajustés pour garantir un juste équilibre des sons provenant des caissons de grave et des haut-parleurs.
- d. Détermination de la plage de fonctionnement du système (fréquences, niveau maximal) à partir des points précédents. Cette plage de fonctionnement est alors devenue un gabarit auquel pourra être confrontée toute caractérisation acoustique d'un environnement sonore à reproduire dans le futur.

2. Caractérisation générique des deux environnements sonores industriels visés.

Le but de cette étape était de collecter des informations préliminaires sur les deux environnements sonores industriels visés par cette étude. Deux types d'environnement étaient ciblés : un environnement intérieur de type usine, avec postes de travail multiples et présence de réverbération, et un environnement extérieur ou ouvert, avec sources multiples en avant-plan ou en arrière-plan. Les activités réalisées dans cette étape étaient :

- a. Mesures préliminaires *in situ*. Cette brève activité expérimentale a consisté en des mesures préliminaires avec un microphone binaural et de l'équipement portable. Le but était de déterminer les niveaux sonores et les spectres sonores typiques de ces lieux en vue de les comparer avec le gabarit décrit en 1.d.
- b. Conclusion sur la capacité de la WFS de reproduire les types d'environnements sonores visés en comparant les résultats de l'étape 1 (gabarit défini en 1.d) avec les mesures préliminaires de l'étape 2.

3. Caractérisation et captations sonores de deux environnements sonores industriels visés.

- a. Conception de la configuration géométrique de l'antenne de microphones spécialement adaptée à la problématique de la captation sonore en vue de sa reproduction par WFS.
- b. Mesures *in situ* avec antenne microphonique pour capter le bruit ambiant et les sources sonores en avant-plan. Cette activité a été réalisée dans les deux lieux de travail visés au point 2. L'antenne de 96 microphones du GAUS a été utilisée à cette fin¹¹. Elle a été déployée dans l'espace afin de collecter, pour post-traitement ultérieur, des informations de phases et de temps d'arrivée des différents sons pour une reproduction spatialisée ultérieure.
- c. Mesures *in situ* avec microphones de proximité pour :
 - i. Capturer les sources sonores individuelles (véhicules, machinerie, etc.);
 - ii. Potentiellement faciliter la séparation ultérieure des signaux sources et des bruits ambiants pour recréer les sources virtuelles de la WFS à partir des mesures avec l'antenne de microphones.
- d. Post-traitement des mesures d'antenne pour extraire et caractériser le champ sonore constituant le bruit ambiant par formation de voie¹².

4. Reproduction par WFS des deux environnements sonores mesurés.

Le but de cette étape était de transformer les captations de l'antenne de microphones en commandes pour piloter les haut-parleurs dans la salle WFS du GAUS :

- a. Création de deux scènes virtuelles avec signaux captés et séparés reproduisant les deux environnements de travail captés. Différents algorithmes ont été utilisés et comparés à cette fin : problème inverse avec sources de reproduction sphériques, problème inverse avec sources de reproduction planes et WFS d'ondes planes, puis, finalement, utilisation de l'algorithme du « lasso » pour obtenir la solution des problèmes inverses mentionnés. Fait important à noter : cette partie se fait uniquement avec les algorithmes et outils informatiques développés par le GAUS (c.-à-d. sans la suite logicielle de WFS de Sonic Emotion™) pour la reproduction non paramétrique (comme définie à la sous-section 2.1.2.1).
- b. Création de variations paramétriques à partir de la scène reproduite à l'étape précédente. Une fois que les deux environnements sonores industriels étaient reproduits fidèlement, il était possible d'effectuer des modifications paramétriques de la scène. Par exemple : retrait ou amplification du bruit ambiant créé par les sources

¹¹ Dans la méthodologie initiale, il était prévu que l'antenne B&K de 196 microphones du GAUS soit utilisée pour ces mesures. Par contre, à la suite des enregistrements en laboratoire dans des conditions peu bruyantes, et après l'écoute directe de ces mêmes enregistrements, il fut constaté que malgré les spécifications techniques remarquables de cet équipement, il ne pouvait être utilisé en contexte audio étant donné l'audibilité d'un bruit de fond non négligeable. En effet, lors d'écoute informelle pendant la vérification de cet équipement, un niveau sonore perçu de bruit de fond comparable à celui de la voix humaine en condition normale fut clairement audible. Ainsi, l'équipement audio du GAUS fut plutôt utilisé pour éviter cette problématique.

¹² Les algorithmes de formation de voie permettent, à partir d'une mesure avec antenne de microphone, de visualiser la provenance des sons et de localiser des sources dans l'espace.

d'arrière-plan ou par la réverbération, déplacement des sources virtuelles d'avant-plan. De telles modifications ont été effectuées pour illustrer la capacité du système à reproduire fidèlement, certes, mais aussi à effectuer des altérations virtuelles pour simuler d'autres situations basées sur les mêmes enregistrements avec antenne de microphones. Fait à noter : cette partie se fait avec les algorithmes et logiciels de WFS de Sonic Emotion™ pour la reproduction paramétrique (comme définie à la sous-section 2.1.2.1).

- c. Investigation d'autres méthodes de reproduction de champs acoustiques pour accroître la qualité spatiale de l'environnement sonore reproduit. Les méthodes et algorithmes développés et adaptés pour répondre à ce défi sont : le « lasso » (*least-absolute shrinkage and selection operator*), l'*elastic-net* et les approches par problèmes inverses. Ces méthodes ont été analysées par des simulations théoriques afin de déterminer laquelle était la plus prometteuse à des fins de mesures lors de l'évaluation objective (étape 5). Cette partie se fait uniquement avec les algorithmes et outils informatiques développés par le GAUS (c.-à-d. sans la suite logicielle de WFS de Sonic Emotion™) pour la reproduction non paramétrique (comme définie à la sous-section 2.1.2.1).

5. Évaluation objective (en termes de fidélité) des environnements sonores reproduits par WFS.

Le but de cette étape était de mesurer, dans la salle de WFS, les champs sonores reproduits avec la même antenne de microphones que celle utilisée à l'étape 3. La mesure des champs sonores cibles a été comparée à celle des champs sonores reproduits afin de statuer sur la capacité du système à reproduire fidèlement, au sens physique, les deux environnements sonores originaux. Les activités détaillées suivantes ont été effectuées :

- a. Comparaison des niveaux et du contenu fréquentiel des champs sonores cibles et reproduits :
 - i. Mesures et comparaisons de la densité spectrale, spectre par tiers d'octave et par octave, bruyance (à l'aide d'une librairie [externe et libre] de sonie et de sonie spécifique), fréquence minimale et fréquence maximale et niveaux de pression en dB. Avec ces mesures et comparaisons, il a été possible de déterminer si le système proposé de reproduction d'environnements sonores reproduisait bel et bien le son visé en termes de métriques usuelles en acoustique (niveaux, spectre, etc.). Par ailleurs, ces comparaisons ne permettant pas de quantifier la fidélité spatiale de la reproduction, une deuxième étape d'évaluation objective a été introduite (5.b.ii).
- b. Évaluation de la mise en espace des deux environnements sonores reproduits :
 - i. Mesures des champs reproduits par antenne microphonique dans le plan horizontal au centre de la zone d'écoute. De ces mesures, des données brutes des deux champs sonores reproduits ont été captées pour post-traitement (étape suivante).
 - ii. Comparaison entre le cas cible et le cas reproduit dans la zone d'écoute. Lors de cette activité, les enregistrements de champs sonores reproduits (étape 5.b.i) ont été traités par un algorithme d'imagerie acoustique.

Cet algorithme a permis la visualisation de la provenance des sons et des bruits en fonction de la direction d'arrivée et des fréquences (« cartes acoustiques »). Les cartes acoustiques reproduites ont été comparées avec les cartes acoustiques des environnements sonores originaux. Si les deux cartes correspondaient bien, il était alors possible de conclure que la distribution spatiale de l'environnement sonore reproduit était fidèle à la distribution spatiale de l'environnement sonore original.

6. Création de démos pratiques des modifications paramétriques de l'environnement sonore : variations du bruit ambiant uniquement, changement des positions des sources en avant-plan, ajout d'une alarme virtuelle, etc.

Ces démonstrations sont pertinentes pour vulgariser et valoriser les résultats de ce projet de recherche. En effet, il n'est pas toujours simple de transmettre des idées et notions liées au son, ou aux environnements sonores, par des moyens classiques comme des figures ou même des écrits. Afin d'illustrer l'intérêt et la qualité de la reproduction sonore des environnements sonores industriels reproduits, différents scénarios virtuels ont été réalisés. Ils ont été créés en combinant des fichiers audionumériques monophoniques qui alimenteront des sources virtuelles en WFS et des configurations virtuelles (positions des sources d'avant-plan, d'arrière-plan) en WFS. Ces démonstrations pratiques pourront ainsi être exposées lors des visites au GAUS ou lors de futurs échanges avec l'IRSST et ses chercheurs.

3.1 Schéma bloc du traitement représentant le projet de recherche

L'ensemble des étapes décrites plus haut peut être synthétisé sous la forme d'un schéma bloc qui représente le traitement du signal multicanal nécessaire (Figure 3). Le champ sonore cible (à reproduire) est capté par une antenne de microphones. Les signaux bruts sont par la suite traités en trois étapes : 1) traitement des données pour extraire les caractéristiques du champ sonore cible, 2) conversion des signaux microphoniques en commande WFS par le biais d'une matrice de conversion, 3) conversion des signaux WFS en commandes de haut-parleurs. Lors de la reproduction du champ sonore cible, les commandes haut-parleurs sont envoyées aux transducteurs et le champ sonore recréé dans la salle est mesuré avec la même antenne de microphones que celle utilisée pour la captation du champ sonore cible. Le champ sonore reproduit est par la suite traité pour extraire ses caractéristiques en vue de la comparaison finale qui quantifie le succès de la méthode proposée. Ce sont les caractéristiques en fréquence et spatiales qui seront comparées.

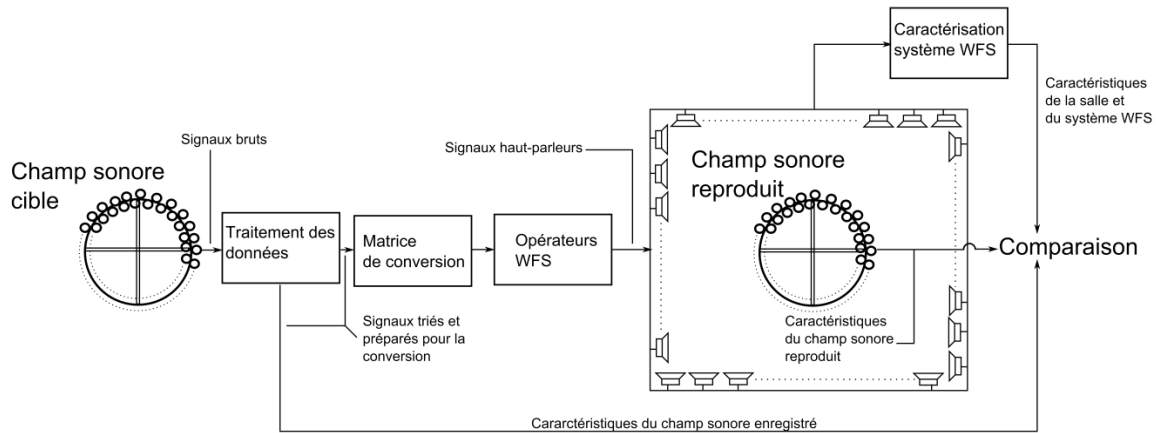


Figure 3 – Schéma bloc représentant les étapes de traitement du signal.

3.2 Description du système de *Wave Field Synthesis* du GAUS

Cette section vise à clarifier les parties matérielles et logicielles du système WFS du GAUS. La partie matérielle du système est constituée de 96 haut-parleurs, de 4 caissons de grave, d'un ordinateur principal, de quatre ordinateurs *Wave III* de Sonic Emotion™, cartes sons MADI¹³ de RME-Audio™, convertisseurs MADI/ADAT¹⁴ de RME-Audio™, baie de brassage numérique de Friendchip™ et 96 amplificateurs pour les haut-parleurs. L'ensemble des connexions est numérique par l'intermédiaire d'ADAT et la baie de brassage permet des changements de branchement rapides sans effort. Cette dernière possibilité introduit deux modes de fonctionnement du système du GAUS qu'il faut absolument distinguer : 1) le mode WFS classique et paramétrique par l'entremise des logiciels de Sonic Emotion™¹⁵ et 2) le mode direct qui permet un total contrôle des signaux envoyés à chacun des haut-parleurs par l'intermédiaire de MATLAB™ (ou d'autres logiciels). Le premier mode est utilisé, dans le cadre de cette étude : 1) pour caractériser la plage d'efficacité du système (section 4.1), 2) pour la création de démonstrations avec reproduction paramétrique (section 4.6) et 3) pour, par exemple, ajouter dans le futur des sources virtuelles en mouvement de façon paramétrique sur un arrière-plan non paramétrique. Le deuxième mode est, pour ce projet de recherche, utilisé pour développer tous les outils de WFS et de traitement du signal d'antennes de microphones nécessaires. Ainsi, les simulations et les résultats expérimentaux présentés aux sections 4.4 et 4.5 utilisent ce mode et les fonctions MATLAB™ développées pour ce projet.

¹³ MADI : *Multichannel Audio Digital Interface*, jusqu'à 64 canaux d'entrées et de sorties par câble.

¹⁴ ADAT : *Alesis Digital Audio Tape*, désigne maintenant la connectique par fibre optique (8 canaux par fibre).

¹⁵ Ce mode ne permet pas d'autres utilisations que la WFS classique d'ondes sphériques ou d'ondes planes. Il n'inclut pas de traitement qui permet, par exemple, la conversion de captations par antenne de microphones en commande WFS.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette section présente d'abord les résultats qui découlent de chacune des six étapes de la méthodologie. En particulier, certains points plus épineux, qui ont ouvert des questions de recherche très spécifiques, sont abordés et discutés.

4.1 Caractérisation acoustique de la plage d'efficacité du système de *Wave Field Synthesis* du GAUS

Avant d'entreprendre toute tentative de reproduction d'environnements sonores captés par une antenne microphonique, il est utile d'établir un gabarit de fonctionnement et de plage d'efficacité du système WFS du GAUS lorsqu'il est utilisé en mode paramétrique avec la WFS paramétrique de Sonic Emotion™. Le gabarit doit présenter quatre frontières : 1) fréquence minimale reproduite, 2) fréquence maximale reproduite, 3) niveau de pression sonore maximal reproduit (à la limite de la saturation du système) et 4) niveau de pression sonore minimal (déterminé par le niveau de bruit de fond de la salle).

La salle WFS est composée de 96 haut-parleurs disposés dans un carré de 4 m de côté. Les haut-parleurs sont également à une hauteur de 1,22 m du sol. Les quatre caissons de grave sont situés sur le sol et positionnés dans les coins de la salle. Dans cette salle, des rideaux sont présents autour des haut-parleurs et des caissons de grave. Une vue d'ensemble de la salle est montrée à la Figure 1.

Au moment de sa construction en 2012, plusieurs constituants de la salle WFS furent conçus pour accroître l'expérience d'écoute, dont :

- Isolation acoustique accrue pour réduire le bruit de fond;
- Système de ventilation avec silencieux et possibilité d'interrompre la ventilation pour réduire le bruit de fond;
- Système d'éclairage au DEL silencieux pour réduire le bruit de fond;
- Passe-fils de différents types pour placer tous les équipements bruyants à l'extérieur de la salle pour à nouveau réduire le bruit de fond;
- Double-porte isolante pour atténuer l'intrusion du bruit issu des autres espaces de laboratoire;
- Disposition de rideaux acoustiques (Figure 1) qui entourent la zone d'écoute avec une plénitude (repliement des rideaux sur eux-mêmes) supérieure à 50 % (Ballou 2008) pour réduire la réverbération et les réflexions sans pour autant fournir des conditions sans écho (conditions souvent jugées trop extrêmes, voire inconfortables, pour la réalisation de tests d'écoute de courte ou de longue durée);
- Tuiles acoustiques suspendues en guise de plafond, tuiles derrière lesquelles de la laine acoustique est disposée pour atténuer une réverbération potentielle ou une résonance entre le plafond suspendu et le plafond du bâtiment;
- Tapis au sol pour réduire les réflexions acoustiques par le plancher.

4.1.1 Niveau de bruit de fond de la salle WFS du GAUS

La qualité de toute écoute audio peut se dégrader si la salle d'écoute est mal isolée des bruits extérieurs, et ce, même si des haut-parleurs de grande qualité sont utilisés. Des mesures ont été effectuées pour caractériser le niveau de bruit de fond de la salle d'écoute de WFS du GAUS par rapport aux courbes de critère de bruit (*NC-curve*) et pour ainsi définir le seuil bas des gabarits décrits plus haut. On peut trouver le critère de bruit en mesurant : 1) soit le niveau de pression sonore équivalent (L_{eq}) en dBA et en le comparant à un tableau (Ballou 2008), 2) soit le spectre de bruit de fond et en le comparant aux courbes seuils de critère de bruit trouvées dans la littérature (Ballou 2008). Les deux méthodes ont été utilisées pour les gabarits présentés. Le niveau a toujours été mesuré au centre du réseau de haut-parleurs, dans le même plan horizontal.

Le Tableau 3 présente l'évaluation du critère de bruit basée sur le L_{eq} mesuré en dBA avec le système de ventilation de la salle en marche ou pas. Sans ventilation, le meilleur niveau défini dans la littérature, soit NC-15, est aisément atteint. Avec la ventilation, le critère de bruit passe à NC-25. Dans les deux cas, de telles qualifications sont considérées comme excellentes dans le monde de l'audio. Par exemple, ces valeurs correspondraient à un excellent studio d'écoute. Ces mesures donnent donc le niveau inférieur du gabarit, soient respectivement 52,8 dB ou 56,3 dB selon l'absence ou la présence de la ventilation, respectivement.

Tableau 3 – Évaluation du critère de bruit pour la salle WFS du GAUS.

Situation	L_{eq} (dB)	L_{eq} (dBA)	Critère de bruit
Avec ventilation	56,3	34	NC-25 ($L_{eq} < 38$ dBA)
Sans ventilation	52,8	20,8	NC-15 ($L_{eq} < 28$ dBA)

4.1.2 Fonctions de réponse en fréquence des transducteurs

Les haut-parleurs et les caissons de grave, combinés à l'acoustique de la salle WFS colorent inévitablement le son reproduit par l'ensemble du système WFS. À partir des fonctions de réponse en fréquence (FRF), il est aussi possible d'établir les fréquences minimales et maximales qui peuvent être reproduites.

Les haut-parleurs sont des ELAC^{MD}301.2. Selon le fabricant, ils couvrent une gamme allant de 80 à 35 000 Hz avec une sensibilité de 86 dB/2,83V à 1 m. Les caissons de grave sont des Velodyne^{MD}MiniVee et, toujours selon le fabricant, couvrent une gamme allant de 28 à 120 Hz.

La Figure 4 présente des FRF typiques mesurées pour les caissons de grave et pour les haut-parleurs. Ces FRF ont été mesurées par la méthode des sinus glissants avec croissance logarithmique de la fréquence et répétitions pour améliorer la qualité de la mesure. Le microphone de mesure était disposé dans le plan d'écoute (plan qui correspond à la hauteur des haut-parleurs), devant les transducteurs et à un mètre de ceux-ci avec un microphone de mesure calibré. Il faut tenir compte du fait que ces mesures incluent aussi la réponse acoustique de la salle, et non uniquement celle des transducteurs. Ainsi, différentes interférences constructives et destructives peuvent altérer les FRF (Figure 4). À la lueur de cette mesure, il est observé que les

haut-parleurs (et les amplificateurs qui les alimentent) ont plutôt une bande passante qui couvre 150 Hz à 24 kHz et que leur réponse n'est pas parfaitement plate dans cette bande. Le caisson de grave semble couvrir efficacement de 20 à 200 Hz. Une résonance est potentiellement existante aux environs de 63 Hz.

Lors de mesures effectuées avec ces caissons de grave dans le cadre d'un autre projet de recherche, il a été constaté que ceux-ci disposent d'un circuit de protection. Ainsi, le gain réel dépend du niveau de signal envoyé au caisson de grave et le système est donc non linéaire. Sans pour autant être non linéaire au sens où des distorsions seraient produites par une saturation, le système des caissons de grave est non linéaire plutôt comme si quelqu'un ajustait le volume selon l'amplitude du signal d'entrée de ces caissons. En ce sens, cette non-linéarité ne cause pas de problème pour la recherche ici rapportée. Il faut néanmoins être conscient de cette particularité.

Ces mesures de FRF qui différencient les haut-parleurs des caissons de grave sont aussi utilisées pour, justement, compenser le gain global des signaux envoyés aux caissons de grave et ainsi préserver l'équilibre entre les sons qui proviennent des haut-parleurs et ceux qui proviennent des caissons de grave.

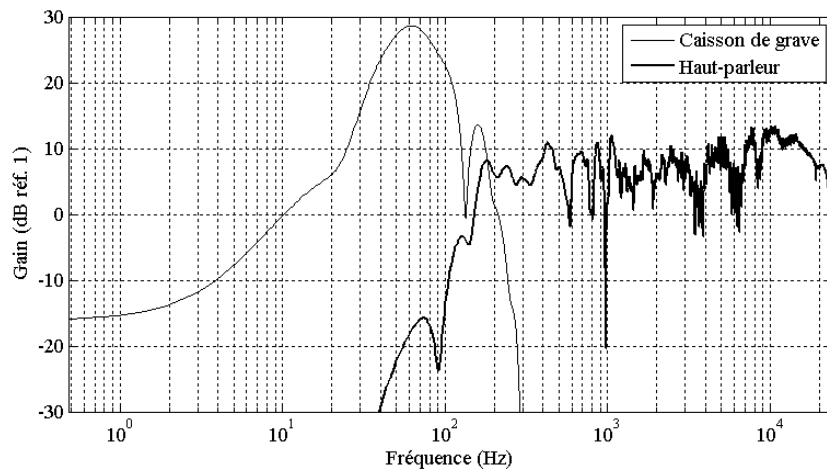


Figure 4 – Gain des fonctions de réponse en fréquence mesurées pour un caisson de grave et pour un haut-parleur. Le gain est exprimé en dB réf. 1, c'est-à-dire qu'un gain de 0 dB correspond à un gain linéaire unitaire.

4.1.3 Niveaux de pression sonore maximaux

La caractérisation des niveaux de pression acoustique maximaux a été effectuée pour différents cas de champ sonore reproduits par WFS paramétrique par l'intermédiaire des logiciels de Sonic Emotion™ : 1) une onde sphérique focalisée à 1 m du centre de la salle, 2) une onde sphérique non focalisée à 4 m du centre de la salle, 3) une onde plane seule, 4) huit ondes planes décorréelées et 5) 16 ondes planes décorréelées. En effet, avec la WFS, le nombre de haut-parleurs actifs pour reproduire une scène virtuelle varie selon le nombre et la position des sources virtuelles correspondantes. Conséquemment, la puissance acoustique varie aussi avec le nombre

et la position des sources virtuelles. C'est pour cette raison que les niveaux maximaux ont été mesurés pour plusieurs cas de sources virtuelles. Deux types de bruit ont été injectés pour ces mesures : rose et blanc. Le bruit blanc contient une énergie uniforme en fréquence. Le bruit rose est un bruit contenant la même quantité d'énergie par bande d'octaves. Cette situation est jugée plus représentative des milieux industriels.

Le Tableau 4 présente les niveaux de pression acoustique maximaux pouvant être reproduits par le système WFS et mesurés à l'aide d'un sonomètre B&K calibré pour toutes ces situations. Ces mesures ont été effectuées sur la même durée que l'injection des bruits rose et blanc, soit 10 secondes. Le microphone du sonomètre était disposé au centre du réseau de haut-parleurs.

Selon ces mesures, il est possible de conclure qu'un environnement sonore immersif (provenant de toutes les directions) de 102 dB pourrait être reproduit sans problème.

Tableau 4 – Niveaux de pression acoustique maximaux pour cinq cas de sources virtuelles.

Situation	L_{eq} bruit rose (dB)	L_{eq} bruit blanc (dB)
Onde focalisée à 1 m	91,4	90,8
Onde non focalisée à 4 m	90,7	91,0
Onde plane seule	92,1	93,1
8 ondes planes	99,7	98,4
16 ondes planes	101,9	100,2

4.1.4 Niveaux de pression en fonction de la distance des sources virtuelles

En théorie, et idéalement, une source ponctuelle virtuelle dans un champ libre virtuel devrait présenter une courbe de décroissance de la pression sonore en $1/r$ où r est la distance de la source virtuelle au point de mesure. Des mesures ont été effectuées pour vérifier si la mise en œuvre de la WFS par Sonic Emotion™ respecte cet aspect de la physique. Le logiciel de WFS permet d'imposer, ou non, cette décroissance spatiale du champ reproduit. Les deux modes ont été vérifiés. Les résultats de mesure sont montrés à la Figure 5, dans le cas où la mesure de pression sonore est effectuée au centre de la salle. À des fins de comparaison avec la théorie, des courbes de décroissance théoriques sont superposées aux mesures. Il est utile de rappeler que pour le système WFS du GAUS, une distance 'source virtuelle – point de mesure' inférieure à 2 m correspond à une source virtuelle *focalisée* (à l'intérieur de l'antenne de haut-parleurs) alors qu'une distance supérieure à 2 m correspond à une source virtuelle *non focalisée* (à l'extérieur de l'antenne de haut-parleurs).

On remarque à la Figure 5 que les niveaux de pression acoustique mesurés diminuent jusqu'à une distance d'environ 2 mètres pour ensuite augmenter. Cette distance correspond à la coïncidence de la source virtuelle avec l'antenne de haut-parleurs. De plus, la courbe expérimentale sans l'utilisation du facteur $1/r$ est relativement constante. La courbe expérimentale pour le mode avec le facteur $1/r$ suit une tendance relativement semblable à la courbe théorique pour des distances entre 4 et 16 mètres. Comme mentionné, la courbe théorique

employant le facteur $1/r$ est en accord satisfaisant avec la courbe expérimentale avec l'utilisation du facteur $1/r$. Ainsi, il est conclu que les courbes de décroissance physique théoriques sont uniquement respectées pour des sources virtuelles non focalisées. En pratique, le positionnement de sources virtuelles à l'extérieur de l'antenne de haut-parleurs ne pose pas de problème. Par ailleurs, le positionnement à l'intérieur de l'antenne de haut-parleurs nécessitera une attention particulière et manuelle. En fait, il faut garder à l'esprit que cette limitation du niveau pour les sources virtuelles près du réseau de haut-parleurs est introduite pour protéger les haut-parleurs. Par exemple, il serait fort difficile de reproduire une source virtuelle produisant 100 dB si sa position coïncidait avec celle d'un haut-parleur puisque seul ce haut-parleur devrait produire toute la puissance acoustique nécessaire pour atteindre un tel niveau.

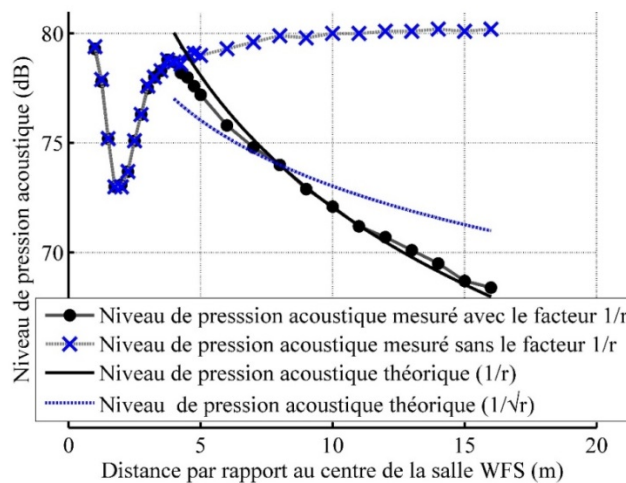


Figure 5 – Niveau de pression acoustique en fonction de la distance entre la source virtuelle et le point de mesure (pour les deux options disponibles dans le logiciel de WFS).

4.1.5 Plage d'efficacité du système de WFS de Sonic Emotion^{MD}

À partir des mesures rapportées aux sous-sections précédentes, il est possible de proposer des gabarits fréquentiels qui montrent la plage d'efficacité du système de WFS pour différents cas de sources virtuelles. Pour des fins de concision, seuls les cas mesurés avec du bruit rose (considéré comme plus représentatif des milieux industriels que le bruit blanc) sont présentés. Une fonction MATLAB^{MD} dédiée à la création de tels gabarits a été développée; il suffit de donner en entrée de la fonction les histoires temporelles de la pression acoustique en Pascal (typiquement au centre de la zone de reproduction).

Les cas présentés, pour lesquels les distances font référence au centre du réseau de haut-parleurs, sont les suivants :

1. Onde sphérique focalisée à un mètre (Figure 6);
2. Onde sphérique non focalisée à quatre mètres (Figure 7);
3. Onde plane (Figure 8);
4. Huit ondes planes décorréelées (Figure 9);
5. Seize ondes planes décorréelées (Figure 10).

Le gabarit pour une onde focalisée à un mètre, soit à proximité d'un auditeur au centre, est montré à la Figure 6. Sur ce type de figure, on trouve plusieurs courbes et lignes qui constituent le gabarit :

1. Des lignes verticales en trait épais, dans l'ordre, des basses vers les hautes fréquences : la fréquence basse des caissons de grave, la fréquence maximale des caissons de grave, la fréquence de croisement entre les basses et hautes fréquences des haut-parleurs à deux voix et la fréquence maximale des haut-parleurs (selon le fabricant).
2. Des lignes horizontales en trait épais, de haut en bas : le niveau de pression sonore global (en dB) maximal pouvant être reproduit au centre de l'antenne¹⁶, le niveau de pression sonore global (en dB) du bruit de fond mesuré avec ventilation active, le niveau de pression sonore global (en dB) du bruit de fond mesuré sans ventilation. Les niveaux associés sont aussi indiqués dans les gabarits.
3. La courbe de critère de bruit utilisée en audio (fin trait continu et noir). Seule la courbe NC respectée par le spectre du bruit de fond (avec et sans ventilation) est montrée.
4. Deux zones grises qui correspondent au gabarit détaillé : la zone en gris pâle correspond à la zone efficace pour laquelle un spectre mesuré pourra être reproduit, dans le cas où la ventilation de la salle fonctionne. La zone en gris foncé représente le contenu spectral supplémentaire qui pourrait être adéquatement reproduit en éliminant le bruit de la ventilation (cette situation correspond à une cible très silencieuse, ce qui est peu probable pour les types d'applications visées par cette étude).
5. Trois courbes de spectre (les contours des zones grises mentionnées au point 4.) de niveau de pression sonore calibré qui, de haut en bas, représentent : le spectre maximal mesuré avec la source virtuelle active, le bruit de fond avec la ventilation active et le bruit de fond sans ventilation.

