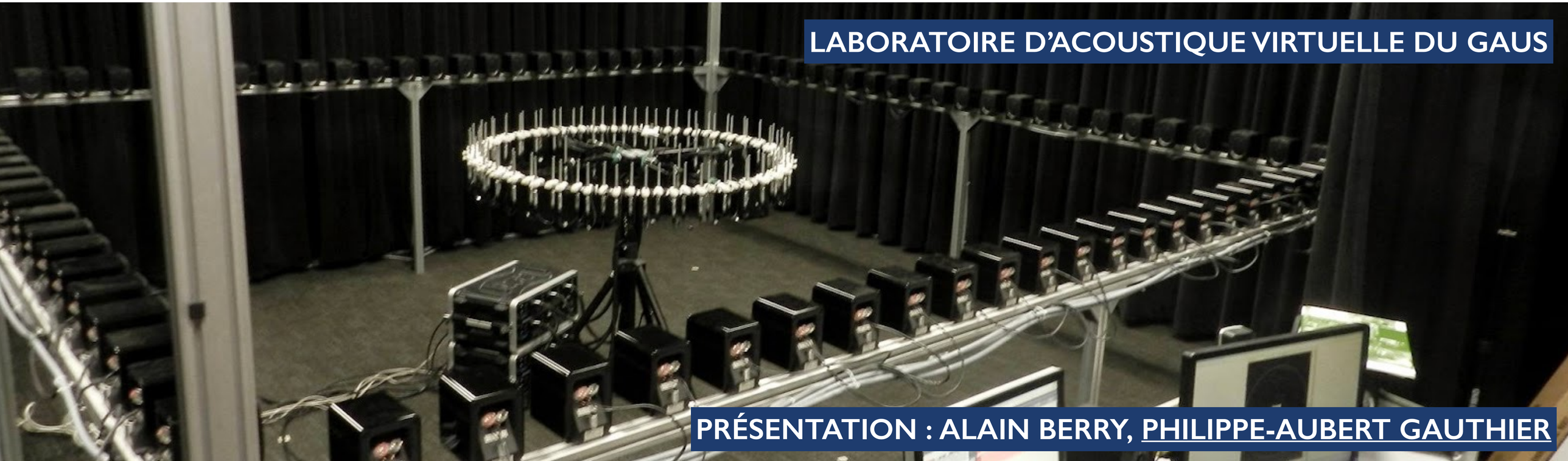
REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS EN VUE D'APPLICATIONS AUX ÉTUDES D'AUDIBILITÉ DES ALARMES ET AUTRES SIGNAUX SONORES POUR LA SANTÉ ET SÉCURITÉ AU TRAVAIL : PREUVE DE CONCEPT

ACOUSTIQUE VIRTUELLE ET SANTÉ+SÉCURITÉ

GAUS
GROUPE D'ACOUSTIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

irsst
Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail



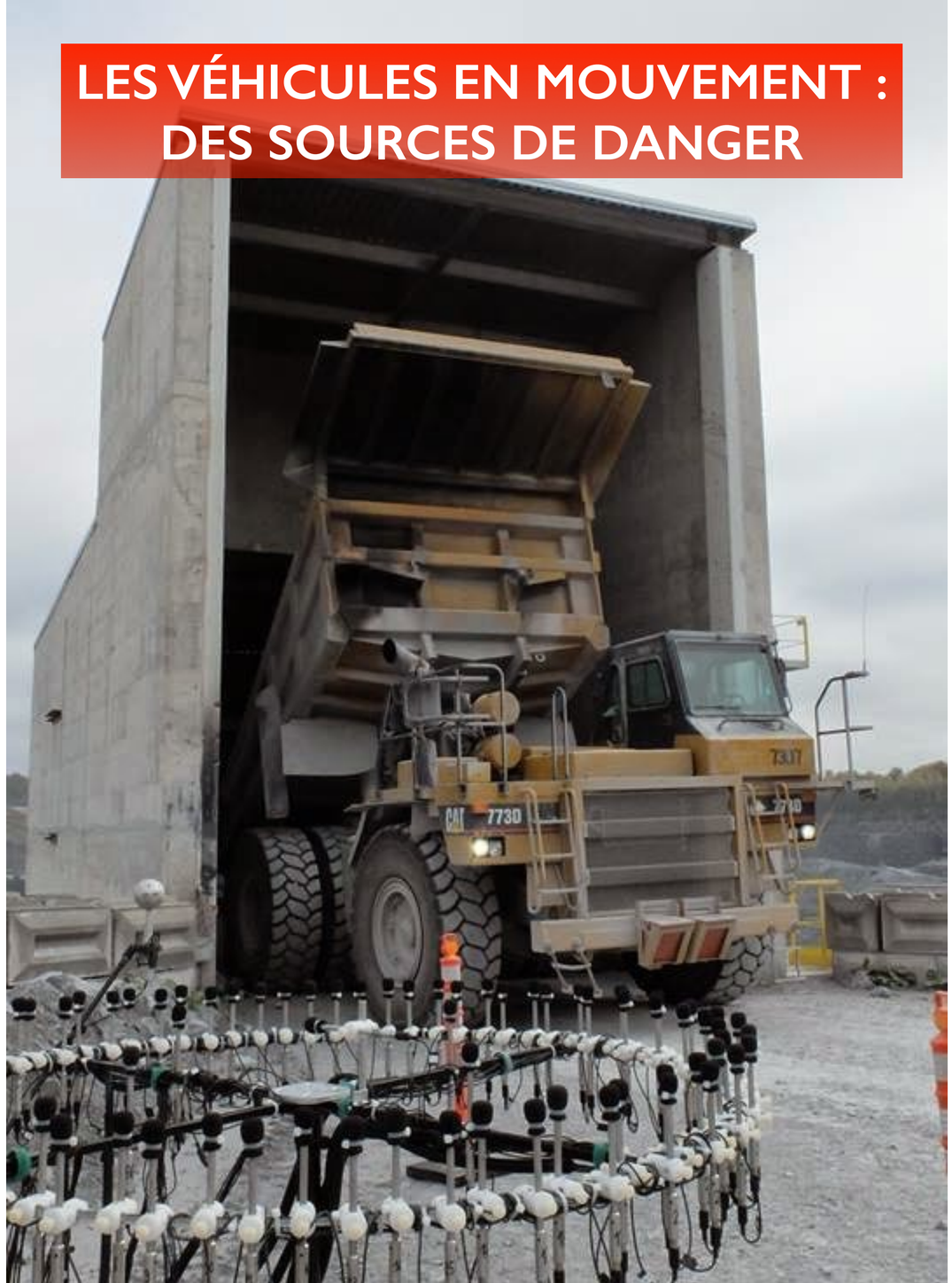
LABORATOIRE D'ACOUSTIQUE VIRTUELLE DU GAUS

PRÉSENTATION : ALAIN BERRY, PHILIPPE-AUBERT GAUTHIER

PLAN DE LA PRÉSENTATION

- La problématique de l'audibilité en milieu de travail
- L'acoustique virtuelle?
- Activité, en bref
  - Objectifs, résultats, retombées
- Conclusions issues de l'activité
- Ouvertures
- Questions et échanges

LES VÉHICULES EN MOUVEMENT : DES SOURCES DE DANGER



US BUREAU

NIOSH

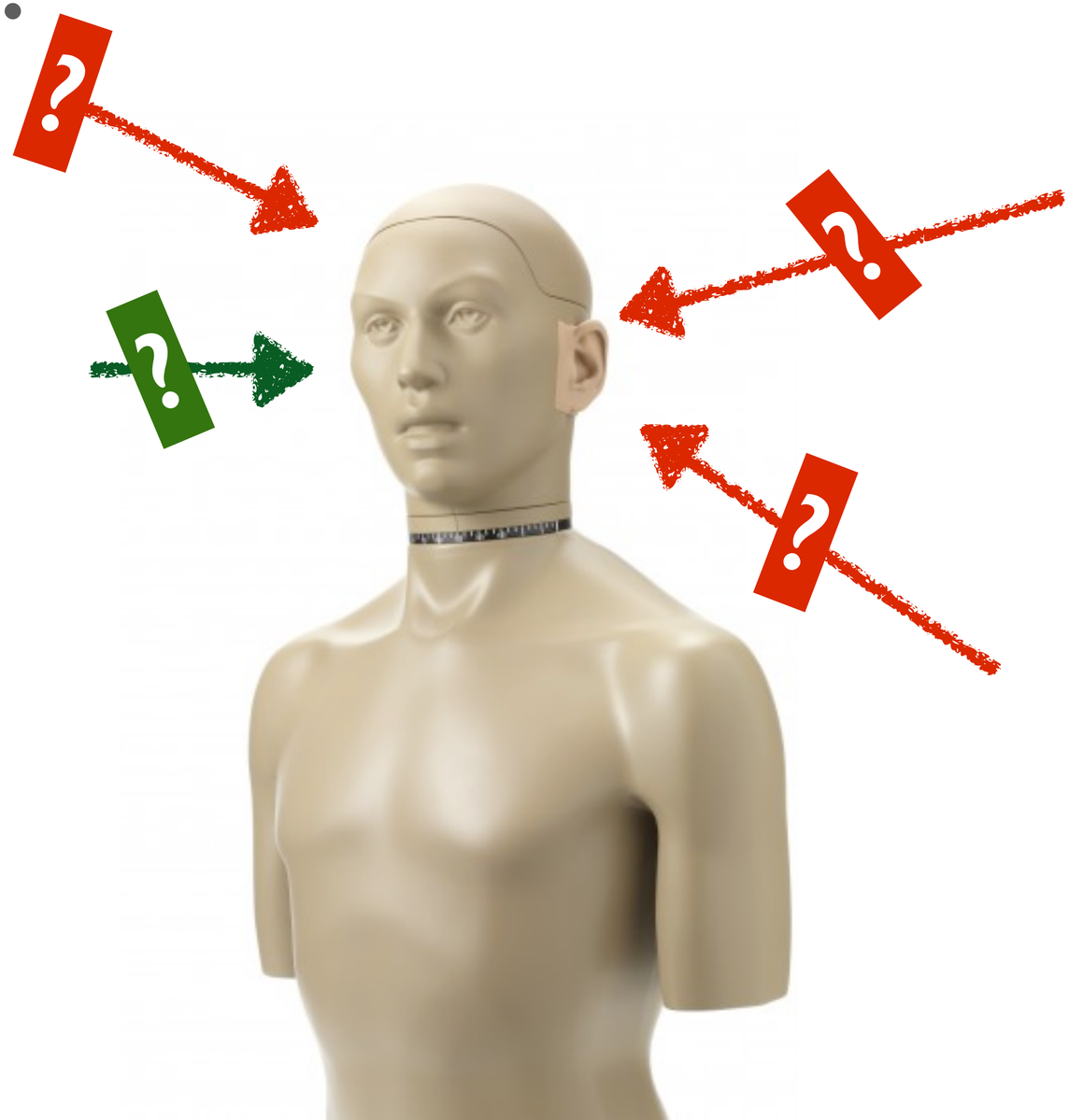
AU QUÉBEC

POURTANT TOUS LES VÉHICULES DOIVENT ÊTRE ÉQUIPÉS D'ALARMES DE RECUL?

