

# É

Bruit et vibrations

## Études et recherches

RAPPORT R-714



### Développement d'un système de cartographie d'intensité acoustique et transfert en milieu de travail

*Michel Pearson  
André L'Espérance  
Louis-Alexis Boudreault  
Franck Sgard  
Hugues Nélisse  
Jérôme Boutin*





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.

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

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

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 de la santé et de la sécurité du travail.

### Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.

De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine Prévention au travail, publié conjointement par l'Institut et la CSST.  
Abonnement : 1-877-221-7046

### Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales  
2011  
ISBN : 978-2-89631-581-9 (PDF)  
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications  
505, boul. De Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 3C2  
Téléphone : 514 288-1551  
Télécopieur : 514 288-7636  
[publications@irsst.qc.ca](mailto:publications@irsst.qc.ca)  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)  
© Institut de recherche Robert-Sauvé  
en santé et en sécurité du travail,  
novembre 2011



Bruit et vibrations

# Études et recherches

■ RAPPORT R-714

## Développement d'un système de cartographie d'intensité acoustique et transfert en milieu de travail

### 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.

*Michel Pearson, André L'Espérance, Louis-Alexis Boudreault  
Soft dB*

*Franck Sgard, Hugues Nélisse  
Service de la recherche, IRSST*

*Jérôme Boutin  
Service soutien à la recherche et à l'expertise, IRSST*



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

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

**CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST**

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document  
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

## **REMERCIEMENTS**

Les auteurs du rapport tiennent à remercier les membres du comité de suivi qui ont participé aux discussions sur le sujet, à l'évaluation et à la bonification du système développé, en particulier Mme Pauline Fortier, M. Jean-Marie Guérin, M. Alexandre Briot, M. Phat Nguyen, M. Yvan Ton-That, M. Franck Duchassin et M. Tony Venditti. Merci à M. Nouredine Atalla et M. Maxime Bolduc pour la mise à la disposition des laboratoires du Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke et leur participation aux mesures de validation. Merci également à Mme Danièle Laplante pour avoir facilité les contacts avec l'entreprise Plombco, située à Valleyfield, ainsi qu'au personnel de cette entreprise pour avoir contribué au bon déroulement des mesures.



## SOMMAIRE

Le bruit est un contaminant important en milieu industriel et sa présence a des répercussions sur la santé des travailleurs. En addition, il peut faire partie des causes d'accidents de travail lorsqu'il masque des événements sonores comme des avertissements sonores ou la parole qui pourraient mettre en garde les travailleurs contre des dangers éventuels.

La réduction du bruit à la source a été reconnue comme étant l'approche à privilégier pour réduire le bruit en milieu industriel. Pour être en mesure de réduire le bruit à la source, il est nécessaire en premier lieu d'identifier les sources de bruit prépondérantes et c'est souvent ce stade qui s'avère être le plus ardu pour les hygiénistes industriels. La technique la plus efficace pour cette étape d'identification est la mesure d'intensité acoustique, mais les équipements qu'elle nécessite sont peu répandus, son utilisation reste complexe et l'interprétation des résultats nécessite une formation avancée.

De manière à démocratiser la mesure d'intensité acoustique pour l'identification des sources de bruit, un système de cartographie d'intensité acoustique a été développé. Ce dernier permet de générer une carte de couleur superposée à une photographie dont les zones rouges identifient les sources de bruit prépondérantes. Cette approche simple permet une identification rapide et efficace des sources de bruit en plus de grandement faciliter l'interprétation des résultats.

L'appareil prend la forme d'un ordinateur portable robuste doté d'une carte d'acquisition haute performance, d'une sonde d'intensité dotée d'un système de repérage spatial et d'une caméra numérique. En addition, le système est muni d'un logiciel dont l'interface est simple et conviviale. L'utilisation de ce système en milieu industriel a permis de confirmer sa pertinence pour l'identification des sources de bruit dans ce milieu. En addition, les cartes de bruit qu'il produit servent non seulement à identifier les sources de bruit en cause, mais donnent aussi des pistes quant aux moyens de réduire leurs émissions.



## TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>CONTEXTE .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>3</b>
2.1	<b>Sonde d'intensité avec système de guidage robotisé [1].....</b>	<b>3</b>
2.2	<b>Méthode NAF (near-field acoustic holography) [2].....</b>	<b>4</b>
2.3	<b>« Beamforming » utilisant une antenne multi microphonique [3] .....</b>	<b>4</b>
2.4	<b>Cartographie point par point avec repère spatial acoustique [4].....</b>	<b>5</b>
2.5	<b>Sonde d'intensité particule-vitesse et repérage manuel par caméra [5] .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>OBJECTIFS DE L'ACTIVITÉ.....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>CONCEPT .....</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>MÉTHODE DE CALCUL DES CARTES D'INTENSITÉ .....</b>	<b>13</b>
5.1	<b>Régions associées à chaque point de mesure .....</b>	<b>13</b>
5.2	<b>Moyenne des points de mesure .....</b>	<b>15</b>
5.3	<b>Interpolation par des niveaux aux points intermédiaires .....</b>	<b>16</b>
5.4	<b>Indice de couverture (qualité de mesure) .....</b>	<b>18</b>
5.5	<b>Limitations.....</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>SYSTÈME DE REPÉRAGE SPATIAL.....</b>	<b>21</b>
6.1	<b>Caméra numérique .....</b>	<b>21</b>
6.2	<b>Objectif de caméra.....</b>	<b>23</b>
6.3	<b>DEL et optimisation de l'intensité lumineuse émise .....</b>	<b>23</b>
6.4	<b>Filtre optique passe-bande .....</b>	<b>24</b>
6.5	<b>Algorithme de vision artificielle.....</b>	<b>25</b>
6.5.1	<b>Rejet des sources infrarouges parasites.....</b>	<b>25</b>

<b>7</b>	<b>SONDE D'INTENSITÉ .....</b>	<b>27</b>
<b>7.1</b>	<b>Dispositif de correction de perspective .....</b>	<b>27</b>
7.1.1	Avantages.....	27
7.1.2	Limitations .....	28
<b>7.2</b>	<b>Sonde d'intensité avec dispositif de repérage.....</b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b>PLATEFORME DE TRAITEMENT DE SIGNAL .....</b>	<b>31</b>
<b>8.1</b>	<b>Carte DSP .....</b>	<b>31</b>
<b>8.2</b>	<b>Carte de conditionnement de signaux ICP .....</b>	<b>32</b>
<b>8.3</b>	<b>Ordinateur .....</b>	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>DÉVELOPPEMENT LOGICIEL .....</b>	<b>35</b>
<b>9.1</b>	<b>Interface principale.....</b>	<b>35</b>
<b>9.2</b>	<b>Paramètres de mesure et d'affichage .....</b>	<b>37</b>
9.2.1	Palette des paramètres de la mesure.....	37
9.2.2	Palette des informations de la mesure.....	38
9.2.3	Palette du spectre de la mesure .....	38
<b>10</b>	<b>FONCTIONNEMENT ÉTAPE PAR ÉTAPE DU MODE CARTOGRAPHIQUE ..</b>	<b>39</b>
<b>10.1</b>	<b>Définition de la zone.....</b>	<b>39</b>
10.1.1	Image de l'arrière-plan.....	39
10.1.2	Validation de l'éclairage de l'environnement.....	40
<b>10.2</b>	<b>Délimitation de la zone de mesure.....</b>	<b>40</b>
<b>10.3</b>	<b>Étalonnage du plan géométrique.....</b>	<b>41</b>
<b>10.4</b>	<b>Mesure de la carte de bruit .....</b>	<b>41</b>
<b>10.5</b>	<b>Affichage des résultats et post-traitement .....</b>	<b>42</b>
10.5.1	Mise en forme de la carte de bruit .....	42
10.5.2	Affichage d'une bande spectrale particulière ou du niveau global.....	44
10.5.3	Type de spectre .....	44
10.5.4	Unités .....	44
10.5.5	Type de mesure.....	45
10.5.6	Outils de sélection.....	46
10.5.7	Outil d'exportation.....	46

<b>11</b>	<b>VALIDATION ET ÉVALUATION DU SYSTÈME.....</b>	<b>47</b>
<b>11.1</b>	<b>Validation.....</b>	<b>47</b>
11.1.1	Puissance acoustique d'une source de référence .....	47
11.1.2	Localisation de défauts acoustiques dans une paroi .....	50
<b>11.2</b>	<b>Évaluation et questionnaires.....</b>	<b>51</b>
<b>12</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>53</b>
<b>13</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>55</b>
<b>ANNEXE A.</b>	<b>DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME DE REPÉRAGE SPATIAL.....</b>	<b>56</b>
<b>ANNEXE B.</b>	<b>RÉPONSES AUX QUESTIONNAIRES D'ÉVALUATION.....</b>	<b>61</b>