L'utilisation de ces gabarits est simple. À partir d'une mesure préliminaire sur un site visé avec un ou deux (ou même plus) microphones, le spectre sonore calibré de l'environnement est calculé et superposé au gabarit pour vérifier si l'environnement sonore pourra être reproduit sur les plans de l'étalement fréquentiel et du niveau sonore.

Par contre, il est possible que le spectre mesuré sorte du gabarit dans certaines bandes de fréquences ou à certaines fréquences particulières (par exemple, émergence de tons purs de fort niveau), sans que ceci compromette sa reproductibilité par notre système. En effet, si le gabarit montre des marges importantes par rapport au spectre cible dans certaines bandes de fréquence, ces marges peuvent être exploitées pour générer les niveaux requis aux fréquences problématiques. Cet aspect est plus clairement illustré à la section 4.3.4.

¹⁶ Il est important de noter que ce niveau global, même s'il est représenté sur un graphique de type spectral, est bel et bien un niveau global qui correspond à l'aire sous la courbe d'un spectre.

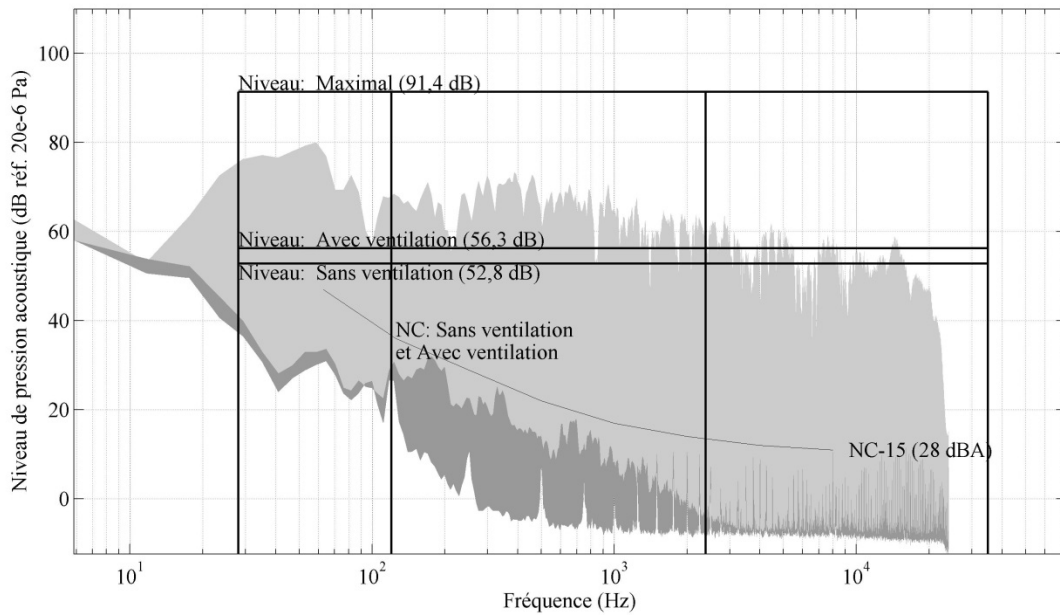


Figure 6 – Gabarit pour une onde sphérique focalisée à un mètre et pour du bruit rose.

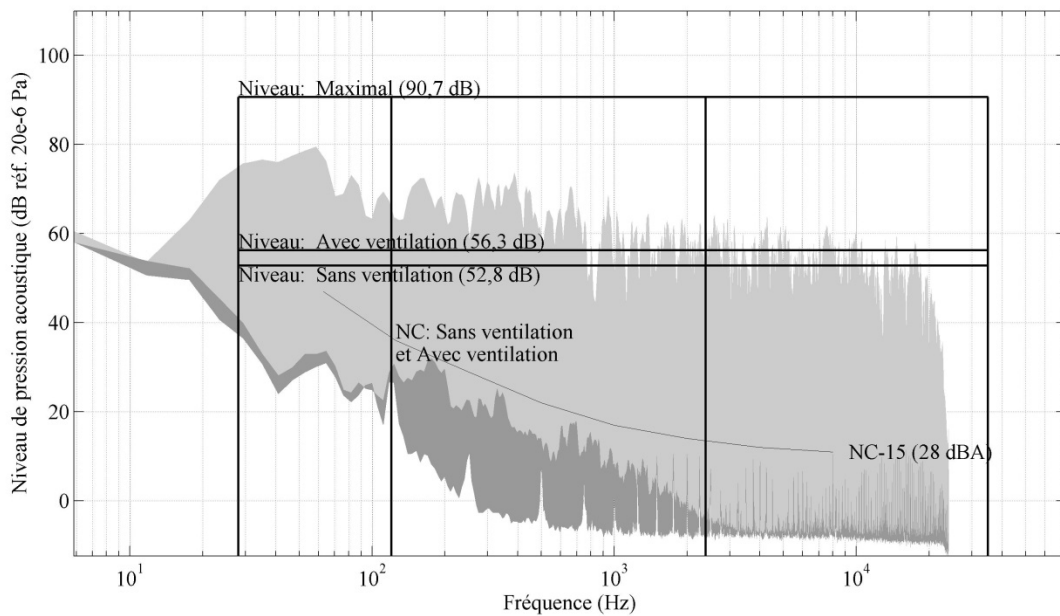


Figure 7 – Gabarit pour une onde sphérique non focalisée à quatre mètres et pour du bruit rose.

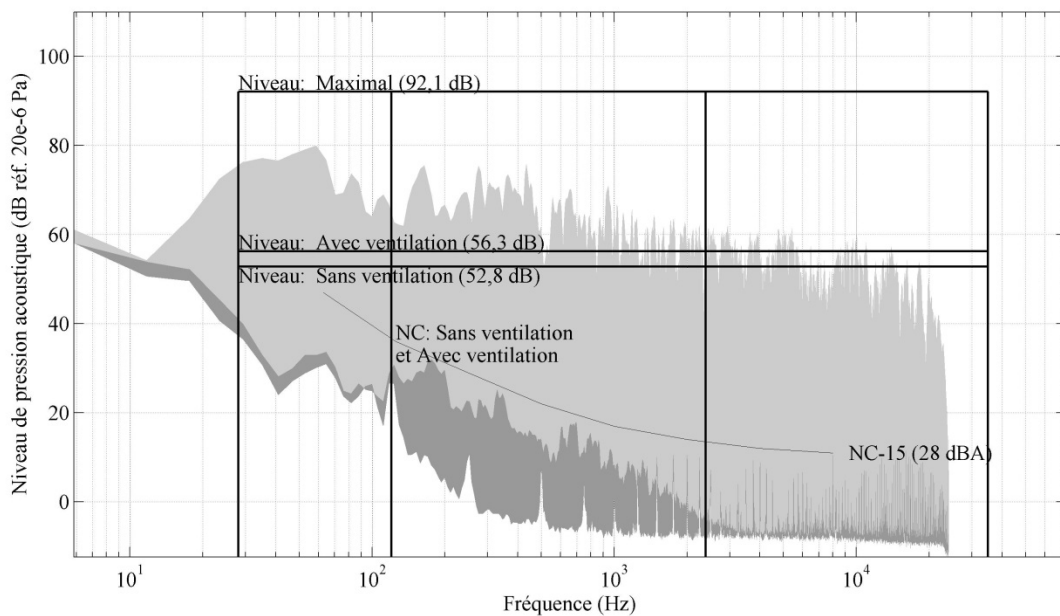


Figure 8 – Gabarit pour une onde plane et pour du bruit rose.

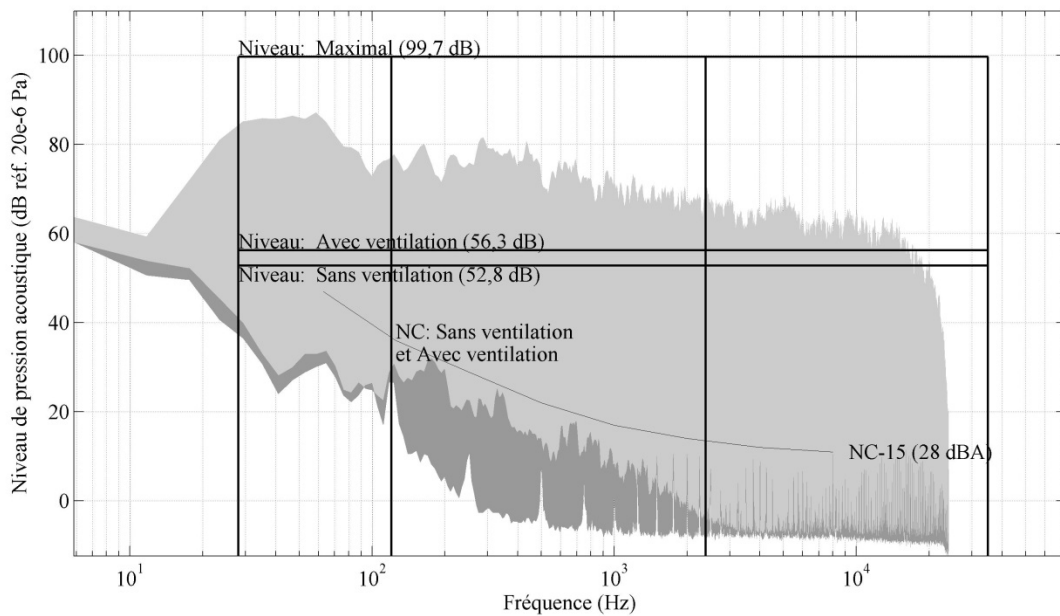


Figure 9 – Gabarit pour huit ondes planes décorréélées et pour du bruit rose.

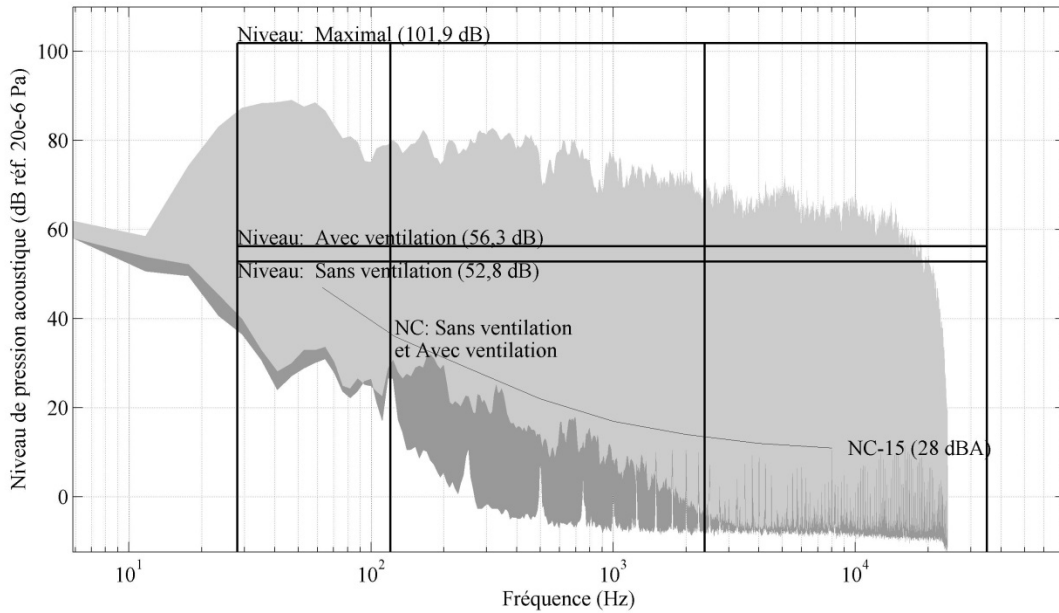


Figure 10 – Gabarit pour seize ondes planes décorréées et pour du bruit rose.

4.1.6 Résumé de la caractérisation de la salle de WFS du GAUS

Cette section a présenté les caractéristiques du système WFS du GAUS. Les caractéristiques des caissons de grave et celles des haut-parleurs, ainsi que les niveaux de pression maximaux pour cinq situations distinctes et les niveaux minimaux de pression acoustique qui déterminent le critère de bruit (NC) de la salle ont été établis. Les fonctions de réponse en fréquence ont également été mesurées pour les caissons de grave ainsi que pour les haut-parleurs afin de visualiser la coloration des transducteurs.

Enfin, les niveaux de pression sonore ainsi que les fonctions de réponse en fréquence obtenus au centre de l'antenne ont été déterminés pour une source virtuelle se situant à des distances variant de 1 m à 16 m. Ceux-ci ont permis de trouver le facteur de décroissance spatiale employé par le système WFS de Sonic Emotion^{MD} lorsque l'option de réduction du gain avec la distance est activée. Ce facteur correspond bien à 1/r (r étant la distance de la source virtuelle au point de mesure) pour les sources non focalisées à plus de 4 m environ. Par contre, les niveaux de pression acoustique ont permis de mettre en évidence une diminution considérable des niveaux reproduits lorsque la source virtuelle se situe près d'une des lignes de haut-parleurs et à l'intérieur de ceux-ci. Conséquemment, lors de l'utilisation du logiciel de Sonic EmotionTM, pour la reproduction de sources virtuelles, le niveau devra être ajusté tout en s'assurant de ne pas saturer les haut-parleurs.

4.2 Caractérisation générique des deux environnements sonores industriels visés

Cette section décrit et présente les mesures préliminaires qui ont été effectuées sur les deux sites industriels préalablement aux captations sonores avec antenne de microphones qui furent réalisées dans un deuxième temps.

Deux sites ont été visités : Graymont (Bedford, QC) qui est une carrière à ciel ouvert de calcaire et un site de production de chaux vive; Agrigratte (St-Jacques, QC) qui est un atelier intérieur de fabrication d'équipements de déneigement. Sur les deux sites, des véhicules motorisés en mouvement avec alarme de recul sont utilisés. Lors des visites préliminaires, l'identification des sites exacts de mesure potentielle et des mesures binaurales ont été réalisées.

4.2.1 Équipements

Pour les captations binaurales préliminaires, des microphones binauraux B&K et un enregistreur portable HeadAcoustics^{MD}SQuadriga ont été utilisés. Les microphones ont été calibrés sur place avec l'enregistreur portable. Tous les enregistrements ont été post-traités avec la suite ArtemiSTM de HeadAcoustics^{MD} et avec des fonctions MATLAB^{MD} développées pour ce projet.

4.2.2 Graymont

Le site de Graymont étant vaste et représentant plusieurs opportunités de captations sonores avec véhicules et machineries, les mesures binaurales ont eu lieu à plusieurs endroits. La Figure 11 montre plusieurs zones du site.



Figure 11 – Photographies de différents endroits sur le site de Graymont. De gauche à droite et de haut en bas : circulation de camions vers un point de chargement de la chaux vive; sous les fours; aux environs des convoyeurs; à un point de chargement de la chaux vive.

Les niveaux sonores moyens pour chacun de ces points sont présentés au Tableau 5. Le niveau le plus faible observé est 80,8 dB alors que le point de chargement était inactif; le niveau le plus fort observé est 96,0 dB à l'entrée du four. Ces deux valeurs sont inférieures au maximum de 99,7 dB mesuré en reproduction par WFS de huit ondes planes. Conséquemment, de ces mesures préliminaires, il est possible de conclure que les scènes sonores visitées sur le site de Graymont pourraient toutes être potentiellement reproduites. La richesse du site de Graymont étant impressionnante, il a été décidé que les captations des champs sonores cibles seraient effectuées sur deux jours avec un maximum de captations possibles pour le plus d'endroits possible.

Tableau 5 – Niveaux sonores globaux (dB) moyens mesurés en différents endroits chez Graymont.

Endroit	Niveau de pression (dB)
PLS (<i>Pulverized limestone</i>)	91,6
PLS côté chargement	90,7
Près d'un camion	90,9
Passage d'un camion	88,1
Entrée du four	96,0
Près de l'édifice d'opération, entre des ventilateurs	94,1
Près de l'édifice d'opération	92,2
Sous les fours (dehors)	95,2
Sous les fours (dehors) (deuxième série de mesures)	94,2
Point de chargement	80,8

Afin de valider plus précisément la possibilité de reproduction, des comparaisons de spectres mesurés avec un des gabarits WFS proposés plus haut sont présentées à la section 4.3.4.1 (Figure 28 à Figure 32), à partir des captations par antenne microphonique.

4.2.3 Agrigratte

Ce deuxième site est de nature différente : c'est un espace intérieur plus restreint. Il représente un espace réverbérant. La distribution des sources sonores fait en sorte que l'environnement sonore est plus dense, c.-à-d. que les sources sonores sont, à l'oreille, plus difficiles à localiser. En ce sens, ce second lieu visité incarne un excellent complément au premier. Les espaces potentiels pour installer tout le matériel d'antennerie étant plus restreints, les mesures binaurales préliminaires ont eu lieu en quelques points du site. Les niveaux sonores moyens pour chacun de ces points sont présentés au Tableau 6. Puisque les activités sont variées dans le temps, plusieurs prises ont été effectuées à chaque endroit. Le niveau le plus faible mesuré est 79,7 dB, tandis que le niveau le plus fort est 88,0 dB. Ces deux niveaux sont plus faibles que ceux mesurés chez Graymont puisque les activités et machineries chez Agrigratte sont de moindre envergure (soudure, découpe, etc.) lors de la visite. Ces deux valeurs sont inférieures à tous les niveaux maximums mesurés lors de la caractérisation de la WFS (voir Tableau 4). Conséquemment, de ces mesures préliminaires, il était possible de conclure que les scènes sonores visitées sur le site d'Agrigratte pouvaient toutes être potentiellement reproduites. Puisque le nombre de points de

captation potentiels était moindre chez Agrigratte que chez Graymont, il a été décidé d'effectuer les mesures avec antenne de microphones en deux endroits lors d'une seule journée de mesure.

Tableau 6 – Niveaux sonores globaux (dB) moyens mesurés à différents endroits chez Agrigratte.

Endroit	Niveau de pression (dB)
Grande pièce (prise 1)	85,6
Grande pièce (prise 2)	86,6
Grande pièce (prise 3)	79,7
Revêtement en poudre (prise 1)	87,0
Revêtement en poudre (prise 2)	88,0

Afin de valider plus précisément la possibilité de reproduction, des comparaisons de spectres mesurés avec un des gabarits WFS proposés plus haut sont présentées à la section 4.3.4.2 (Figure 33 et Figure 34), à partir des captations par antenne microphonique.

4.3 Caractérisation et captations sonores de deux environnements sonores industriels visés

La caractérisation et la captation des environnements sonores industriels représentent une des parties les plus exigeantes du projet puisque l'équipement de captation par antenne de microphones doit être apporté sur les sites et déplacé pour effectuer plusieurs mesures en différents endroits. Ce point étant critique, plusieurs étapes préparatoires ont été accomplies dont une partie des résultats associés est discutée dans cette section. Suivant ces considérations et préparations, une description complète des captations qui ont eu lieu est présentée à la section 4.3.3.

4.3.1 Conception de la géométrie de l'antenne

Pour toute reproduction spatiale d'enregistrements sonores effectués avec une antenne de microphones, la géométrie de l'antenne de microphones constitue un élément critique (en plus des algorithmes utilisés pour une antenne de haut-parleurs donnée), qui influence grandement la qualité spatiale de la restitution. Différents critères et certaines contraintes guident la conception de cette géométrie.

4.3.1.1 Restitution bidimensionnelle d'un espace tridimensionnel

Le système de WFS du GAUS est bidimensionnel et ne permet pas une réelle reproduction tridimensionnelle. Par ailleurs, il faut savoir qu'une reproduction tridimensionnelle complète avec WFS est prohibitive pour des raisons de coût et de complexité. En effet, le nombre de haut-parleurs devient très grand. Aussi, une configuration bidimensionnelle pour la WFS est très courante : très peu de systèmes 3D de WFS existent en pratique.

Donc, en tenant compte du fait que le système de WFS du GAUS est un système bidimensionnel, c.-à-d. que tous les haut-parleurs sont dans le plan horizontal d'écoute, la première question à résoudre est comment opérer le passage d'un espace réel tridimensionnel à un espace bidimensionnel. La conséquence sur la géométrie de l'antenne de microphones est simple et directe : elle doit être bidimensionnelle et dans le plan horizontal. Par contre, ce n'est pas parce que cette antenne est bidimensionnelle qu'elle n'est pas capable de distinguer des sons provenant de plusieurs angles d'élévation par rapport au plan horizontal. En effet, puisque tout le traitement du signal est typiquement effectué dans le domaine fréquentiel, pour une fréquence donnée, la longueur d'onde projetée dans le plan horizontal varie avec l'élévation de la source réelle. C'est précisément ce changement de longueur d'onde dans le plan, pour une fréquence donnée, qui permet l'utilisation d'une antenne bidimensionnelle dans le plan horizontal pour les applications visées par cette étude. Par contre, il faut garder à l'esprit que le système actuel du GAUS ne permet pas la recréation de sources sonores en dehors du plan horizontal. Celles-ci seraient remplacées par une source sonore dans le plan horizontal avec un azimuth similaire. Le pire cas est évidemment une source sonore qui serait directement au-dessus de l'antenne de microphones. Pour ce cas précis, la source sonore serait reproduite comme venant de toutes les directions du plan horizontal, ce qui reste la meilleure stratégie dans une telle situation.

4.3.1.2 Résolution angulaire

Le deuxième critère de conception découle de l'intérêt d'avoir une antenne de microphones qui offre une résolution angulaire (dans le plan horizontal) la plus uniforme possible. Pour cette raison, des antennes classiques comme l'ULA (*Uniform Linear Array*, antenne linéaire uniforme) ou l'URA (*Uniform Rectangular Array*, antenne rectangulaire uniforme) ne peuvent pas être utilisées puisque, par exemple, la taille des lobes obtenus par formation de voies varie avec la direction d'arrivée du son par rapport à l'antenne. Pour cette raison, ces deux géométries classiques ne sont pas retenues pour ce projet. La façon la plus simple de régler cette exigence trouve sa solution dans les géométries axisymétriques ou circulaires. Pour ce projet, c'est le deuxième type qui a été choisi. Par contre, ce type d'antenne circulaire peut être accompagné de certaines limitations. Celles-ci sont abordées et prises en compte à la section 4.3.1.4.

4.3.1.3 Limites des basses et hautes fréquences

Le troisième critère de conception de la géométrie est plutôt lié à la plage de fréquences pour laquelle une bonne résolution spatiale est attendue. En règle générale, plus la fréquence diminue, plus la longueur d'onde relative à l'antenne augmente et moins bonne est la résolution spatiale. La règle habituelle est que l'ouverture minimale de l'antenne (diamètre) corresponde à une demi-longueur d'onde de la fréquence la plus basse mesurée. D'un autre côté, plus la fréquence augmente, meilleure est la résolution jusqu'au point où du recouvrement spatial peut apparaître et ainsi dégrader la résolution spatiale en introduisant des lobes repliés. Ce phénomène de recouvrement est inévitable et est lié à la distance séparant deux microphones adjacents.

Toujours en prenant comme point de départ le système de WFS du GAUS, la bande passante de l'antenne microphonique peut être définie avec comme fréquence minimale la fréquence de transition entre les caissons de grave et les haut-parleurs et, comme fréquence maximale, la fréquence de repliement du système de WFS (Ahrens, 2012). En effet, il n'est pas très utile de chercher une grande résolution spatiale sous la fréquence de transition puisque quatre caissons de

grave sont utilisés à cet effet. À titre d'exemple, avec seulement quatre caissons de grave, il serait bien difficile de positionner une source à plus ou moins cinq degrés d'azimut. Ainsi, l'antenne de microphones devrait offrir une résolution spatiale acceptable de 150 Hz (fréquence de transition) à au moins 1040 Hz (fréquence pessimiste de repliement spatial de la WFS du GAUS¹⁷, correspondant à une demi-longueur d'onde sur la distance inter-haut-parleurs : 0,165 mètre). Ainsi, comme pour toute mise en œuvre de la WFS, des artéfacts de reproduction existeront au-delà de 1040 Hz. Ils correspondent au repliement spatial qui est inévitable avec des réseaux de sources discrets. Par contre, il faut noter que les artéfacts de repliement spatial s'ajoutent au champ sonore idéal qui, quant à lui, est bel et bien reproduit.

La longueur d'onde acoustique à 150 Hz est environ 2,3 mètres. L'ouverture de l'antenne pourrait donc être de l'ordre de 1 à 2 mètres (de l'ordre de la longueur d'onde ou de la demi-longueur d'onde). En tenant compte de la seconde contrainte, soit éviter le repliement spatial (au moins deux microphones par longueur d'onde), la distance intermicrophone doit être d'au plus 0,165 mètre et idéalement au plus 0,0825 mètre. Finalement, tenant compte du nombre de microphones disponibles (80 pour la partie circulaire), un compromis peut être établi :

- Diamètre de l'antenne : 1,25 m
- Nombre de microphones : 80
- Distance intermicrophone sur la circonférence : 4,91 cm

Même si, pour le même nombre de microphones, il avait été possible d'accroître le diamètre de l'antenne, le déploiement de celle-ci sur les sites d'accueil aurait été plus complexe et potentiellement plus dérangeant pour les compagnies visitées.

4.3.1.4 Autres limitations possibles

Une antenne de microphones circulaire uniforme présente typiquement deux défauts :

- Risque de confusion quant au champ acoustique au centre de l'antenne (qui correspondra au point d'écoute central dans la salle de reproduction, soit le point le plus utilisé).
- Absence d'information sur le gradient de pression radial le long du cercle formé par l'antenne, ce qui amène un risque de confusion entre les ondes convergentes et les ondes divergentes par rapport au centre de l'antenne.

Pour une antenne circulaire uniforme comme celle décrite à la section précédente, ces deux problèmes ont été observés lors de simulations théoriques effectuées lors de ce projet de recherche (non présentées dans ce rapport). Afin de pallier ces problèmes, deux solutions classiques ont été mises en place et vérifiées par le biais de simulations théoriques :

- Ajout de cinq microphones de référence disposés au cœur de l'antenne pour régler toute confusion quant au champ acoustique au centre de celle-ci.

¹⁷ La fréquence optimiste est plutôt de 2080 Hz, soit deux fois la fréquence pessimiste. La fréquence optimiste correspond au cas d'une onde perpendiculaire au réseau. En effet, la fréquence de repliement spatial dépend de l'angle entre l'onde plane et la ligne de sources de reproduction.

- Création d'un cercle double couche en alternant les microphones sur un cercle intérieur et sur un cercle extérieur. Cela offre une estimation du gradient radial de pression sonore. La distance radiale entre les deux cercles est de 5,08 cm (2 pouces).

La géométrie finale de l'antenne de microphones est montrée à la Figure 12.

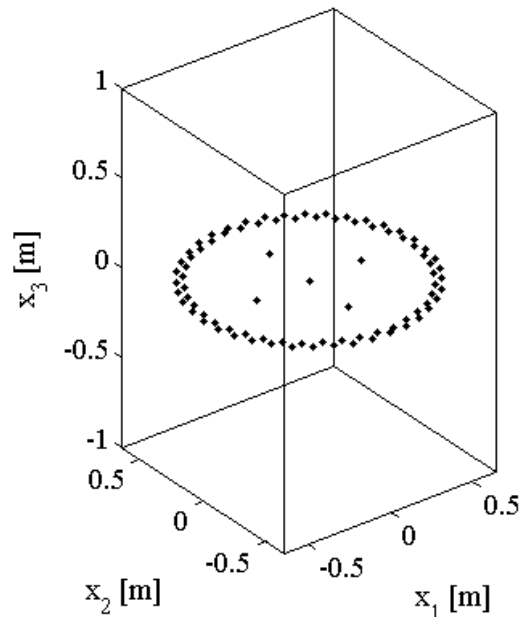


Figure 12 – Géométrie de l'antenne de 85 microphones : double couche circulaire avec cinq microphones de référence au centre de l'antenne.

4.3.1.5 Vérification de la capacité à reproduire un champ sonore cible

Avant de lancer la fabrication de l'antenne de microphones et d'initier les mesures *in situ*, des simulations théoriques de la captation et de la reproduction de champs acoustiques avec la géométrie proposée à la Figure 12 ont été effectuées afin de valider la géométrie dans un contexte de reproduction. Plusieurs cas ont été étudiés dont quelques-uns sont présentés dans ce rapport pour démontrer la validité de la géométrie. Les simulations correspondent aux étapes suivantes et sont toutes effectuées avec une fréquence d'échantillonnage audio typique, soit 48 kHz (ces étapes correspondent au schéma bloc de la Figure 3) :

- Captation d'une source virtuelle (onde plane ou sphérique) émettant une impulsion gaussienne (centrée à 440 Hz) par l'antenne de microphones.
- Conversion des signaux microphoniques en amplitude d'ondes planes (162 ondes planes sur un hémisphère) par solution inverse régularisée. Ces ondes planes sont celles qui reconstruisent au mieux les signaux captés par les microphones de l'antenne.
- Conversion des amplitudes d'ondes planes en signaux de commande des haut-parleurs par le biais des opérateurs de la WFS pour des ondes planes. Dans les simulations, la configuration des haut-parleurs correspond au système de WFS du GAUS.

- Calcul du champ de pression instantané (pour le scénario champ libre) dans la zone d'écoute de 4 m par 4 m.

La Figure 13 présente la reproduction d'une onde plane progressant dans le plan horizontal de l'espace de reproduction délimité par le réseau de haut-parleurs à quatre instants différents. La Figure 14 expose le même résultat pour une onde sphérique non focalisée à trois mètres du centre de l'espace de reproduction (c.-à-d. dont la position est derrière les haut-parleurs) et la Figure 15 montre aussi le même type de résultat pour une source focalisée à 1,75 mètre du centre de l'espace de reproduction (c.-à-d. située devant les haut-parleurs).