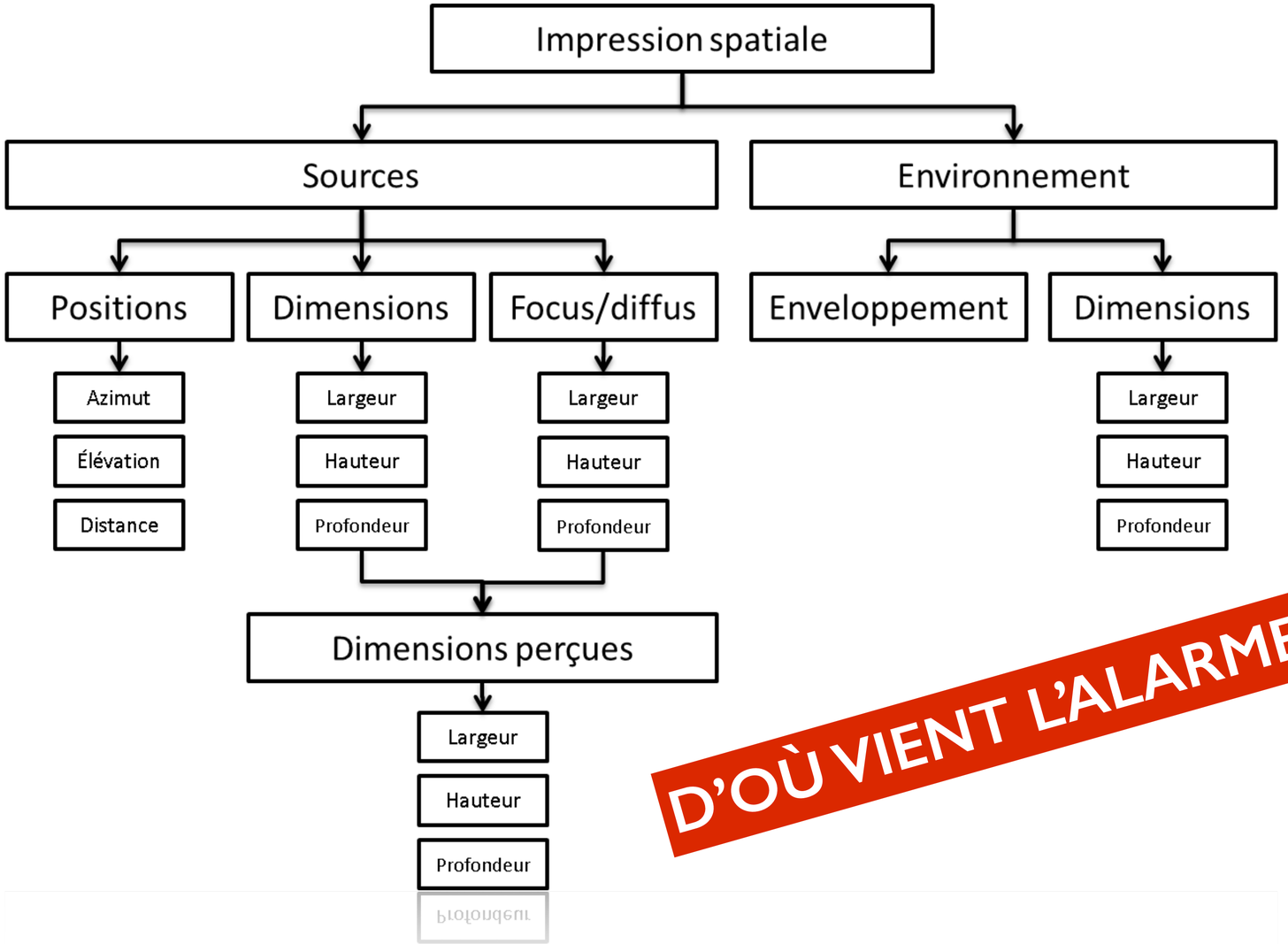
RISQUE ASSOCIÉ À L'AUDIBILITÉ DES ALARMES ET AUTRES AVERTISSEURS SONORES

LOCALISATION SONORE … PAS FACILE!

- Niveau de bruit souvent élevé
- Environnement sonore complexe combinant plusieurs sources, réflexions et réverbération
- Concurrence des sources sonores, provenance sur 360 degrés
- Effet de masque auditif
- Utilisation de protecteurs auditifs
- Et ainsi de suite …



LES ENVIRONNEMENTS ET LA LOCALISATION SONORES SONT COMPLEXES!



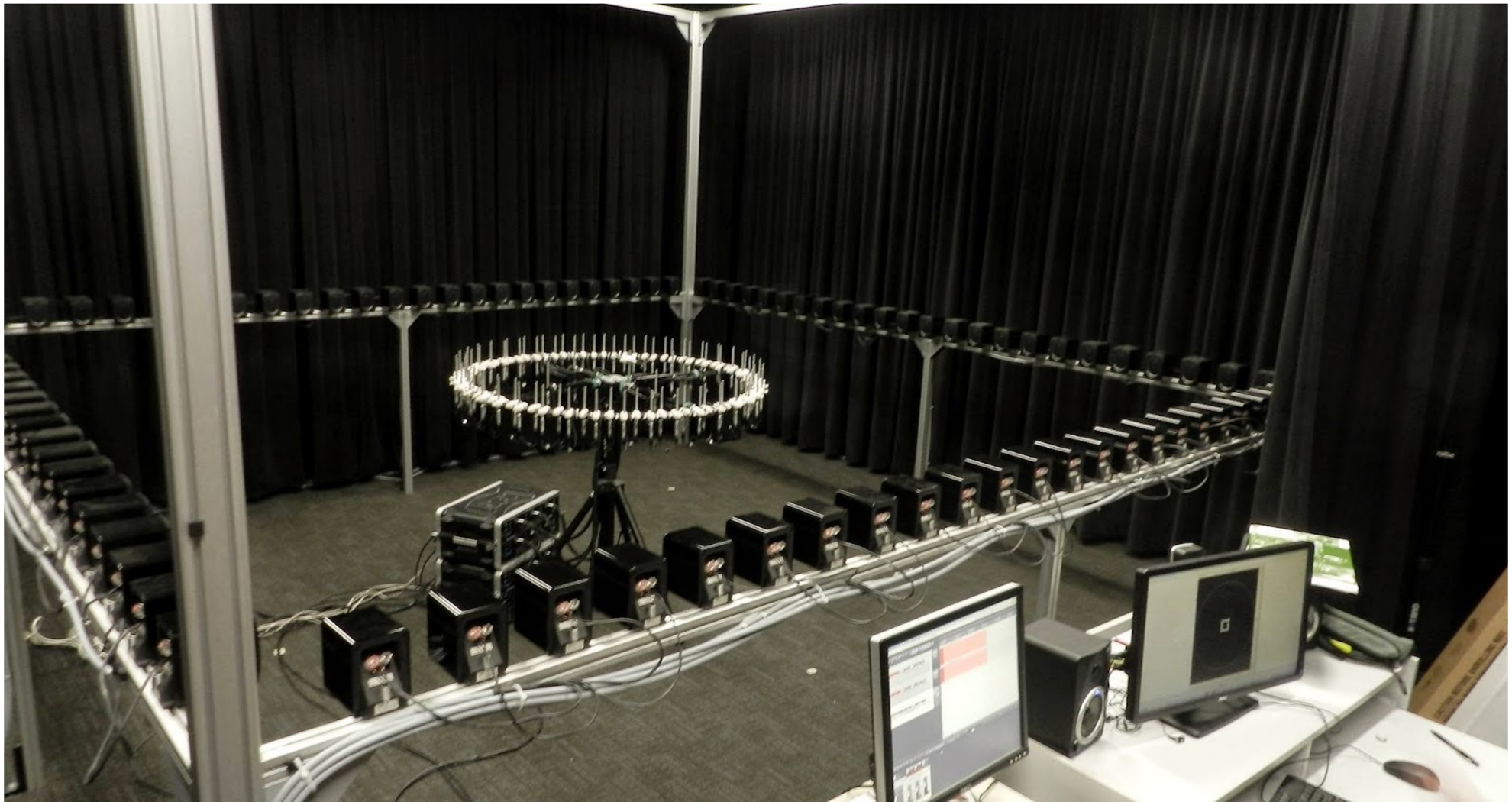
D'OÙ VIENT L'ALARME ?

AUDIBILITÉ DES ALARMES
LES ÉTUDES PASSÉES LES PLUS MARQUANTES

- 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.
- Laroche, C., Tran Quoc, H., Hétu, 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.
- 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.
- Pichette, L. « Quelle technologie rend les alarmes de recul plus sécuritaires ? », *Prévention au travail*, été 2013, p. 24–26.

REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

L'ACOUSTIQUE VIRTUELLE? C'EST QUOI?



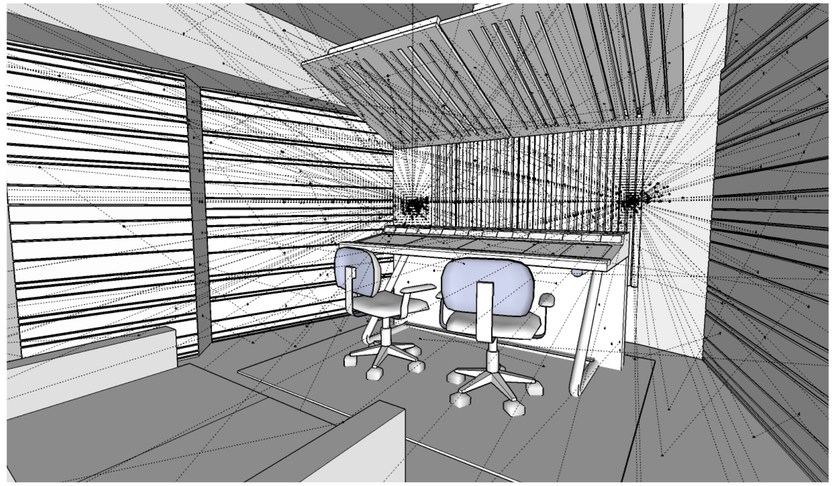
ACOUSTIQUE VIRTUELLE?