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Sonde d'intensité avec système de guidage robotisé.....	3
Figure 2 – Système d'acquisition NAH de B&K .....	4
Figure 3 – Antenne multi microphonique B&K pour le « beamforming » .....	5
Figure 4 – Système de positionnement spatial acoustique.....	5
Figure 5 – Système avec repérage manuel par caméra.....	6
Figure 6 – Illustration du concept de sonde à gradient de pression .....	9
Figure 7 – Création d'une carte d'intensité à partir de mesures ponctuelles .....	10
Figure 8 – Utilisation d'une caméra comme dispositif de repérage .....	10
Figure 9 – Système de cartographie I-Track.....	11
Figure 10 – Éléments constitutifs .....	13
Figure 11 – Ellipsoïde de Fresnel .....	14
Figure 12 – Illustration de la surface élémentaire de mesure .....	14
Figure 13 – Moyenne des points de mesure.....	15
Figure 14 – Résolution de la carte et point d'évaluation .....	16
Figure 15 – Triangulation de Delaunay .....	17
Figure 16 – Conditions pour la validité d'un point d'évaluation.....	17
Figure 17 – Illustration du cas du triangle étiré .....	19
Figure 18 – Rendement du capteur en fonction de la longueur d'onde .....	22
Figure 19 – Transmission du filtre passe-bande choisi en fonction de la longueur d'onde.....	24
Figure 20 – Image captée par la caméra avec filtre en place .....	25
Figure 21 – Rejet des sources parasites par image de référence.....	25
Figure 22 – Position du système de repérage et du plan de mesure .....	27
Figure 23 – Prototype de sonde d'intensité acoustique doté du système de repérage spatial.....	29
Figure 24 – Poignée de la sonde avec son circuit de télécommande et boutons de contrôle rétro éclairés .....	30
Figure 25 – Carte DSP SR-MK3 utilisé dans le système final .....	31
Figure 26 – Carte d'expansion SR-MK3 utilisé dans le système final .....	32
Figure 27 – Compartiment de l'ordinateur avec la carte SR-MK3 et la carte de conditionnement de signaux et d'alimentation ICP.....	33
Figure 28 – Interface logicielle du mode 2D .....	36
Figure 29 – Palettes du mode 2D.....	37

---

Figure 30 – Palette des paramètres de la mesure en mode 2D.....	37
Figure 31 – Palette des informations de la mesure du mode 2D .....	38
Figure 32 – Palette du spectre de la mesure en mode 2D .....	38
Figure 33 – Image de l'arrière-plan (cas du bol vibrant pour la sélection des pesées, société Plombco).....	40
Figure 34 – Méthode de balayage recommandée par la norme ISO 9614-2 .....	42
Figure 35 – Mise en forme des cartes de bruit (transparent et opaque).....	43
Figure 36 - Affichage de l'intensité positive (gauche) et négative (droite).....	43
Figure 37 – Échelle de couleur automatique (gauche) et manuelle (droite).....	44
Figure 38 – Intensité acoustique (a), Pression acoustique (b) et Indice PI (c).....	45
Figure 39 – Outil de sélection ponctuel (gauche) et de sélection de surface (droite).....	46
Figure 40 – Source de référence testée .....	47
Figure 41 – Mesure de la puissance acoustique d'une source de référence à l'aide d'une antenne microphonique .....	48
Figure 42 – Mesure de la puissance acoustique d'une source de référence à l'aide de la sonde intensimétrique de SoftdB.....	48
Figure 43 – Mesure de la puissance acoustique d'une source de référence à l'aide d'une sonde intensimétrique Brüel&Kjaer (gauche) photo de la sonde intensimétrique Brüel&Kjaer (droite).....	49
Figure 44 – Niveaux de puissance acoustique par tiers d'octave de la source testée mesurés par 3 techniques et courbe de référence du manufacturier de la source .....	50
Figure 45 – Structure étudiée - côté réception, chambre semi-anéchoïque (gauche) côté émission, chambre réverbérante (droite).....	51
Figure 46 – Carte d'intensité acoustique globale (gauche) et dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale 6300 Hz (droite) .....	51

## 1 CONTEXTE

Le bruit est un problème important relié à la santé au travail et la réduction du bruit à la source a été reconnue comme étant l'approche à privilégier pour réduire ce problème. La réduction du bruit à la source requiert souvent d'identifier et de caractériser les éléments spécifiques responsables de l'émission sonore. Cette étape d'identification des éléments et des mécanismes d'émission est souvent difficile, voire impossible à réaliser à l'aide d'un simple sonomètre. Des techniques et des appareils plus performants tels que les intensimètres acoustiques sont souvent requis pour permettre cette identification.

Les intensimètres acoustiques mesurent le flux d'énergie acoustique dans une direction donnée alors que les sonomètres ne permettent d'obtenir que la pression acoustique en un point donné. Cette différence fondamentale permet aux intensimètres d'évaluer la puissance acoustique d'une source précise alors que les sonomètres ne le peuvent pas. C'est précisément ce phénomène qui est utilisé lors de l'identification des sources sonores en milieu industriel. Les appareils d'intensimétrie acoustique ne sont toutefois encore que peu répandus et utilisés, leur coût<sup>1</sup> et les difficultés d'utilisation et d'analyse étant des contraintes importantes. De plus, l'intensimétrie telle que pratiquée de façon classique est souvent lourde lorsque vient le temps de générer des cartes de bruit, car la mesure de l'intensité se fait alors point par point. On doit alors ensuite analyser et combiner ces mesures par points séparément pour constituer les cartes sonores.

Pour tenter de contourner ces contraintes, le projet de recherche *Conception d'un intensimètre économique et évaluation d'un nouveau concept de cartographie acoustique* a été réalisé en 2003-2004 (rapport IRSST R-422). Ce projet a permis de démontrer la faisabilité et la pertinence d'un appareil permettant d'obtenir des cartes d'intensité acoustique visant à simplifier et faciliter l'analyse des résultats en combinant des mesures d'intensité acoustique à un système de repérage spatial. Les cartes d'intensité acoustique offrent une représentation graphique de la mesure d'intensité effectuée qui prend la forme d'une photo sur laquelle est superposé le rayonnement mesuré, illustré par des taches de couleur. Les intensimètres conventionnels quant à eux n'offrent qu'un spectre d'intensité comme résultat et laissent son interprétation à l'utilisateur, ce qui rend plus difficile l'interprétation des résultats.

La performance du prototype développé a cependant été limitée par les vitesses de communication et la performance des ordinateurs disponibles en 2004. En effet, la vitesse d'acquisition et la performance de calcul ne permettaient pas un traitement de données en temps réel, aspect se traduisant par des pertes d'information et un affichage discontinu des niveaux d'intensité lors du balayage. La période de mesure pouvait donc devenir assez longue pour l'obtention d'une carte d'intensité complète. Outre cet aspect, le système de positionnement utilisé pour le prototype était un appareil distinct (système *Flock of Bird* (FOB)) du système de mesure acoustique. Le système de mesure complet était donc relativement encombrant et difficilement utilisable en milieu industriel.

---

<sup>1</sup> Le prix d'un système de base permettant de mesurer l'intensité varie entre 30 000\$ à 45 000\$, sans l'option de mesure cartographique.

L'amélioration des performances des ordinateurs et des cartes de traitement de signaux au cours des dernières années permet maintenant d'envisager le développement d'un système de cartographie d'intensité performant et compact. C'est dans ce contexte que ce projet de *Développement d'un système de cartographie d'intensité acoustique et transfert en milieu de travail* a été entrepris.

## 2 ÉTAT DE L'ART

Il existe cinq principales méthodes de cartographie acoustique identifiées sur le marché mondial et/ou présentées dans des articles scientifiques. Ces différentes méthodes sont décrites ci-dessous et permettent toutes de visualiser un rayonnement acoustique. Un problème important de ces méthodes est lié à leur utilisation en milieu industriel. En effet, le manque de flexibilité, lors des manipulations, confine la plupart de ces méthodes aux mesures *in situ* en laboratoire. L'autre obstacle majeur est le coût des équipements requis pour chacune de ces technologies. L'équipement commercial le moins onéreux se vend environ 100 000 \$ (CAN). Ces contraintes limitent très rapidement l'accès des équipements de cartographie aux intervenants en acoustique en milieu industriel.

### 2.1 Sonde d'intensité avec système de guidage robotisé [1]

Dans cette méthode, l'utilisation d'un robot et d'un contrôleur est nécessaire afin de déterminer la séquence de points ou du balayage à effectuer avec la sonde (Figure 1). Cette méthode exige un système mécanique lourd et encombrant qui rend la mesure en industrie difficile, voire impossible. Cet équipement est donc réservé à l'utilisation *in situ* pour les laboratoires de recherche. Le coût d'un système complet 2D pour une surface de 25 m<sup>2</sup> oscille autour de 100 000 \$ (CAN). L'emploi d'une antenne multi microphonique avec cette méthode rend le coût du système plus onéreux en raison de l'utilisation de plusieurs microphones et d'un système d'acquisition ayant un nombre d'entrées proportionnel à la quantité de microphones utilisés.



Figure 1 – Sonde d'intensité avec système de guidage robotisé

## 2.2 Méthode NAF (near-field acoustic holography) [2]

Cette méthode consiste à effectuer une cartographie avec une antenne en champ proche basée sur la transformation spatiale du champ d'ondes planes. Le système proposé par Bruël & Kjaer (B&K) se limite aux fréquences inférieures à 3 kHz en mode de mesure des ondes non stationnaires et à 5 kHz en mode stationnaire. Le système NAF stationnaire peut aussi être couplé à un robot et à un contrôleur pour la gestion de la position. L'antenne typique, illustrée à la Figure 2 et qui utilise 120 microphones, ainsi qu'un système d'acquisition imposant limitent l'utilisation de cet équipement aux mesures en laboratoire. Le prix d'un système non stationnaire à 36 canaux est d'environ 230 000 \$ (CAN). De plus, la calibration de cette antenne devient beaucoup plus longue étant donné que la calibration en amplitude de tous les microphones doit être effectuée avant et après chaque série de mesures.