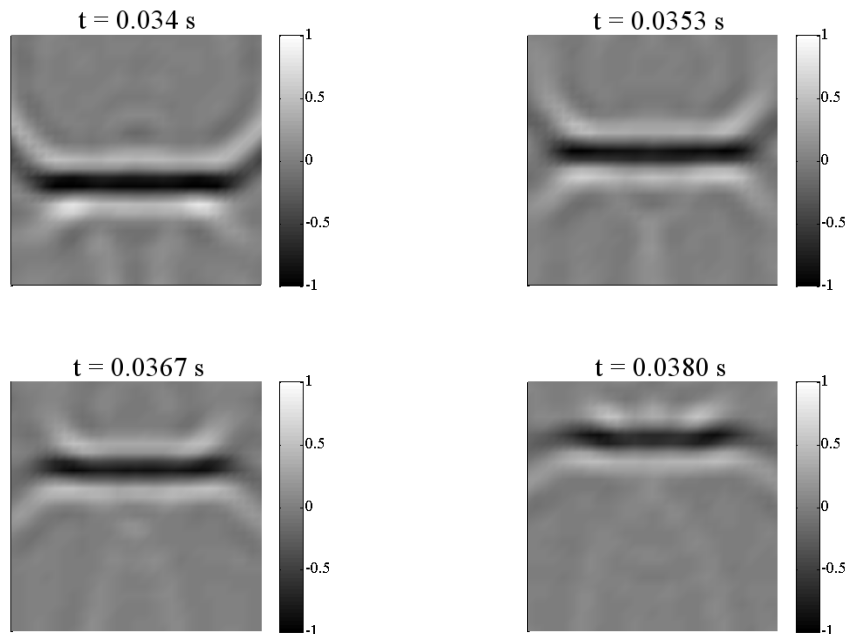


Figure 13 – Champ de pression sonore instantané (Pa) dans la zone d'écoute horizontale (4 m par 4 m) à différents instants pour la reproduction d'une onde plane.

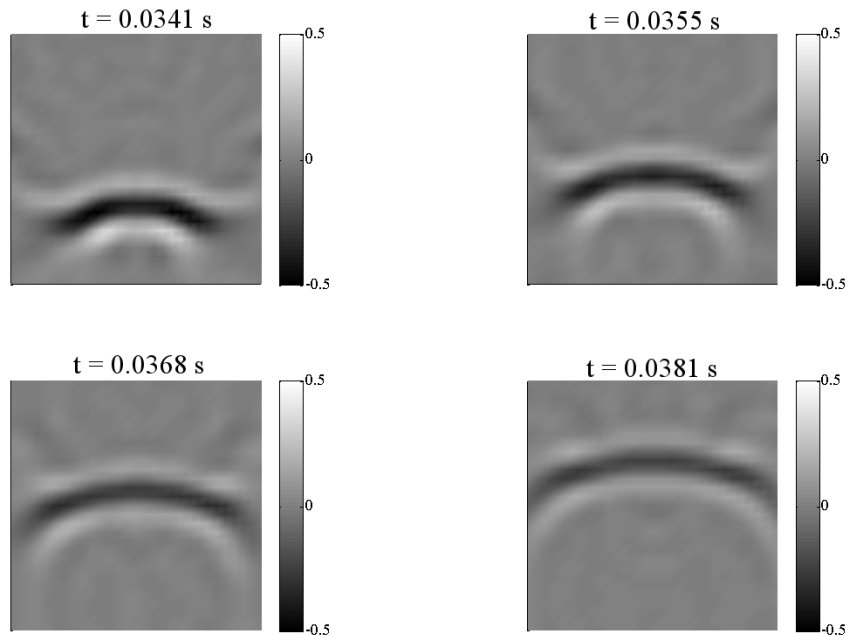


Figure 14 – Champ de pression sonore instantané (Pa) dans la zone d'écoute horizontale (4 m par 4 m) à différents instants pour la reproduction d'une onde sphérique non focalisée.

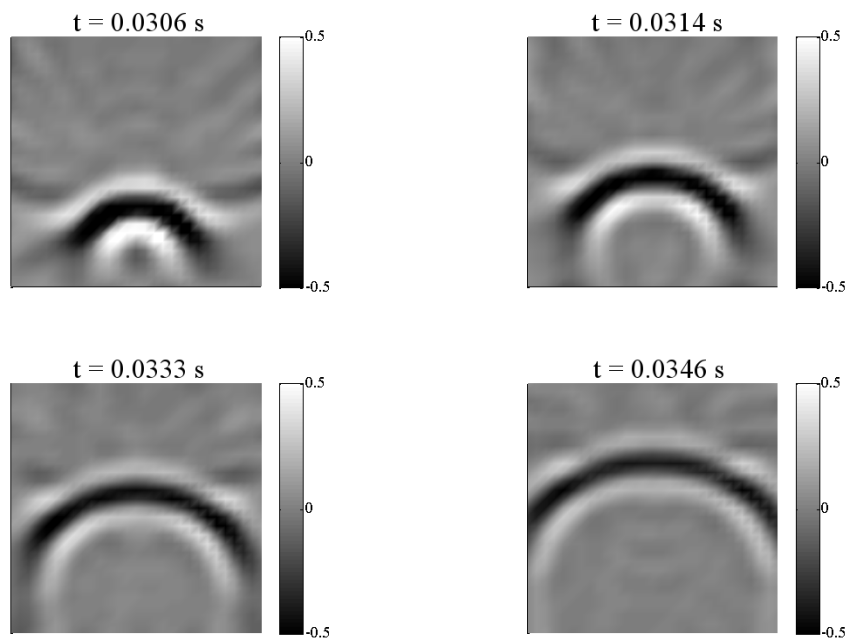


Figure 15 – Champ de pression sonore instantané (Pa) dans la zone d'écoute horizontale (4 m par 4 m) à différents instants pour la reproduction d'une onde sphérique focalisée.

De ces figures, il est possible de conclure sur les points suivants :

- Les directions de propagation sont bien celles attendues pour chaque cas.
- Les courbures des fronts d'onde, causées par la distance, sont bien de la forme attendue.
- Il n'y a pas d'artéfact excessif¹⁸ au centre de l'antenne de microphones.

Sur la base de ces observations, l'efficacité de la géométrie de l'antenne de microphones a été suffisamment illustrée pour permettre sa fabrication et celle de sa structure pour les mesures *in situ*.

Par contre, deux limitations ont été relevées :

- La zone efficace de reproduction ressemble à un disque qui ne couvre pas la totalité de la zone d'écoute carrée de 4 m par 4 m.
- Des artefacts existent en amont et en aval du passage du front d'onde principal (prééchos et postéchos potentiels) et sont plus flagrants en dehors de la zone de reconstruction du front d'onde. Par ailleurs, le lecteur doit noter que ces artefacts ne sont pas des artefacts de repliement spatial (Ahrens, 2012; Spors et coll. 2013).

Si le premier point est attendu et exige que l'auditeur ne soit pas trop près des haut-parleurs, le deuxième peut, quant à lui, devenir un facteur à surveiller. En effet, quoique possiblement fort peu problématique dans le cas d'environnements sonores stationnaires et bruyants puisque les artefacts sont potentiellement masqués par le contenu principal, cet étalement spatial pourrait néanmoins réduire la précision spatiale de la perception résultante. Aussi, il faut noter le fait que lors de la reproduction paramétrique d'un environnement sonore combinant environnement d'arrière-plan enregistré avec antenne et scénario virtuel avec alarmes en mouvement reproduites par WFS classique, par exemple, cet étalement spatial n'affecterait pas une source transitoire en mouvement comme une alarme de recul simulée.

Ce point critique mérite un peu plus d'explications puisqu'il est, dans le cadre de ce projet, la source d'une nouveauté (explorée à la section 4.4.1).

La Figure 16 présente les valeurs efficaces en dB réf. 1 des commandes de haut-parleurs pour chacun des trois cas de simulation présentés. Dans les trois cas, le maximum des commandes est observé pour les haut-parleurs dans la direction de la source virtuelle, ce qui est attendu. Par contre, la solution est distribuée et la différence entre le niveau correspondant au maximum et les autres niveaux va de 10 dB à 20 dB. Ceci représente une valeur assez faible et laisse sous-entendre que, malgré une reproduction de champs sonores qui serait physiquement valide (sur la base de métriques physiques), il est possible que la perception spatiale ne soit pas parfaite. Cet étalement des commandes sur tous les haut-parleurs est causé par l'approche par problème inverse régularisé qui, dans tous les cas de régularisation standard, distribue la solution sur toutes les sources de reproduction.

¹⁸ Un exemple de cette problématique serait une zone de silence au centre de l'antenne circulaire. Ceci est possible en l'absence de microphones de référence situés dans le cœur du cercle.

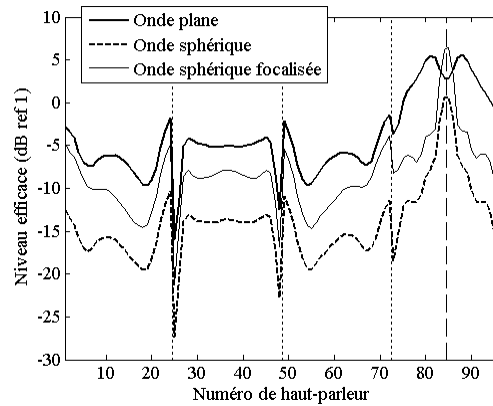


Figure 16 – Niveau efficace des commandes des 96 haut-parleurs pour les simulations présentées (Figure 13 à Figure 15). Les quatre segments du réseau de haut-parleurs sont séparés par les lignes pointillées. La source virtuelle est indiquée par les tirets verticaux.

Une autre façon de visualiser ce problème potentiel de la reproduction spatiale de l'environnement sonore visé est montrée à la Figure 17. Le champ sonore reproduit de la Figure 14 est montré cette fois-ci en dB réf. 1. On observe clairement des fronts d'ondes et autres artefacts en amont et en aval du front d'onde principal de l'ordre de -30 dB plus faible que le front d'onde principal. Si -30 dB peuvent paraître beaucoup, c'est peu comparativement à la plage dynamique de l'oreille humaine et il est possible que ces artefacts réduisent la précision spatiale de la reproduction. Cette problématique potentielle est spécialement investiguée à la section 4.4.1 et une solution potentielle en traitement du signal est présentée.

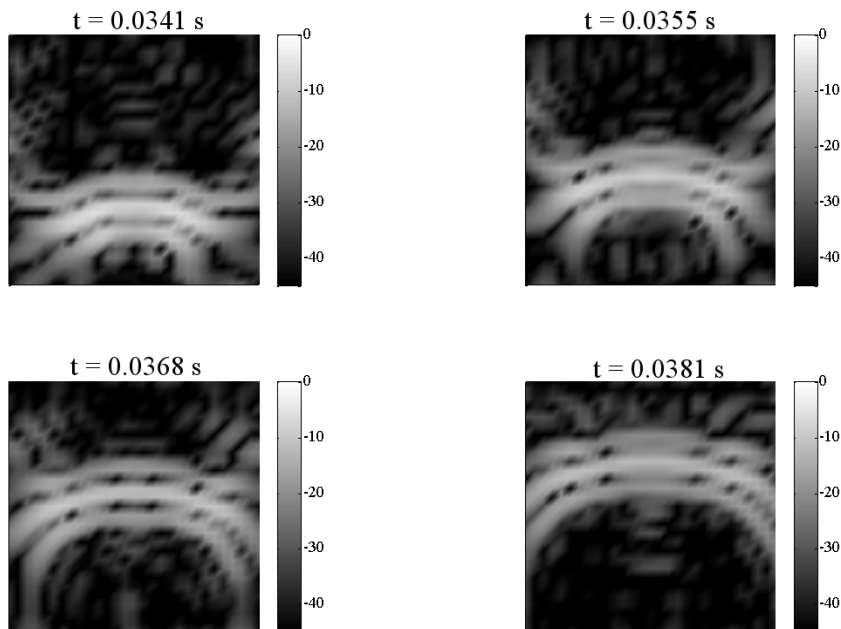


Figure 17 – Champ de pression sonore instantané (dB réf. 1) dans la zone d'écoute (4 m par 4 m) à différents instants pour la reproduction d'une onde sphérique non focalisée.

4.3.2 Méthode de captation et documentation

4.3.2.1 Installation des équipements

Lors de la préparation des captations *in situ* et suivant certaines observations découlant des simulations théoriques, dont une partie a été présentée à la section 4.3.1.5, il a été convenu de respecter la distribution des équipements telle que montrée à la Figure 18. L'antenne de microphones est supportée par un trépied. Toute source sonore doit être à au moins deux mètres de l'antenne de microphones pour éviter les problèmes mentionnés à la section 4.1.4 pour des sources sonores focalisées dans l'enceinte des haut-parleurs (4 m par 4 m). Les sources dites « en avant-plan » sont entre 2 et 10 mètres de l'antenne. Toutes les autres sources sont considérées « en arrière-plan ». Dans certains cas, des microphones de proximité ont aussi été utilisés. Sur les sites, les captations ont aussi été effectuées avec deux microphones sphériques, le Memsbedev^{MD} et le Eigenmike^{MD}.

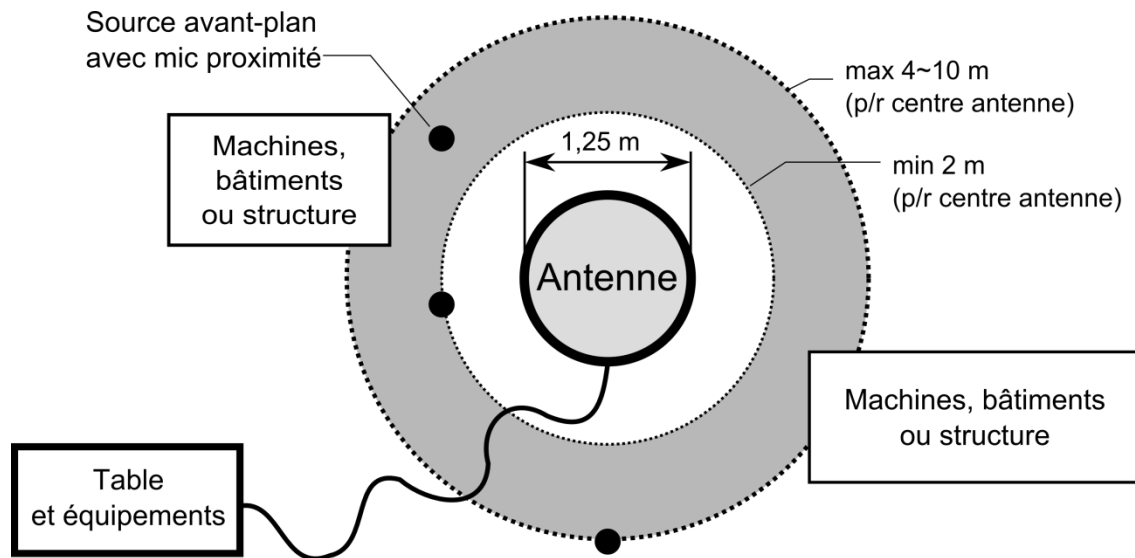


Figure 18 – Distribution des équipements et de l'antenne de microphones lors des mesures *in situ* par rapport aux équipements disponibles et aux sources sonores réelles sur le site (vue du haut).

Sur chacun des sites visités, 3 ou 4 personnes du GAUS étaient présentes pour les mesures, dont Philippe-Aubert Gauthier, Philippe Rousseau (étudiant stagiaire), Anthony Bolduc (étudiant à la maîtrise) et Pierre Lecomte (étudiant au doctorat). Cette présence de plusieurs personnes a facilité le travail de mesure tout en dégageant le temps nécessaire à la réalisation d'une documentation minutieuse des captations. Pour chaque endroit sur chaque site, une vue du haut schématisée de l'environnement a été dessinée sur place puis refaite en version informatique (voir ces schémas dans les annexes A et B de ce rapport). Pour chaque endroit, plusieurs photographies ont été prises, classées, puis annotées et répertoriées pour chacun des sites visités. Lors de l'enregistrement de véhicules en mouvement, des vidéos ont aussi été réalisées. Tous les enregistrements (heure, nom de fichier, notes) étaient catalogués sur place dans une grille de note spécialement conçue à cet effet qui a été retranscrite de façon informatique pour archive et

référence ultérieure. Avant chaque captation prolongée, une calibration des microphones était effectuée. Tous les enregistrements ont été réalisés avec le DAW (*Digital Audio Workstation*) Reaper™.

4.3.2.2 Documentation et annotations des enregistrements

Après chaque séance de captation, le stagiaire Philippe Rousseau s'est vu confier la réécoute de tous les enregistrements et leur annotation détaillée. Le but de ces réécoutes était d'identifier tout artefact indésirable (vent, bruit de contact, erreur numérique, bruit de fond, etc.) et souligner tout moment intéressant en plus d'y ajouter des notes. Un exemple de capture d'écran d'un projet Reaper^{MD} annoté est montré à la Figure 19. L'explorateur de région et de marqueur de Reaper™ donne encore davantage de détails.

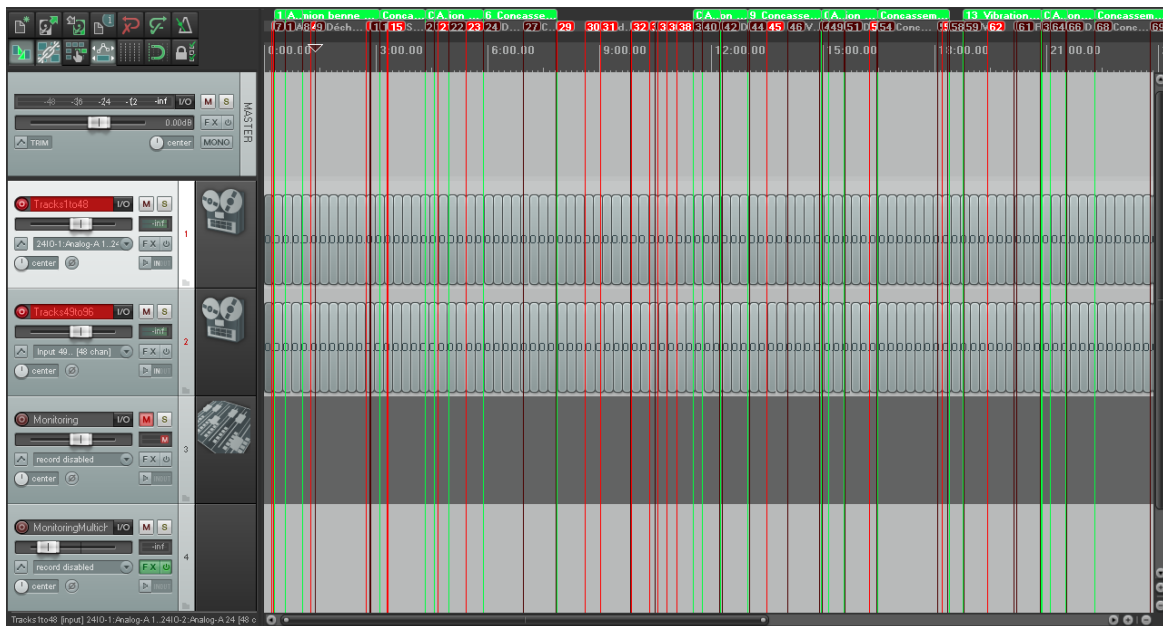


Figure 19 – Exemple de projet Reaper^{MD} annoté. Les deux premières pistes horizontales représentent les signaux audio en groupes de 48 pistes. Les deux dernières pistes horizontales sont les bus d'écoute. Les segments d'intérêt sont en vert. Les segments potentiellement problématiques sont en rouge clair. Tout autre événement (voix humaine, bruit non représentatif de l'environnement, trop de vent, problème technique, etc.) est en rouge foncé.

Tous les projets Reaper^{MD} créés pour le traitement des données ont été sauvegardés sur l'ordinateur utilisé pour les captations et sur les disques durs de sauvegarde de sécurité du GAUS. Afin d'avoir un accès facile aux marqueurs et aux régions créés, un fichier .txt a été généré pour chacun des sites.

4.3.3 Liste de la banque de captations disponibles

4.3.3.1 Site extérieur : mine à ciel ouvert

Cette section présente une liste détaillée de tout ce qui a été capté sur le premier site, soit chez Graymont (30 septembre et 1^{er} octobre 2014). Les enregistrements effectués dans cette entreprise sont présentés au Tableau 7. Les photographies des endroits de captation sont montrées aux Figure 20 à Figure 25 (les correspondances entre les endroits de captation et les photographies sont données au Tableau 7). Même si ces photographies ne les montrent pas toujours, il faut souligner le fait que, pour chaque endroit, des véhicules en mouvement ont été captés.

Tableau 7 – Liste des enregistrements et évènements captés chez Graymont

No	Endroit de mesure	Donnée météorologique	Note ou évènement
1	Sous les fours (Figure 20, Figure 79)	Vent : 3,5 mph, pression : 1008 hPa Temp. : 23,5 °C, humidité : 67 %	Micro de référence au Compresseur 1.
2	Sous les fours (Figure 20, Figure 79)	Vent : 4 mph, pression : 1008 hPa Temp. : 25,6 °C, humidité : 53,3 %	Recul de chariot élévateur 4X.
3	Sous les fours (Figure 20, Figure 79)	Idem 2	Compresseur 1 en marche.
4	Sous les fours (Figure 20, Figure 79)	Idem 2	Compresseur 1 en marche. Recul de chariot élévateur 4X. Filmé par Pierre Lecomte.
5	Sous les fours (Figure 20, Figure 79)	Idem 2	Déplacement du compresseur (1 vers 2) par camion.
6	Sous les fours (Figure 20, Figure 79)	Vent : 2 mph, pression : 1008 hPa Temp. : 23,8 °C, humidité : 46,1 %	Compresseur seul avec micro de référence au Compresseur 2.
7	Sous les fours (Figure 20, Figure 79)	Idem 6	Compresseur 2. Recul chariot élévateur 4X.
8	Aire de chargement (Figure 21, Figure 80)	Vent : 0,9 mph, pression : 1007 hPa Temp. : 26,5 °C, humidité : 46,1 %	Environnement seulement
9	Aire de chargement (Figure 21, Figure 80)	Idem 8	Recul camion de chargement au Déplacement 3X. Rinçage moteur.
10	Trafic à l'entrée (Figure 22, Figure 23, Figure 81)	Vent : 0,9 mph, pression : 1007 hPa Temp. : 26,5 °C, humidité : 46,1 %	Camion 18 roues bat. Admin. Loin 2X. Camion benne bat. Admin. Loin 15 h 40 : camion de chargement Section 1. 15 h 42 : Camion benne Section 1.

No	Endroit de mesure	Donnée météorologique	Note ou évènement		
			Temps	Véhicule et manœuvre	Section
11	Trafic à l'entrée (Figure 22, Figure 23, Figure 81)	Idem 10	00:03:00	Camion de chargement	1
			00:03:25	Camion benne	1
			00:04:19	Camion benne	1
			00:05:01	Camion benne	1
			00:05:17	Camion benne avant/recul	2 et 4
			00:05:39 – 00:06:01	Camion benne recul/avant	1 et 4
			00:06:21 – 00:06:34	Camion benne avant/recul	2 et 4
			00:06:47 – 00:07:14	Camion benne recul/avant	4 et 1
			00:07:33 – 00:07:45	Camion benne avant/recul	2 et 4
			00:08:03	Camion benne recul	4 et 1
			00:08:40	Camion benne recul vers nous	Dépl. 3
			00:09:20	Camion benne recul vers nous	Dépl. 3
			–	Camion benne recul vers nous	Dépl. 3
			00:10:41	Camion benne recul vers nous	Dépl. 3
			00:11:43	Camion immobile benne dos	Dépl. 3 au plus près
			00:13:10	Camion immobile benne face	Dépl. 3 au plus près
12	PLS côté route (Figure 24, Figure 82)	Vent : 1,5 mph, pression : 1015 hPa Temp. : 12,6 °C. humidité : 79,1 %	Au début, il y a eu un chargement.		
13	PLS côté route (Figure 24, Figure 82)	Idem 12	Passage camion		
14	PLS côté route (Figure 24, Figure 82)	Idem 12	Passage balayeuse 1 4X. Passage balayeuse 2 4X. Passage camion.		
15	Concasseur (Figure 25, Figure 83)	Vent : 0,9 mph, pression : 1015 hPa Temp. : 18 °C, humidité : 75,3 %	Recul : (00 :50 :00) (04 :26 :00) Voir signaux pour le détail des reculs captés		

Des vues du haut schématiques représentant les environnements captés sont présentées à l'annexe A. À différents moments, les niveaux de pression sonore ont été mesurés avec un

sonomètre en guise de référence : 90,9 dBA dans la zone de trafic, 72,9 dBA au PLS (*Pulverized Limestone*) et 79 dBA au concasseur.

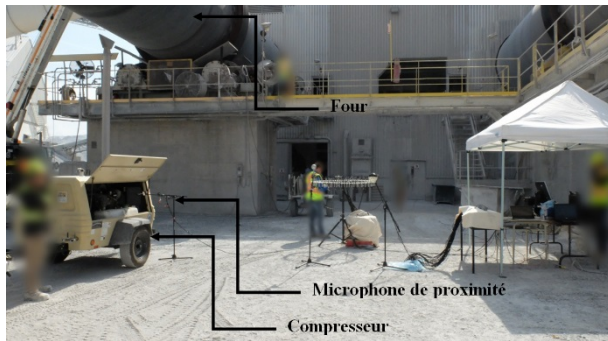


Figure 20 – Captation : sous les fours.



Figure 21 – Captation : aire de chargement.



Figure 22 – Captation : trafic.



Figure 23 – Captation : trafic et recul.

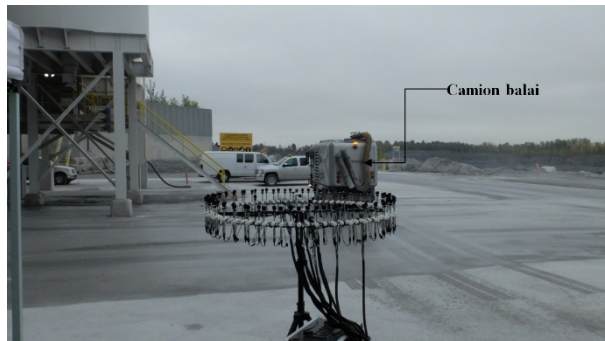


Figure 24 – Captation : PLS.



Figure 25 – Captation : concasseur.

4.3.3.2 Site intérieur : atelier de fabrication et d'assemblage

Cette section présente une liste détaillée de tout ce qui a été capté sur le second site. Les enregistrements effectués chez Agrigratte, le 24 novembre 2014, sont présentés au Tableau 8. L'antenne microphonique a été placée dans deux zones distinctes : la grande salle et l'aire de peinture. Des photographies des endroits de captation sont montrées aux Figure 26 et Figure 27 (les correspondances entre les endroits de captation et les photographies sont données au

Tableau 8). Des vues du haut schématiques représentant les environnements captés sont présentées à l'annexe B.

Dans la grande salle sont installés, entre autres, des postes de soudure, de meulage, de nettoyage par jet de sable. Deux ponts roulants ont été utilisés afin d'effectuer des captations sonores avec sources en mouvements, celui dans la section B et celui dans la section A (Figure 84 à l'annexe B). De plus, un chariot élévateur à fourche télescopique a effectué deux déplacements selon la double flèche verticale de la Figure 84. Le premier déplacement fut une manœuvre d'avance et de recul avec alarme de recul, tandis que le deuxième fut une manœuvre de recul avec alarme et ensuite d'avance. L'alarme de recul présente sur ce véhicule est une alarme tonale. La Figure 26 illustre la section A ainsi que le montage des antennes et équipements pour les mesures dans la grande salle.

L'aire de peinture a aussi été sélectionnée en raison de la présence du poste de peinture, de la station de sablage au jet de sable ainsi que du four. Cependant, lors des expérimentations, le poste de peinture était inutilisé et le four n'était pas actif. Ainsi, seule la station de sablage au jet de sable a pu être enregistrée pendant qu'elle était en fonction. La Figure 27 illustre cet endroit de mesure avec une vue du poste de peinture ainsi que le montage de microphones.

Tableau 8 – Liste des enregistrements et évènements captés chez Agrigratte.

No	Endroit de mesure	Donnée météorologique	Note ou évènement
1	Grande salle (Figure 26, Figure 84)	Temp. : 17,1 °C Humidité : 58,7 %	Meuleuse en B. Soudeuse en A. Musique en A. À 00:09:10 : Personne qui parle.
2	Grande salle (Figure 26, Figure 84)	Idem 1	Aucune musique. Jet de sable fonctionne. Meuleuse en B. Soudure en B. Visseuse à percussion en C.
3	Grande salle (Figure 26, Figure 84)	Idem 1	Recul d'un véhicule (Itinéraire 1). Soudure en B. Meuleuse en B.
4	Grande salle (Figure 26, Figure 84)	Idem 1	Jet de sable fonctionne. Déplacements du pont roulant en A 6X.
5	Grande salle (Figure 26, Figure 84)	Idem 1	Meuleuse en A.
6	Grande salle (Figure 26, Figure 84)	Idem 1	Déplacement du pont roulant en B.
7	Aire de peinture (Figure 27, Figure 85)	Temp. : 16,0 °C Humidité : 71,8 %	Jet de sable fonctionne. Meuleuse. Coups de marteau. Déplacement véhicule à l'aire d'assemblage. Peinture en fonction (peu audible).
8	Aire de peinture (Figure 27, Figure 85)	Idem 7	Jet de sable avec microphone de référence. Recul d'un véhicule avec alarme.

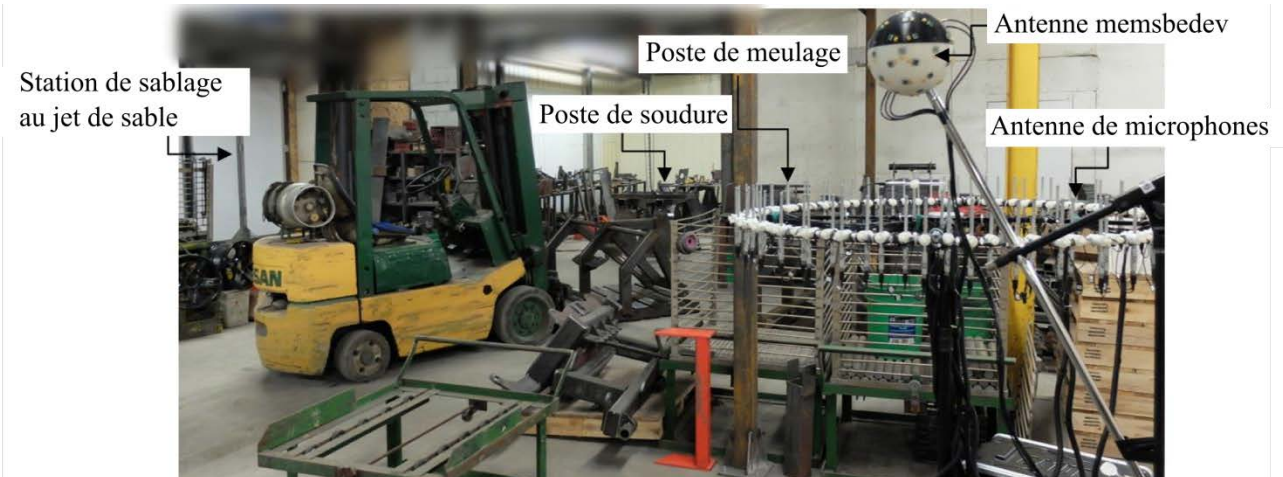


Figure 26 – Captation dans la grande salle.