DEUX FAÇONS DE DÉFINIR CE QUI DOIT ÊTRE REPRODUIT

REPRODUCTION

BASÉE SUR DES CAPTATIONS DE CHAMPS ACOUSTIQUES

Captation de champs acoustiques avec un, ou plusieurs, microphone, l'information spatiale est reproduite par traitement multicanal.

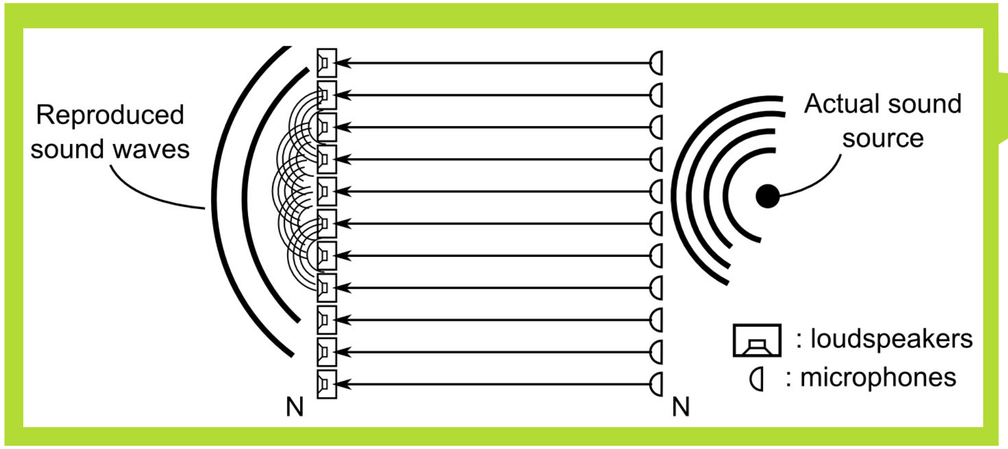


SYNTHÈSE

BASÉE SUR DES MODÈLES DE CHAMPS ACOUSTIQUES

Simulation théorique de champs acoustiques par le biais de différents modèles. Les excitations peuvent être des captations ou aussi synthétisées.

TRAITEMENTS PARAMÉTRIQUES VS NON-PARAMÉTRIQUES



Non-paramétrique

- Encodage et décodage par canal
- Approche aveugle, ou boite noire, de la scène acoustique

Paramétrique

- Encodage et décodage spatial par objet
- On tente de décomposer et de recomposer l'environnement sonore par des éléments avec des paramètres (positions, signaux, tailles, etc.)

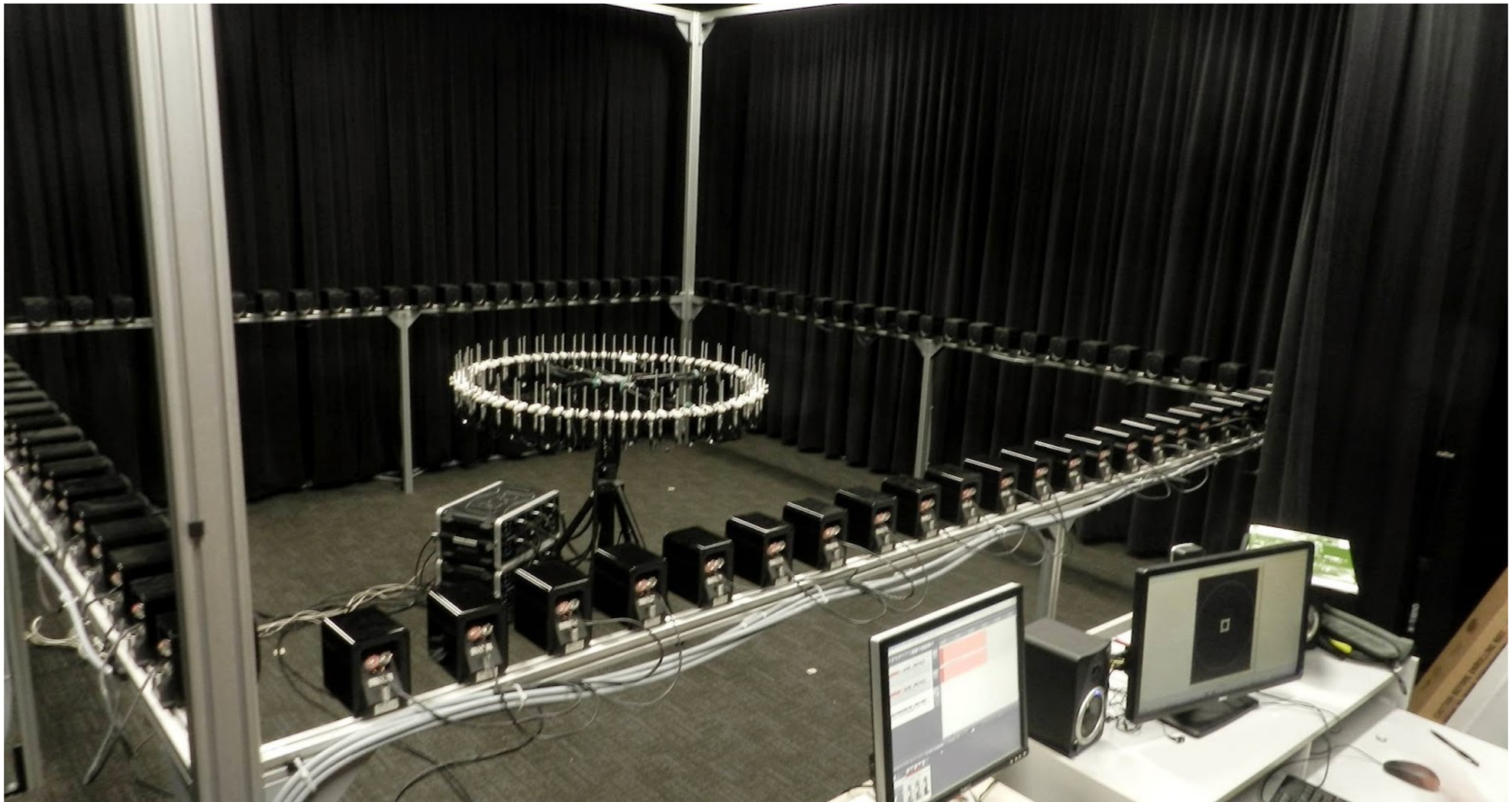
ACOUSTIQUE VIRTUELLE?

DANS LE CADRE DE L'ACTIVITÉ

- **<u>Reproduction non-paramétrique</u> :**
  - Captation d'environnements sonores entiers par antenne de microphones
  - Reproduction par *problème inverse* et par *Wave Field Synthesis* (WFS) en laboratoire and 96 haut-parleurs et 4 caissons de graves
    - Filtre et égalisation multicanal inverse? Égalisation en fréquence du système et réduction de la diaphonie

REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

L'ACOUSTIQUE VIRTUELLE?
EN PRATIQUE? LA WAVE FIELD SYNTHESIS AU GAUS



REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

OBJECTIFS DE L’ACTIVITÉ

OBJECTIFS DE L'ACTIVITÉ

Réalité virtuelle et acoustique virtuelle sont prometteuses … mais sont elles fiables et suffisamment adaptées aux études en santé et sécurité et à l'audibilité des alarmes?

Pour le savoir : Évaluation physique de la capacité du système de reproduction sonore *Wave Field Synthesis* (WFS) (96 haut-parleurs, 4 caissons de grave) du GAUS à reproduire des environnements sonores industriels mesurés *in situ*.

Évaluation physique = Capacité à reproduire :

- les niveaux sonores,
- le contenu fréquentiel et
- la distribution spatiale du champ acoustique.

Les environnements sonores industriels posent des défis particuliers : niveaux, caractère à la fois immersif et localisé.

OBJECTIFS ET TÂCHES DE L'ACTIVITÉ EN ACOUSTIQUE VIRTUELLE

Objectifs spécifiques et tâches :