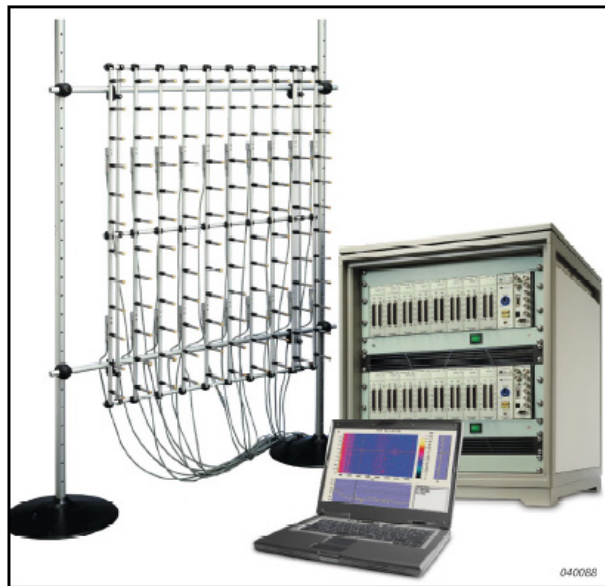
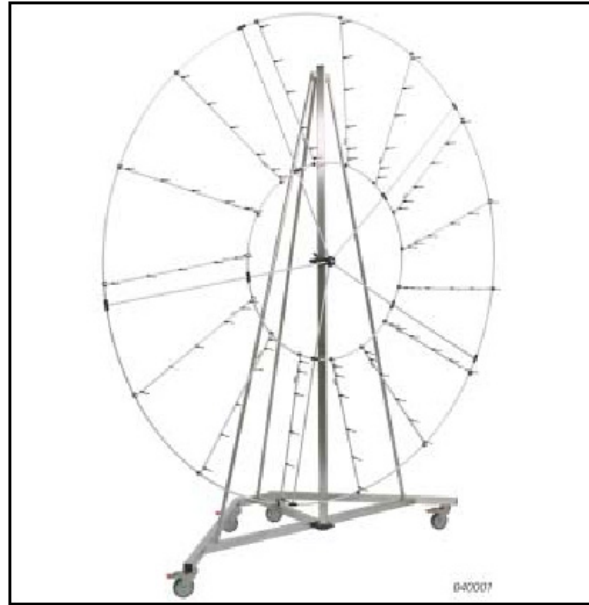


Figure 2 – Système d'acquisition NAH de B&K

## 2.3 « Beamforming » utilisant une antenne multi microphonique [3]

La cartographie avec cette méthode (Figure 3) donne des indications sur les zones à fort rayonnement. Cette technique ne donne aucun renseignement sur l'intensité acoustique ainsi que sur la puissance des sources. L'antenne doit être orientée en champ lointain (3 à 7 m) face à la zone d'évaluation et limite ainsi l'utilisation dans plusieurs environnements industriels généralement encombrés. Le coût d'un système à 42 canaux est d'environ 200 000 \$ (CAN). Le problème de calibration est le même que pour la technique NAF.



**Figure 3 – Antenne multi microphonique B&K pour le « beamforming »**

## **2.4 Cartographie point par point avec repère spatial acoustique [4]**

Le repère spatial est une antenne de quatre haut-parleurs qui émettent un signal de référence à chaque point de mesure pour évaluer les coordonnées spatiales de la sonde (Figure 4). La sonde d'intensité 3D permet d'évaluer un vecteur d'intensité ainsi que le retard des signaux sonores de référence et de calculer la position de mesure. L'information sur l'intensité acoustique est ensuite acquise et associée à la mesure de position. Le processus est répété pour tous les points prédéfinis par l'utilisateur.



**Figure 4 – Système de positionnement spatial acoustique**

Les problèmes rencontrés avec cette technique résident dans le transport et la disposition de l'antenne de haut-parleur dans des endroits encombrés en industrie. Les obstacles entre les haut-parleurs et la sonde affecteront les mesures. Les réflexions et les sources extérieures de bruit peuvent introduire de fausses mesures de position. De plus, il est essentiel de travailler avec une sonde d'intensité 3D à 6 microphones. La technique point par point est très peu utilisée en industrie en raison du temps de mesure qui est beaucoup plus long. Cette méthode exige aussi la disposition d'un maillage pour que l'utilisateur repère les points prédéfinis dans l'espace.

## 2.5 Sonde d'intensité particule-vitesse et repérage manuel par caméra [5]

Le système dont il est question est celui de la firme *Microflown*. Ce système utilise une sonde particule-vitesse unique qui est déplacée dans le plan de mesure (Figure 5). Une caméra vidéo filme la scène lors de la mesure. Lorsque la mesure est terminée, la bande vidéo est analysée et la position de la sonde est manuellement identifiée pour chaque échantillon de signal acoustique. Pour s'assurer que le signal temporel provenant de la sonde et que le flux vidéo soient synchronisés, l'opérateur doit frapper des mains face à la caméra au début et à la fin de la mesure pour manuellement aligner les deux flux temporels d'information. L'avantage de ce système est son faible coût par rapport aux autres méthodes de cartographie, mais le principal inconvénient est l'étape d'identification manuelle de la position sur la bande vidéo.



Figure 5 – Système avec repérage manuel par caméra

### 3 OBJECTIFS DE L'ACTIVITÉ

L'objectif de cette activité a été de développer un appareil de cartographie d'intensité acoustique efficace, compact et facile d'utilisation. Ce système devait combiner une sonde d'intensité avec un système de repérage spatial permettant la création de cartes de bruit de façon simple.

Cet appareil visait à donner aux intervenants en réduction de bruit un outil pour :

- Cartographier le rayonnement acoustique de sources de bruit problématiques, en vue de concevoir et d'implanter des solutions de réduction de bruit efficaces;
- Évaluer la puissance acoustique de ces sources de bruit,  $L_{w(F)}$ . Ce paramètre de puissance est requis dans les outils d'analyse et de conception acoustique tels que *RAP-ONE* et le logiciel d'aide à la conception d'encoffrements développé par l'IRSST.

Le développement de l'appareil a été réalisé en quatre étapes principales :

1. Développement du système de repérage spatial;
2. Développement de la sonde et du système d'acquisition acoustique;
3. Développement de l'algorithme de calcul des cartes d'intensité à partir des données combinées du système de repérage spatial et de la sonde d'intensité;
4. Développement d'une interface usager conviviale et facile d'utilisation.

Ce rapport résume les principales étapes de ces développements et les résultats obtenus.

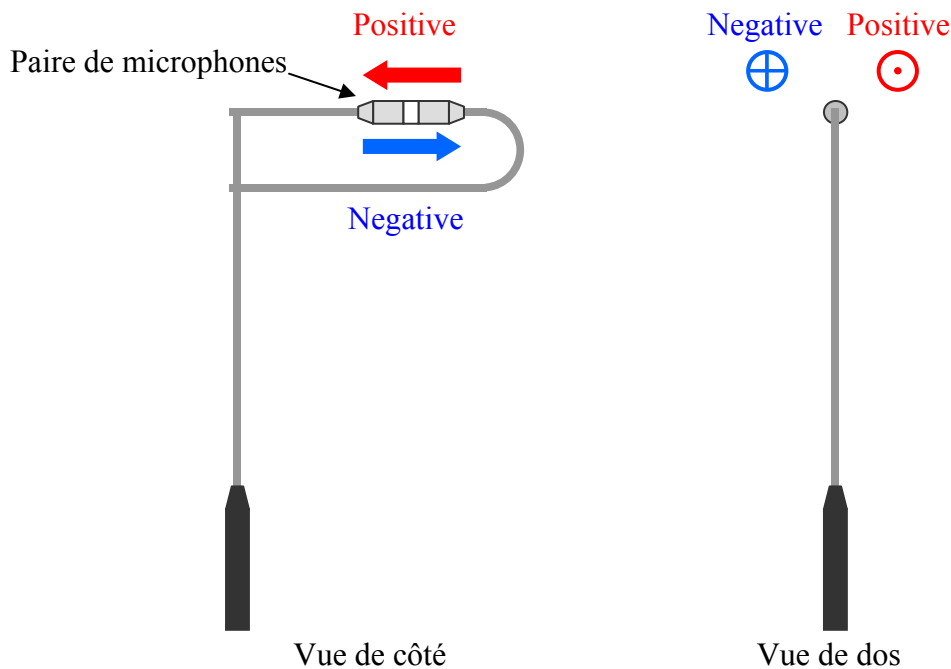


## 4 CONCEPT

Le concept à la base de cet appareil est de combiner une mesure d'intensité acoustique ponctuelle avec ses coordonnées spatiales. Lorsque ces mesures sont réparties sur un plan, une interpolation est effectuée entre les points de mesure pour créer une carte d'intensité. Les mesures ponctuelles d'intensité sont réalisées avec une sonde à gradient de pression, dotée de deux microphones légèrement espacés. C'est par le biais de l'interspectre entre les signaux des deux microphones que le spectre d'intensité est évalué.

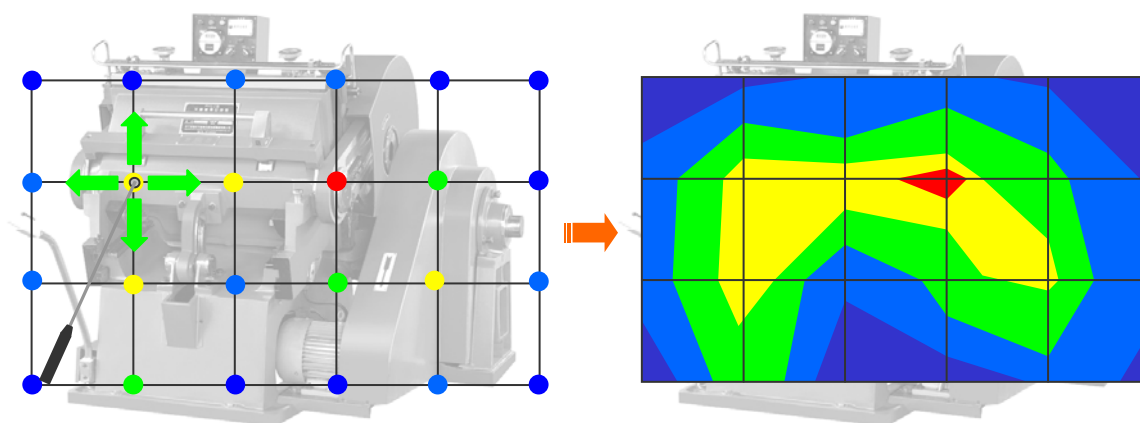
$$I(f) = \frac{-\text{Im}[G_{ba}(f)]}{\omega\rho\Delta x}$$

Un front d'onde provenant de l'avant de la sonde donnera une intensité positive alors qu'un front d'onde provenant de l'arrière de la sonde donnera une intensité négative (Figure 6). Si le front d'onde provient du côté de la sonde, alors l'intensité sera nulle.