Figure 27 – Captation à l'aire de peinture.

4.3.4 Comparaison avec les gabarits

Dans cette section, des résultats issus des mesures *in situ* sont comparés avec les gabarits de la WFS (section 4.1.5) afin d'évaluer la capacité du système à reproduire les niveaux mesurés, jugés représentatifs des endroits visités et des événements captés. Toutes les comparaisons sont effectuées avec le microphone de référence, soit celui du centre de l'antenne de microphones. Le gabarit utilisé est celui des 16 ondes planes (Figure 10) en bruit rose.

4.3.4.1 Site extérieur : carrière à ciel ouvert (Graymont)

Pour les cinq endroits de captation (voir Tableau 7), les gabarits sont montrés de la Figure 28 à la Figure 32. Sur ces figures, les parties noires et grises sont les gabarits et les parties vertes et

rouges sont les spectres mesurés avec lesquels sont comparés les gabarits. Les parties rouges sont en dehors du gabarit et les parties vertes sont dans le gabarit, donc reproductibles sans problème¹⁹.

Par ailleurs, les parties en rouge ne sont pas nécessairement impossibles à reproduire. En effet, il est important de garder à l'esprit que la comparaison d'un spectre avec le gabarit est un outil qui permet d'offrir des indices quant à la reproductibilité de l'environnement capté, c'est-à-dire qu'il ne représente pas une condition nécessaire. En effet, les limites supérieures de ces gabarits furent obtenues pour des bruits roses à la limite de saturation en « amplitude instantanée ». Ainsi, pour des cas de spectre qui sont en dehors du gabarit pour des zones de fréquences restreintes, les niveaux plus faibles pour d'autres fréquences garantissent la possibilité d'y récupérer de la dynamique pour s'assurer qu'il n'y a pas de saturation pour les parties du spectre plus fortes. Pour les captations près du concasseur (Figure 32), le gabarit est respecté dans son ensemble sauf aux environs de 10 Hz, bande de fréquence qui est négligée pour cette activité puisque inaudible et sous la bande efficace des caissons de grave. Pour les autres endroits de mesure (de la Figure 28 à la Figure 31), les gabarits sont respectés sur la plus grande partie des spectres sauf pour certains pics émergents à certaines fréquences. Ces raies ne sont pas jugées comme réellement problématiques puisque la marge obtenue pour les autres fréquences sous la limite du gabarit permettra toujours de récupérer de la dynamique pour les fréquences qui en nécessitent plus. De plus, les mesures respectent, sur le plan des niveaux globaux, les gabarits.

Par ailleurs, à la suite de ces observations et comparaisons entre les mesures chez Graymont et les gabarits de WFS, deux nouveaux caissons de grave ont été achetés pour un total de quatre caissons qui sont utilisés dans les phases de reproduction. Fait important à noter, la suite logicielle de Sonic Emotion^{MD} ne permet pas l'utilisation de plus de deux caissons. Ce sont donc, comme prévu, les logiciels développés en interne du GAUS qui ont été utilisés pour piloter le système en phase de reproduction puisque ceux-ci n'ont pas de limites sur le nombre de caissons. L'ajout de ces deux nouveaux caissons permet d'atteindre des niveaux de pression encore plus élevés en basses fréquences. Ainsi, la plupart des environnements mesurés chez Graymont sont reproductibles. Par contre, à ce stade-ci, ce type d'environnements sonores et de niveaux est considéré comme à la limite de la capacité du système.

¹⁹ Puisque ces courbes de spectre sonore sont en fait issues d'un traitement du signal basé sur la transformée de Fourier, le spectre est uniquement évalué pour des fréquences discrètes. Ainsi, ces courbes devraient être, en principe, représentées par des points ou marqueurs sans ligne entre eux. Par contre, à des fins de lisibilité, et étant donné le très grand nombre de points, ceux-ci sont reliés entre eux par les segments verts ou rouges. Par contre, il ne serait pas rigoureux de lier les segments verts et rouges puisqu'il faudrait spéculer sur l'appartenance, ou non, du spectre au gabarit lorsque deux points de spectre consécutifs sont, respectivement, en dehors ou à l'intérieur du gabarit. C'est pour cette raison que les courbes de spectre sont intermittentes.

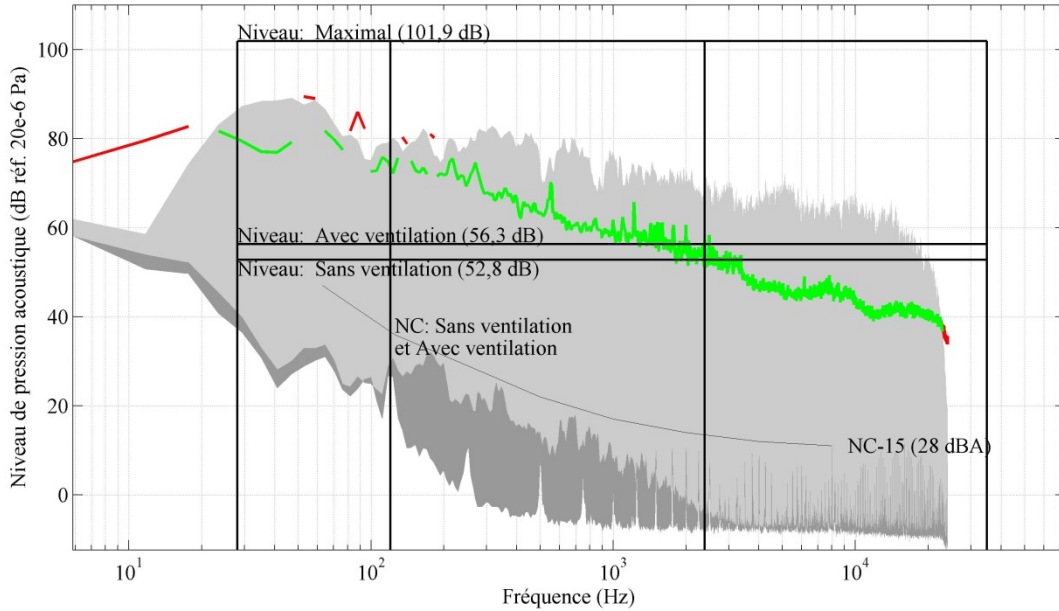


Figure 28 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS pour les captations sous les fours chez Graymont. Le gabarit, comme défini plus tôt, est montré en noir et en gris. La mesure est indiquée en vert pour la partie qui respecte le gabarit et en rouge pour la partie qui ne respecte pas le gabarit.

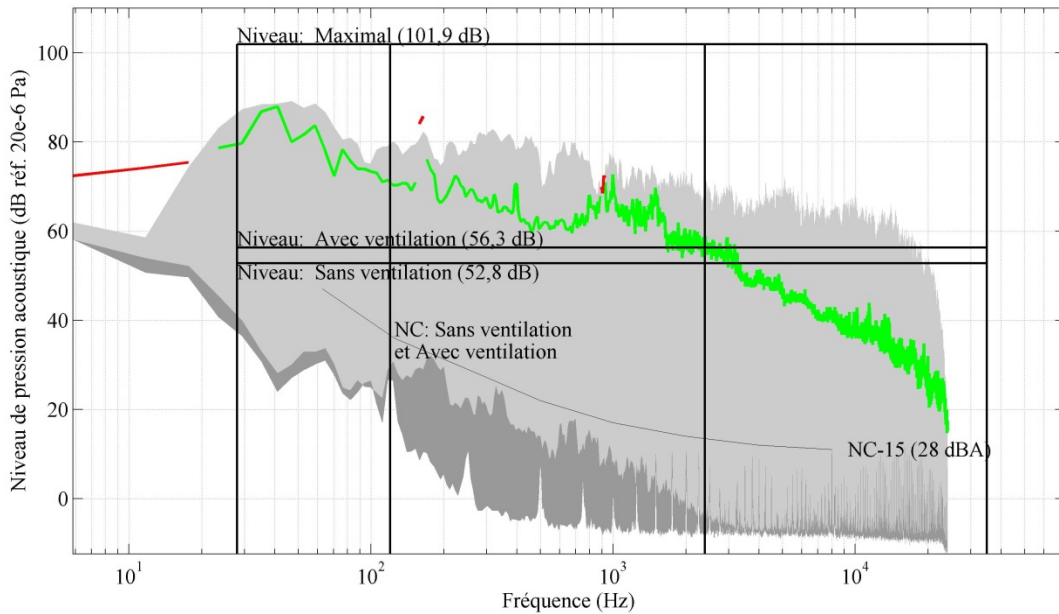


Figure 29 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS pour les captations à l'aire de chargement chez Graymont (légende à la Figure 28).

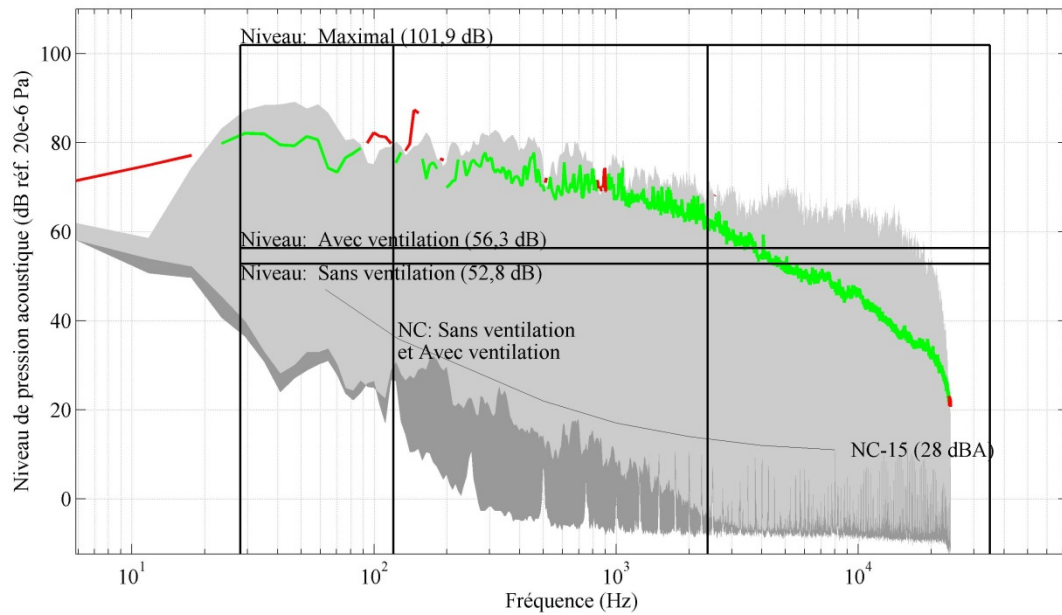


Figure 30 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS pour les captations dans l’aire de trafic Graymontlégende à la Figure 28).

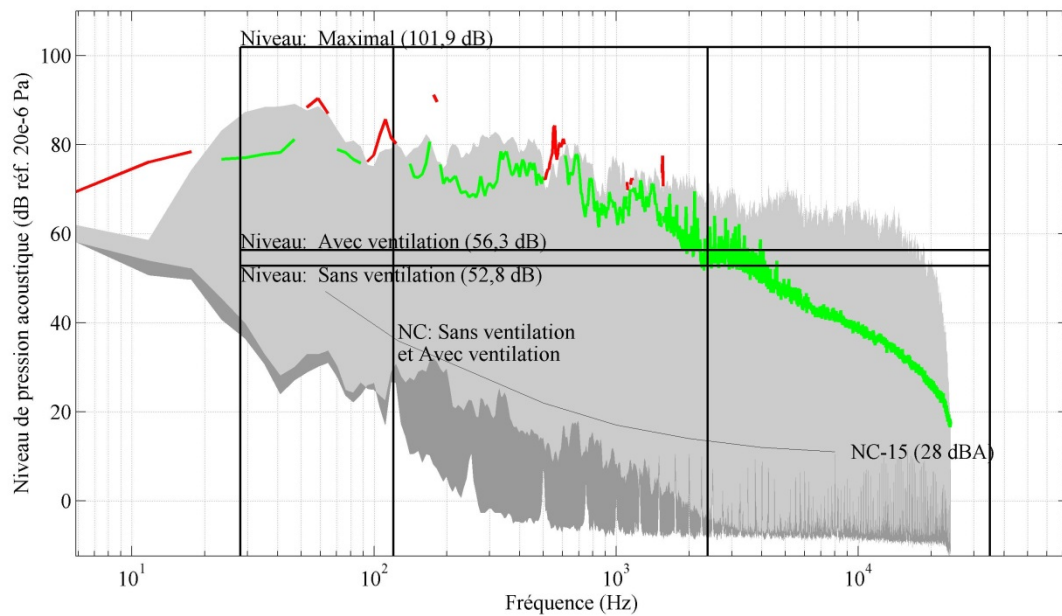


Figure 31 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS pour les captations au PLS chez Graymont (légende à la Figure 28).

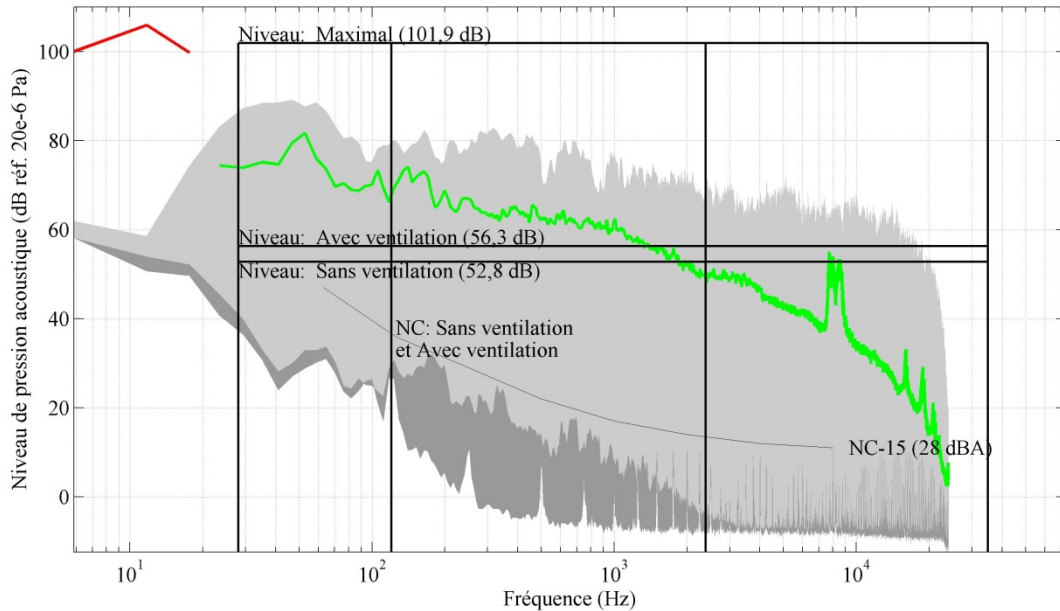


Figure 32 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS pour les captations au concasseur chez Graymont (légende à la Figure 28).

4.3.4.2 Site intérieur : atelier de fabrication et d'assemblage (Agrigratte)

Les comparaisons sont montrées à la Figure 33 pour la grande salle et à la Figure 34 pour l'aire de peinture. Sur ces figures, les parties noires et grises sont les gabarits et les parties vertes et rouges sont les spectres mesurés avec lesquels sont comparés les gabarits. Les parties rouges sont en dehors du gabarit et les parties vertes sont à l'intérieur du gabarit, donc reproductibles. Pour la grande salle (Figure 33), la partie la plus importante du spectre mesuré au microphone de référence entre dans le gabarit, à l'exception d'un artefact négligeable aux environs de 10 Hz et d'un ton pur émergent aux environs de 2 865 Hz. Par contre, ce dernier ne devrait pas poser de problème et être aisément reproductible. En effet, comme mentionné plus haut, avec toute la différence de niveau entre le gabarit et la mesure aux autres fréquences, il reste suffisamment de gamme dynamique pour compenser. Dans le cas de l'aire de peinture (Figure 34), l'ensemble du spectre mesuré sur le site respecte le gabarit de WFS. La reproduction ne devrait, dans ce cas, poser aucun problème.

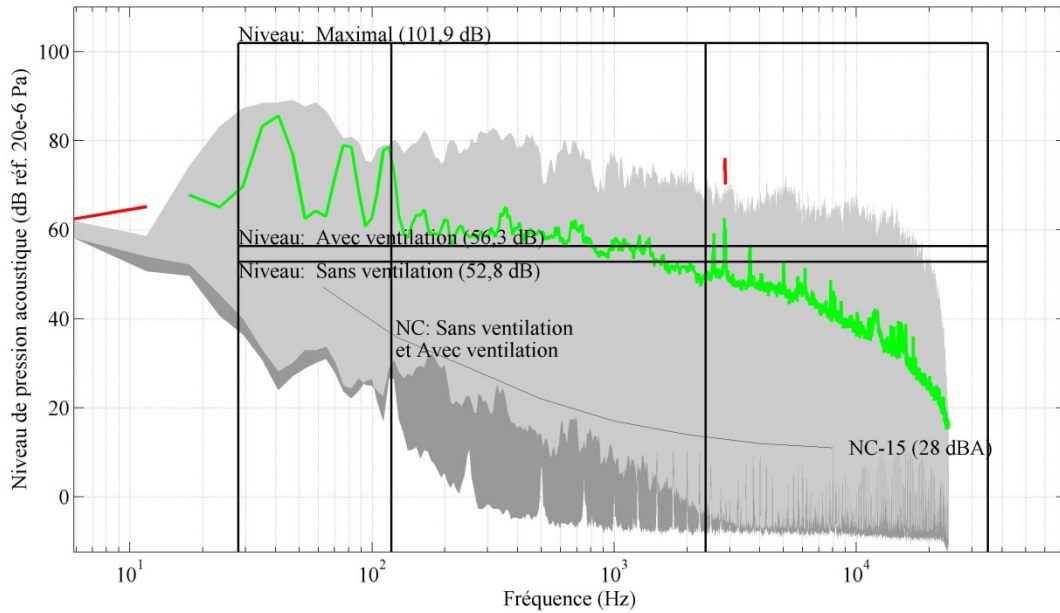


Figure 33 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS pour la grande salle chez Agrigratte (légende à la Figure 28).

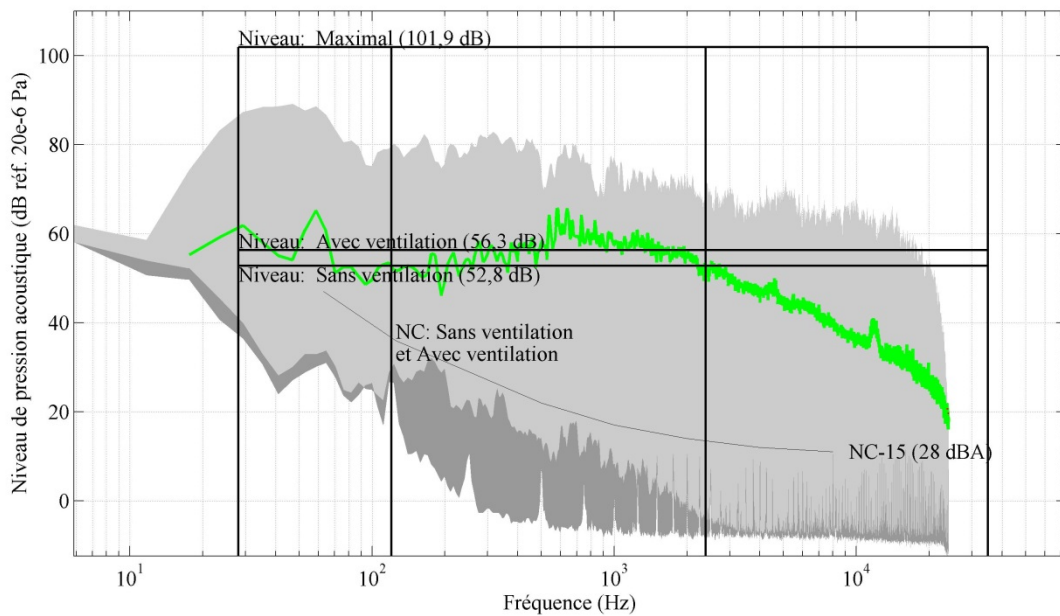


Figure 34 – Comparaison du spectre de pression sonore calibré avec le gabarit WFS pour l'aire de peinture chez Agrigratte (légende à la Figure 28).

4.4 Reproduction par WFS des deux environnements sonores mesurés

Cette section présente les méthodes utilisées pour la reproduction des environnements sonores. Des simulations théoriques sont aussi incluses afin : 1) de comparer les méthodes sur des cas simples, 2) de déterminer la méthode la plus pertinente et 3) de trouver les paramètres les plus prometteurs. Ces étapes préliminaires ont aussi permis de valider l'ensemble des fonctions et scripts MATLAB^{MD} qui permettent de générer les commandes des haut-parleurs et d'effectuer l'évaluation physique de la reproduction. En effet, l'ensemble des codes utilisés pour les simulations sont utilisés tels quels pour les expériences décrites dans la présente section.

4.4.1 Méthodes comparées : WFS, problèmes inverses et algorithmes du « lasso » et de l'elastic-net

Dans le cadre de ce projet de recherche, quatre méthodes ont été comparées et testées, seules ou combinées. Dans tous les cas, la chaîne de traitement du signal correspond à celle introduite à la Figure 3. Les méthodes comparées se concentrent sur les deux blocs principaux : la « matrice de conversion » et les « opérateurs WFS ». Pour des raisons de ressources informatiques et de simplicité, l'ensemble de ces opérations est toujours effectué en prétraitement, en temps différé. En effet, puisque les signaux sont tous échantillonnés à 48 kHz et que les matrices de transfert comportent jusqu'à 8 160 fonctions de transfert (96 sources de reproduction, 85 microphones), les calculs requis sont relativement lourds.

4.4.1.1 Wave Field Synthesis

La commande par WFS (le bloc « Opérateurs WFS » de la Figure 3), comme développée par le GAUS pour cette étude, permet de transformer des signaux d'ondes planes en commandes de haut-parleurs. La WFS se base sur une approximation dite 2,5D de l'intégrale de Kirchhoff-Helmholtz (Spors et coll. 2013). Lorsqu'elle est utilisée, la WFS nécessite donc un prétraitement des signaux microphoniques pour les convertir en signaux d'ondes planes (selon l'hypothèse que tout champ de pression sonore peut être représenté par une somme d'ondes planes [Williams, 1999]). Pour la moitié des cas étudiés (comme décrit plus bas), lorsque la WFS n'est pas utilisée, la conversion des mesures microphoniques (le bloc « Matrice de conversion » de la Figure 3) génère directement la commande des haut-parleurs.

4.4.1.2 Conversion des signaux microphoniques

Selon l'absence ou la présence de la WFS telle que décrite plus haut, on distingue deux cas de conversions des signaux microphoniques (le bloc « Matrice de conversion » de la Figure 3) : 1) en ondes planes pour l'utilisation de la WFS d'ondes planes ou 2) directement en commande de haut-parleurs²⁰ (on parlera simplement de reproduction par ondes sphériques). Dans le premier cas, l'hypothèse sous-tend que le champ sonore peut être reproduit par une somme d'ondes planes qui, quant à elles, seront reproduites par WFS. Dans le deuxième cas, l'hypothèse suppose que le champ sonore réel peut être reproduit par des distributions de sources sphériques (les haut-

²⁰ La commande de haut-parleurs fait référence à tous les signaux audio numériques directement envoyés aux amplificateurs des haut-parleurs.

parleurs), dont les gains et phases sont ajustés pour chaque fréquence et chaque instant. Dans les deux cas, les deux mêmes algorithmes utilisés pour la conversion sont comparés. La seule différence vient de la définition de la matrice de fonctions de transfert directe. Dans le premier cas, cette matrice représente des fonctions de transfert d'ondes planes jusqu'à l'antenne de microphones. Dans le deuxième cas, cette matrice représente des fonctions de transfert théoriques estimant les fonctions de transfert d'ondes sphériques, dont les origines correspondent aux positions de haut-parleurs, jusqu'à l'antenne de microphones. Les deux algorithmes sont de la famille de problèmes inverses qui consistent à trouver la cause de l'effet observé et un modèle reliant cause à effet. Fait à noter, ces deux algorithmes sont tous deux appliqués pour la reproduction par : 1) ondes sphériques et 2) ondes planes avec WFS d'ondes planes. Les algorithmes comparés sont les suivants :

- Problème inverse avec régularisation de Tikhonov (avec paramètres de régularisation ajustables et normalisés par rapport à la première valeur singulière du système direct) (Gauthier et coll. 2013). Dans les sections qui suivent, pour simplifier la lecture des résultats, l'acronyme PIT pour Problème inverse Tikhonov, identifiera cet algorithme.
- Problème inverse avec recherche de solution présentant une certaine parcimonie, selon deux algorithmes distincts : algorithmes du « lasso » et de l'*elastic-net* (Tibshirani, 1996 ; Zou et Hastie 2005). Même si l'*elastic-net* a été testé dans le cadre de cette étude, les résultats n'ont pas été consignés à des fins de concision. Pour ces deux algorithmes, le paramètre de régularisation ajustable est le nombre maximal de sources actives ; l'*elastic-net* comporte un autre paramètre ajustable. Dans les sections qui suivent, pour simplifier la lecture des résultats, l'acronyme PIL pour Problème inverse « lasso », identifiera cet algorithme.

Chacun des deux algorithmes présente des avantages et des désavantages. Le problème inverse avec régularisation de Tikhonov (PIT) activera toujours toutes les sources de reproduction (ondes planes ou haut-parleurs). Cela peut amener à une perception spatiale un peu floue, malgré une bonne reproduction objective. L'approche dite du « lasso » permet de limiter le nombre de sources actives par le biais d'une régularisation par une norme 1 pour possiblement régler ce problème. Par contre, le temps de calcul devient plus important²¹.

Quelques précisions au sujet des deux algorithmes (PIT et PIL) sont données pour simplifier l'interprétation des résultats associés aux sections suivantes. L'approche PIT se base sur la technique des moindres-carrés alors que la somme (pour tous les microphones) des erreurs quadratiques de reproduction (différence entre le champ à reproduire et le champ reproduit) est minimisée. Avec l'approche PIT, une régularisation de la solution est introduite par le biais d'une fonction coût composite qui inclut la somme des erreurs quadratiques et une pondération de la « norme deux »²² de la solution (c'est-à-dire des amplitudes complexes de chacune des commandes haut-parleurs). L'avantage de la méthode PIT tient dans sa simplicité : la solution

²¹ La mise en œuvre actuelle du « lasso », basée sur l'algorithme complexe de descente par coordonnées, n'est pas optimisée et donc peu représentative. La différence actuelle de temps de calcul est de 100 et plus. Il serait possible d'optimiser la mise en œuvre actuelle du « lasso » par le biais de l'algorithme de descente par coordonnées par bloc.

²² La norme deux d'un vecteur complexe correspond à la racine carrée de la somme des carrés des magnitudes des coefficients du vecteur.

analytique est connue et peut être programmée en une seule ligne de code sans itération. Aussi, la méthode PIT peut offrir une solution sous la forme d'un filtre multicanal qui peut être réutilisé pour plusieurs scènes à reproduire. Par contre, la méthode PIT peut introduire deux inconvénients. D'abord, l'image spatiale pourra être plus floue que ce qui serait espéré puisque toutes les sources de reproduction seront toujours actives. Ce qui, pour certains cas, comme celui d'une seule source en mouvement dans un espace ouvert, ne serait pas idéal. Ensuite, l'approche PIT ne présente que très peu d'innovation autre que, dans le cadre de cette étude, son application en contexte de santé et de sécurité. L'approche PIL se base aussi sur la technique des moindres-carrés alors que la somme quadratique des erreurs de reproduction à tous les microphones est minimisée. Par contre, contrairement à la PIT, c'est la « norme un »²³ de la solution qui est ajoutée dans la fonction coût composite. Cette simple différence introduit un effet de sélection, c'est-à-dire que certains coefficients de la solution ne seront pas activés. C'est ce qui garantit la parcimonie de la solution. La méthode PIL pourrait donc accroître le contraste spatial de l'image perçue. Par contre, la méthode PIL est plus complexe et non-linéaire, puisqu'elle est itérative et fondée sur l'algorithme de descente des coordonnées complexes. De plus, elle dépend de la scène à reproduire. Néanmoins, la méthode PIL fut introduite dans ce projet de recherche pour inclure un aspect d'innovation et pour potentiellement accroître la précision spatiale de l'image reconstruite. Dans la littérature scientifique sur le sujet, cette méthode ne fut utilisée qu'une seule fois théoriquement pour la reproduction de champs acoustiques (Lillis, 2010). Aucune expérience de reproduction de champs acoustiques par PIL (avec l'algorithme du « lasso ») n'est actuellement rapportée dans la littérature. Ainsi, la méthode PIL fut donc introduite dans cette étude à titre exploratoire.

4.4.2 Simulations théoriques

Cette section présente des simulations théoriques de toute la chaîne de traitement du signal telle que présentée à la Figure 3. Il est important de noter que cette chaîne est mise en œuvre avec des fonctions et des outils développés au GAUS, c.-à-d. sans l'utilisation de la suite logicielle de WFS par Sonic Emotion^{MD} et ce, pour les géométries des réseaux de microphones et de haut-parleurs utilisées dans cette étude. Les haut-parleurs et les microphones sont dans le même plan horizontal et l'antenne de microphones est au centre du réseau de haut-parleurs. Les simulations théoriques sont exposées pour trois cas de champs sonores cibles représentatifs de la plupart des défis à relever lors des enregistrements *in situ* : 1) deux sources ponctuelles fixes en champ libre, 2) une source intermittente en mouvement et 3) un champ acoustique immersif (presque « diffus ») produit par 91 ondes planes de bruits non corrélées. Puisque plusieurs simulations ont été effectuées pour établir les meilleurs paramètres de régularisation, seules les simulations associées sont rapportées dans ce document. Dans tous les cas, ces sources fictives, à la source des champs sonores cibles, se situent dans le plan horizontal.

Les simulations théoriques sont faites sur la base de plusieurs métriques qui comparent systématiquement le champ sonore à reproduire (cible) et le champ sonore reproduit :

1. Niveaux de pression sonore (dB) à chaque microphone de l'antenne;
2. Spectre de pression au microphone de référence (au centre de l'antenne);

²³ La norme un d'un vecteur complexe correspond à la somme des magnitudes des coefficients du vecteur.