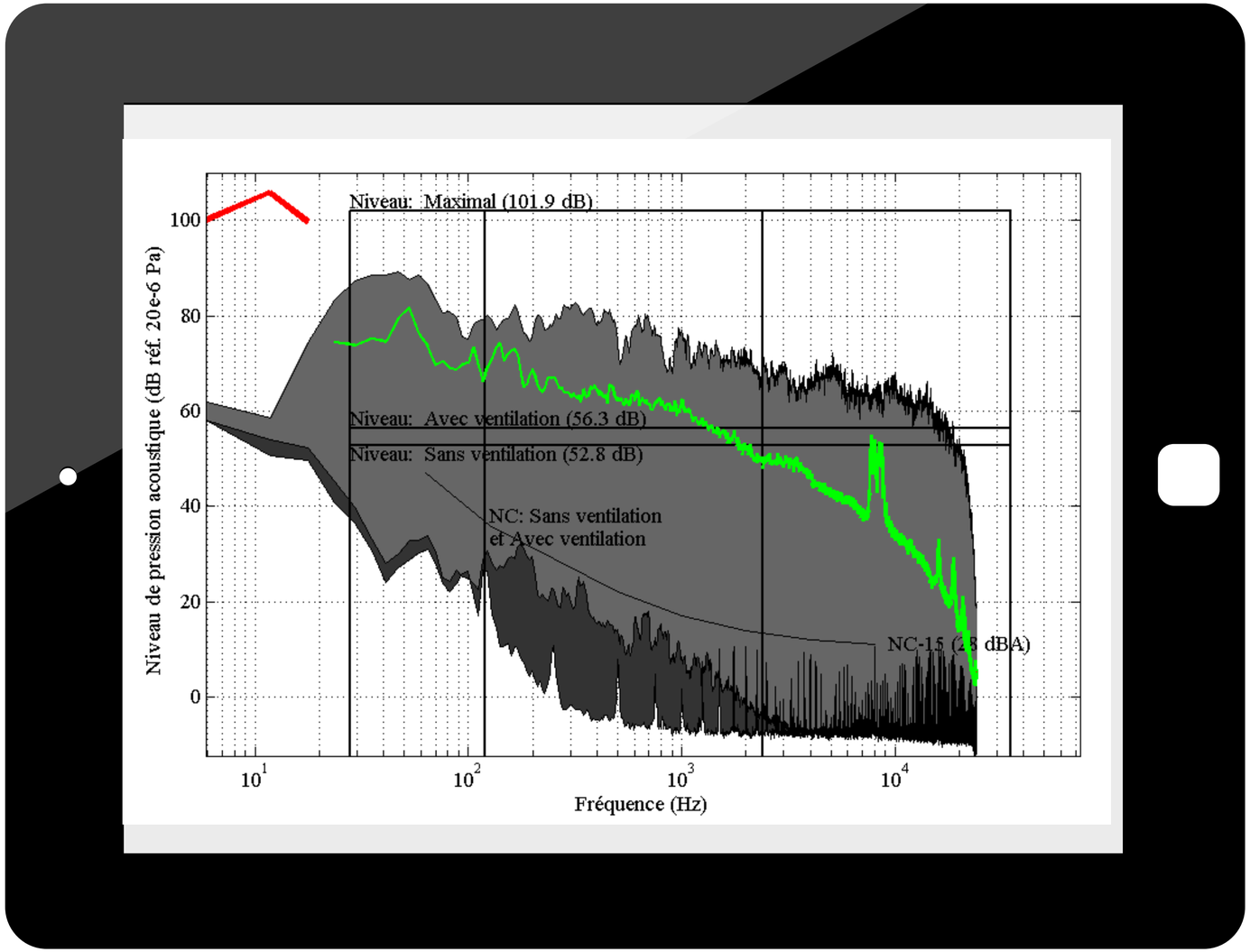
- Caractériser les capacités acoustiques du système WFS du GAUS.
- Caractériser et établir sommairement l'acoustique des environnements sonores visés par cette étude.
- Statuer sur la capacité du système WFS du GAUS à reproduire en laboratoire les caractéristiques acoustiques des environnements sonores 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.

REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

RÉSULTATS ET CONCLUSIONS ISSUS DE L'ACTIVITÉ

REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

GABARITS DE REPRODUCTION WFS



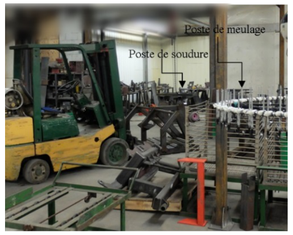
- Caractérisation de la salle de WFS du GAUS
- Fréquences minimales et maximales pouvant être reproduites
- Niveaux minimaux et maximaux
- Spectres maximaux pour différentes positions de sources virtuelles simples
- Ici : exemple de spectre en usine (en vert) comparé au gabarit

REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

ÉCHANTILLONS SONORES ET CAPTATIONS

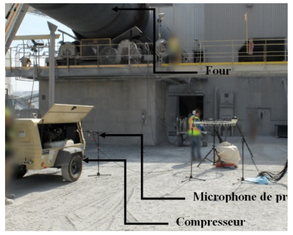
EXTÉRIEURS

Deux jours de captations en continu : ~89 scènes, ~62.4 Go



INTÉRIEURS

Une journée de captation en continu : ~47 scènes, ~56.1 Go



IMMERSIFS + EXTÉRIEURS

Une demi-journée de captation et plus

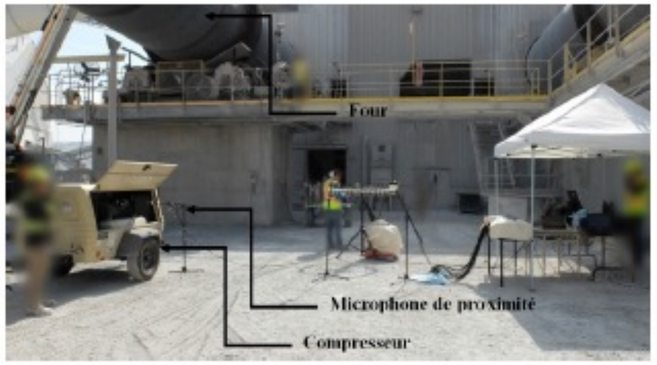


Figure 20 – Captation : sous les fours.

Figure 21 – Captation : aire de chargement.

Figure 22 – Captation : trafic.

Figure 23 – Captation : trafic et recul.

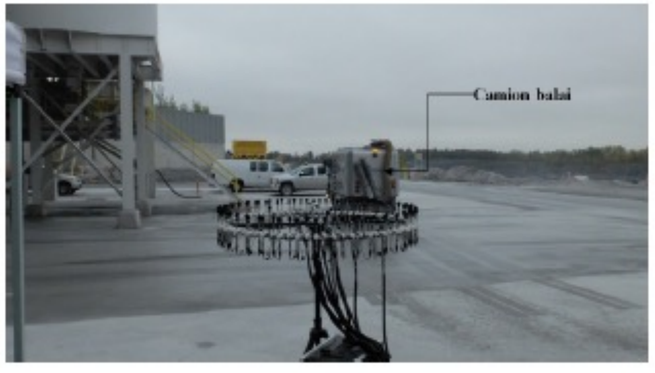
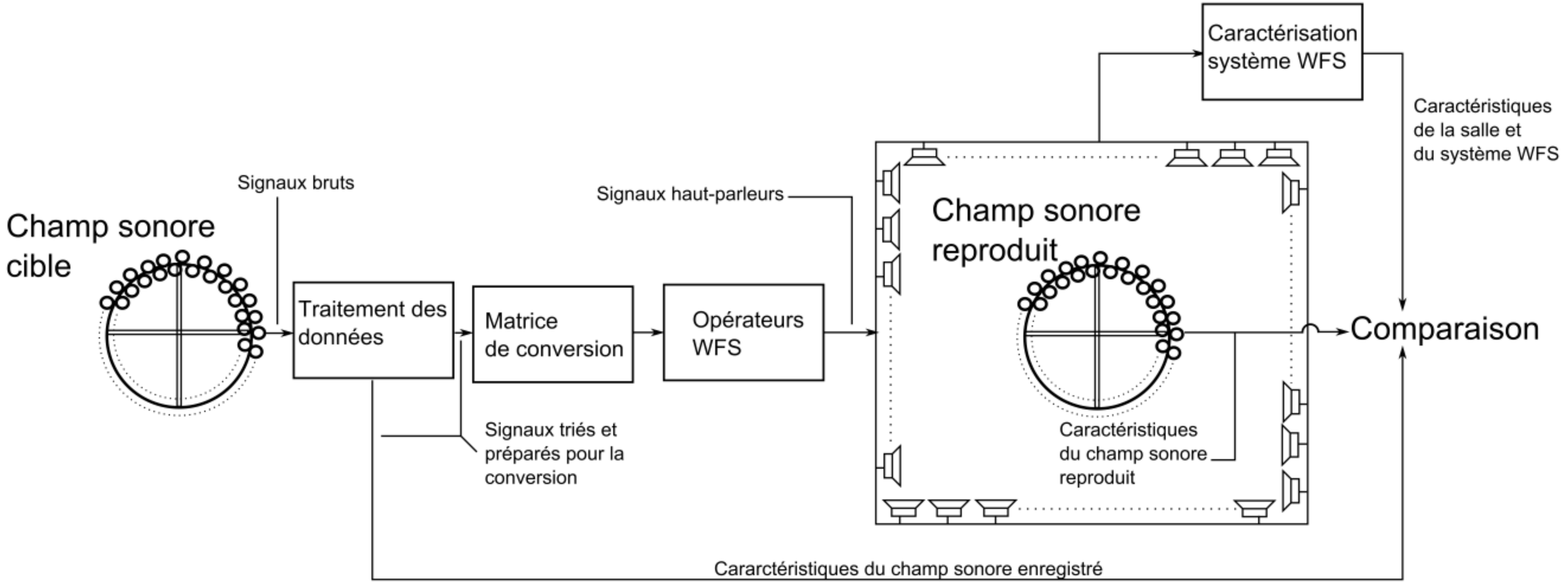


Figure 24 – Captation : PLS.

Figure 25 – Captation : concasseur.

REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

TRAITEMENT DU SIGNAL PROGRAMMÉ ET TESTÉ

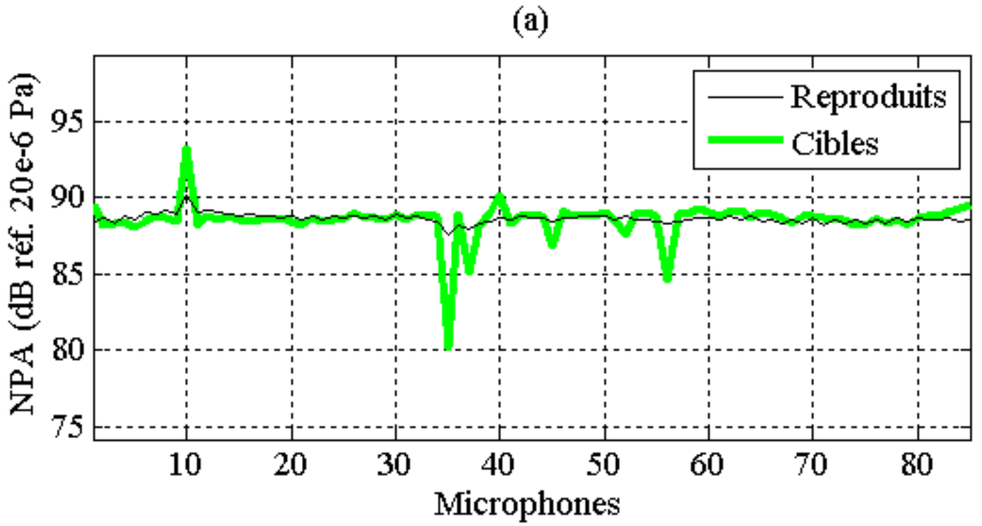


CAPTATION TRAITEMENT REPRODUCTION ET VALIDATION

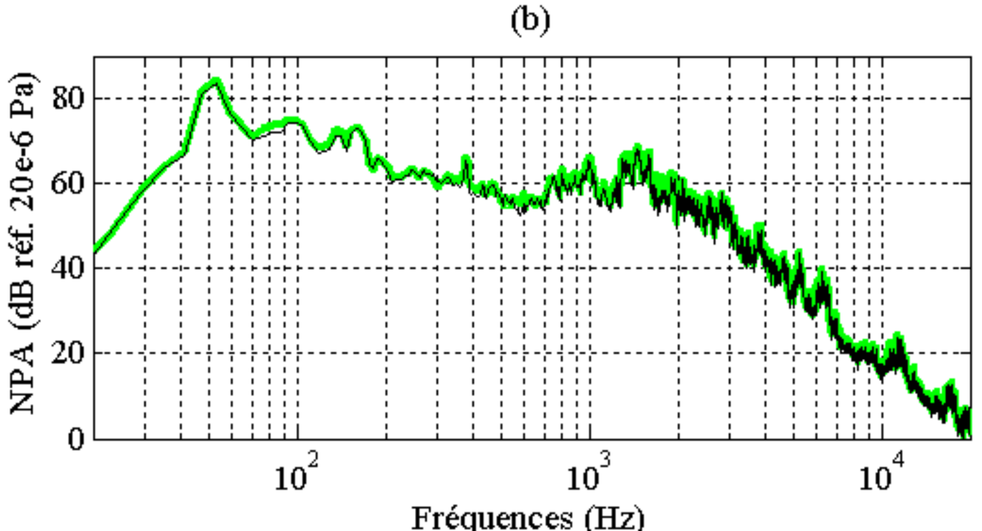
REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

SIMULATIONS THÉORIQUES ENVIRONNEMENT SONORE CAPTÉ

NPA
AUX MICROS



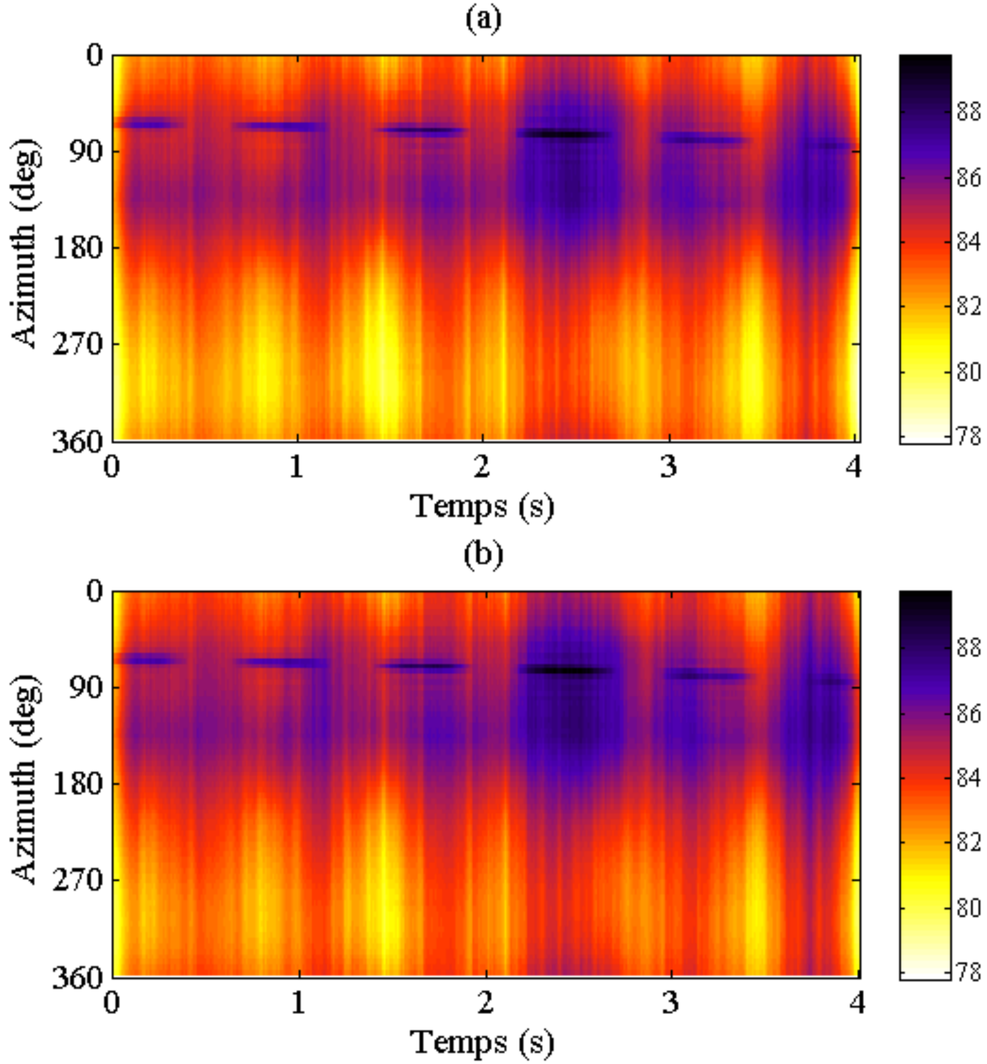
SPECTRES
AU MICRO DE
RÉF



SIMULATIONS THÉORIQUES CHAMP REPRODUIT

CARTOGRAPHIE CIBLE

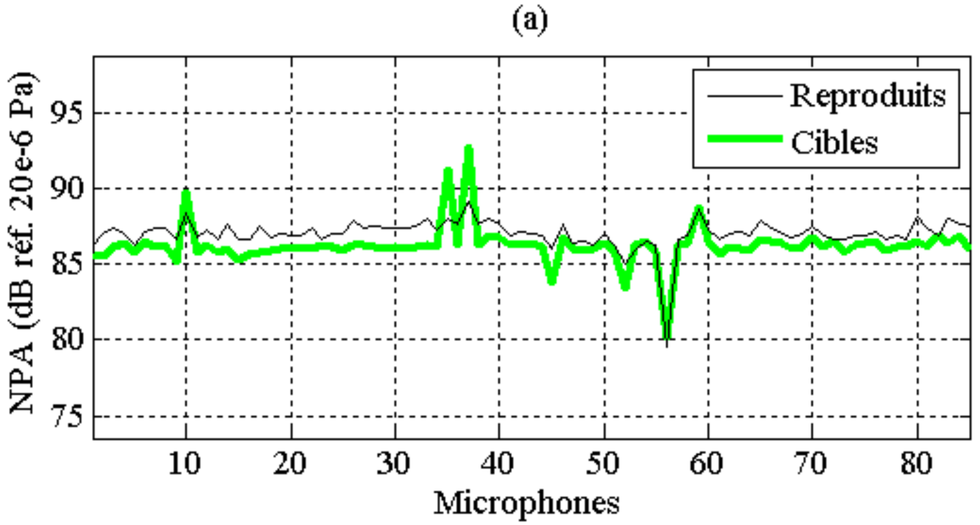
CARTOGRAPHIE REPRODUITE



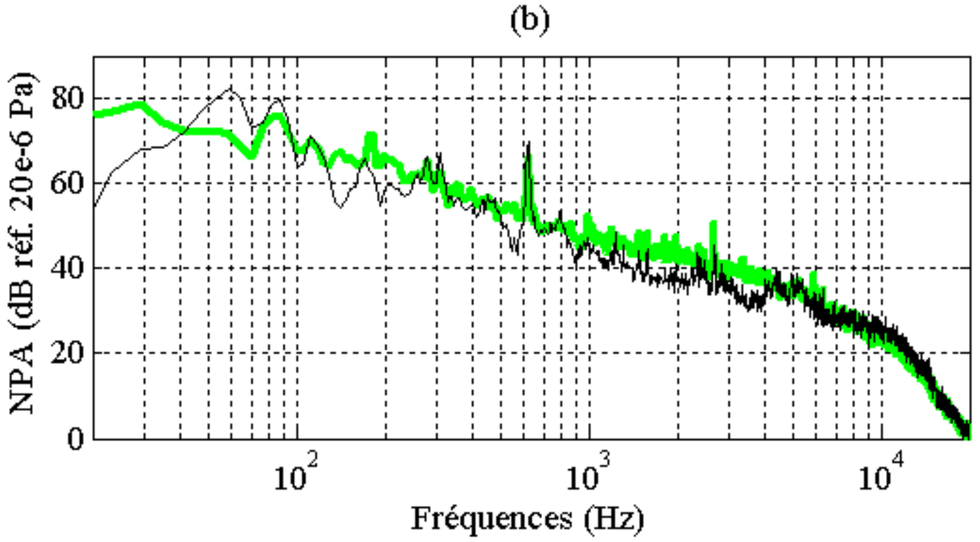
REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

VALIDATION EXPÉRIMENTALE ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR ET FIXE