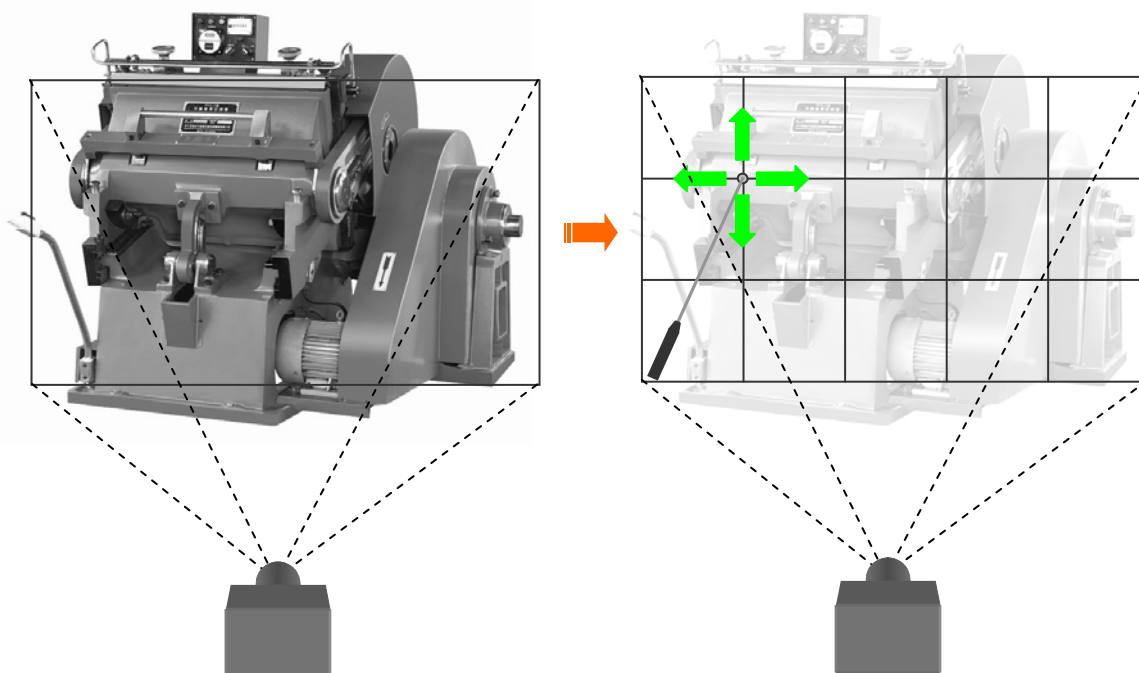
**Figure 6 – Illustration du concept de sonde à gradient de pression**

Les coordonnées géométriques de chaque mesure ponctuelle sont prélevées sur un plan de mesure qui prend place près de la source de bruit sous examen. Des mesures répétées sur ce plan de mesure recueillent les échantillons utilisés pour produire la carte d'intensité (Figure 7). La carte d'intensité résultante illustre alors la grandeur de l'énergie acoustique traversant la surface définie par le plan de mesure. Lorsque visualisée en transparence pour faire apparaître l'arrière-plan, cette carte de couleur permet d'associer un flux d'énergie plus important à une certaine partie de la source de bruit sous examen, ce qui facilite grandement l'identification des sources de bruit prépondérantes.



**Figure 7 – Création d'une carte d'intensité à partir de mesures ponctuelles**

De manière à localiser la sonde sur le plan de mesure, une caméra numérique est utilisée en combinaison avec un dispositif de repérage localisé sur la sonde d'intensité. Cette caméra permet aussi de prendre une photographie de la source sous examen, ce qui garantit une superposition parfaite de l'image de la source de bruit et de la carte produite (Figure 8).



**Figure 8 – Utilisation d'une caméra comme dispositif de repérage**

Le système développé, intégrant le concept décrit, a été nommé I-Track pour *Intensity Tracking*. Cet appareil comprend tous les éléments nécessaires à la production d'une carte d'intensité acoustique (Figure 9).



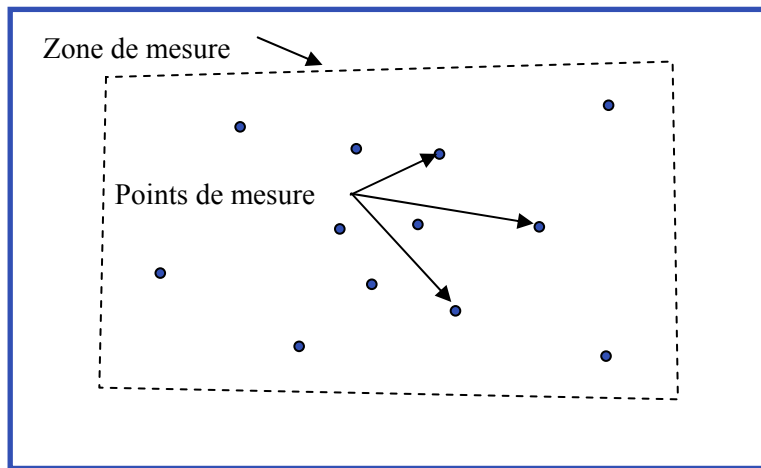
- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| 1. Sonde d'intensité acoustique           | 5. Carte d'acquisition DSP intégrée |
| 2. Dispositif de positionnement           | 6. Caméra numérique                 |
| 3. Poignée avec boutons de contrôle       | 7. Objectif grand-angle             |
| 4. Ordinateur avec logiciel de traitement | 8. Filtre infrarouge                |

**Figure 9 – Système de cartographie I-Track**



## 5 MÉTHODE DE CALCUL DES CARTES D'INTENSITÉ

Avec le système de repérage, le balayage de la sonde dans un plan de mesure permet d'obtenir les valeurs d'intensité ponctuelles auxquelles sont associées des coordonnées spatiales recueillies avec le système de repérage. Ces points de mesure sont alors répartis sur la zone de mesure le long de la trajectoire de balayage. La répartition des points résultante est aléatoire et non uniforme (Figure 10). Pour limiter le temps de balayage (et aussi le nombre de données à traiter), en pratique, toutes les régions de la zone ne sont pas nécessairement couvertes durant le balayage. La Figure 10 illustre des points de l'espace pour lesquelles les valeurs d'intensité (et de pression sonore) sont connues suite au balayage.

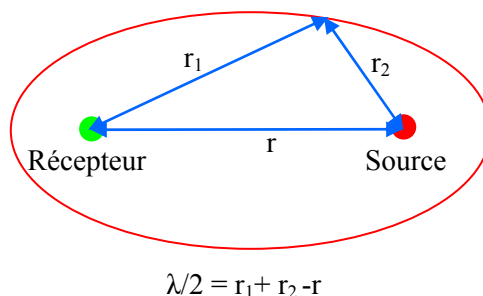


**Figure 10 – Éléments constitutifs**

Le calcul de la carte de bruit implique donc une interpolation des valeurs d'intensité pour tous les points non couverts par le balayage. Ce chapitre décrit la méthode d'évaluation qui a été développée pour l'évaluation des points intermédiaires et la génération des cartes d'intensité.

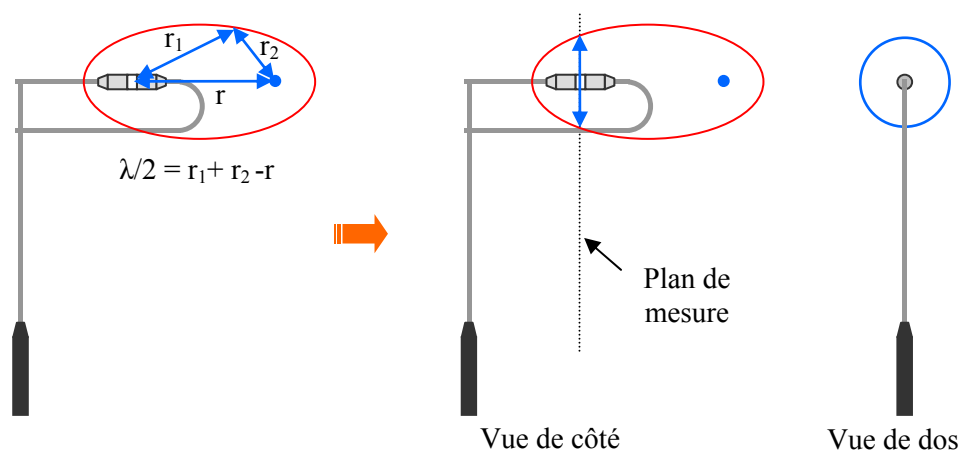
### 5.1 Régions associées à chaque point de mesure

Un des premiers éléments qu'il nous est apparu nécessaire de quantifier est l'élément de surface élémentaire auquel peut être associée la valeur du point de mesure. Pour cette évaluation, le concept de l'ellipsoïde de Fresnel a été retenu. Ce concept établit que le rayonnement d'une onde optique, électromagnétique ou acoustique est principalement défini par la région de l'espace délimité par la première zone de Fresnel. En acoustique, cette zone de Fresnel est un ellipsoïde dont les pôles sont la source et le récepteur (Figure 11).