3. Carte acoustique par formation de voix en fonction du temps (pour visualiser les sources en mouvement et la distribution spatiale de l'environnement cible ou reproduit);
4. Champs sonores reproduits dans l'ensemble de la zone délimitée par le réseau de haut-parleurs.

Les métriques 1 et 2 permettent d'évaluer les qualités les plus fondamentales de la reproduction, niveau et timbre. Les métriques 3 et 4 permettent l'évaluation de la qualité spatiale de la reproduction.

4.4.2.1 Cas 1 : Deux sources fixes

Dans ce cas, le champ acoustique cible est produit par deux sources harmoniques de fréquences différentes (220 Hz, provenant d'un point en [-3,1] m, et 440 Hz, provenant d'un point en [1,4] m). Elles émettent chacun leur tour, sans chevauchement, c'est-à-dire jamais simultanément, pendant deux secondes chacune (leurs signaux incluent aussi de courts fondus pour éviter de potentiels clics). Le champ cible dans la zone d'écoute (4 m par 4 m) est montré pour quatre instants (voir Figure 39, placée un peu plus loin pour faciliter la comparaison). Les deux sources sont à l'extérieur de la zone d'écoute.

Les résultats de reproduction avec les différents algorithmes sont présentés de la Figure 35 à la Figure 45. La Figure 35 présente les niveaux de pression acoustique (NPA) à tous les microphones et les spectres au microphone de référence (au centre) pour le cas de reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT. Niveaux et spectres sont bien reproduits. La Figure 36 exhibe les cartes acoustiques circulaires en fonction du temps pour le champ cible et le champ reproduit pour le cas de reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT. Ces cartes et les suivantes sont calculées à partir d'un algorithme de formation de voies non focalisé et à partir des données à l'antenne de microphones; elles permettent d'illustrer, à partir des signaux microphoniques cibles et reproduits, les directions d'arrivée du son dans le plan horizontal. Sur la carte cible, on note bien une source provenant de 345 degrés pendant les deux premières secondes, suivie d'une source aux environs de 255 degrés pour les deux dernières secondes. En plus des lobes principaux (noirs), les lobes secondaires (jaunes) ne reflètent que des artefacts de l'algorithme de formation de voies et ne correspondent pas à des sources. La reproduction est fidèle et offre une carte similaire à la cible.

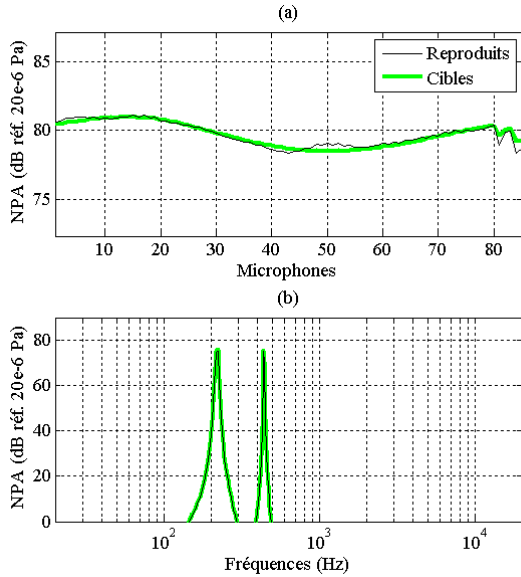


Figure 35 – Deux sources sonores, reproduction avec sources sphériques et par PIT (sans WFS d’ondes planes) : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de pression cibles et reproduits.

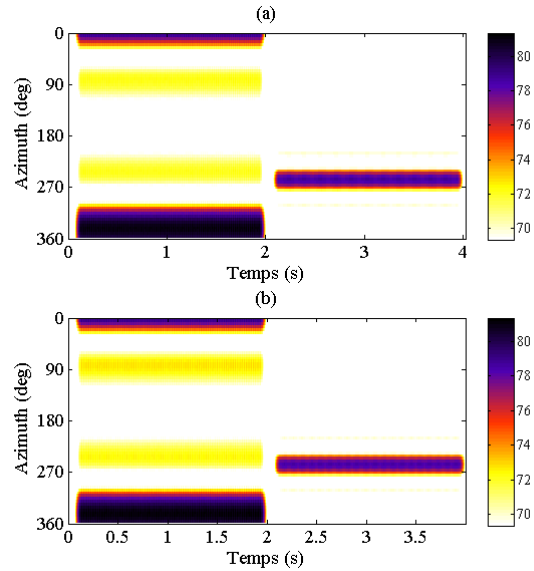


Figure 36 – Deux sources sonores, reproduction avec sources sphériques et par PIT (sans WFS d’ondes planes) : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

De façon similaire, la Figure 37 et la Figure 38 présentent les résultats basés sur la reproduction par WFS d’ondes planes et sur la conversion des signaux d’antenne de microphones en ondes planes par PIT. Bien qu’acceptables, les résultats paraissent néanmoins un peu moins bons que dans le cas précédent de reproduction avec sources sphériques (sans WFS d’ondes planes) et par PIT. Cette différence est surtout visible dans la distribution des niveaux de pression acoustique à l’antenne de microphones.

À la lumière de ces résultats, visualisés à partir de l’antenne de microphones, la Figure 40 montre quatre instants du champ sonore reproduit avec sources sphériques (sans WFS d’ondes planes) et par PIT, soit le meilleur cas établi plus haut qui correspond à la Figure 35 et à la Figure 36. Le champ de pression sonore cible est, quant à lui, présenté à la Figure 39. Il est possible d’y observer la bonne direction d’arrivée et de courbure des fronts d’onde et le fait que les deux sources recréées ne sont pas actives en même temps. Par contre, mais sans surprise, la comparaison du champ de pression cible (Figure 39) avec le champ de pression reproduit (Figure 40) indique que la reproduction est surtout valide au centre de la zone illustrée, soit dans la région de l’antenne de microphones. Cela est un résultat normal dans de telles conditions et avec cette taille d’antenne de microphones.

Les résultats pour l’algorithme PIL (avec et sans WFS d’ondes planes) sont présentés de la Figure 41 à la Figure 45. La Figure 41 et la Figure 42 font état des résultats de reproduction pour l’algorithme PIL avec sources de reproduction sphériques. La Figure 43 et la Figure 44 présentent les résultats de reproduction pour l’algorithme PIL avec WFS d’ondes plane. Finalement, la Figure 45 expose le champ reproduit avec l’algorithme PIL pour le meilleur cas, soit la reproduction par PIL avec ondes sphériques. Cette dernière figure doit être comparée avec le

champ de pression sonore cible de la Figure 39. Comme on peut le voir, le champ reproduit et les cartographies acoustiques montrent une bonne reconstruction spatiale du champ reproduit au regard de la provenance du son. De plus, le champ reproduit à la Figure 45 montre bien la force du « lasso » : une seule source est active simultanément et le champ acoustique reproduit est plus uniforme et simple dans l'ensemble de la zone d'écoute. Par contre, cette parcimonie se fait au coût d'une réduction de l'exactitude physique du champ reproduit, ce qui, selon les applications, peut être entrevu comme un avantage ou une limitation. En effet, l'avantage pourrait être de resserrer le contraste spatial et de réduire le risque de flou de localisation en éradiquant les pré — et post-échos. Le désavantage découle d'une exactitude physique réduite. Il s'agit ici d'une question de compromis. Encore une fois, le cas de reproduction avec sources sphériques sans WFS d'ondes planes offre de meilleurs résultats, ce qui laisse présager qu'il serait possible de simplifier la chaîne de reproduction en se soustrayant, pour le cas de reproduction d'environnements sonores captés avec antenne de microphones, de la nécessité du bloc de WFS.

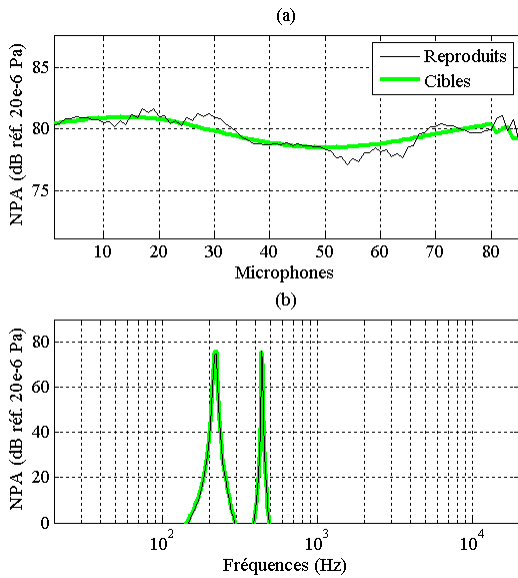


Figure 37 – Deux sources sonores, reproduction par WFS d’ondes planes et par PIT: (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de pression cibles et reproduits.

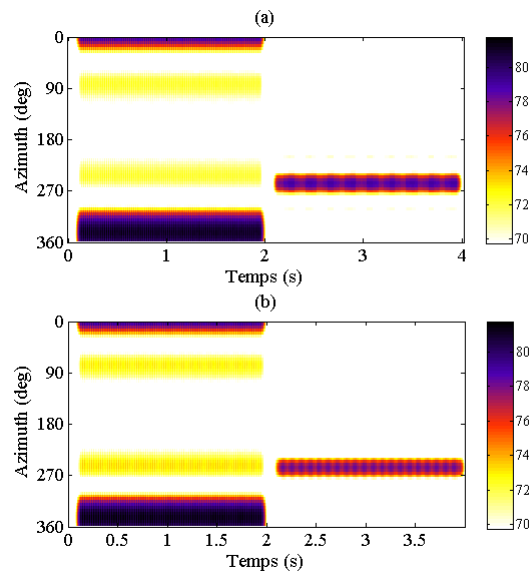


Figure 38 – Deux sources sonores, reproduction par WFS d’ondes planes et par PIT : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

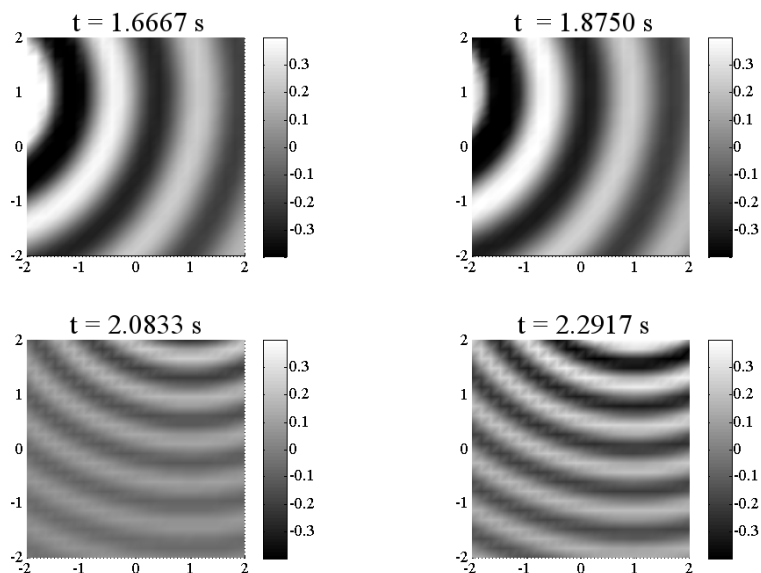


Figure 39 – Quatre instants du champ de pression cible (Pa) pour le cas des deux sources harmoniques.

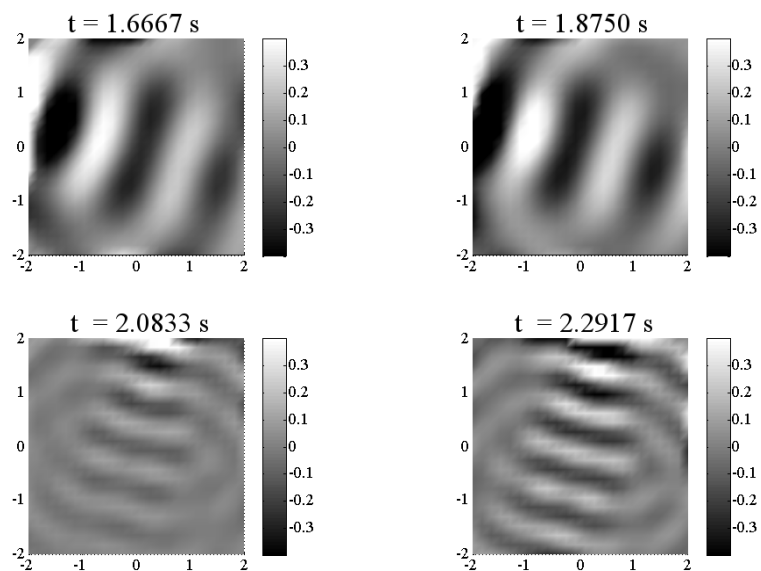


Figure 40 – Quatre instants du champ de pression reproduit (Pa) pour le cas des deux sources harmoniques. Reproduction avec sources sphériques et par PIT (sans WFS d'ondes planes).

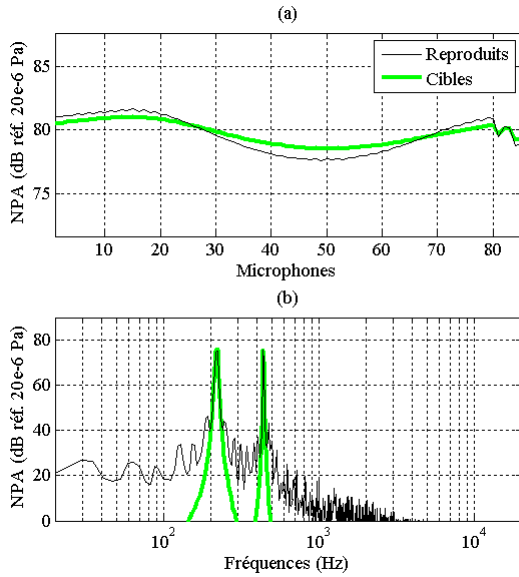


Figure 41 – Deux sources sonores, reproduction avec sources sphériques et par PIL (sans WFS d’ondes planes) : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de pression cibles et reproduits.

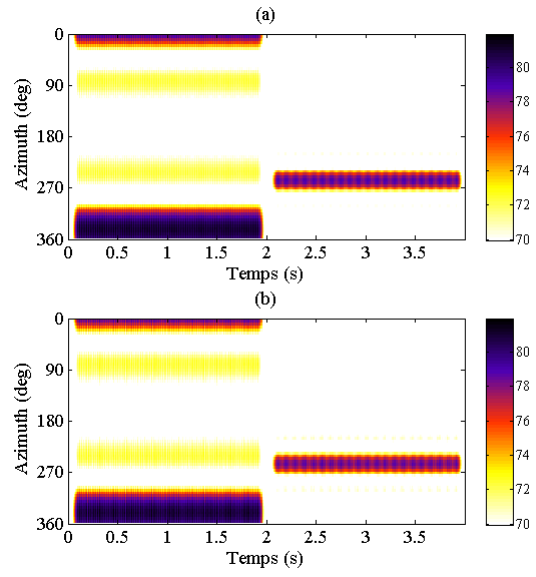


Figure 42 – Deux sources sonores, reproduction avec sources sphériques et par PIL (sans WFS d’ondes planes) : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

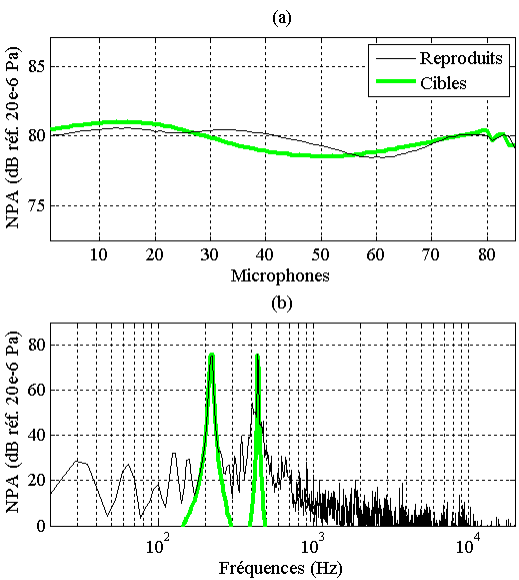


Figure 43 – Deux sources sonores, reproduction par WFS d’ondes planes et par PIL : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de pression cibles et reproduits.

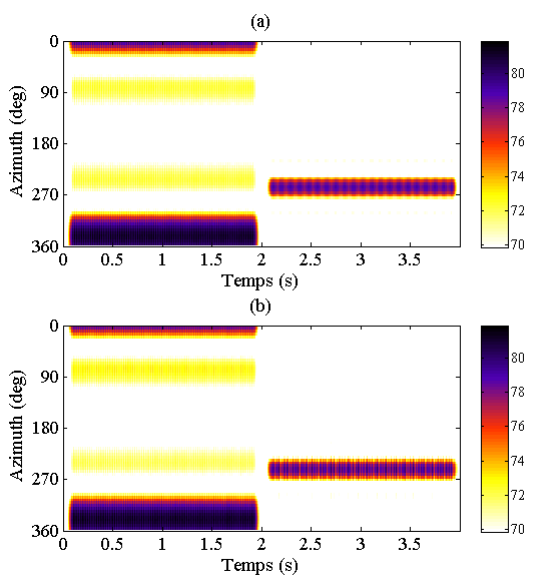


Figure 44 – Deux sources sonores, reproduction par WFS d’ondes planes et par PIL : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

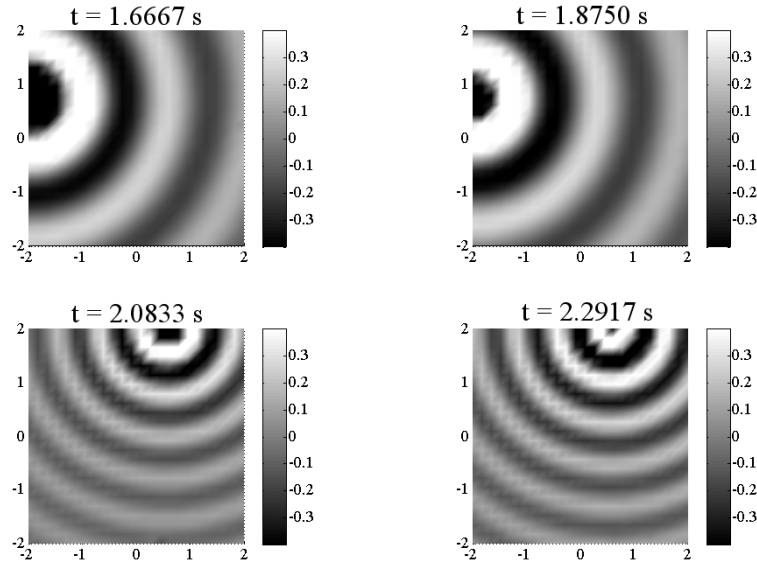


Figure 45 – Quatre instants du champ de pression reproduit (Pa) pour le cas des deux sources harmoniques. Reproduction avec sources sphériques et par PIL (sans WFS d'ondes planes).

4.4.2.2 Cas 2 : Une source intermittente en mouvement

Un autre cas représentatif est celui des sources en mouvement. Les simulations qui suivent correspondent à une source sphérique harmonique (440 Hz) intermittente (alternance de 0,125 seconde) qui effectue une demi-rotation autour de l'antenne de microphones. Le champ de pression cible est illustré (un peu plus loin pour comparaison ultérieure) pour quatre instants, pour lesquels la source est active (voir Figure 54).

Les résultats de reproduction avec les différents algorithmes sont dévoilés de la Figure 46 à la Figure 56. La Figure 46 indique les niveaux de pression acoustique (NPA) à tous les microphones et les spectres au microphone de référence (au centre) pour le cas de reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT. Niveaux et spectres sont bien reproduits. La Figure 47 exhibe les cartes acoustiques circulaires en fonction du temps pour le champ cible et le champ reproduit pour le même cas. Sur la carte cible, on voit bien la rotation de la source et son intermittence. La reproduction est fidèle et offre une carte similaire à la cible. Le mouvement de la source intermittente est donc bien recréé.

La Figure 48 et la Figure 49 présentent les mêmes résultats, mais en utilisant la WFS d'ondes planes et la conversion des signaux d'antenne de microphones en ondes planes par PIT. Encore une fois, les résultats sont acceptables, mais ils sont néanmoins un peu moins bons que pour le cas précédent sans WFS. Cette différence est surtout visible dans la distribution des niveaux de pression acoustique alors qu'elle est pratiquement invisible pour les autres métriques.

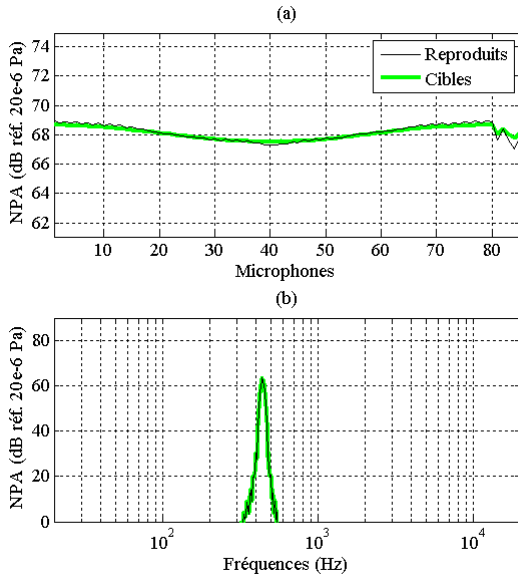


Figure 46 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec sources sphériques et par PIT (sans WFS d’ondes planes) : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

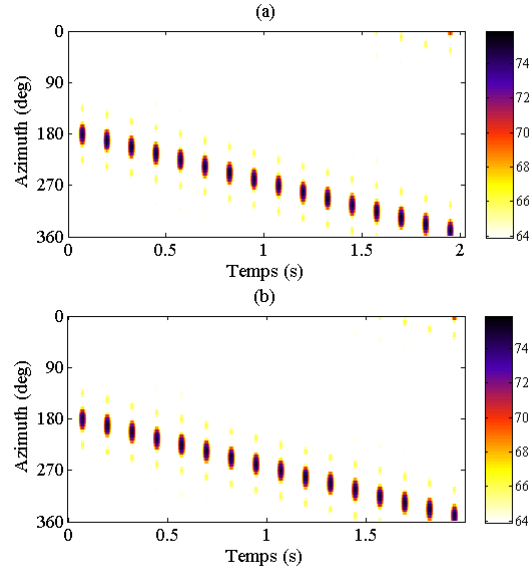


Figure 47 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec sources sphériques et par PIT (sans WFS d’ondes planes) : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

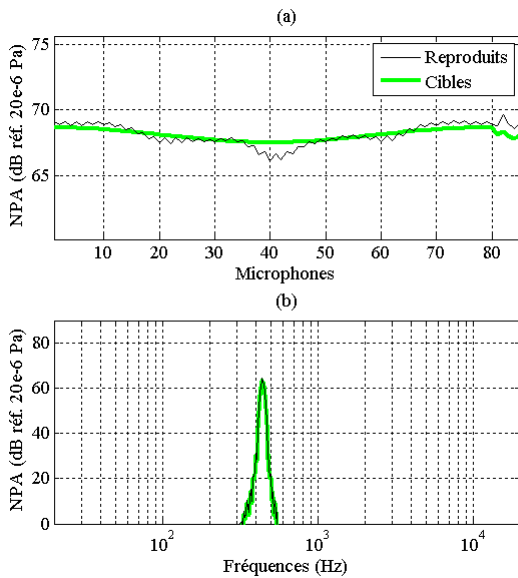


Figure 48 – Une source sonore en mouvement, reproduction par WFS d’ondes planes et par PIT : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

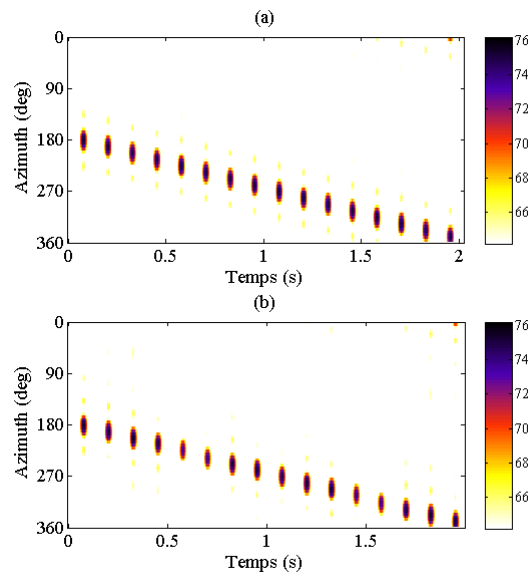


Figure 49 – Une source sonore en mouvement, reproduction par WFS d’ondes planes et par PIT : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

La Figure 55 présente quatre instants du champ sonore reproduit avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par problème inverse régularisé, soit le meilleur cas établi plus haut. Il est possible d'y voir la bonne courbure des fronts d'onde et le mouvement de la source dans le temps. Comme pour le cas précédent, le champ de pression reproduit montre que la reproduction est surtout valide au centre de la zone illustrée, soit aux environs de l'antenne de microphones.

Les résultats pour le cas de la source en mouvement et avec l'algorithme du « lasso » pour a) la conversion des signaux microphoniques en commandes haut-parleurs ou b) la conversion des signaux microphoniques en ondes planes pour WFS d'ondes planes subséquentes sont présentés de la Figure 50 à la Figure 53 (et à la Figure 56). Pour le cas du « lasso » avec reproduction par sources sphériques (Figure 50, Figure 51 et Figure 56), les résultats sont satisfaisants. De plus, le champ reproduit (Figure 56) montre bien que la source en mouvement est recrée par une seule source de reproduction à la fois. Par contre, les résultats combinant la conversion des signaux microphoniques en ondes planes par « lasso » à la reproduction WFS d'ondes planes (Figure 52 et Figure 53) offrent une moins bonne performance. Le niveau de modulation d'amplitude est notamment plus élevé et les niveaux de pression acoustique à l'antenne sont aussi trop importants.

Dans l'ensemble, la conclusion indique que les algorithmes testés sont capables de reproduire un champ sonore causé par une source en mouvement. Les meilleurs résultats, comme pour le cas précédent, sont obtenus par problème inverse régularisé et par reproduction par ondes sphériques (sans WFS d'ondes planes). Le « lasso » peut, quant à lui, fournir une solution avec un nombre contrôle de sources de reproduction actives simultanément.

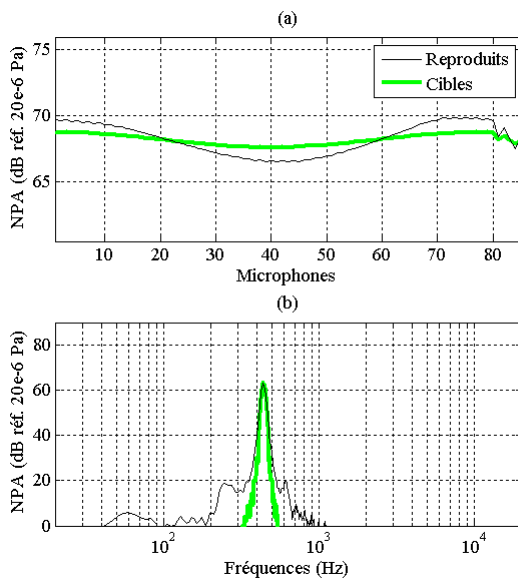


Figure 50 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec sources sphériques et par PIL (sans WFS d'ondes planes) : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

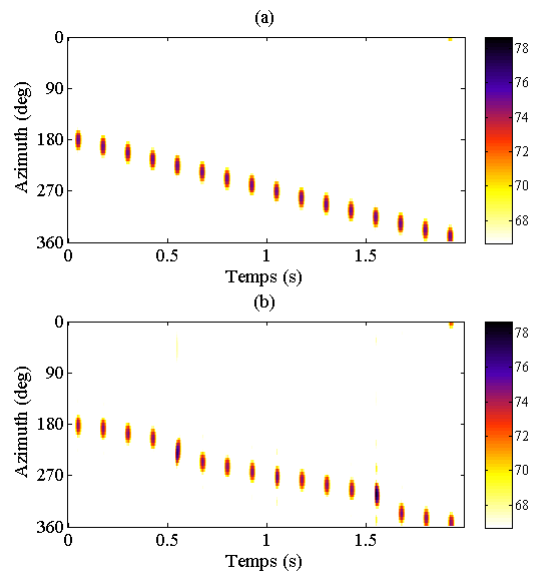


Figure 51 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec sources sphériques et par PIL (sans WFS d'ondes planes) : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

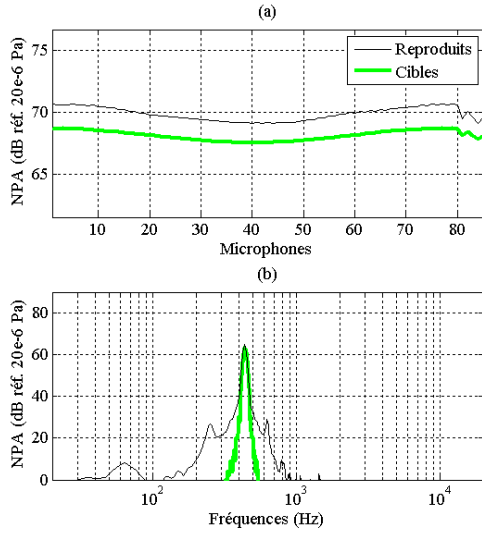


Figure 52 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec WFS d’ondes planes et par PIL : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

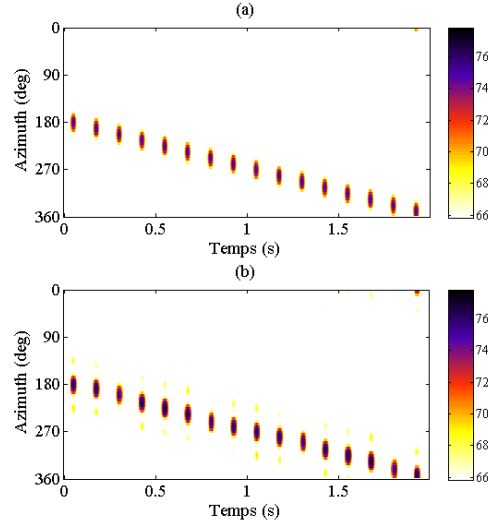


Figure 53 – Une source sonore en mouvement, reproduction avec WFS d’ondes planes et par PIL : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

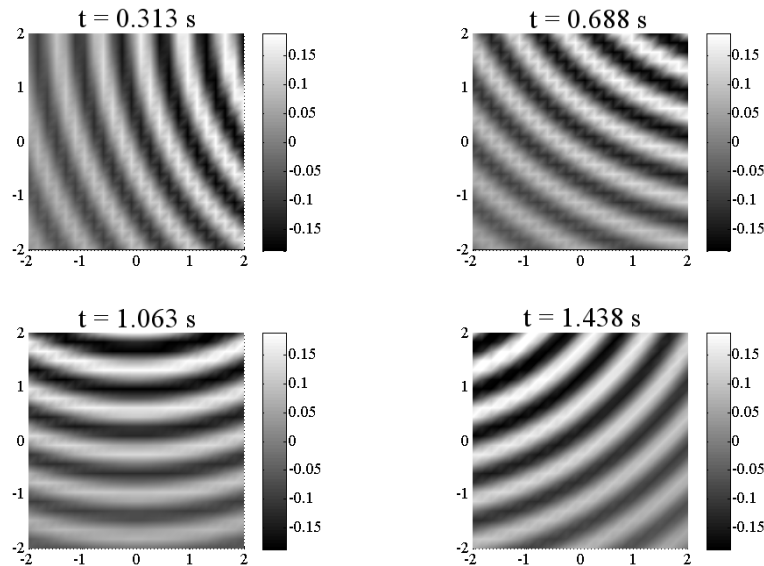


Figure 54 – Quatre instants du champ de pression cible (Pa) pour le cas de la source en mouvement.