NPA
AUX MICROS



SPECTRES
AU MICRO DE
RÉF

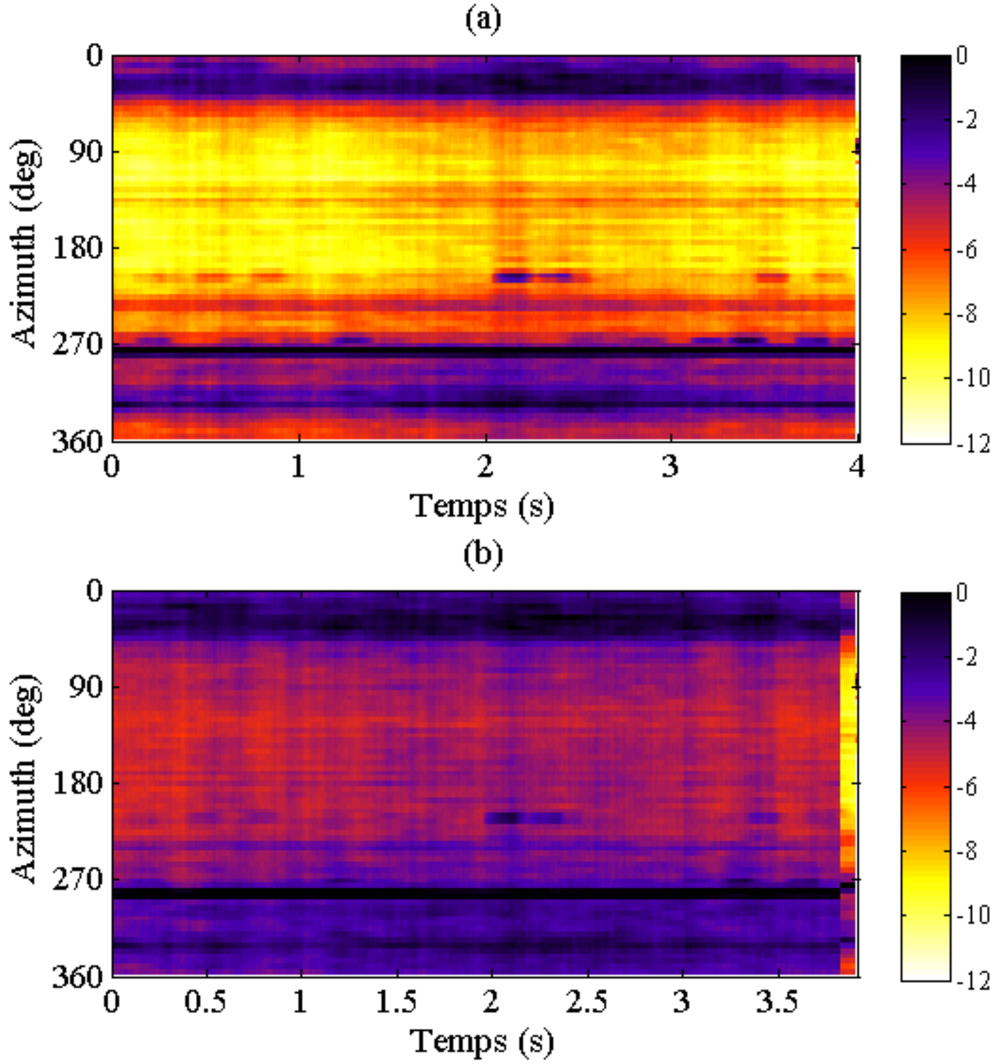


REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

VALIDATION EXPÉRIMENTALE ENVIRONNEMENT EXT ET FIXE

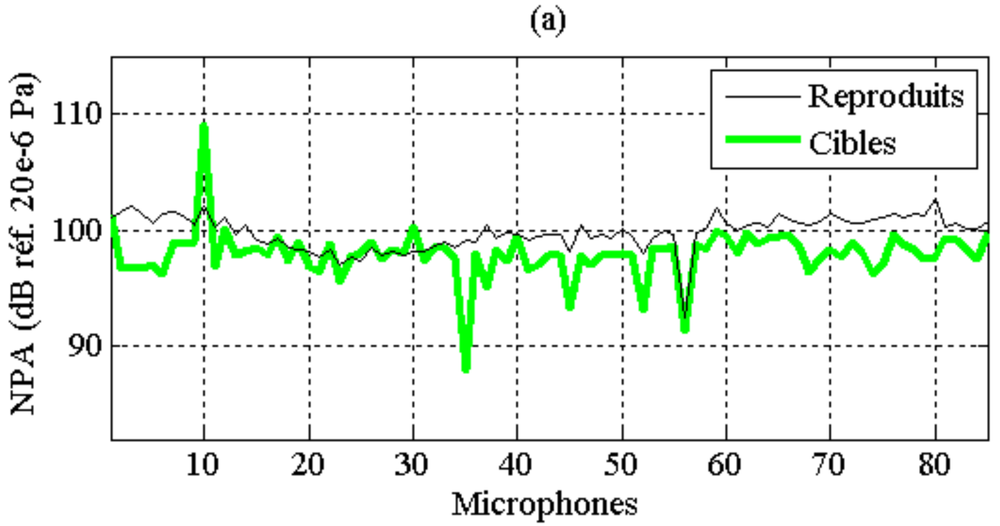
CARTOGRAPHIE CIBLE (NORMALISÉE)

CARTOGRAPHIE REPRODUITE (NORMALISÉE)

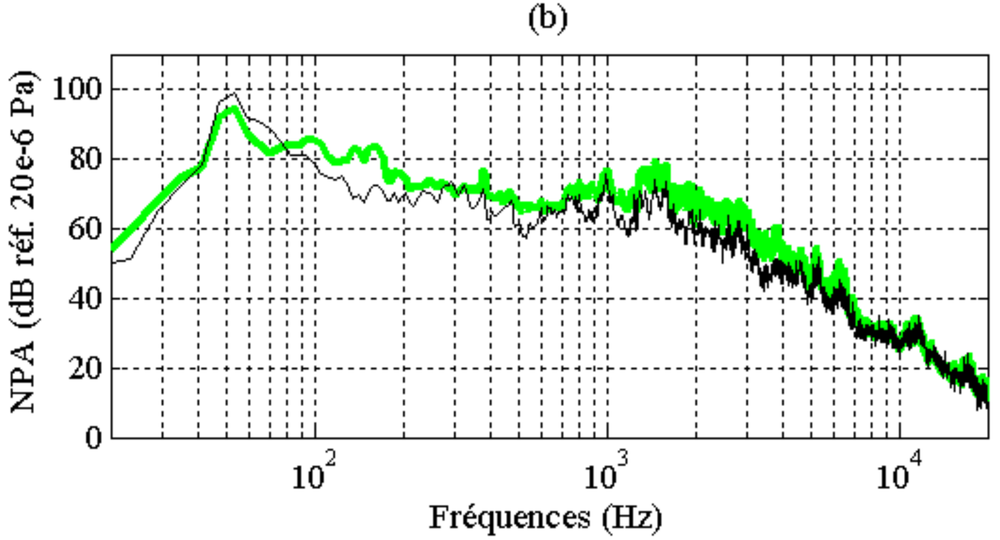


VALIDATION EXPÉRIMENTALE ENVIRONNEMENT EXT ET MVT

NPA
AUX MICROS



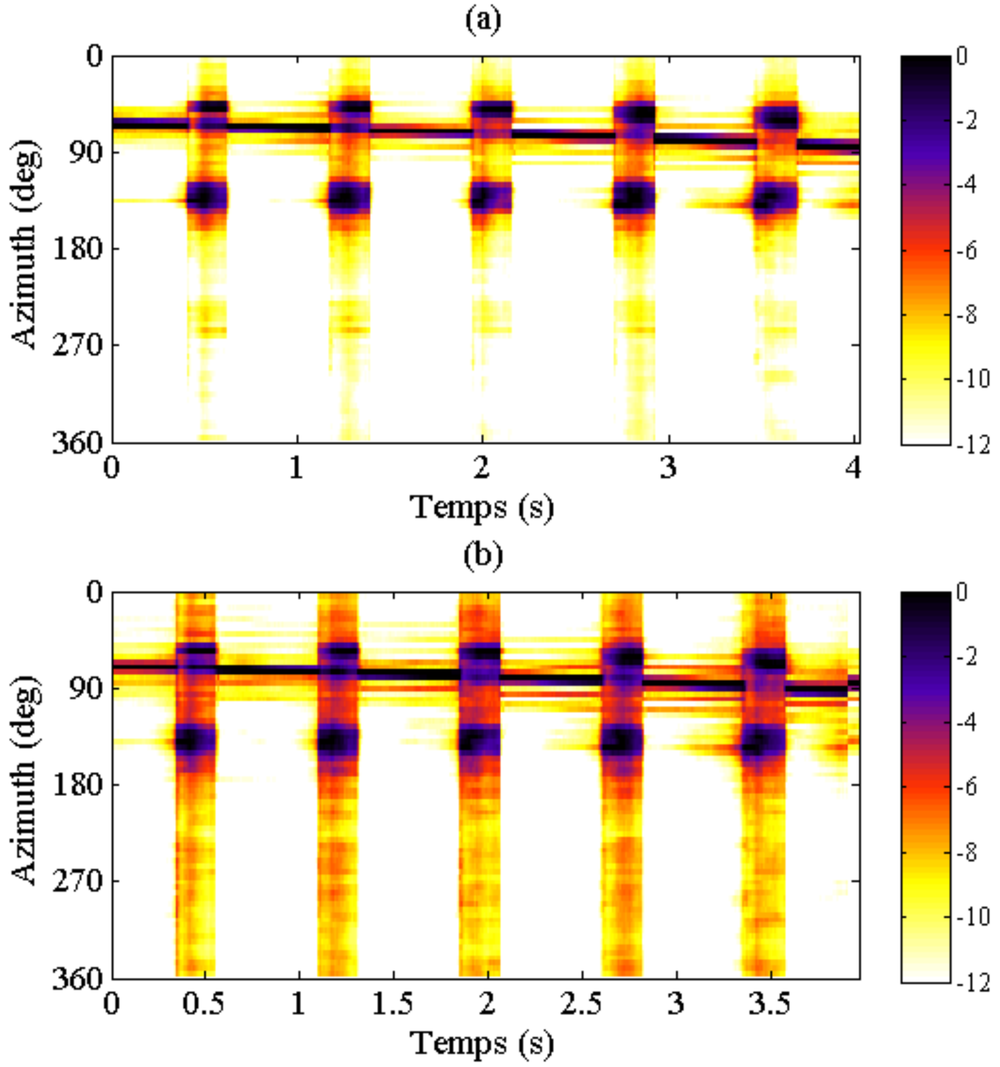
SPECTRES
AU MICRO DE
RÉF



VALIDATION EXPÉRIMENTALE ENVIRONNEMENT EXT ET MVT

CARTOGRAPHIE CIBLE (NORMALISÉE)

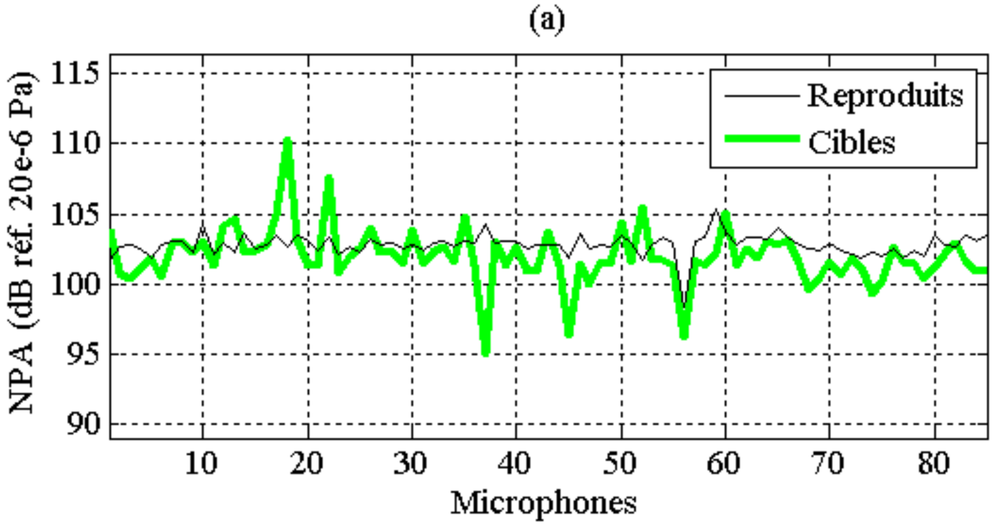
CARTOGRAPHIE REPRODUITE (NORMALISÉE)