**Figure 11 – Ellipsoïde de Fresnel**

Dans le cas présent, la source est la source de bruit élémentaire sous examen située en face de la sonde et le récepteur est incarné par le centre acoustique des microphones de la sonde situé dans le plan de balayage. Par conséquent, l'élément de surface élémentaire auquel peut être associée la mesure ponctuelle prend la forme d'un disque résultant de l'intersection de l'ellipsoïde avec le plan de balayage (Figure 12).



**Figure 12 – Illustration de la surface élémentaire de mesure**

Sachant la position du point d'évaluation et la position de la source, le diamètre du disque que l'on peut associer à la mesure peut être déterminé par la relation suivante :

$$Diamètre = \frac{2 \times \left( \left( \frac{\lambda}{2} \right)^2 + |\overrightarrow{SR}| \times \lambda \right)}{\lambda + 2 \times |\overrightarrow{SR}|}$$

Le diamètre du disque est fonction de la distance du plan de mesure à la source et de la fréquence. La distance à la source étant généralement de l'ordre de 0,3 m dans le système de cartographie, le principal facteur influençant le diamètre du disque devient alors la fréquence à considérer.

Plus la fréquence à analyser sera élevée, plus petite sera la région de l'espace pouvant être représentée par cette mesure, et donc plus grand sera le nombre de points requis pour obtenir une carte de bruit représentative. En pratique, les mesures d'intensité sont généralement effectuées à une distance variant entre 0,5 et 0,3 m selon le type de source et le montage de mesure. L'influence de la variation de distance (entre 0,5 et 0,3 m) sur la précision et la représentativité des cartes d'intensité s'étant avérée mineure en pratique, cette distance a été fixée à 0,30 m dans le logiciel dans un but de simplification. Cette valeur est jugée conservatrice car elle réduit la taille des disques. Ce paramètre pourrait toutefois être ajustable.

Il est important de mentionner que le champ acoustique en champ rapproché est susceptible d'être plus fortement réactif que celui en champ à plus grande distance. Cependant, les cartes d'intensité effectuées lors de mesures en champ proche contiennent plus de variation spatiale que des cartes produites lors de mesures en champ éloigné. En d'autres termes, les cartes produites en champ rapproché permettent plus facilement de discerner deux sources de bruit qui sont près l'une de l'autre qu'une carte produite en champ éloigné.

## 5.2 Moyenne des points de mesure

Considérant que la durée de chaque trame d'acquisition lors du passage de la sonde est de 0,125 s, que l'intensité sonore émise par la source peut varier dans le temps, mais aussi que la sonde peut passer plusieurs fois au même endroit, il est nécessaire de procéder à une moyenne spatiale des échantillons. Ce processus consiste, pour chaque point de mesure, à déterminer le niveau moyen associé en effectuant une moyenne de tous les points de mesure compris à l'intérieur du disque du premier ellipsoïde de Fresnel (Figure 13). Pour la suite, ce disque sera nommé « disque d'influence ». Le point central du disque d'influence considéré se voit attribuer la moyenne des valeurs des points de mesures contenus dans ce disque. Cette opération est répétée pour tous les points de mesure. Le niveau moyen associé à chaque disque d'influence est défini comme étant le niveau moyen du point de mesure et est la valeur utilisée pour la suite de l'interpolation.

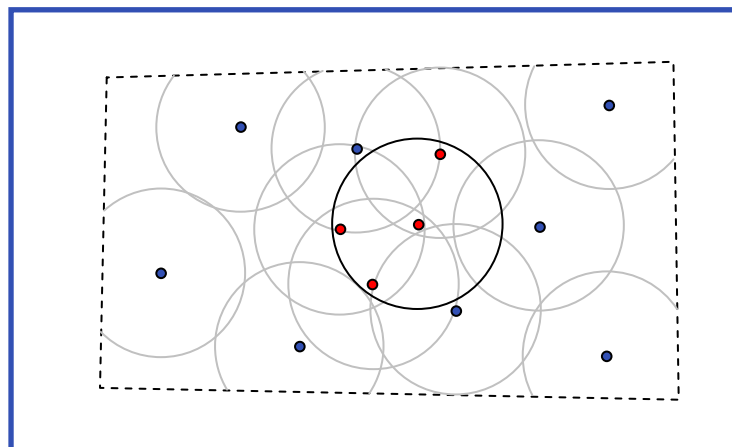


Figure 13 – Moyenne des points de mesure

Il est à noter que la dimension du disque d'influence étant variable pour chaque fréquence, ce processus de détermination des points à considérer dans la moyenne doit être répété pour toutes les bandes de fréquence à considérer. Il est à noter également que l'opération de moyenne effectuée porte sur l'énergie de la mesure et tient compte du sens du vecteur d'intensité. La valeur associée au point de mesure devient alors l'énergie moyenne du disque d'influence. Par exemple, si trois points de mesure sont contenus dans le disque, le premier à  $1 \text{ W/m}^2$ , le second à  $3 \text{ W/m}^2$  et le troisième à  $-2 \text{ W/m}^2$ , la moyenne est de  $0,66 \text{ W/m}^2$ .

### 5.3 Interpolation par des niveaux aux points intermédiaires

Pour créer une carte d'intensité, un niveau d'intensité doit être associé à chaque région de l'image. Dans cette application, la région la plus petite sera un pixel. Il est toutefois possible de considérer des groupes de pixel. Cette option par groupe de pixel offrira une carte plus grossière, mais pour laquelle le calcul sera plus rapide. Dans ce cas, les coordonnées d'évaluation seront celles du point central de ce groupe de pixels. Chaque point à évaluer sera nommé ci-dessous « point d'évaluation » (Figure 14). Pour cette évaluation, la méthode de triangulation de Delaunay est utilisée avec les valeurs moyennées des points de mesure comme paramètres initiaux (Figure 15).

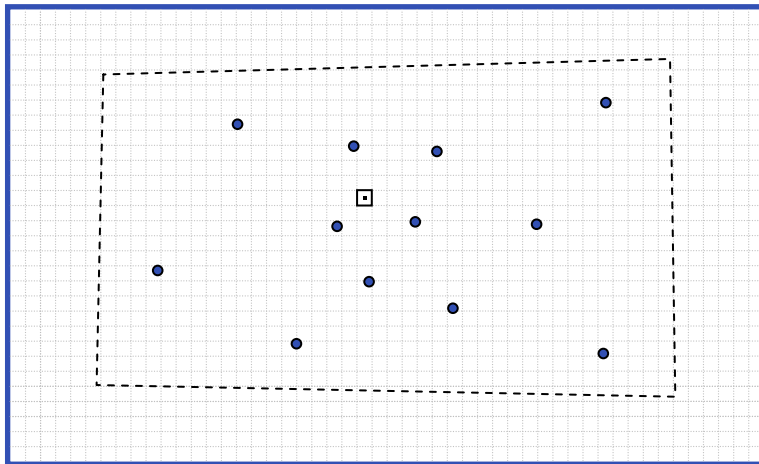
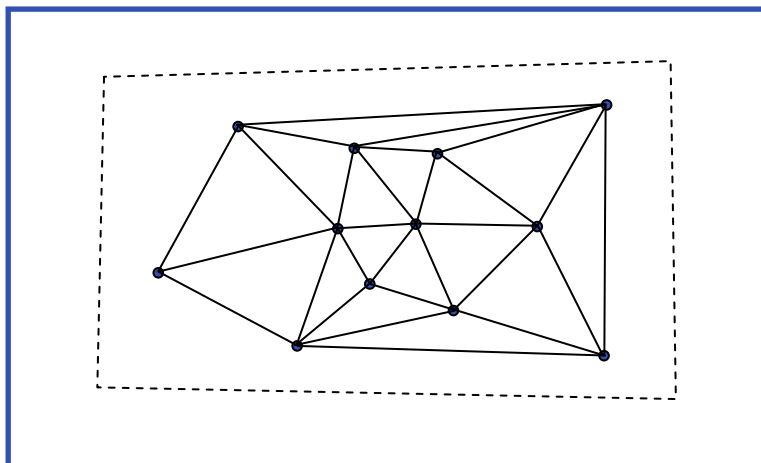


Figure 14 – Résolution de la carte et point d'évaluation

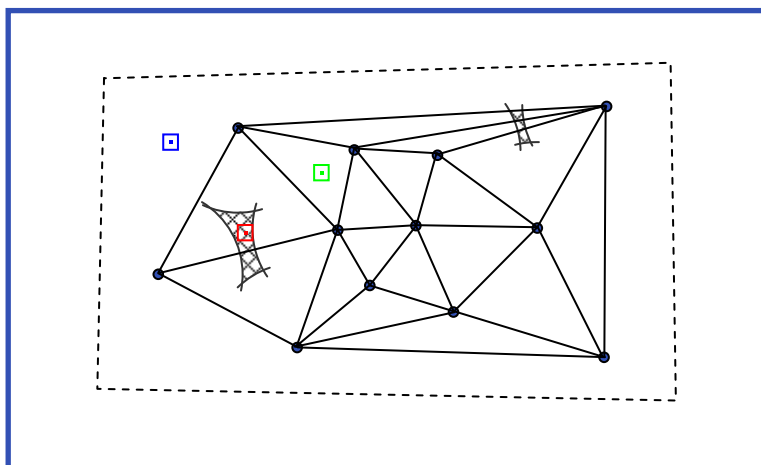


**Figure 15 – Triangulation de Delaunay**

Pour pouvoir déterminer la valeur d'un point d'évaluation, ce point doit être:

- Dans la zone de mesure;
- Être compris dans un triangle de la triangulation de Delaunay;
- Être compris dans le disque d'influence d'au moins un des sommets du triangle dans lequel il est inscrit.