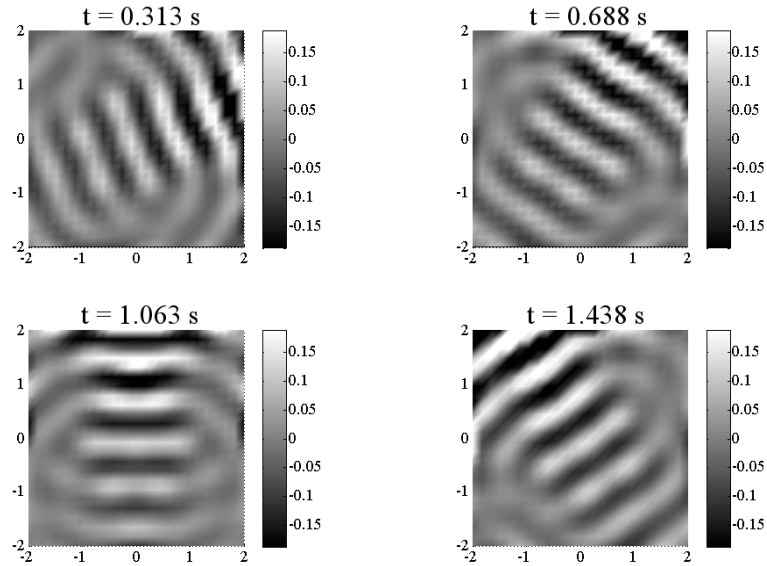


Figure 55 – Quatre instants du champ de pression reproduit (Pa) pour le cas de la source intermittente par le biais de la reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT.

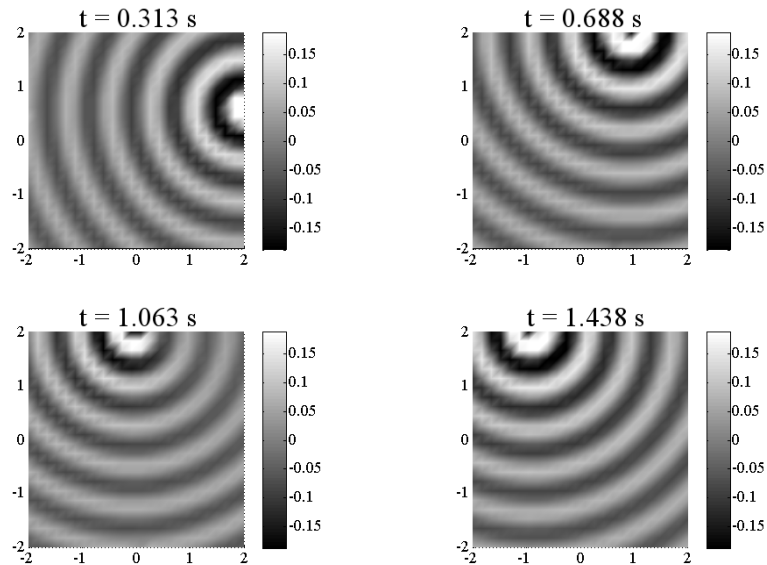


Figure 56 – Quatre instants du champ de pression reproduit (Pa) pour le cas de la source intermittente par le biais de la reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIL.

4.4.2.3 Cas 3 : Un environnement immersif

Le cas suivant, considéré pour les simulations, est celui d'un environnement immersif. Il est produit à partir d'une distribution de 91 ondes planes sur un hémisphère (soit dans un demi-espace, ce qui ne fait pas de différence avec une distribution sphérique puisque tous les réseaux sont dans le plan horizontal) qui émettent des bruits blancs filtrés passe-bas non corrélés. Les résultats sont présentés de la Figure 57 à la Figure 60 pour l'approche PIT et ceux utilisant l'algorithme du « lasso » (PIL) le sont de la Figure 61 à la Figure 64.

Les observations sont similaires aux cas précédents : le cas de reproduction avec des sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT ou PIL donne de meilleurs résultats. Cette fois, il est possible de noter cette observation par la distribution des NPA à l'antenne de microphones, mais aussi par le spectre au microphone de référence. Les cartes acoustiques, qui montrent bien une provenance de toutes les directions, sont aussi bien reproduites. Cela laisse sous-entendre que le système est capable de recréer un environnement immersif.

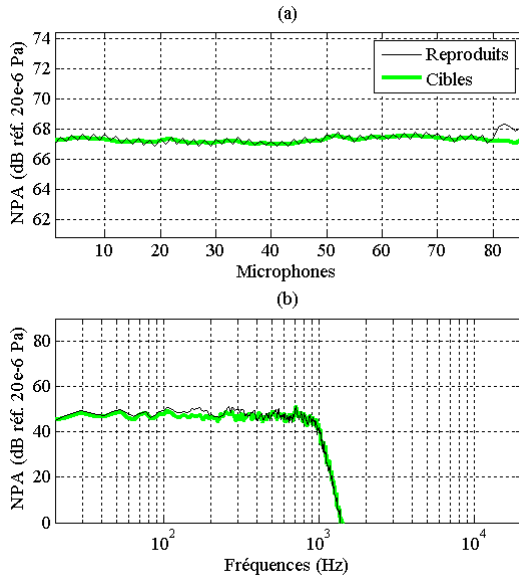


Figure 57 – Un champ diffus, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

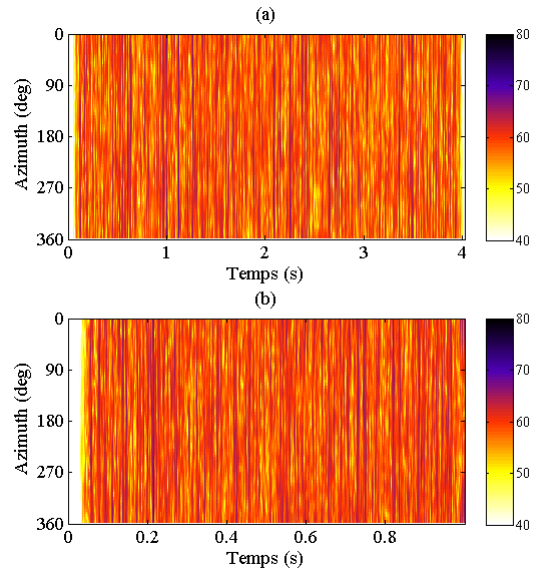


Figure 58 – Un champ diffus, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

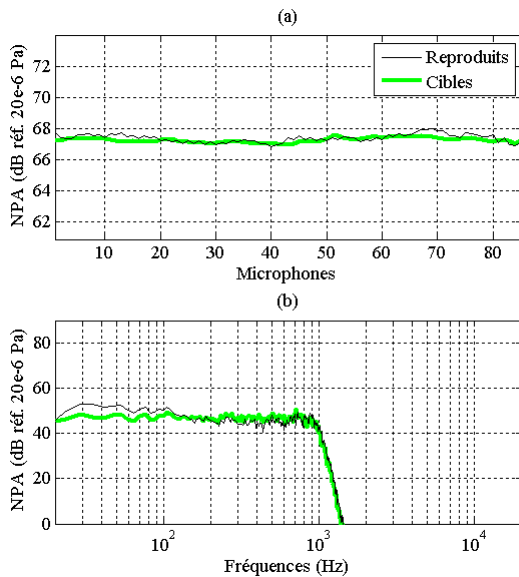


Figure 59 – Un champ diffus, reproduction par WFS d'ondes planes et par PIT : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

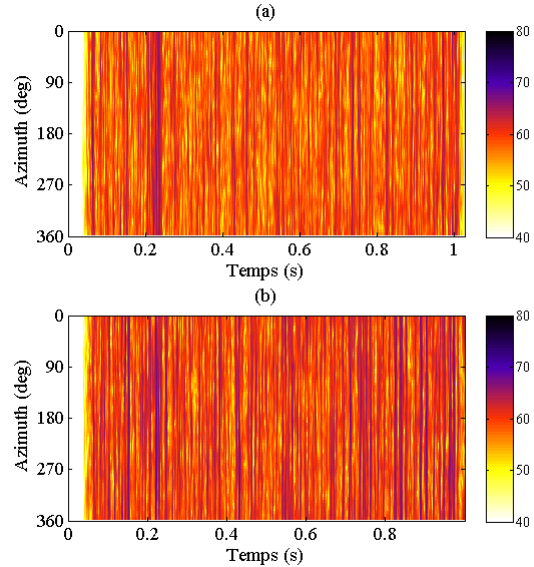


Figure 60 – Un champ diffus, reproduction par WFS d'ondes planes et par PIT : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

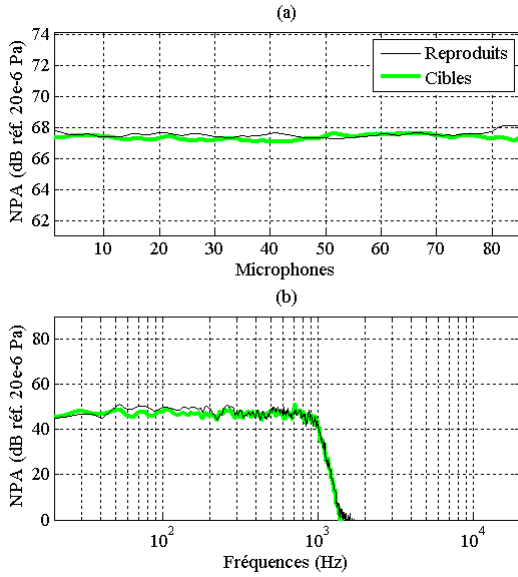


Figure 61 – Un champ diffus, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d’ondes planes) et par PIL : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

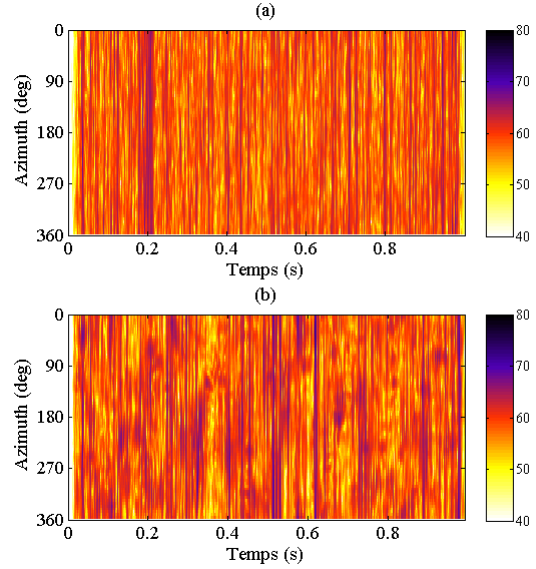


Figure 62 – Un champ diffus, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d’ondes planes) et par PIL : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

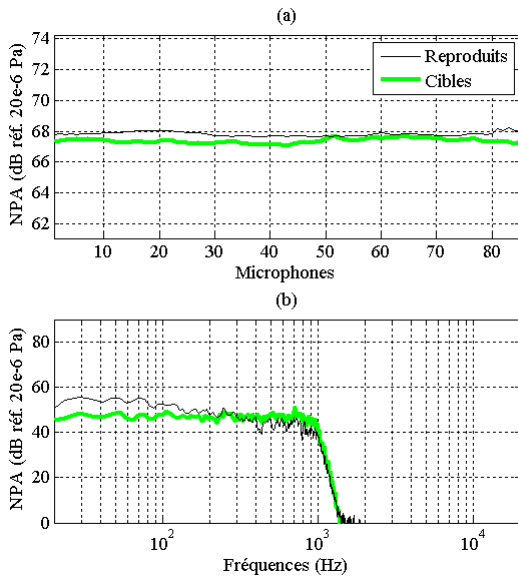


Figure 63 – Un champ diffus, reproduction par WFS d’ondes planes et par PIL : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

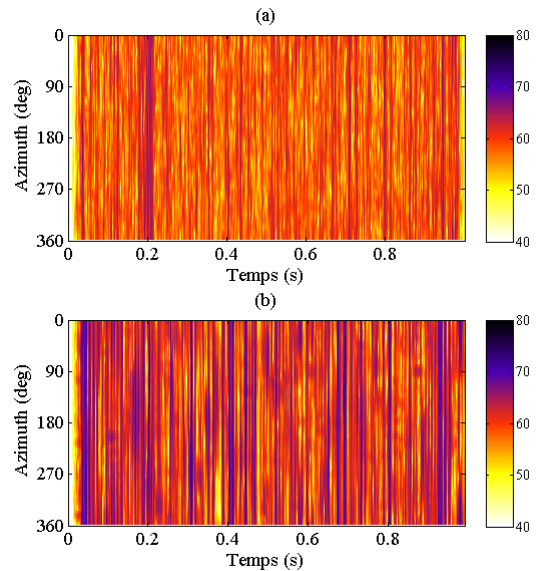


Figure 64 – Un champ diffus, reproduction par WFS d’ondes planes et par PIL : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

4.4.2.4 Cas 4 : Un environnement sonore mesuré sur site

En guise de dernière simulation présentée, un environnement sonore cible comme celui capté sur le site extérieur est utilisé. Pour cette simulation, seule la reproduction par ondes sphériques (sans WFS d'ondes planes) en champ libre est illustrée puisque c'est elle qui s'est démarquée lors des simulations précédentes. Le champ cible considéré est un véhicule en mouvement avec alarme de recul intermittente et à large bande, pour un extrait de quatre secondes, et pour une captation en espace extérieur, chez Graymont. Les résultats de simulation et d'évaluation objective des simulations pour l'algorithme PIT sont dévoilés à la Figure 65 et à la Figure 66. Pour ce qui est de la comparaison entre les niveaux de pression acoustique cible et reproduit (Figure 65[a]), deux observations sont notables. D'abord, dans l'ensemble, les NPA sont bien reproduits. Deuxièmement, les NPA cibles à l'antenne présentent quelques valeurs qui sortent du lot. Cela peut être causé par une calibration imparfaite, ou par toute autre problématique dans la chaîne d'acquisition. Par contre, on constate que les NPA reproduits lissent en fait ces imperfections. C'est une observation importante qui démontre qu'une captation imparfaite (microphone brisé, erreur de calibration, problème de connexion, etc.) saura être compensée par les algorithmes de reproduction de champs sonores. En ce qui concerne le spectre reproduit au microphone de référence, la Figure 65(b) montre qu'il s'approche du spectre cible. Finalement, la reproduction spatiale est valide elle aussi, comme il est possible de le voir par le biais des cartographies montrées à la Figure 66. Pour cet extrait, il est possible d'y distinguer clairement six émissions de l'alarme qui se déplace de 65 à 85 degrés.

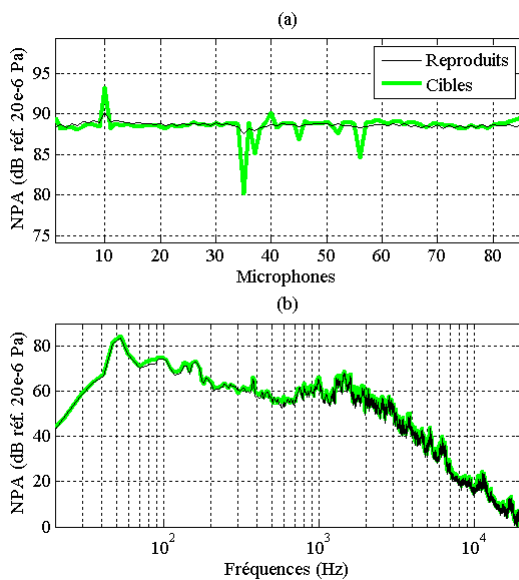


Figure 65 – Un champ mesuré sur site, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

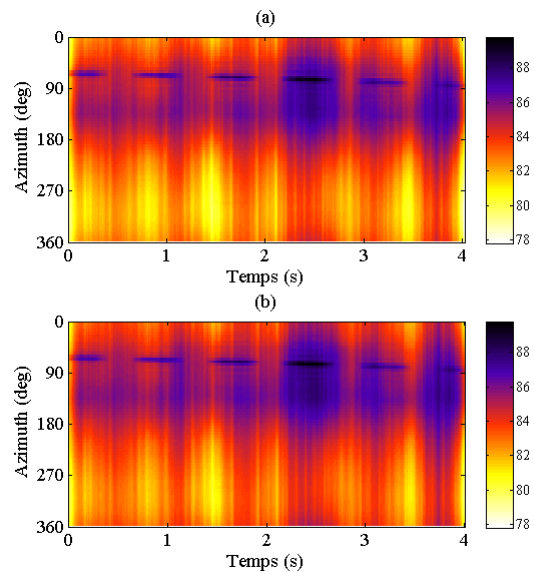


Figure 66 – Un champ mesuré sur site, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

Les résultats sont présentés de la même façon pour l'algorithme du « lasso » (PIL) par reproduction avec ondes sphériques (sans WFS d'ondes planes) pour la captation sur site à la Figure 67 et à la Figure 68. Même si, sur la base de ces résultats, la reproduction peut paraître moins fidèle que pour le cas précédent, les conclusions sont tout de même acceptables et la source en mouvement semble être reproduite. Aussi, il faut rappeler que le l'algorithme du « lasso » ne peut que réduire la qualité de la reproduction à l'antenne, mais au profit d'un nombre très restreint de sources actives par bloc et par fréquence ; ici, une seule source est active. Les avantages et les bénéfices pratiques du « lasso » ne peuvent être évalués que sur la base d'une écoute.

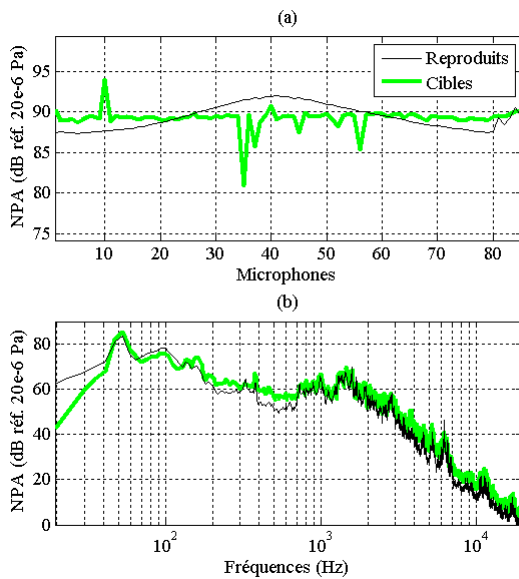


Figure 67 – Un champ mesuré sur site, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIL : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

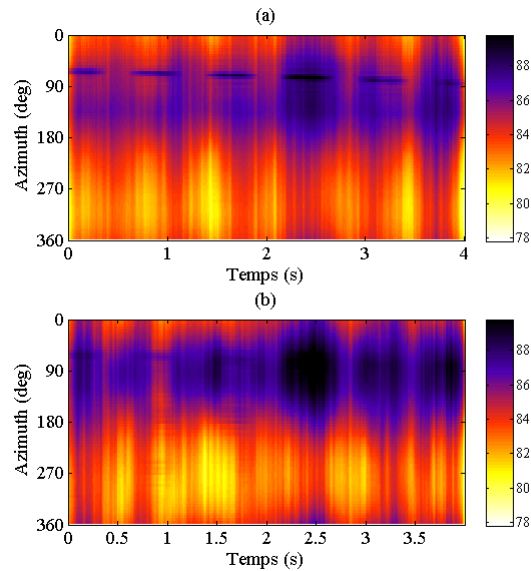


Figure 68 – Un champ mesuré sur site, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIL : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

4.4.2.5 Bilan des simulations théoriques

En guise de conclusion, les observations suivantes sont notées :

- La reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par problème inverse régularisé donne toujours de meilleurs résultats. Les résultats par WFS d'ondes planes combinées au problème inverse pour la conversion des signaux microphoniques en ondes planes sont néanmoins acceptables.
- Les meilleures performances sont toujours obtenues avec un paramètre de régularisation égal à 0,1 (soit 10 % de la première valeur singulière).
- Le système et la méthode proposés sont capables de reproduire des sources fixes, des sources en mouvement et des environnements immersifs.

- La réalisation de la conversion des signaux microphones en signaux d'ondes planes (pour WFS subséquente) ou en signaux de haut-parleurs par l'algorithme du « lasso » permet de réduire drastiquement (c'est aussi un paramètre ajustable) le nombre de sources de reproduction actives simultanément.
- L'algorithme du « lasso » fonctionne en ce sens qu'il réduit le nombre de sources de reproduction actives simultanément (ce qui éradique la présence de prééchos) même s'il occasionne une légère perte d'exactitude physique (mais les provenances des sons sont bien reconstruites, comme il est possible de le voir sur les cartographies acoustiques).

Pour les expériences qui suivent, les meilleurs paramètres et algorithmes établis lors des simulations sont utilisés pour valider la reproduction expérimentale pour différents cas.

4.5 Évaluation objective des environnements sonores reproduits

Cette section présente la partie cruciale de ce projet de recherche, soit l'évaluation physique des environnements sonores reproduits en comparaison avec les environnements sonores captés sur les sites visités. Étant donné leur nombre, seuls les meilleurs cas sont rapportés. Ceux qui sont écartés ne le sont pas parce qu'ils représentent des cas mauvais ou inacceptables (sauf pour certains cas extrêmes de parcimonie du « lasso »), mais parce qu'ils n'ajouteraient que peu d'informations supplémentaires. En effet, le but est de valider les cas d'ajustement de paramètres les plus prometteurs. Pour effectuer cette évaluation expérimentale, l'antenne de microphones, comme présentée plus tôt, a été installée au centre du réseau de haut-parleurs de la salle de WFS du GAUS. L'antenne était dans le même plan horizontal que celui du réseau de haut-parleurs. Lors de la reproduction, l'environnement recréé a été mesuré par l'antenne microphonique. Le traitement du signal est identique aux cas de simulation et correspond au diagramme de la Figure 3. Aussi, tous les cas de reproduction ici rapportés se basent sur les outils et fonctions développés par le GAUS pour cette étude, c.-à-d. sans l'utilisation des outils informatiques de WFS par Sonic Emotion^{MD}. Comme pour les simulations, tous les signaux sont de qualité audio (16 bits et fréquence d'échantillonnage de 48 kHz). La comparaison avec les environnements cibles se base toujours sur les mêmes métriques : NPA aux microphones de l'antenne, spectres au microphone de référence et cartographies acoustiques (cette fois normalisées en fonction du temps, c.-à-d. pour chaque temps les cartographies sont normalisées à 0 dB). Quatre cas sont rapportés : 1) environnement fixe extérieur, 2) source en mouvement en extérieur, 3) environnement fixe intérieur et 4) source en mouvement en intérieur.

Par contre, puisque les cas d'environnement cibles sont très complexes (autant en contenu fréquentiel qu'en distribution spatiale) et qu'il en est de même de la reproduction en laboratoire qui ne peut qu'ajouter des artefacts, les cartographies acoustiques cibles et reproduites ne sont présentées que de 250 à 1000 Hz pour plus de clarté. En effet, sous 250 Hz, la résolution des cartographies serait moins bonne et les basses fréquences, aussi dominantes en niveau, masqueraient la distribution spatiale des autres fréquences. Au-delà de 1000 Hz, des artefacts de repliement spatial pourraient aussi complexifier la lecture des cartographies. Il faut noter que ces artefacts de repliement spatial, qui s'ajoutent à la bonne reproduction, sont inévitables pour des réseaux discrets de transducteurs (Ahrens, 2012). Par ailleurs, ces artefacts sont toujours, dans le temps, ultérieurs au passage du front d'onde qui lui, même au-dessus de 1000 Hz, est bien reproduit. Ceci, en tenant compte de l'effet de précedence (Blauert, 1999) en localisation

auditive, garantit que la localisation pourra tout de même être adéquate. Ce qui est aussi discuté et vérifié du point de vue perceptif par Spors et coll. (2013). Les algorithmes testés sont ceux qui ont produit les meilleurs résultats lors des simulations.

Les résultats pour l'environnement extérieur en l'absence de source sonore en déplacement sont présentés à la Figure 69 et à la Figure 70 pour l'approche par problème inverse avec régularisation et reproduction par ondes sphériques (sans WFS d'ondes planes). Spectres de référence et cartographies sont bien reproduits. On note, par contre, une légère exagération des basses fréquences qui explique le dépassement de NPA. Cela est possiblement causé par le fait que le contenu de l'environnement cible comporte des basses fréquences qui correspondent à des fréquences de résonance des caissons de grave ou de la salle WFS du GAUS, ce qui résulte en des gains plus élevés que le gain scalaire utilisé pour calibrer les caissons de grave. Les positions des sources sont bien recréées quoique moins précisément que pour la cible. Contrairement aux simulations, mais comme pour les environnements sonores captés, on note plus de variations de niveaux entre les microphones. Cela peut être causé par les imprécisions de la calibration ou par des canaux de gains variés dans la chaîne multicanale d'acquisition.

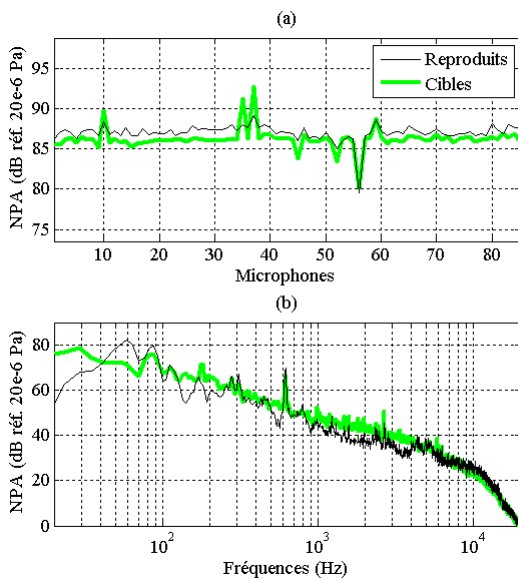


Figure 69 – Mesure sur site, cas extérieur fixe, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

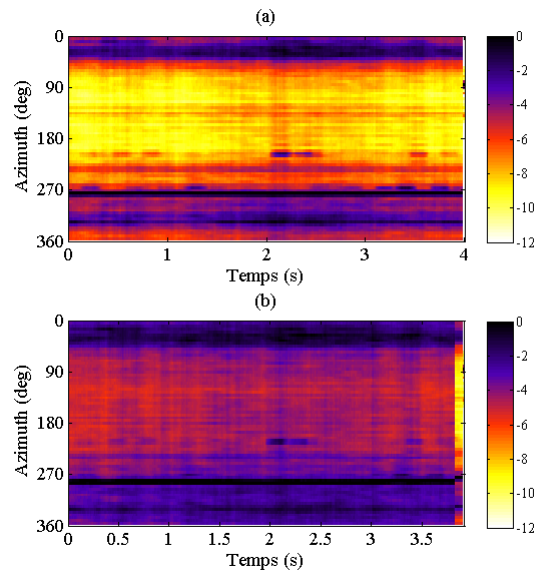


Figure 70 – Mesure sur site, cas extérieur fixe, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

De la même façon, les résultats pour le cas de la source en mouvement en environnement extérieur sont illustrés de la Figure 71 à la Figure 74 pour la reproduction avec ondes sphériques (sans WFS d'ondes planes) par problème inverse régularisé ou avec l'algorithme du « lasso » (dans ce cas avec huit sources actives simultanément par bloc et par fréquence). Sur la base des critères utilisés, la reproduction est satisfaisante et il est même possible de voir que la source en

mouvement est bien reproduite. Selon les cartographies, l'algorithme du « lasso » donne de moins bons résultats, mais il faut garder à l'esprit que seules huit sources sont actives simultanément. Sur les cartographies normalisées (cibles et reproduites), on voit bien la source en mouvement. Elle correspond aux traits fins sur les cartographies qui sont causés par l'alarme à large bande qui est la source dominante dans cette scène. Les deux sources (à environ 45 et 135 degrés) qui se répètent en l'absence de l'alarme intermittente correspondent en fait au son du concasseur et à sa réflexion sur la falaise opposée. D'un autre côté, comme mentionné plus tôt, l'algorithme du « lasso » souffre de modulations en amplitude, déficience qui pourrait être corrigée dans le futur.