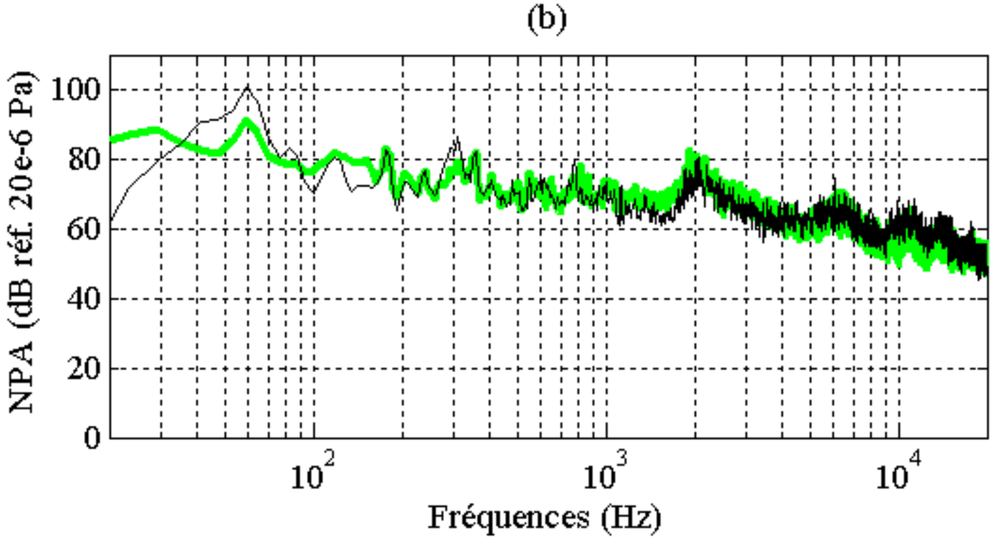
REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

VALIDATION EXPÉRIMENTALE ENVIRONNEMENT INT ET FIXE

NPA
AUX MICROS



SPECTRES
AU MICRO DE
RÉF

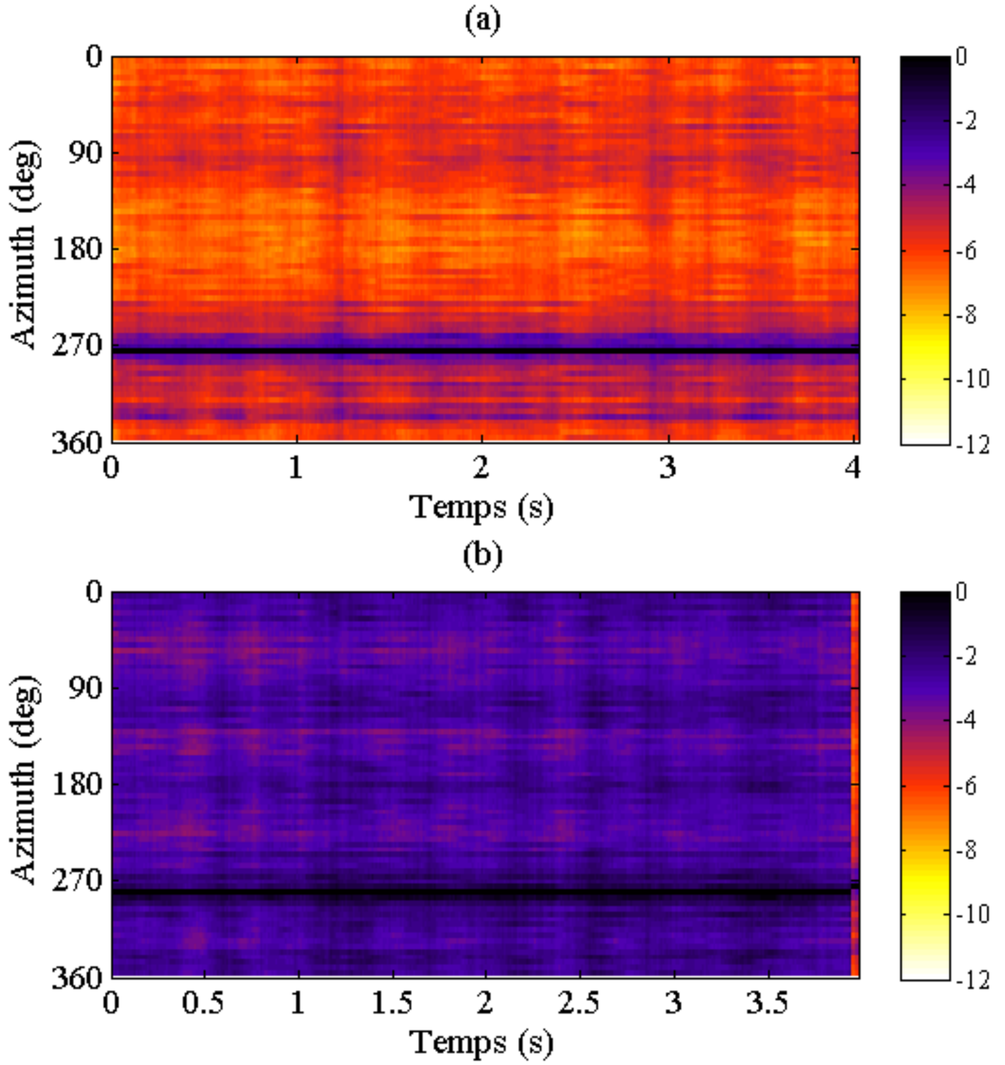


REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

VALIDATION EXPÉRIMENTALE ENVIRONNEMENT INT ET FIXE

CARTOGRAPHIE CIBLE (NORMALISÉE)

CARTOGRAPHIE REPRODUITE (NORMALISÉE)



CONCLUSION DE L'ACTIVITÉ

- Avec le système de WFS du GAUS, il est possible de reproduire des environnements sonores captés avec antenne de microphones
- La qualité audio est bien est au rendez-vous!
- Pistes de développement à court terme :
  - Égalisation de la réponse en champ libre des haut-parleurs
  - Égalisation de la réponse en champ libre des caissons de grave
  - Amélioration des algorithmes (lasso, parcimonie, approches paramétriques, etc.)

AUTRES RÉSULTATS ET LIVRABLES

- Démonstrations paramétriques avec exemples de scénarios virtuels
- Publications :
  - 2 conférences scientifiques avec cahiers des actes
  - 1 manuscrit en préparation pour IEEE MSSP 2018 à Vancouver

EN APPRENDRE PLUS?

- R-937
- Reproduction d'environnements sonores industriels en vue d'applications aux études d'audibilité des alarmes et autres signaux
- Alain Berry, Philippe-Aubert Gauthier, Hugues Nélisse, Franck Sgard

REPRODUCTION D'ENVIRONNEMENTS SONORES INDUSTRIELS

RETOMBÉES POUR LES MILIEUX DE TRAVAIL

RETOMBÉES POUR LES MILIEUX DE TRAVAIL ET LES TRAVAILLEURS

- Création et validation d'une plateforme d'acoustique virtuelle pour l'étude des risques physiques associés aux environnements sonores et aux avertisseurs de danger
- Permet de contourner les défis des vastes campagnes d'étude avec sujets humains qui sont difficiles à réaliser *in situ*
  - La plateforme permet des études paramétriques, avec variations des environnements sonores, des positions des sujets humains, des activités des sujets humains, etc.
- Utilités et retombées pratiques :
  - Réduire le temps nécessaire pour ces études, arriver à des conclusions plus rapidement, influencer et informer les milieux de travail plus rapidement

RETOMBÉS POUR LES MILIEUX DE TRAVAIL ET LES TRAVAILLEURS

- Spécifiquement, la plateforme permet donc :
  - De recréer « spatialement », en laboratoire, des environnements bruyants réels, avec la possibilité de recréer un « poste de travail » virtuel (environnement sonore, tâche manuelle, mouvement du sujet).
  - De modifier virtuellement ces environnements pour simuler l'effet de traitements acoustiques, de réduction des différentes sources, d'addition de signaux utiles (alarmes, conversations, ...)
  - De faire des études perceptives avec changements rapides et variés des configurations (ce qui est impossible en condition *in situ*).

MERCI!

QUESTIONS ET DISCUSSIONS?