Les conditions où le calcul est permis sont présentées à la Figure 16. Le point d'évaluation bleu est à l'extérieur des triangles de la sous-division de Delaunay et le point d'évaluation rouge n'est pas compris dans le disque d'influence d'aucuns des points de mesure bien qu'il soit compris dans un triangle. Il est à noter que les zones non comprises dans aucun disque d'influence sont représentées par des sections hachurées. Le point vert, quant à lui respecte, toutes ces conditions et par conséquent est validé.



**Figure 16 – Conditions pour la validité d'un point d'évaluation**

Lorsqu'un point d'évaluation est considéré comme valide, son niveau est calculé en utilisant les sommets du triangle qui le contient. On attribue à chacun de ces sommets une coordonnée d'élévation Z qui représente l'intensité mesurée en ce point en plus des coordonnées X et Y. Par

la suite, l'équation du plan de l'espace passant par ces trois sommets est évaluée et c'est à partir de cette équation que la coordonnée  $Z$  du point d'évaluation est isolée. Cette coordonnée  $Z$  représente l'intensité évaluée pour ce point. Il en résulte une surface dotée de facettes triangulaires qui représentent le champ d'intensité de cette surface.

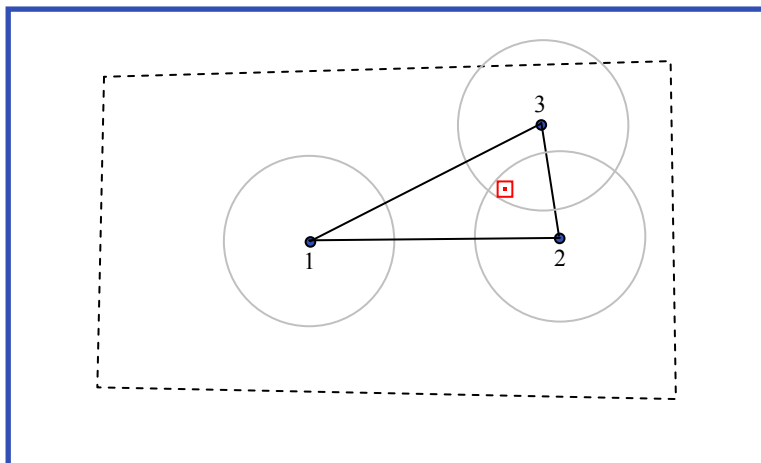
D'autres algorithmes d'interpolation spatiale ont été évalués tels que l'algorithme de Kriggeage. Cet algorithme permet d'obtenir une surface d'interpolation qui est constituée d'une surface continue et non constituée de facettes comme la triangulation. Cependant, les résultats obtenus n'ont pas été aussi bons que ceux obtenus par la triangulation en raison de particularités intrinsèques à la méthode. Cette méthode offre une interpolation de type *spline* surfacique qui peut surévaluer les valeurs interpolées dans certaines conditions.

## 5.4 Indice de couverture (qualité de mesure)

Pour refléter l'impact des conditions de validité sur la mesure, un indice de couverture a été développé. Cet indice est le rapport de l'aire de la surface ayant des points d'évaluation valides sur l'aire totale de la zone de mesure. Un ratio de 1 représente une couverture complète et par conséquent une mesure représentative. La dimension des disques associés à chaque point de mesure étant fonction de la fréquence, l'indice de couverture est fonction de la fréquence. En basse fréquence, le ratio de 1 sera plus rapidement atteint. Plus la fréquence augmente, plus le balayage devra être important pour couvrir chaque section du plan de mesure. En pratique, pour une série de mesures donnée, l'indice de couverture sera de 1 en basses fréquences et commencera à chuter vers 500, 1 000, ou 2 000 Hz selon la régularité et la densité du balayage.

## 5.5 Limitations

Le principal problème de l'algorithme retenu est l'important temps de calcul découlant, entre autres, des surfaces de disques, variables selon la fréquence. Cet aspect nécessite des calculs spécifiques à chaque fréquence. Une autre limite de la méthode est de laisser des points non évalués dans la carte d'intensité lorsque les disques d'influence ne couvrent pas entièrement la zone de mesure. Une autre limite se manifeste lorsqu'un point de mesure situé dans un triangle très étiré peut être influencé par un sommet éloigné tel qu'illustré à la Figure 17. Sur cette figure, le point d'évaluation indiqué par un point rouge est évalué à partir des points de mesure 1, 2 et 3 et ce, malgré que le point 1 soit très éloigné et ne devrait pas être considéré dans l'opération.



**Figure 17 – Illustration du cas du triangle étiré**

De plus, la taille du disque d'influence est basée sur le volume de Fresnel qui nécessite de connaître la distance des microphones à la source. Dans le cas présent, cette distance est fixée arbitrairement à 30 cm, mais l'expérience a démontré que les sources de bruit en milieu industriel peuvent être à des distances qui varient par rapport au plan de balayage.

Au regard de ces constats, il serait envisageable de réorienter l'approche du maillage sans le concept du disque d'influence, mais plutôt en se basant sur le nombre minimal d'éléments de surface et du critère d'hétérogénéité du champ contenu dans la norme ISO 9614-1.

Le processus d'interpolation et de cartographie développé dans le cadre du projet permet d'obtenir des résultats significatifs et des plus intéressants. Cela dit, il serait sûrement pertinent d'explorer plus à fond et de réaliser des développements appropriés pour améliorer la précision des cartes et réduire les temps de calcul requis.



## 6 SYSTÈME DE REPÉRAGE SPATIAL

Le système de repérage spatial est basé sur le repérage de diodes électroluminescentes (DEL) localisées sur la sonde d'intensité. Le rayonnement des DEL est capté par la caméra numérique et l'analyse des images résultantes par vision artificielle permet de localiser ces points lumineux dans l'image. Les DEL choisies émettent dans l'infrarouge proche à 940 nm de longueur d'onde, ce qui est la longueur d'onde des émetteurs de la plupart des télécommandes d'appareils domestiques. Leur rayonnement est invisible à l'œil humain, mais peut être détecté par certaines caméras numériques. Les essais préliminaires faits avec le premier prototype de dispositif de repérage, discutés plus en détail à l'Annexe A, ont fait ressortir les limites et contraintes suivantes :

- *Importance du taux de rafraîchissement de l'image.* Par exemple, la webcam *Microsoft VX-3000* a un capteur CMOS de 640 x 480 pixels ayant un taux de rafraîchissement maximal de trente images par seconde (fps). Ce taux est insuffisant pour permettre un repérage en continu et efficace de la sonde, et donc d'assurer une bonne corrélation entre cette position et la mesure acoustique.
- *Problème de repérage des DEL en présence de sources infrarouges « parasites ».* Par exemple, à la lumière du jour (extérieur) ou en présence de lumière émettant à la longueur d'onde de 940 nm, le système confond ces sources avec le rayonnement des DEL de la sonde.

Les paragraphes qui suivent présentent les principaux développements qui ont été réalisés pour mettre au point le module de repérage par DEL du système de cartographie d'intensité acoustique.

### 6.1 Caméra numérique

La sonde et ses DEL sont déplacées à une vitesse pouvant atteindre 0,5 m/s (vitesse de déplacement maximum admissible pour la norme de mesure d'intensité acoustique par balayage)<sup>2</sup>. La vitesse d'ouverture de la caméra et la durée d'exposition sont alors critiques pour obtenir une image précise de la DEL lorsqu'elle est déplacée à cette vitesse. Une durée d'exposition trop longue fait apparaître la DEL non plus comme un point, mais plutôt comme une forme oblongue ou un trait. La forme ronde de la DEL et son diamètre étant des paramètres importants dans l'algorithme de vision artificielle servant au repérage, la durée d'ouverture est donc un élément critique. Pour obtenir une précision adéquate de la forme du spot de la DEL dans l'image, une vitesse d'ouverture de l'ordre de 100 Hz est requise. Avec une vitesse de déplacement de l'ordre de 0,5 m/s, la distance parcourue durant l'ouverture est de 5 mm, soit environ le diamètre de la DEL. Par conséquent, l'image du spot de la DEL sur l'image reste

---

<sup>2</sup> Cette limite de vitesse de balayage est aussi cruciale pour obtenir un échantillon acoustique circonscrit à une petite région de l'espace. Plus les échantillons acoustiques sont attribués à de petites régions, plus la carte résultante sera en mesure d'illustrer les variations spatiales du champ mesuré. Avec une fenêtre temporelle d'intégration de 0,125 s et une vitesse de balayage de 0,5 m/s, l'échantillon acoustique est moyenné sur un parcours de 6,25 cm, qui représente la limite acceptable pour obtenir une carte représentative.

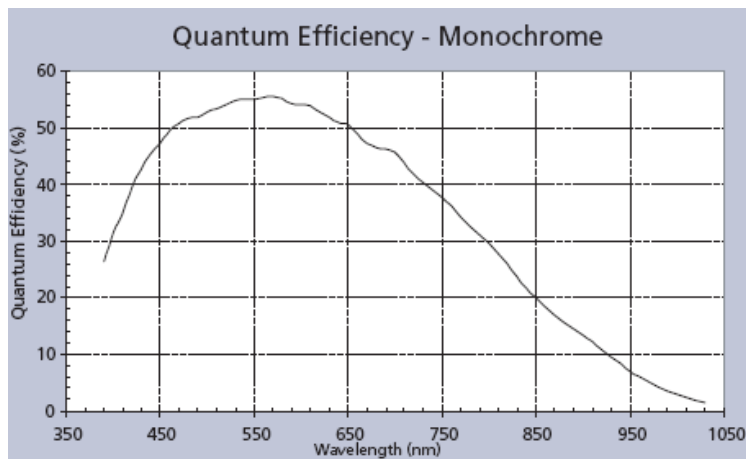
pratiquement de la forme d'un disque. En contrepartie, plus la durée d'exposition est faible, plus il sera nécessaire d'avoir un rayonnement important en provenance des DEL pour exposer le capteur à suffisamment de photons pour y développer une image.