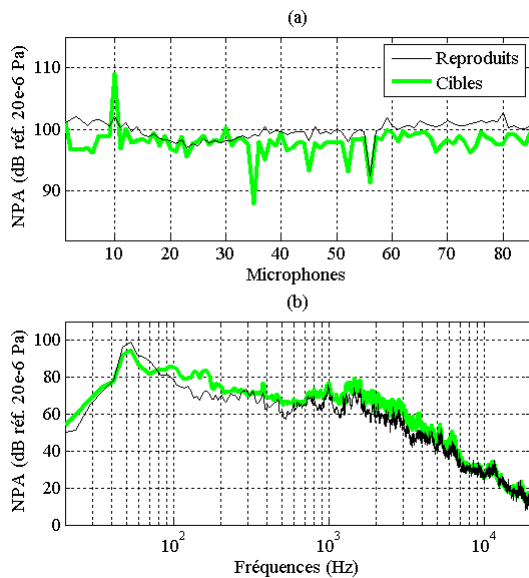


Figure 71 – Mesure sur site, cas extérieur, source en mouvement, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

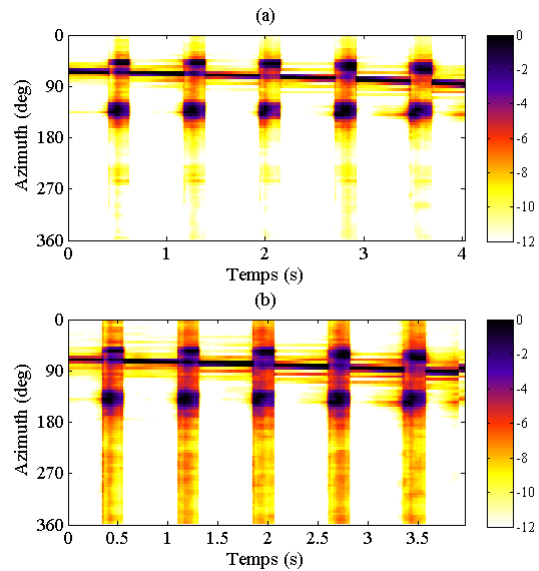


Figure 72 – Mesure sur site, cas extérieur, source en mouvement reproduction avec sources sphériques (sans WFS d'ondes planes) et par PIT : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

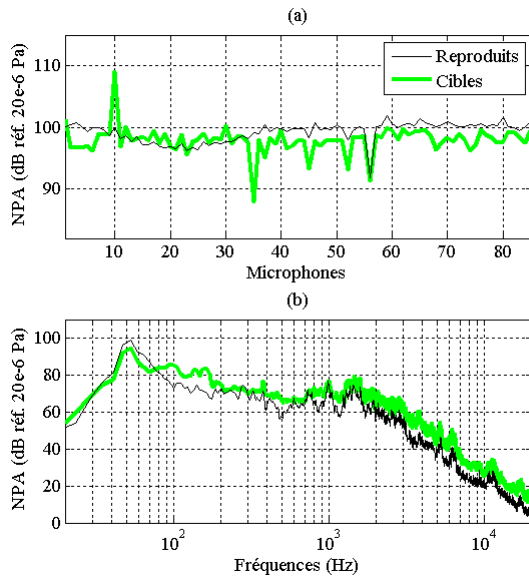


Figure 73 – Mesure sur site, cas extérieur, source en mouvement, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d’ondes planes) et par PIL : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

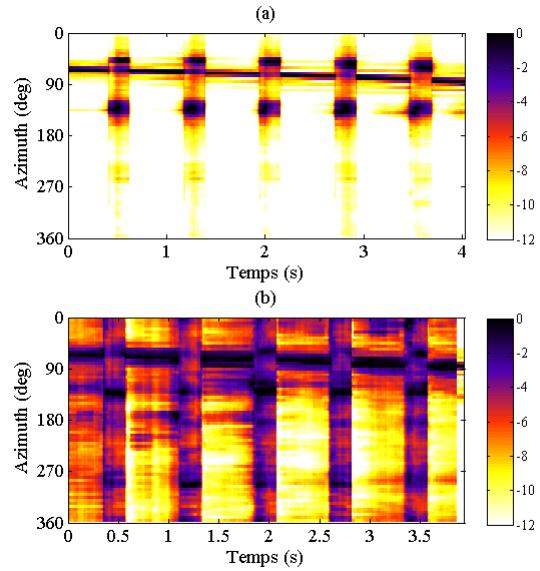


Figure 74 – Mesure sur site, cas extérieur, source en mouvement reproduction avec sources sphériques (sans WFS d’ondes planes) et par PIL : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

Les résultats pour les cas de sources fixes et de sources en mouvement pour l’environnement sonore intérieur sont présentés de la Figure 75 à la Figure 78. Encore une fois, ces résultats démontrent que la reproduction est efficace, autant pour les NPA à l’antenne de microphones, que pour les spectres reproduits et les cartographies acoustiques. Par contre, la source en mouvement dans un espace intérieur est plus difficile à déceler dans la cartographie de l’environnement reproduit. D’un autre côté, une exagération du contraste de cette cartographie permet de voir la trace de la source en mouvement dans l’environnement reproduit.

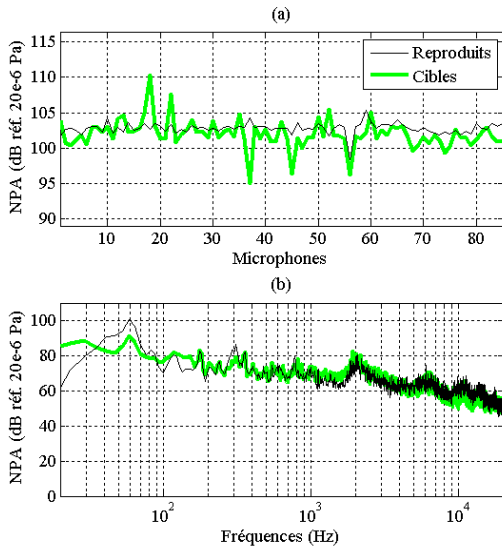


Figure 75 – Mesure sur site, cas intérieur fixe, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d’ondes planes) et par PIT : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

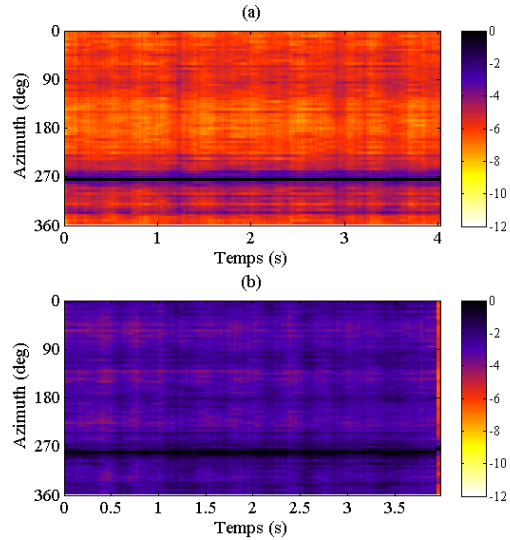


Figure 76 – Mesure sur site, cas intérieur fixe, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d’ondes planes) et par PIT : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

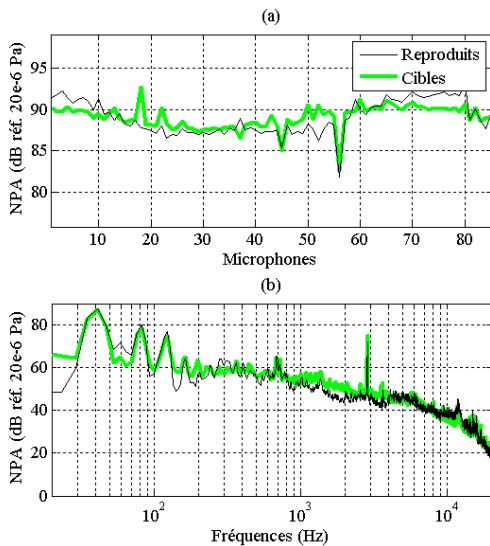


Figure 77 – Mesure sur site, cas intérieur, source en mouvement, reproduction avec sources sphériques (sans WFS d’ondes planes) et par PIT : (a) niveaux de pression acoustique, (b) spectres de référence.

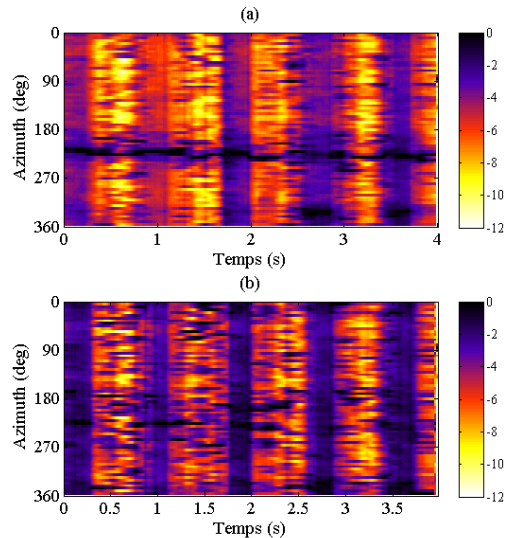


Figure 78 – Mesure sur site, cas intérieur, source en mouvement reproduction avec sources sphériques (sans WFS d’ondes planes) et par PIT : (a) carte acoustique cible, (b) carte acoustique reproduite.

4.5.1 Bilans des évaluations objectives

À la lueur de ces résultats, il est possible de conclure que le système de reproduction du GAUS ainsi que les algorithmes testés sont capables de reproduire des environnements sonores extérieurs et intérieurs (présentant donc plus de réverbération et possiblement de directions de propagation du son), et ce, autant pour des cas de sources sonores fixes qu'en mouvement.

Le premier point discutable est le niveau sonore un peu trop faible ou un peu trop fort rapporté pour différents cas de champs cibles même si le traitement du signal est le même. Cela dépend essentiellement du contenu fréquentiel de l'environnement sonore cible. Deux recommandations sont formulées à ce sujet. D'abord, en prévision de tout test d'écoute, le niveau du champ de pression sonore reproduit devrait être mesuré puis comparé à celui de la cible pour, par la suite, l'ajuster de façon artificielle (par les gains globaux des caissons de grave et des haut-parleurs) afin que le niveau rejoigne celui de la cible, et ce, pour chaque cas reproduit. Deuxièmement, les réponses en fréquence en champ libre des haut-parleurs devraient être mesurées pour concevoir un filtre d'égalisation moyen des haut-parleurs. Aussi, les résultats du « lasso » pourraient être améliorés dans le futur.

4.6 Création de démos pratiques et des modifications paramétriques d'environnements sonores

À la suite des évaluations objectives et de l'identification des meilleurs paramètres et algorithmes de reproduction présentés à la section précédente, la banque d'enregistrements *in situ* réalisés au début de l'étude a été traitée afin de créer une série de démonstrations pratiques de plus longues durées et avec plus de variations de cas. En effet, il faut rappeler que les évaluations physiques ont été effectuées pour des échantillons de quatre secondes. Ces démonstrations peuvent être classées selon deux types : 1) reproduction intégrale des environnements captés avec l'antenne de microphones et 2) reproduction paramétrique des environnements captés en vue de modifications manuelles (avec la suite logicielle de WFS paramétrique par Sonic Emotio^{MD}).

Pour le premier type, les environnements reproduits se basent sur l'approche combinant le problème inverse régularisé avec sources de reproduction sphériques (sans WFS d'ondes planes) ou sur celle combinant le problème inverse régularisé avec ondes planes et WFS d'ondes planes. Pour le second type, des algorithmes similaires sont utilisés pour l'extraction de signaux, mais la restitution paramétrique, avec possibilité de modification manuelle et interactive de l'environnement se fait plutôt avec le logiciel de WFS de Sonic Emotion^{MD} en combinant, par exemple, 16 ondes planes virtuelles pour l'arrière-plan et huit sources virtuelles ponctuelles pour les sources de bruit en avant-plan ou en mouvement. Puisque l'utilité de ces démonstrations pratiques tient plus dans la possibilité de montrer le réalisme et la qualité audio des reproductions à des chercheurs potentiels ou à des visiteurs, les démonstrations pratiques n'ont pas été soumises à des évaluations physiques.

Ce projet de recherche a aussi été la source de différents travaux et explorations qui ne sont pas détaillés dans ce rapport. Un bon exemple est le traitement des signaux des microphones de

proximité par l'entremise des algorithmes de contrôle actif. Le détail de ces développements est disponible dans une publication (Gauthier et coll., 2014)²⁴.

²⁴ <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17358>

5. CONCLUSION

Il est généralement admis qu'une mauvaise audibilité ou une mauvaise localisation sonore des alarmes peut causer des accidents en milieux de travail. Des études de perception et de localisation des alarmes sonores ont déjà été réalisées dans le passé, mais il est facile de constater que ces études peuvent devenir rapidement complexes lorsque les chercheurs désirent :

- étudier l'effet de plusieurs paramètres (sources, environnements, alarmes) sur la perception;
- inclure des sujets humains;
- étudier des environnements sonores réalistes.

Le but de cette étude était de vérifier la capacité des techniques de reproduction de champs acoustiques (combinant captations *in situ* avec antennes de microphones et reproduction par réseaux de haut-parleurs) à imiter deux environnements sonores représentatifs des milieux de travail où des véhicules en mouvement avec alarmes de recul sont présents.

Pour investir cette possibilité, une antenne de 85 microphones a d'abord été assemblée pour réaliser des captations d'environnements sonores sur deux sites industriels, un intérieur et un extérieur. Durant ces campagnes de mesures, des sessions d'enregistrement d'une dizaine d'heures et plus de 50 extraits sonores variés (avec et sans sources sonores en mouvement) ont été réalisés et documentés. Par la suite, ces mesures ont été comparées avec les gabarits de reproductibilité (aussi réalisés dans le cadre de cette étude) pour le système de *Wave Field Synthesis* (WFS) par Sonic Emotion^{MD} du GAUS. Ces comparaisons ont permis de conclure que la plupart des captations pouvaient être reproduites. Le plus grand défi étant toujours les cas de niveaux sonores élevés.

Finalement, des simulations théoriques et des mesures expérimentales de la reproduction des environnements sonores ont été réalisées. Différents algorithmes ont été comparés : 1) problème inverse avec sources de reproduction sphériques, 2) problème inverse avec sources de reproduction planes et WFS d'ondes planes, 3) algorithme du « lasso » avec sources de reproduction sphériques, 4) algorithme du « lasso » avec sources de reproduction planes et WFS d'ondes planes. À la lueur de ces résultats, les meilleures performances en matière d'évaluation physique ont été obtenues pour le problème inverse avec sources de reproduction sphériques. L'algorithme du « lasso » reste un bon candidat pour accroître la précision spatiale de la reproduction (au risque de perdre une certaine exactitude physique lors de la reproduction). Mais ce dernier algorithme devrait être légèrement amélioré. À ce sujet, les pistes envisagées sont : augmentation à plus de huit du nombre de sources actives et optimisation de la programmation pour accroître l'efficacité du calcul. L'évaluation physique des champs sonores reproduits a été effectuée sur la base de différentes métriques : spectre de pression acoustique, niveau de pression acoustique, sonie spécifique et sonie globale aux microphones de l'antenne. Même si dans ce rapport, seuls les spectres et les niveaux ont été présentés, les autres métriques ont aussi été vérifiées et ont conduit à des conclusions similaires. De plus, pour évaluer la qualité spatiale de la reproduction, d'autres métriques ont été utilisées : cartographie acoustique par formation de voix en fonction du temps, et champs acoustiques instantanés dans le cas des simulations théoriques.

En plus des mesures documentées et rapportées dans ce rapport, différentes démonstrations d'application de l'acoustique virtuelle, sur la base des mesures effectuées, ont été réalisées. La plupart d'entre elles combinent 16 ondes planes virtuelles (sur 360 degrés) pour la création d'un arrière-plan, la combinaison de huit sources virtuelles ponctuelles pour la création d'un avant-plan, et la possibilité de déplacer ces sources de façon interactive.

5.1.1 Recommandations

Les recommandations suivantes sont formulées :

- La captation d'environnements sonores par antenne de microphones peut être utilisée pour la reproduction d'environnements sonores.
- La reproduction d'environnements sonores correspondant à des milieux de travail à risque peut être effectuée aux laboratoires du GAUS avec le réseau de 96 haut-parleurs et de quatre caissons de grave.
- L'ensemble des moyens technologiques proposés ici peut être utilisé pour la création, en laboratoire, de toute une panoplie d'environnements sonores de types industriels pouvant servir dans diverses études perceptives liées à des essais faisant intervenir des sujets humains dans un contexte de SST. Cela peut porter sur l'efficacité des protecteurs auditifs et des systèmes de communication, sur la notion de confort et de danger en milieu bruyant, sur la capacité à communiquer dans le bruit, ainsi que sur l'audibilité et la localisation des alarmes et autres avertisseurs sonores, sujets qui ont été étudiés plus spécifiquement dans cette étude.
- Pour l'application des méthodes étudiées, dans un contexte de tests d'écoute avec sujets humains, la reproduction pourrait être améliorée avec deux traitements supplémentaires :
 - Égalisation moyenne de la réponse en fréquence des haut-parleurs en champ libre ;
 - Mesure du niveau reproduit, comparaison avec le niveau et ajustement du gain global au besoin pour retrouver le niveau visé, pour chaque cas reproduit.

5.1.2 Limites des conclusions apportées

Les conclusions de ce projet de recherche disposent de certaines limites. Ces dernières sont les suivantes :

- L'ensemble des résultats et interprétations se fondent, comme ce fut défini par les objectifs de l'étude, sur des mesures et des comparaisons physiques de champs reproduits. Conséquemment, il n'est pas possible d'extrapoler les conclusions et de statuer sur la validité perceptive des techniques proposées. Par contre, comme souvent encouru dans un contexte d'ingénierie, ceci n'est pas considéré comme étant spécialement problématique puisque les simulateurs doivent d'abord respecter des évaluations physiques de leurs performances.
- Les comparaisons des méthodes suggèrent que les meilleures performances en matière d'évaluation physique ont été obtenues pour le problème inverse avec sources de reproduction sphériques. Cette conclusion devrait être comparée avec des résultats de

tests perceptifs (voir les propositions de pistes de recherche présentées à la section suivante).

- L'évaluation physique des méthodes de reproduction d'environnements sonores est basée sur une certaine configuration géométrique de haut-parleurs et de microphones. Il n'est donc pas possible d'extrapoler les résultats de cette étude, à savoir est-ce que ces configurations étaient optimales? Par contre, il faut garder à l'esprit que la configuration plane et carrée des 96 haut-parleurs (par opposition à une configuration sphérique ou circulaire) introduit plusieurs avantages pratiques spécialement adaptés au contexte futur d'études de la perception des alarmes : espace permettant la présence de plusieurs auditeurs, espace permettant la reproduction d'un poste de travail, possibilité de se déplacer, etc.

5.1.3 Pistes et opportunités de recherche

Les pistes de recherche futures peuvent être classées en deux catégories : 1) perceptives avec sujets humains et 2) technologiques.

En ce qui concerne la perception et les sujets humains, les pistes suivantes ont été établies :

- Réalisation préliminaire de tests perceptifs et d'évaluations perceptives des algorithmes et paramètres proposés dans ce rapport pour des cas d'environnements simples (comme ceux présentés à la section 4.4.2). Le but serait alors d'identifier la meilleure solution technologique, du point de vue de la perception, avant de passer en phase de tests d'écoute dédiés à la perception des alarmes.
- Étude de perception des alarmes en combinant l'environnement ambiant capté par une antenne de microphones avec des simulations de véhicules en mouvement ajoutées à la scène captée.
- Exemples d'études des effets d'un facteur spécifique :
 - Perception et localisation des alarmes en tenant compte des individus avec pertes auditives dans diverses conditions de protection auditive.
 - Effets des mouvements de la tête sur la capacité de détecter et de localiser les alarmes en conditions réalistes de travail (travailleur effectuant une tâche en parallèle).
 - Effets des coquilles de protection actives et passives sur la perception et la localisation des alarmes de recul.
 - Perception des alarmes en espace clos avec réflexion, réverbération, etc., impliquant une modification paramétrique de l'environnement.
 - Effets sur la localisation auditive des alarmes de recul lorsque plusieurs alarmes sont activées simultanément.
 - Immersion de travailleurs dans des environnements sonores multiples et typiques de milieu de travail pour étudier le confort des protecteurs auditifs.
 - Études sur la communication dans le bruit avec des travailleurs.

Sur le plan des technologies concernées, les pistes de recherche suivantes ont été déterminées :

- Développement de méthodes systématiques qui permettent la captation et la reproduction paramétrique d'environnements sonores. Par exemple, séparation automatique d'un environnement complet en éléments simplifiés pour reconstruction paramétrique avec variations, extraction des spectres d'arrière-plan.
- Développement de méthodes de reproduction d'environnements sonores prescrits non pas par des captations sonores, mais par des simulations ou des modèles théoriques (simples ou complexes). Par exemple, reproduction de courbes de décroissance spatiale prescrites en dB en fonction de la distance, reproduction de cartographies acoustiques classiques prescrites en dB en fonction de l'espace.
- Investigation plus fouillée quant à la capacité des algorithmes du « lasso » et de l'*elastic-net* à permettre la réduction du nombre de microphones nécessaires pour une captation *in situ*. Cela pourrait conséquemment alléger la création de vastes banques d'environnements sonores captés pour des études perceptives avec sujets humains.
- Réduction des artéfacts de modulation d'amplitude issus de l'algorithme du « lasso ».
- Amélioration de la mise en œuvre des algorithmes du « lasso » et de l'*elastic-net* pour diminuer le temps de calcul.
- Reproduction tridimensionnelle avec sources de reproduction en dehors du plan horizontal.
- À plus long terme : réalité virtuelle complète avec aspects visuels.

BIBLIOGRAPHIE

- Bregman, A.S. *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*, The MIT Press, 1990, 773 p.
- Ahrens, J., *Analytical Methods for Sound Field Synthesis*, Springer, 2012, 299 p.
- Ali, S.A. « Industrial noise levels and annoyance in Egypt ». *Applied Acoustics*, vol. 72, no 4, 2011, p.221–225.
- Arbogast, T.L., Mason, C.R. et Kidd, G. « The effect of spatial separation on informational and energetic masking of speech ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 112, no 5, 2002, p.2086-2098.
- Ballou, G. (éd.) *Handbook for sound engineers*, Focal Press, 2008, 1784 p.
- Begault, D.R., « Auditory and non-auditory factors that potentially influence virtual acoustic imagery », in *AES 16th International Conference on Spatial Sound Reproduction*, Rovaniemi, Finlande, 1999.
- Begault, D.R., Wenzel, E.M., Anderson, M.R. « Direct Comparison of the Impact of Head Tracking, Reverberation, and Individualized Head-Related Transfer Functions of the Spatial Perception of a Virtual Speech Source ». *Journal of the Audio Engineering Society*, 2001, Vol. 49, p. 904-916.
- Berckmans D., Janssens K., Van der Auweraer, H., Sas, P., et Desmet, W. « Model-based synthesis of aircraft noise to quantify human perception of sound quality and annoyance ». *Journal of Sound and Vibration*, vol 311, 2008, p.1175–1195.
- Berkhout, A.J., de vries, D., et Vogel, P. « Acoustic control by wave field synthesis ». *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 93, no 5, 1993, p.2764–2778.
- Bertet, S., Daniel, J., Parizet, É., Gros, L., Warusfel, O. « Investigation of the perceived spatial resolution of higher order Ambisonics sound fields: A subjective evaluation involving virtual and real 3D microphones », in *Audio Engineering Society 30th International Conference*, Saariselkä, Finlande, 2007.
- Bharitkar, S. et Kyriakakis, C. *Immersive Audio Signal Processing*, Springer, 2006, 215 p.
- Bijsterveld, K. *Mechanical Sound - Technology, Culture, and Public Problems of Noise in the Twentieth Century*, MIT Press, 2008, 349 p.
- Blauert, J. *Spatial hearing - The psychophysics of human sound localization*, The MIT Press, 1999, 494 p.
- Blouin, S., *Bilan de connaissances sur les dispositifs de détection de personnes lors des manoeuvres de recul des véhicules dans les chantier de construction*, Rapport B-067, IRSST, 2005.
- Bolduc, A., Gauthier, P.-A., Ramanana, T., Berry, A. « Sound Field Reproduction of Vibroacoustic Models: Application to a Plate with Wave Field Synthesis », in *AES 55th International Conference on Spatial Audio*, Helsinki, Finlande, 2014.
- Breebaart, J. et Faller, C. *Spatial Audio Processing: MPEG Surround and Other Applications*, Wiley, 2007, 209 p.

- Ceoen, C., « Comparative Stereophonic Listening Tests ». *Journal of the Audio Engineering Society*, 1972, Vol. 20, No 1, p. 19-27.
- Czuchaj, J., Śliwiński, A. et Środecki, K. « Noise sources and acoustic properties of workrooms in the plants of food-processing and pharmaceutical industry ». *Applied Acoustics*, Vol. 62, No 10, 2001, p.1141–1156.
- Fernández, M.D., Quintana, S., Chavarria, N., Ballesteros, J.A. « Noise exposure of workers of the construction sector ». *Applied Acoustics*, vol. 70, no 5, 2009, p.753–760.
- Fernández, M.D., Recuero, M. et Blas, J.M. « Definition of a labelling code for the noise emitted by machines ». *Applied Acoustics*, vol. 69, no 2, 2008, p.141–146.
- Gauthier, P.-A., Camier, C., Gauthier, O., Pasco, Y., Berry, A. « Sound field reproduction of real flight recordings in cabin mock-up », in *Audio Engineering Society 52th International Conference*, Guildford, Angleterre, 2013.
- Guasch, O., Magrans, F.X. et Rodriguez, P. V. « An inversion modelling method to obtain the acoustic power of the noise sources in a large factory ». *Applied Acoustics*, vol. 63, no 4, 2002, p. 401–417.
- Guastavino, C., Katz, B.F.G. « Perceptual evaluation of multi-dimensional spatial audio reproduction ». *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 116, No 2, 2004, p.1105–1115.
- Guastavino, C., Katz, B.F.G., Polack J.-D., Levitin, D.J., Dubois, D. « Ecological Validity of Soundscape Reproduction ». *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 91, 2005, p.333–341.
- Hamasaki, K., Hiyama, K., Nishigichi, T., Ono, K. « Advanced Multichannel Audio Systems with Superior Impression of Presence and Reality », in *Audio Engineering Society 116th Convention*, Berlin, Germany, 2004.
- Harvey, F.K., Schroeder, M.R., « Subjective Evaluation of Factors Affecting Two-Channel Stereophony ». *Journal of the Audio Engineering Society*, 1961, Vol. 9, No 1, p. 19-28.
- Hay, B. « Noise consents for work on construction sites ». *Applied Acoustics*, vol. 10, 1977, p. 259-261.
- Hay, B. « International legislation on external industrial noise ». *Applied Acoustics*, vol. 8, no 2, 1975, p.133–148.
- Hiyama, K., Komiyama, S., Hamasaki, K. « The minimum number of loudspeakers and its arrangement for reproducing the spatial impression of diffuse sound field », in *Audio Engineering Society 113th Convention*, Los Angeles, USA, 2002.
- Jot, J.-M., Larcher, V., Pernaux, J.M., « A comparative study of 3-D audio encoding and rendering techniques », in *Audio Engineering Society 16th International Conference*, Rovaniemi, Finlande, 1999.
- Kleiner, M., Dalenback, B.-I., Svensson, P. « Auralization - An overview ». *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 41, No 11, 1993, p. 861–875.
- Koyama, S., Furuya K., Haneda, Y., Saruwatari, H. « Source-Location-Informed Sound Field Recording and Reproduction ». *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 9, no 5, 2015, p.881–894.

Laroche, C., Tran Quoc, H., Héту, R., McDuff, S. « “Detectsound”: A computerized model for predicting the detectability of warning signals in noisy workplaces ». *Applied Acoustics*, Vol. 32, No 3, 1991, p.193–214.

Laroche, C. « Détermination des caractéristiques acoustiques optimales des alarmes de recul », source inconnue, 1995, p. 19-20.

Lee, J.S. et Kong, D. « Investigation of hearing protection effects in an extreme noise environment with an alarm location problem ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 36, No 8, 2006, p.685–693.

Lilis, G.N., Angelosante, D. et Giannakis, G.B. « Sound field reproduction using the lasso ». *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, Vol. 18, No 8, 2010, p.1902–1912.

Marsh, K.J. « Specification and prediction of noise levels in oil refineries and petrochemical plants ». *Applied Acoustics*, Vol. 9, No 1, 1976, p.1–15.

McCoy, D., « Distortion of Auditory Perspective Produced by Interchannel Mixing at High and Low Audio Frequencies ». *Journal of the Audio Engineering Society*, 1961, Vol. 9, No 1, p. 13-17.

Mellert, V., Baumann I., Freese, N., Weber R., « Impact of sound and vibration on health, travel comfort and performance of flight attendants and pilots ». *Aerospace Science and Technology*, vol. 12, 2008, p.18–25.

Moller, H., Sorensen, M.F., Jensen, C.B., Hammershoi, D. « Binaural Techniques : Do We Need Individual Recordings ». *Journal of the Audio Engineering Society*, 1996, Vol. 44, p. 451-469.

Moore, H.B., « Effect of System Parameters on the Stereophonic Effect ». *Journal of the Audio Engineering Society*, 1961, Vol. 9, No 1, p. 7-12.

Nakayama, T., Miura, T., Kosaka, O., Okamoto, M., Shiga, T. « Subjective Assessment of Multichannel Reproduction ». *Journal of the Audio Engineering Society*, 1971, Vol. 19, No 2, p. 744-751.

NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), *Worker Health Chartbook*, 2004.

Park, M.Y., Casali, J.G., « An Empirical Study of Comfort Afforded by Various Hearing Protection Devices: Laboratory versus Field Results ». *Applied Acoustics*, vol. 34, 1991, p.151–179.

Pichette, L. « Quelle technologie rend les alarmes de recul plus sécuritaires ? », *Prévention au travail*, été 2013, p.24–26.

Pheasant, R., Horoshenkov, K., Watts, G., Barrett, B. « The acoustic and visual factors influencing the construction of tranquil space in urban and rural environments tranquil spaces-quiet places? ». *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 123, No 3, 2008, p.1446–1457.

Pheasant, R., Watts, G., Horoshenkov, K., « Validation of a Tranquillity Rating Prediction Tool ». *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 95, no 6, 2009, p.1024–1031.

- Pulkki, V., Hirvonen, T. « Localization of Virtual Sources in Multichannel Audio Reproduction ». *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2005, Vol. 13, No 1, p. 105–119.
- Pulkki, V., « Spatial sound reproduction with directional audio coding ». *Journal of the Audio Engineering Society*, 2007, Vol. 55, No 6, p. 503–516.
- Ramanana, T., Gauthier, P.-A., Bolduc, A., et Berry, A. « Sound Reproduction by Beamforming Capture and Wave Field Synthesis », in *AES 55th International Conference on Spatial Audio*, Helsinki, Finlande, 2014.
- Rumsey, F. *Spatial audio*, Focal Press, 2001, 240 p.
- Sakamoto M., Gotoh T., Kogure, T., Shimbo, M. « Controlling Sound-Image Localization in Stereophonic Reproduction: Part II ». *Journal of the Audio Engineering Society*, 1982, Vol. 30, No 10, p. 719-712.
- Sharma, O., Mohanan, V. et Singh, M., « Noise emission levels in coal industry ». *Applied Acoustics*, Vol. 54, No 1, 1998, p.1–7.
- Sheng, X., Han, J. et Hao, M., « Sound Analysis and Synthesis for Audio Simulation System of Flight Simulator », in *4th International Conference on Computer Modeling and Simulation*, Singapore, 2013, p.160–164.
- Smith, R.L. et Lucaccini, L.F. « Vigilance Research : Its Application To Industrial Problems ». *Human Factors*, Vol. 11, No 2, 1969, p.149–156.
- Soulodre, G.A., Lavoie, M.C., Norcross, S.G. « Objective Measures of Listener Envelopment in Multichannel Surround Systems ». *Journal of the Audio Engineering Society*, 2003, Vol. 51, No 9, p. 826-840.
- Spors, S., Wierstorf, H., Raake, A., Melchior, F., Frank M., et Zotter, F. « Spatial sound with loudspeakers and its perception: A review of the current state ». *Proceedings of the IEEE*, Vol. 101, No 9, 2013, p.1920–1938.
- Stern Jr., R.M. et Colburn, H.S. « Theory of binaural interaction based on auditory-nerve data IV. A model for subjective lateral position ». *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 64, No 1, 1978, p.127–140.
- Tibshirani, R. « Regression Shrinkage and Selection via the Lasso ». *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 58, No 1, 1996, p.267–288.
- Utley, W. A. et Miller, L. A. « Occupational noise exposure on construction sites ». *Applied Acoustics*, Vol. 18, No 4, 1985, p.293–303.
- Vaillancourt, V., Nélisse, H., Laroche, C., Giguère, C., Boutin, J., Laferrière, P. *Sécurité des travailleurs derrière les véhicules lourds - Évaluation de trois types d'alarmes sonores de recul*, rapport IRSST, rapport R-763, 2012.
- Valente, D.L., Plevinsky, H.M., Franco, J.M., Heinrichs-Graham, E.C., Lewis, D.E. « Experimental investigation of the effects of the acoustical conditions in a simulated classroom on speech recognition and learning in children ». *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 131, No 1, 2012, p.232–246.
- Vorländer, M. *Auralization*, Springer 2008, 335 p.