OU ANNEXES ET OUVERTURES

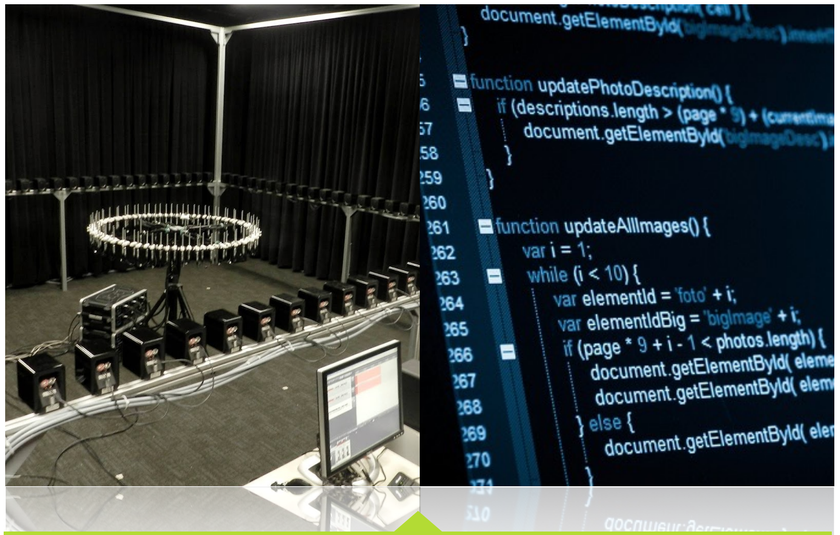
OUVERTURES :
L'ACOUSTIQUE VIRTUELLE POUR DES ÉTUDES PARAMÉTRIQUES AVEC SUJETS HUMAINS

POSSIBILITÉS POUR LE FUTUR

DEUX AVENUES DE RECHERCHE COMPLÉMENTAIRES

TESTS AVEC SUJETS HUMAINS

CAMPAGNE DE TESTS PERCEPTIFS



TECHNOLOGIE ACOU. VIRTUELLE

DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES ET D'ALGORITHMES

AVENUES DE RECHERCHE FUTURES

TESTS AVEC SUJETS HUMAINS

ÉTUDES D'AUDIBILITÉ DES ALARMES

- Campagne de perception et de localisation des alarmes et autres indicateurs
- Projet en démarrage avec Prof. Étienne Parizet (INSA Lyon) et le GAUS :
  - Étude de détection des alarmes : reproduction binaurale versus WFS

AVENUES DE RECHERCHE FUTURES

TESTS AVEC SUJETS HUMAINS

ÉTUDES D'AUDIBILITÉ DES ALARMES

- Campagnes d'étude approfondies, DOE avec différents facteurs :
  - **Auditeur** : âge, pertes auditives, protections auditives, tâche et occupation, etc.
  - **Environnement et sources** : intérieur vs extérieur, réverbération, immersion, fixes ou en mouvement, devant derrière, plusieurs alarmes, etc.

AVENUES DE RECHERCHE FUTURES

TECHNOLOGIE DE L'ACOUSTIQUE VIRTUELLE

DISPOSITIFS ET TECHNOLOGIE

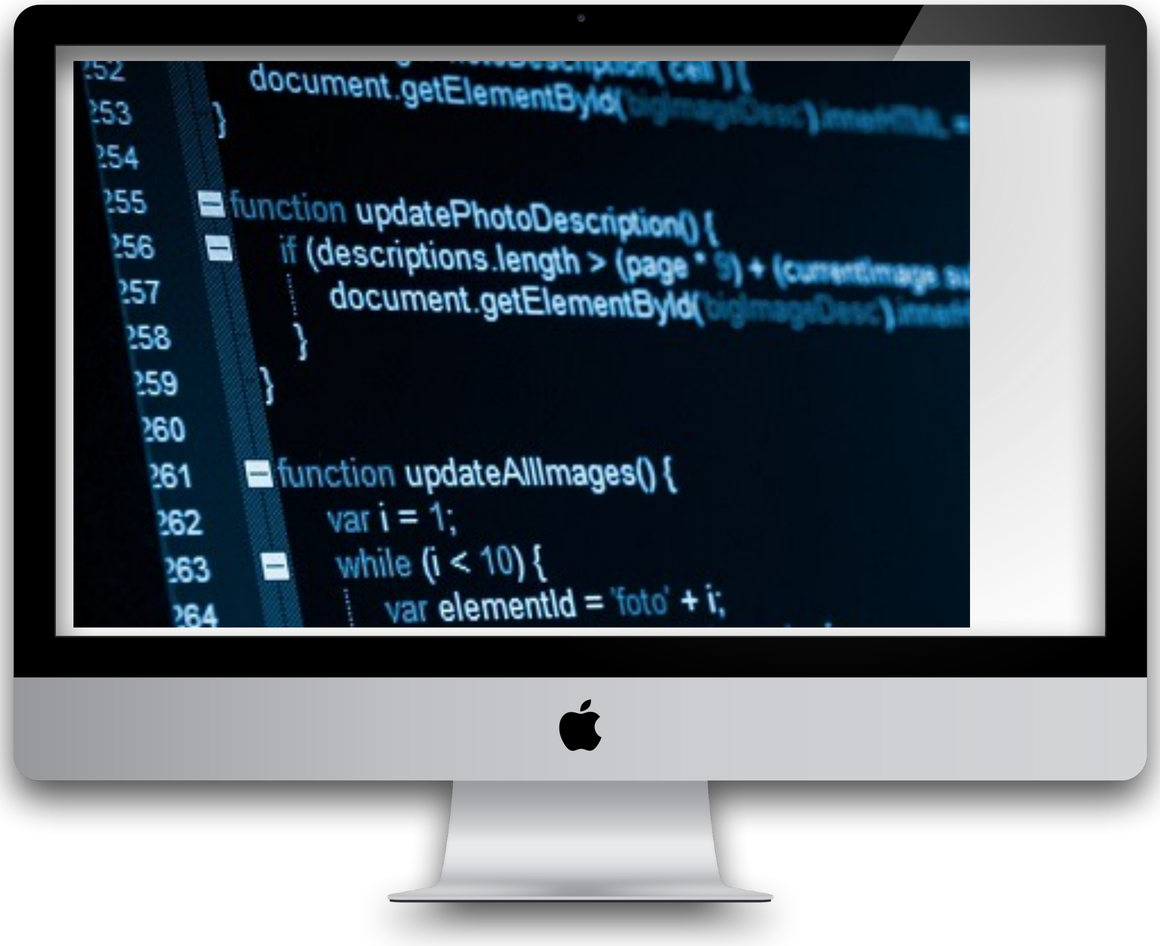
- Augmentation de puissance totale
- Ajout de composantes vidéo/VR
- Antennes de microphones compactes
- Antennes de microphones distribuées pour étendre la captation :
  - Possibilité de « choisir » une zone à reproduire dans une captation plus générale
- Exploitation des microphones de proximité

AVENUES DE RECHERCHE FUTURES

TECHNOLOGIE DE L'ACOUSTIQUE VIRTUELLE

ALGORITHME+TRAITEMENT DU SIGNAL

- Traitement et analyse des captations d'antenne de microphones
  - Extraction et synthèse des « spectres d'arrière-plan »
  - Localisation et extraction des sources localisées
  - Reproduction de mesures avec petites antennes de microphones



AVENUES DE RECHERCHE FUTURES

TECHNOLOGIE DE L'ACOUSTIQUE VIRTUELLE

ALGORITHME+TRAITEMENT DU SIGNAL

- Acoustique virtuelle basée sur des modèles acoustiques
  - Acoustique architecturale et **scans tridimensionnels**
  - Modèles ou mesures de décroissance spatiale
  - Modèles ou mesures de cartographies acoustiques
  - Etc.

AVENUES DE RECHERCHE FUTURES

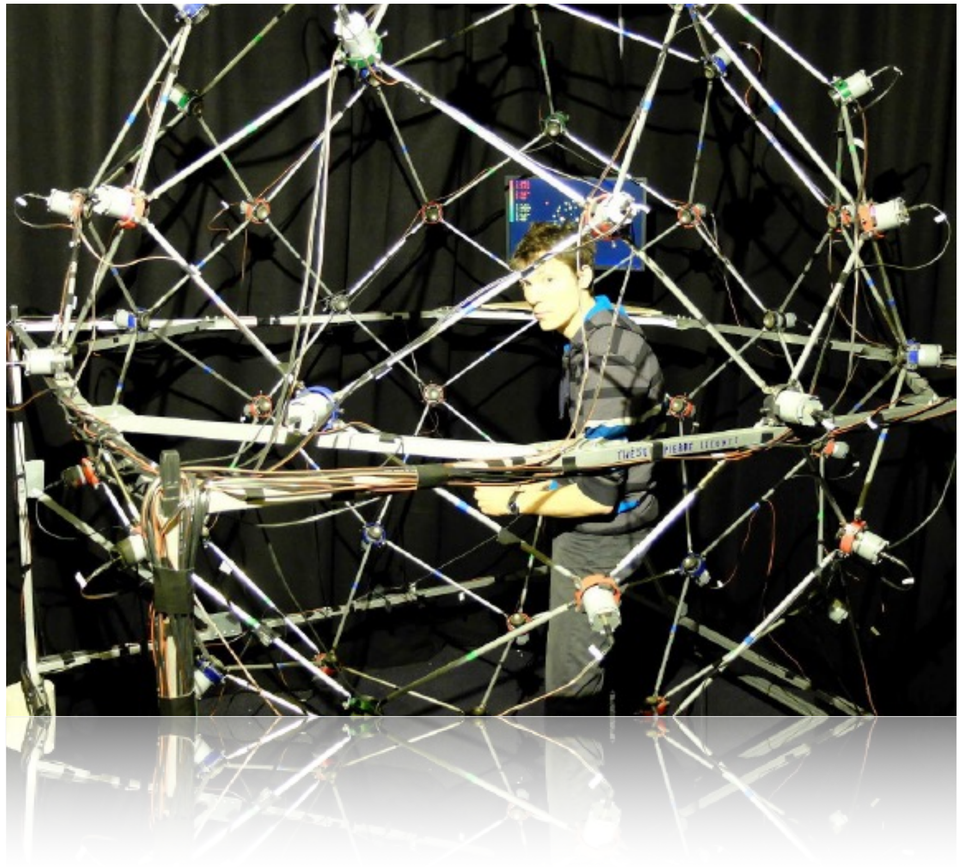
ÉQUIPEMENTS ET TECHNOLOGIES DISPONIBLES

- Reproduction de 24 sources ponctuelles (avec directivité) en mode paramétrique avec les logiciels de Sonic Emotion
- Reproduction telle qu'elle des captations d'antenne de microphones avec les résultats de l'activité de recherche
- Nouveau depuis 2018 : financement pour nouveaux équipements en acoustique virtuelle :
  - 128 canaux de mesure
  - Casque de réalité virtuelle et suivi de tête pour mesures de sujets humains
  - Scanner 3D

AVENUES DE RECHERCHE FUTURES

ÉQUIPEMENTS ET ALGORITHMES DISPONIBLES

- Extension à la reproduction 3D
- Sphère de 50 haut-parleurs
- Sphère de 100 microphones en préparation



MERCI!

QUESTIONS ET DISCUSSIONS?

LES VÉHICULES EN MOUVEMENT

RISQUES, DANGER ET ACCIDENTS

US BUREAU

6% des accidents mortels, pour un total de 23 en 2002

NIOSH

106 accidents mortels dans la construction en 2001

AU QUÉBEC

25 accidents mortels entre 1975 et 1991