Pour développer un système de repérage stable et robuste, le choix de la caméra est vite apparu comme étant un élément critique. Les caractéristiques qui ont guidé la sélection ont été :

- Sensibilité suffisante à la longueur d'onde de 940 nm;
- Possibilité de modifier les paramètres d'exposition;
- Taux de transfert de l'ordre de 100 fps;
- Résolution suffisante pour un repérage précis (> 640 x 480);
- Lien USB.

Après plusieurs recherches, la caméra DCC1545M de *Thorlabs* a été choisie. Cette dernière offre une résolution maximale de 1280 x 1024 à un taux de rafraîchissement de 25 fps. Cependant, elle permet un taux de 79 fps en sous échantillonnage double (640 x 512). Toutefois, dans la pratique, des taux de 100 fps ont pu être atteints en diminuant la durée d'exposition.

Le capteur est de type CMOS monochrome de ½ po. modèle MT9M001 de *Micron*. La Figure 18 présente le rendement du capteur en fonction de la longueur d'onde. Le rendement d'un capteur indique en quelque sorte la capacité de celui-ci à détecter un phénomène physique particulier. Dans le cas présent, il s'agit de la détection du rayonnement électromagnétique (lumière) en fonction de sa longueur d'onde.



**Figure 18 – Rendement du capteur en fonction de la longueur d'onde**

Au regard de la Figure 18, il apparaît que l'efficacité n'est pas très grande à 940 nm. Cette réponse est normale en raison du matériau utilisé, soit le silicium. Pour avoir un meilleur rendement en infrarouge, on doit utiliser un capteur à base d'InGaAs. Cependant, la réponse de ce type de capteur à la longueur d'onde de 940 nm n'est pas vraiment supérieure à celle d'un capteur au silicium. Ces capteurs étant optimisés pour des longueurs d'onde plus longues, on les utilise davantage pour des caméras thermiques.

Il est à noter que les capteurs CCD n'offrent pas de meilleurs rendements que le capteur CMOS choisi, à cette longueur d'onde. Cela dit, la webcam utilisée lors des tests préliminaires possédait un capteur de la même nature et celui-ci permettait de détecter la longueur d'onde avec suffisamment de sensibilité. Ne pouvant trouver mieux sur le marché, à un prix abordable, cette caméra est apparue être un compromis acceptable.

Cette caméra comprend également un *Software Development Kit* (SDK) exhaustif en C++ qui permet la manipulation complète de tous les paramètres de la caméra en plus de permettre le déclenchement ponctuel de l'acquisition d'une image, contrairement aux webcams plus génériques qui offrent un flux vidéo difficile à associer à un repère temporel. Pour obtenir une caméra infrarouge qui offre des caractéristiques analogues au capteur de la télécommande de la console *Wii*, un filtre optique passe-bande devait être ajouté. Pour être utilisé à la fois comme dispositif de repérage de DEL infrarouge (940 nm seulement) et d'appareil photo (rayonnement visible), un système de lentille amovible a été conçu.

## 6.2 Objectif de caméra

Au fil de l'évaluation en industrie de l'appareil, par un groupe d'utilisateurs ciblés, il a été soulevé que l'ajout d'un objectif grand-angle sur la caméra offrirait moins de limitations quant au positionnement de la caméra. En effet, avec l'objectif utilisé au départ doté d'une longueur focale de 8 mm, il est couramment nécessaire d'être à plus de 2 m de la source sous examen pour la couvrir entièrement, ce qui est souvent difficile en industrie voir impossible.

Cependant, les objectifs à grand-angle, dont la longueur focale est très petite et qui permettent d'être plus près de la source, causent une distorsion de barillet sur l'image ce qui invalide la méthode de calibration du plan de mesure. Toutefois, il existe des objectifs développés par *Theia Technologies* qui permettent d'atteindre une longueur focale de 1,7 mm avec une distorsion de barillet inférieure à 1%. C'est le modèle SY110M qui a été choisi pour être intégré à l'appareil. Maintenant doté de cet objectif, la distance à la source a été réduite à une distance de l'ordre de 1 à 1,5 m pour la plupart des applications, ce qui représente une distance jugée acceptable pour l'utilisation de cet appareil en industrie.

## 6.3 DEL et optimisation de l'intensité lumineuse émise

Le second facteur ayant un impact important sur la détection est l'intensité lumineuse de la DEL. Avec de fortes intensités, le seuil de détection peut être augmenté et plusieurs sources parasites sont alors filtrées par seuillage de l'image résultante. En d'autres termes, les DEL deviennent plus lumineuses relativement aux sources parasites, ce qui permet de les discriminer. Des DEL offrant la meilleure intensité possible tout en respectant des contraintes de dimension et de consommation électrique ont été sélectionnées.

Par ailleurs, le type d'alimentation permet d'augmenter l'intensité possible pour une même DEL. Ainsi, en utilisant une alimentation électrique pulsée il est possible d'augmenter l'intensité

lumineuse des DEL. Un simple temporisateur fut également testé afin d'envoyer des impulsions de courant de l'ordre de 200 mA, comparativement à 100 mA en alimentation continue. En addition à l'intensité maximale des DEL, la directivité de ces sources lumineuses est aussi critique. Il est nécessaire que les DEL soient aussi omnidirectionnelles que possible de manière à être en mesure de détecter la présence de la sonde dans une orientation quelconque par rapport à la caméra. Si les DEL offraient un rayonnement très directif, il serait impossible de détecter leur rayonnement lorsqu'elles sont à angle. Avec ces critères en tête, le choix s'est arrêté sur les DEL SFH4240 d'OSRAM qui offrent une intensité de 120 mW/sr pour un angle de demi-intensité de  $\pm 60^\circ$ .

## 6.4 Filtre optique passe-bande

Pour obtenir une meilleure immunité face à la lumière parasite, dans un premier temps, un filtre infrarouge passe-bande centré sur la longueur d'onde de 940 nm a été sélectionné. La Figure 19 présente le pourcentage de transmission en fonction de la longueur d'onde pour le filtre choisi. De plus, la longueur d'onde choisie est située dans une fenêtre d'absorption de l'atmosphère qui limite le rayonnement solaire pour cette longueur d'onde. Cependant, les sources de lumière émettant du rayonnement infrarouge comme les ampoules incandescentes et les halogènes émettent substantiellement à cette longueur d'onde. Par conséquent, ce dispositif reste sensible à ce type de sources, considérées ici comme des sources parasites.

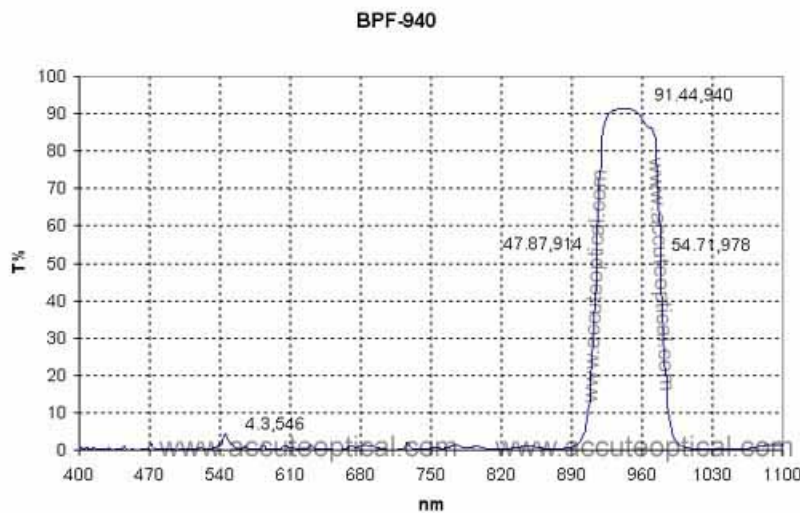


Figure 19 – Transmission du filtre passe-bande choisi en fonction de la longueur d'onde

## 6.5 Algorithme de vision artificielle

L'algorithme de vision artificielle analyse l'image captée par la caméra lorsque le filtre infrarouge est en place. Avec ce filtre, seul le rayonnement provenant des DEL expose le capteur de la caméra. L'image résultante est alors une image en tons de gris. Ensuite, un seuillage est appliqué à l'image. Le seuillage applique la valeur 0 à tous les pixels dont le niveau de gris est inférieur au seuil et la valeur 1 à tous les pixels dont le niveau de gris est supérieur. Il en résulte une image binaire. L'image résultante est alors analysée pour identifier les formes circulaires. Lorsqu'une forme est identifiée, son centre de gravité est localisé et les coordonnées de la DEL dans l'image sont saisies. La Figure 20 illustre les étapes de ce traitement d'image.

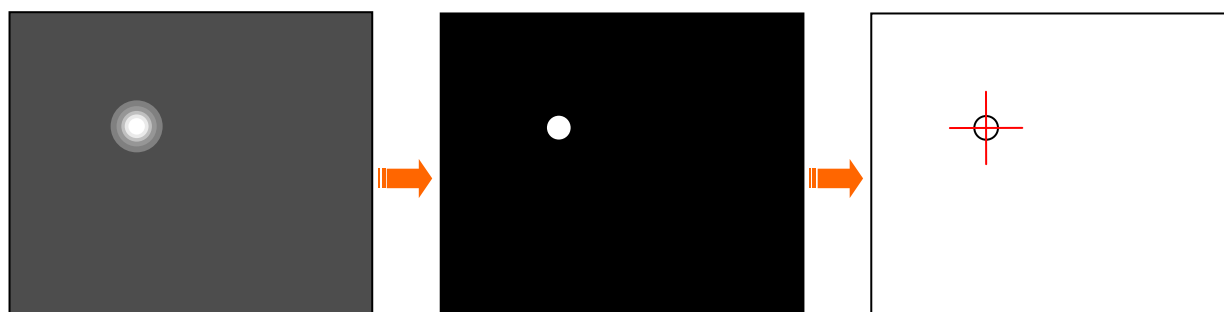


Figure 20 – Image captée par la caméra avec filtre en place

### 6.5.1 Rejet des sources infrarouges parasites

Bien que le filtre infrarouge restreigne le spectre visible à la bande de 940 nm, des sources non désirées émettant à cette longueur d'onde peuvent être visibles et confondues avec la DEL. De manière à contourner ce problème, une image de référence est capturée au début de la procédure, sans la présence de la DEL dans l'image. Les sources parasites, représentées par des ampoules incandescentes à la Figure 21, sont alors identifiées et rejetées lors du repérage de la DEL.