Watts, G.R., Pheasant, R.J. « Factors affecting tranquillity in the countryside ». *Applied Acoustics*, Vol. 74, 2013, p.1094–1103.

Watts, G.R., Pheasant, R.J. « Identifying tranquil environments and quantifying impacts ». *Applied Acoustics*, Vol. 89, 2015, p.122–127.

Weber, R., Baumann, I., Freese, N., Buss, S., König, C., Mellert, V., « Effects of noise on the comfort of cabin crew studied in an aircraft cabin simulator». Sources et dates inconnues et non indiquées dans le document.

Wilkins, P. A. « A field study to assess the effects of wearing hearing protectors on the perception of warning sounds in an industrial environment ». *Applied Acoustics*, Vol. 17, No 6, 1984, p.413–437.

Wilkins, P. A. et Martin, A. M. « Hearing protection and warning sounds in industry—a review ». *Applied Acoustics*, Vol. 21, No 4, 1987, p.267–293.

Williams, E.G. *Fourier Acoustics - Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography* Academic Press, 1999, 306 p.

Williams, R.G.D. et Yang, S.J. « Sound-field characterisation and implications for industrial sound-intensity measurements ». *Applied Acoustics*, Vol. 35, No 4, 1992, p.311–323.

Williams, W., Purdy, S.C., Story, L., Nakhla, M., et Boon, G. « Towards more effective methods for changing perceptions of noise in the workplace ». *Safety Science*, Vol. 45, No 4, 2007, p. 431–447.

Withington, D.J. « Reversing goes broadband ». *Quarry Management*, May, 2004, p.27–33.

Zou, H. et Hastie, T. « Regularization and variable selection via the elastic-net ». *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 67, 2005, p.301–320.

ANNEXE A – ENDROITS DE CAPTATION CHEZ GRAYMONT

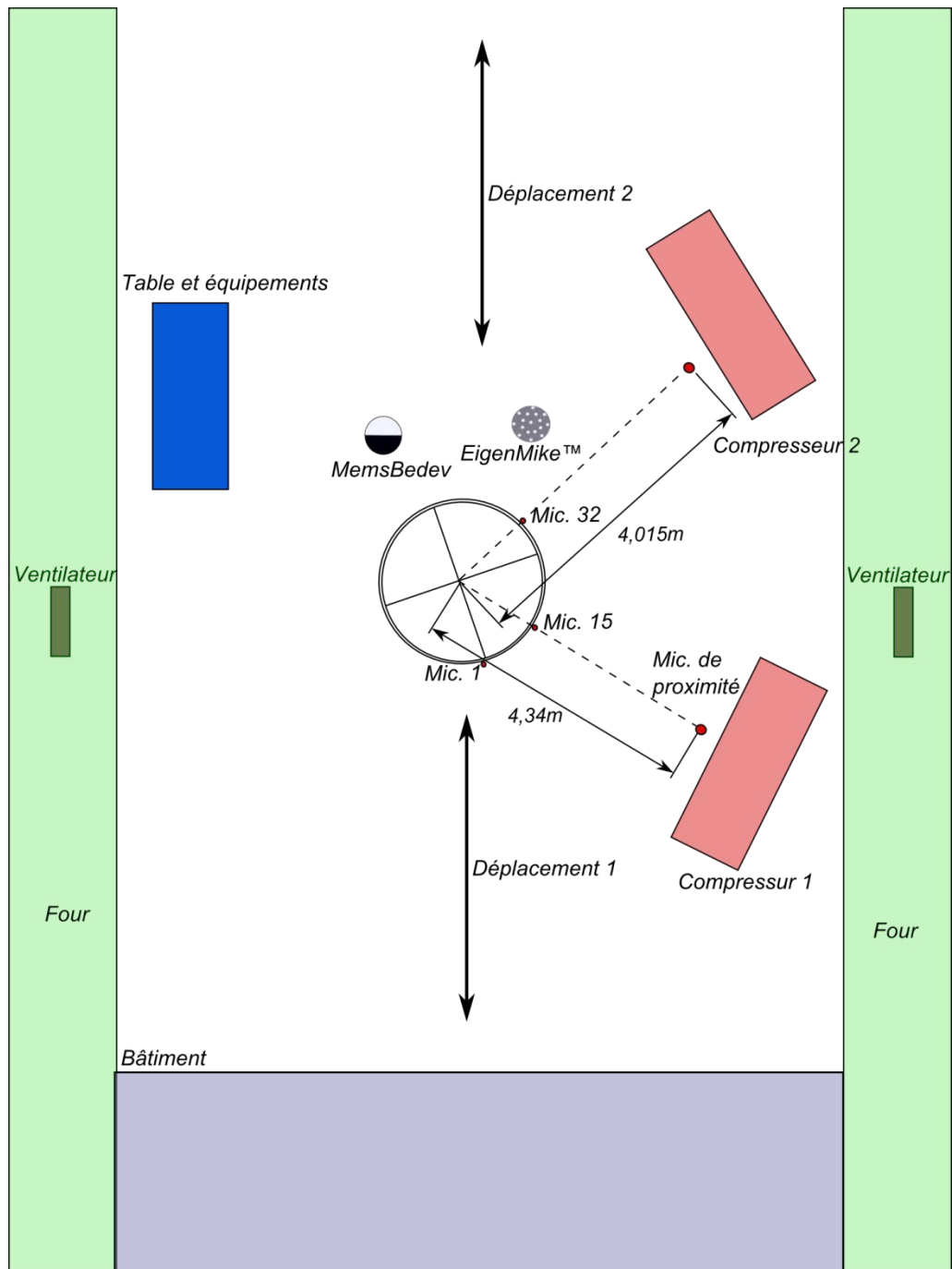


Figure 79 – Schéma (vue du haut, pas à l'échelle) de la captation sous les fours. Les positions des équipements et antennes de microphone sont indiquées. La position du microphone n°1 est aussi indiquée en référence pour l'orientation de la scène captée. Les mouvements de véhicules enregistrés sont aussi identifiés par « Déplacement 1 » et « Déplacement 2 ».

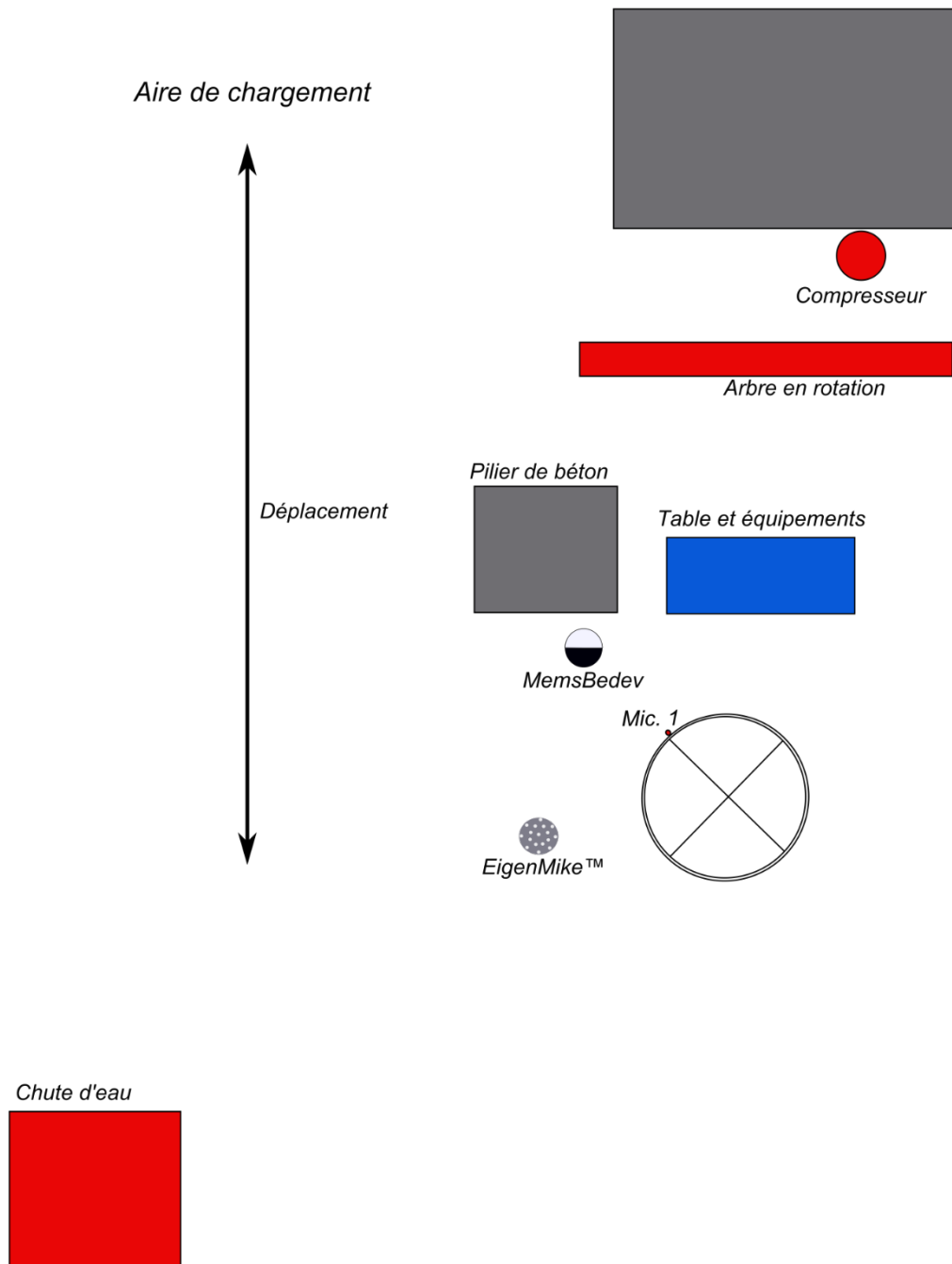


Figure 80 – Schéma (vue du haut, pas à l'échelle) de la captation à l'aire de chargement. Les positions des équipements et antennes de microphone sont indiquées. La position du microphone n° 1 est aussi indiquée en référence pour l'orientation de la scène captée. Les mouvements de véhicules enregistrés sont aussi identifiés par « Déplacement »

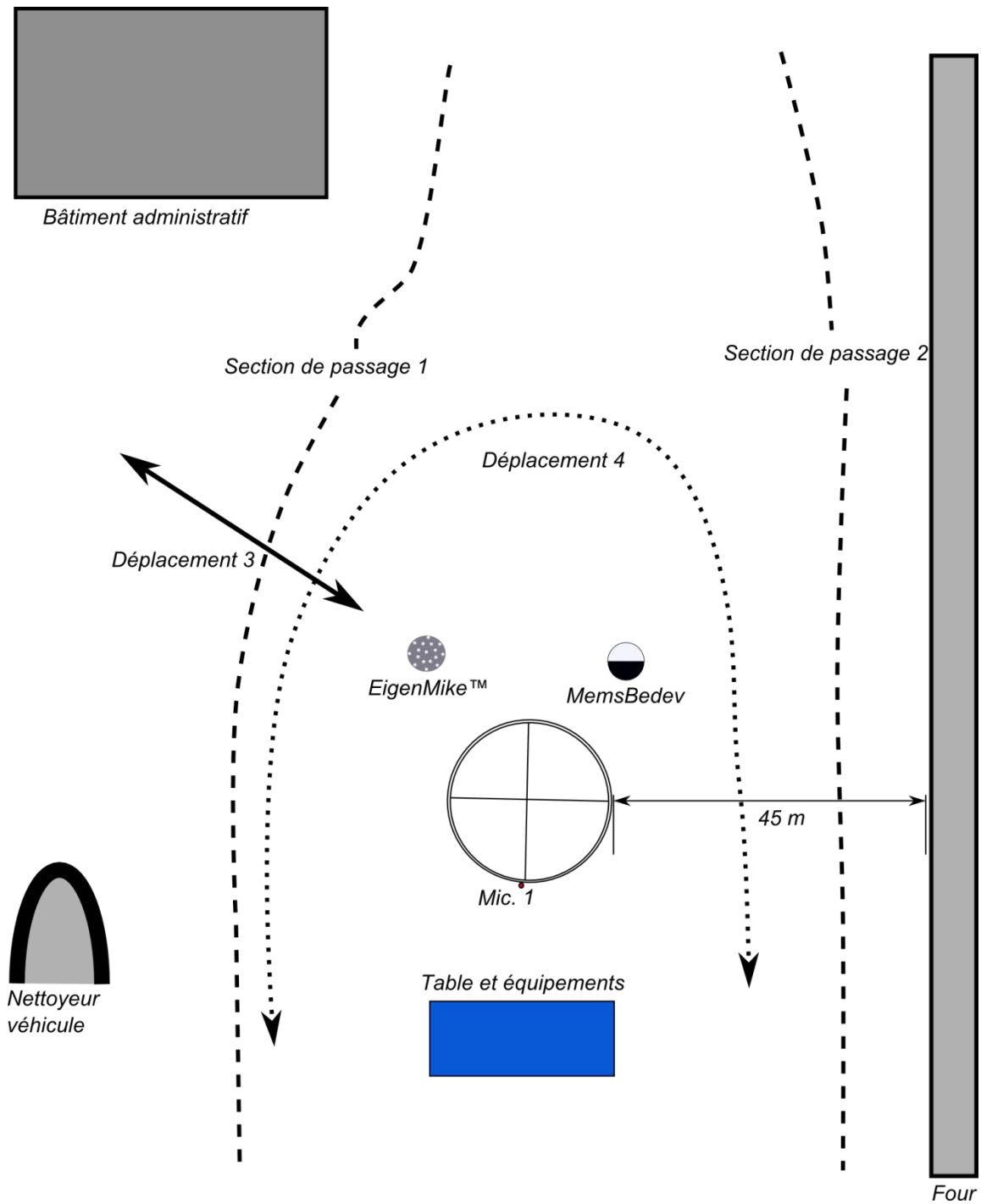


Figure 81 – Schéma (vue du haut, pas à l'échelle) de la captation à l'aire de trafic. Les positions des équipements et antennes de microphone sont indiquées. La position du microphone n° 1 est aussi indiquée en référence pour l'orientation de la scène captée. Les mouvements de véhicules enregistrés sont aussi identifiés par le vocable « Déplacement ».

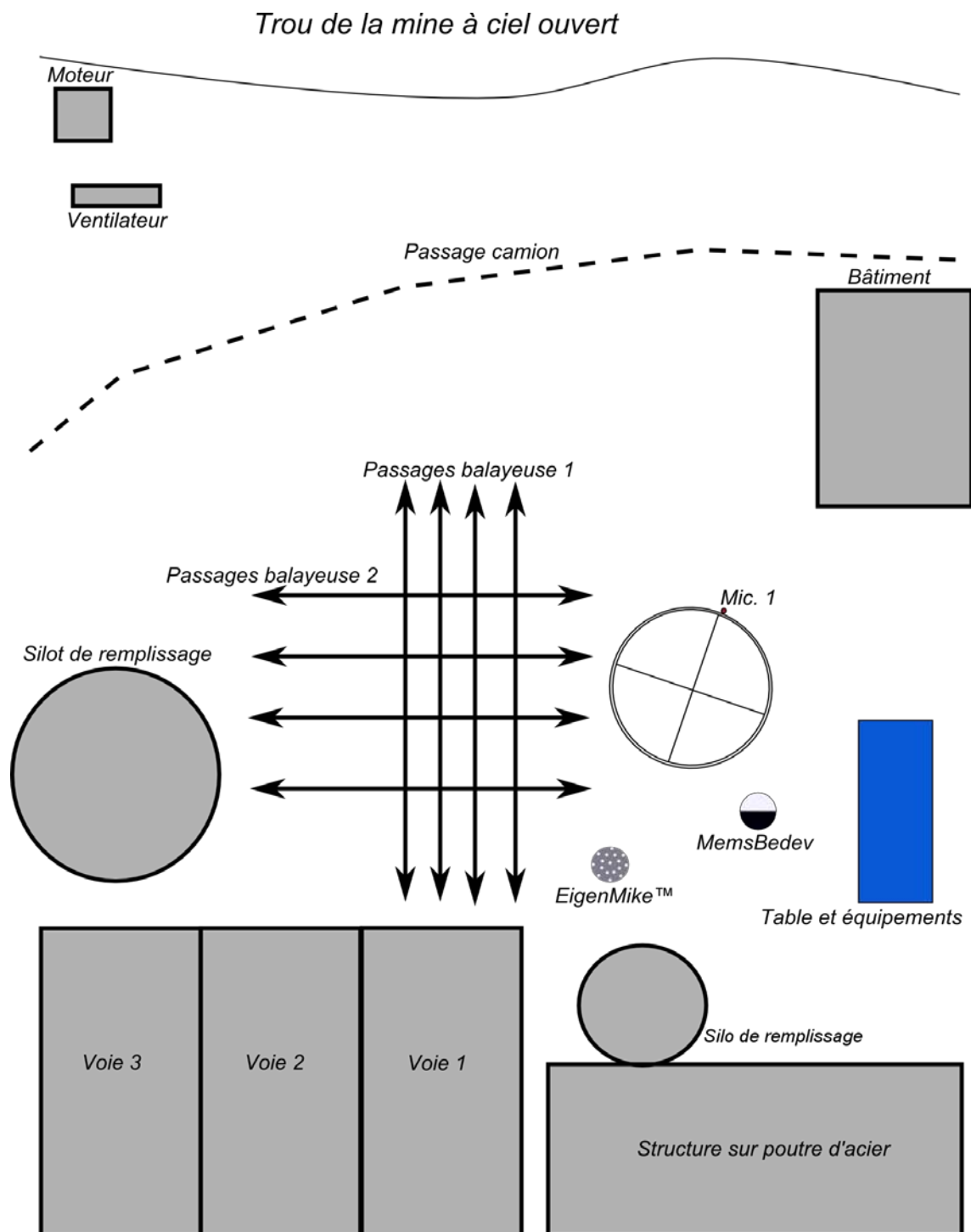


Figure 82 – Schéma (vue du haut, pas à l'échelle) de la captation au PLS. Les positions des équipements et antennes de microphone sont indiquées. La position du microphone n° 1 est aussi indiquée en référence pour l'orientation de la scène captée. Les mouvements de véhicules enregistrés sont aussi identifiés par le vocable « Passage ».

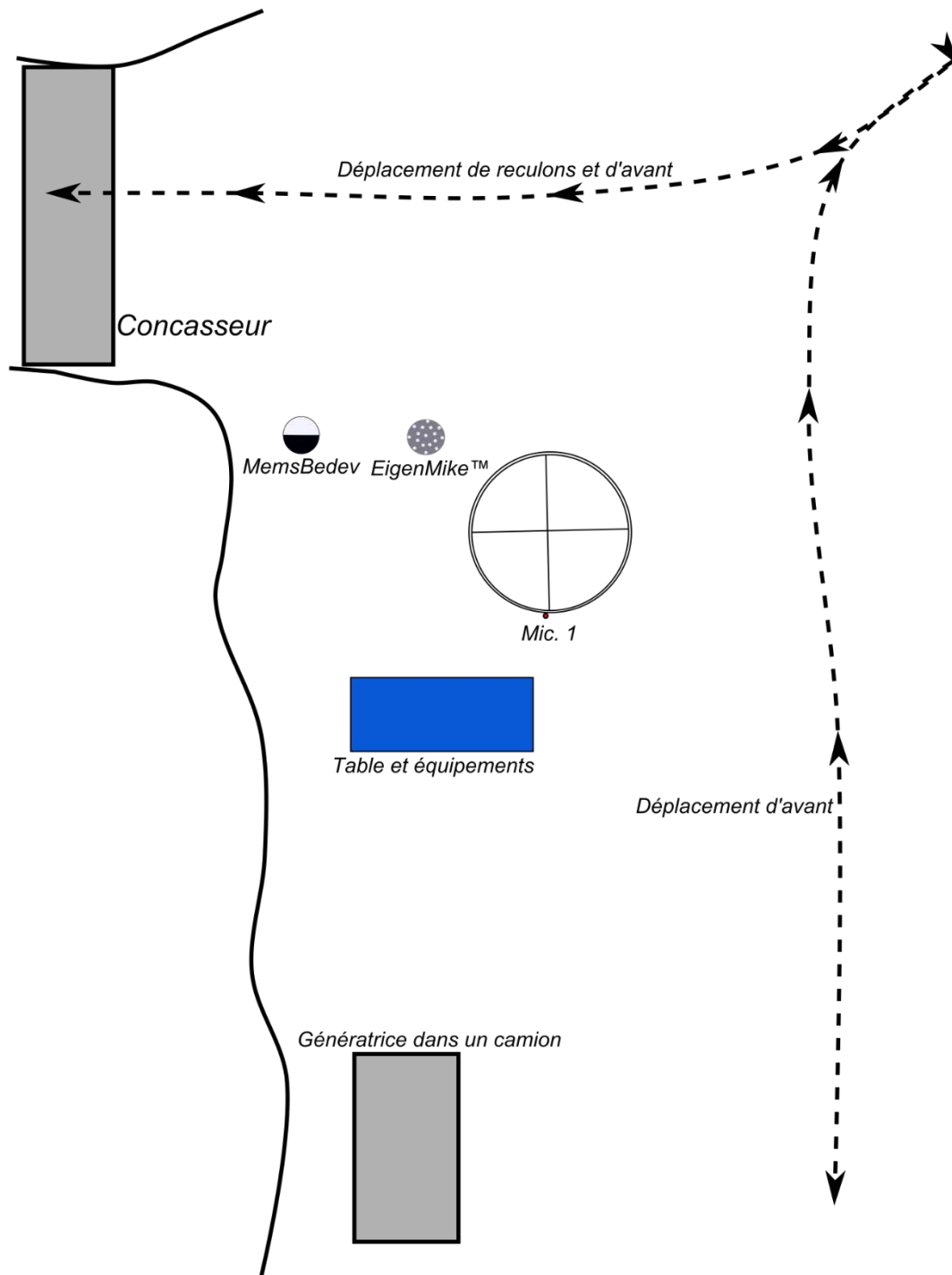


Figure 83 – Schéma (vue du haut, pas à l'échelle) de la captation au concasseur. Les positions des équipements et antennes de microphone sont indiquées. La position du microphone n° 1 est aussi indiquée en référence pour l'orientation de la scène captée. Les mouvements de véhicules enregistrés sont aussi identifiés par le vocable « Déplacement ».

ANNEXE B – ENDROITS DE CAPTATION CHEZ AGRIGRATTE

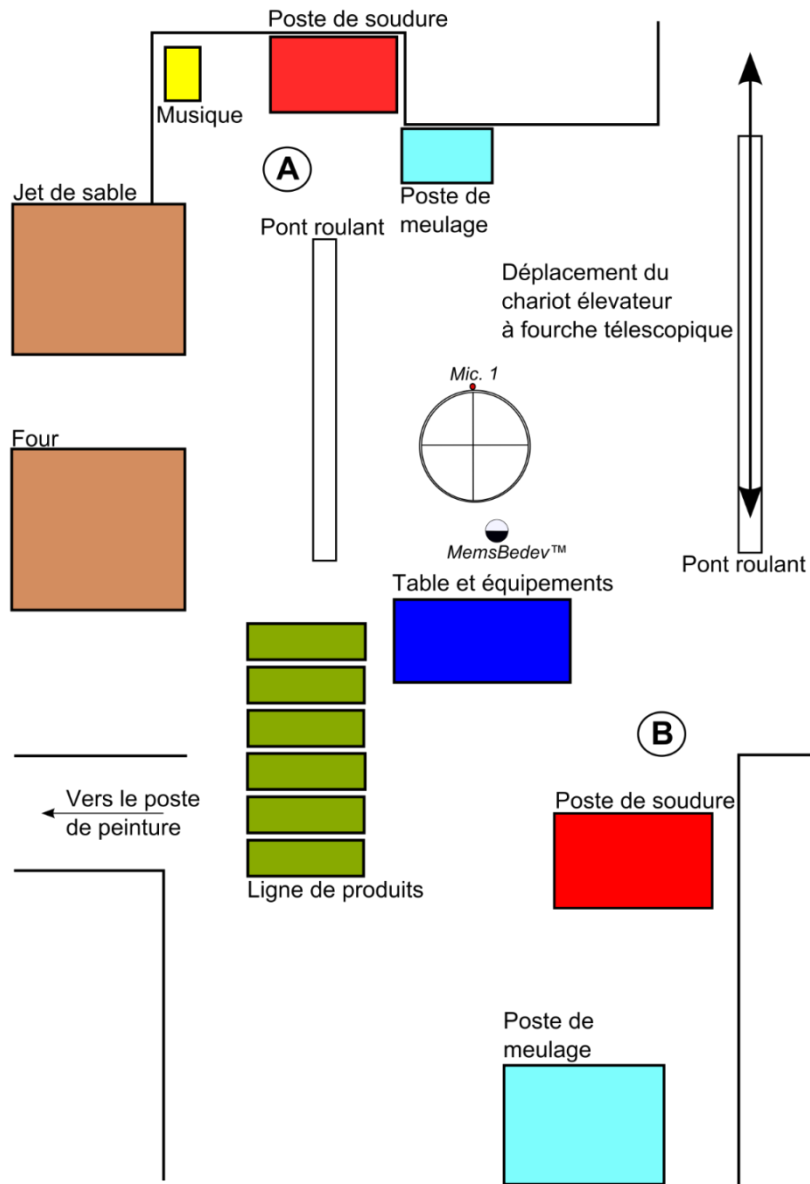


Figure 84 – Schéma (vue du haut, pas à l'échelle) de la captation dans la grande salle. Les positions des équipements et antennes de microphone sont indiquées. La position du microphone n° 1 est aussi indiquée en référence pour l'orientation de la scène captée. Les mouvements de véhicules enregistrés sont aussi identifiés par le vocable « Déplacement ». Les points (A) et (B) correspondent à des événements introduits dans la liste des enregistrements effectués.

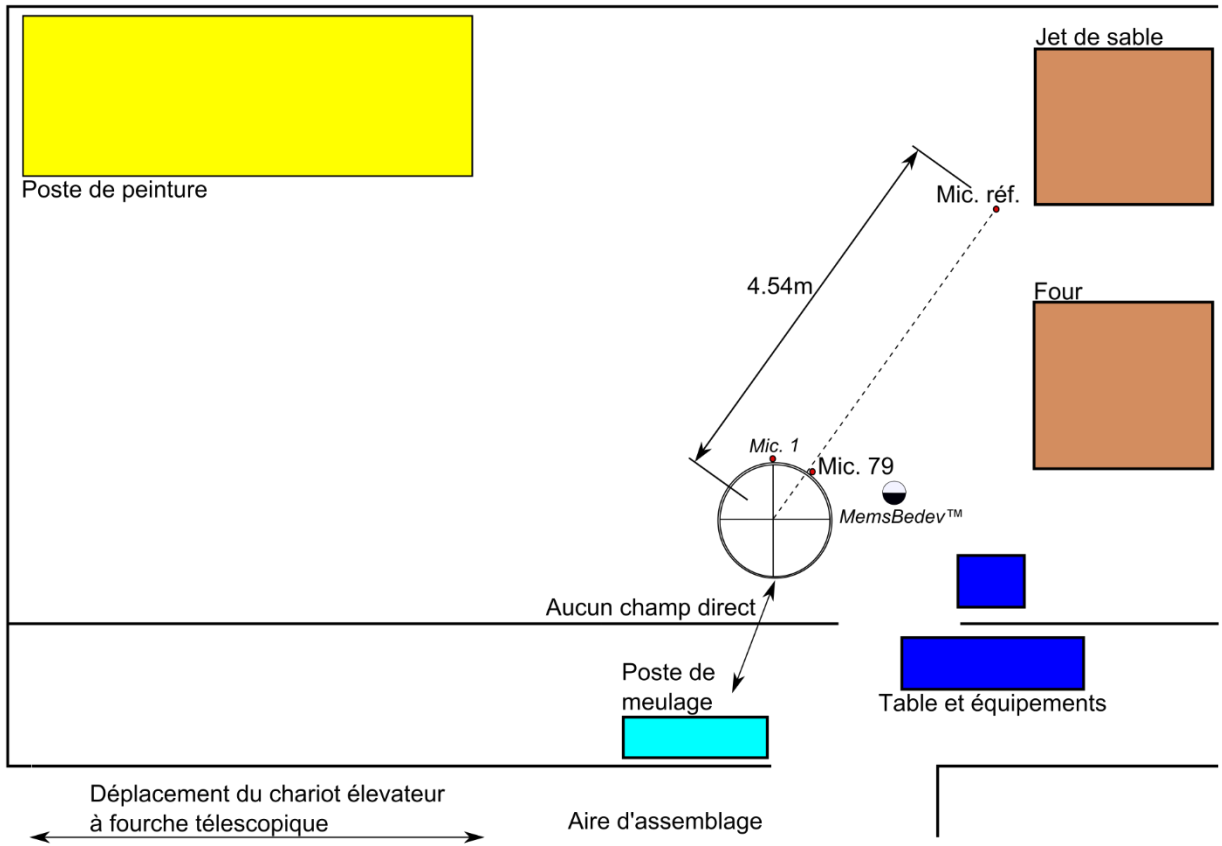


Figure 85 – Schéma (vue du haut, pas à l'échelle) de la captation dans la salle de peinture. Les positions des équipements et antennes de microphone sont indiquées. La position du microphone n^o 1 est aussi indiquée en référence pour l'orientation de la scène captée.