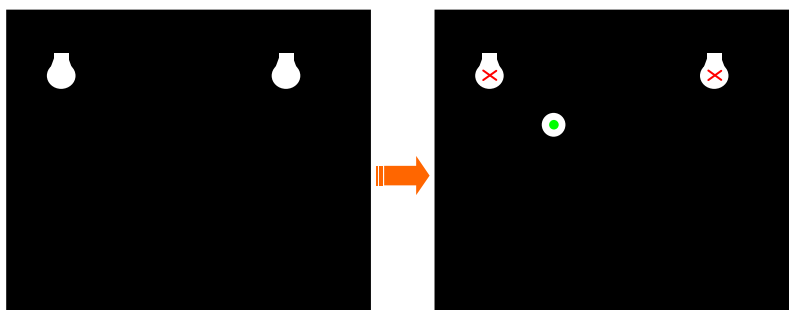


Figure 21 – Rejet des sources parasites par image de référence



## 7 SONDE D'INTENSITÉ

### 7.1 Dispositif de correction de perspective

Un des plus grands problèmes rencontrés lors de l'implantation du dispositif de repérage fut la correction de la perspective. En effet, le dispositif développé à l'origine localise un point lumineux à l'arrière de la sonde, représenté par un point rouge sur la Figure 22. Par contre, la localisation désirée pour la cartographie est celle sur le plan de mesure où se trouvent les microphones. Lorsque la caméra est située directement derrière la sonde, le point arrière et les microphones sont confondus et les coordonnées sont les mêmes. Cependant, lorsque la sonde n'est plus directement dans l'axe de la caméra, une correction de perspective devient nécessaire pour assurer une corrélation adéquate entre le système de repérage et le plan des microphones. Le dispositif et l'algorithme de vision artificielle utilisés pour pallier aux problèmes de perspective font actuellement l'objet d'une demande de brevet et ne peuvent être divulgués dans le présent rapport.

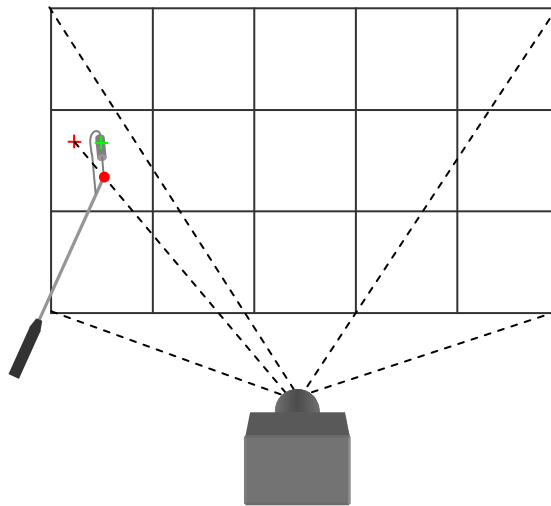


Figure 22 – Position du système de repérage et du plan de mesure

#### 7.1.1 Avantages

##### 7.1.1.1 Évaluation automatique des dimensions balayées et de la puissance acoustique

En plus de localiser adéquatement les coordonnées des microphones dans le repère de la caméra, la forme du dispositif de repérage permet de calibrer le plan de balayage en termes de perspective et de dimensions réelles. En d'autres termes, il est possible d'évaluer l'orientation du plan de balayage par rapport à la caméra et d'évaluer ses dimensions en  $m^2$ . C'est par le biais de l'analyse des quatre points de la croix du système de repérage que ces paramètres sont évalués. Ces quatre coins forment un carré dont les dimensions réelles sont connues. L'analyse de la forme de ce carré sur l'image captée par la caméra permet d'évaluer ces paramètres.

### 7.1.1.2 Possibilité de mesure avec caméra non perpendiculaire au plan de mesure

Cette même correction de perspective permet de balayer une source sur un plan non perpendiculaire à l'axe de la caméra. Ainsi, la caméra peut être oblique par rapport au plan de mesure, une option très pratique dans des endroits exigus. Lorsque la caméra est à plus de 30° par rapport à la perpendiculaire du plan de mesure, des erreurs d'évaluation de dimensions peuvent toutefois survenir. Des expérimentations ont soulevé que ces erreurs peuvent atteindre 5% sur l'évaluation de la surface. Ces erreurs sur l'évaluation de la surface peuvent entraîner des erreurs de l'ordre de  $\pm 0,8$  dB sur le calcul de puissance acoustique. La quantification de ces erreurs et de la limite de la méthode ne fait pas partie de la présente étude. Des travaux complémentaires devront éventuellement être effectués pour préciser ces erreurs et les limites acceptables d'utilisation. Pour l'instant, il est recommandé que la caméra soit positionnée à 30° au plus de l'axe perpendiculaire au plan de mesure.

### 7.1.2 Limitations

Dans l'algorithme de positionnement, on suppose que la cinquième DEL se situe à l'intérieur du quadrilatère formé par les quatre autres DEL. C'est en dessinant le plus petit polygone convexe contenant tous les points que le point central est identifié : ce point est le seul ne figurant pas comme un des sommets de ce polygone. Cette considération implique que la sonde ne peut être positionnée trop oblique, car le point central sortirait des limites du polygone et le point central devient impossible à identifier selon cette méthode. De plus, pour améliorer la précision du calcul, la distance réelle entre le centre de la croix et le point arrière doit être la plus grande possible. Cependant, plus cette distance est grande plus le point arrière est sujet à sortir des limites du polygone. De manière à corriger ce problème, les dimensions de la croix doivent être agrandies dans les mêmes proportions. Des contraintes d'ordre pratique limitent toutefois les dimensions de cette croix.

## 7.2 Sonde d'intensité avec dispositif de repérage

Plusieurs contraintes établies en collaboration avec le comité de suivi de l'activité ont guidé la conception de la sonde. Les principales contraintes de design ont été :

- Les DEL, câbles et composantes électroniques requises pour son fonctionnement doivent être contenus à l'intérieur de la sonde;
- La sonde et son système de positionnement doivent être les plus petits possible pour minimiser la perturbation du champ sonore à mesurer.
- Le dispositif de repérage doit offrir une très bonne solidité mécanique, tout en étant léger et offrir les critères de dimensions nécessaires à son bon fonctionnement.
- La sonde et le dispositif de repérage doivent pouvoir être détachés pour faciliter le rangement, mais aussi pour permettre des mesures d'intensité en mode standard sans l'utilisation du système de positionnement. Cette contrainte nécessite, entre autres, d'avoir un système de connexion simple à utiliser, mais robuste et fiable;

- La sonde doit offrir des boutons de contrôle permettant de contrôler les mesures (Run/Pause/Stop) et de fournir des informations à l'utilisateur lors de la mesure telle que la validité de la position de la sonde dans le plan de mesure.

Outre ces aspects relatifs à la fixation du dispositif de repérage, le système d'attache des microphones et de leur préamplificateur a également dû être spécialement conçu. Pour cet aspect, des échanges ont eu lieu avec le fabricant de transducteurs acoustiques *BSWA*<sup>3</sup> afin d'obtenir des ensembles préamplificateurs de micro ICP de faible dimension et facile d'installation. Ces travaux ont conduit à la conception de préamplificateurs ayant la moitié de la taille des préamplificateurs communs avec connecteur SMB. La Figure 23 présente la modélisation du prototype de sonde.



**Figure 23 – Prototype de sonde d'intensité acoustique doté du système de repérage spatial**

Des DEL pouvant émettre des couleurs variables ont été intégrées aux boutons de contrôle de la poignée de la sonde (Figure 24). Ces DEL permettent de fournir à l'utilisateur l'information concernant l'état du processus de mesure.

- Rouge – La sonde se trouve à l'extérieur des limites de la zone et l'acquisition est en pause jusqu'à ce qu'elle retourne à l'intérieur de la zone.
- Vert – La sonde se trouve à l'intérieur des limites de la zone et l'acquisition est en cours.
- Jaune – Pause de la mesure par l'utilisateur.

<sup>3</sup> <http://www.bswa-tech.com/>



**Figure 24 – Poignée de la sonde avec son circuit de télécommande et boutons de contrôle rétro éclairés**

Bien que la forme générale de la sonde d'intensité soit établie, plusieurs aspects de la sonde font l'objet de développement dans le but d'en améliorer le fonctionnement. Parmi ces aspects, on note la masse, la robustesse, la sensibilité des boutons et l'amélioration du système de repérage spatial. Aussi, la longueur de la sonde est un critère d'importance, car une sonde plus courte dans la direction de l'axe des microphones sera plus facile à manier et permettra une mesure plus près de la source, ce qui est désiré pour plusieurs applications.

## 8 PLATEFORME DE TRAITEMENT DE SIGNAL

### 8.1 Carte DSP

Lors du projet d'exploration de 2004, le prototype de système de cartographie d'intensité à repérage spatial avait été réalisé avec la carte de traitement de signal *Signal-Ranger 1* (carte DSP SR-1). Cette carte avait un processeur point fixe ayant une vitesse d'horloge de 100 MHz, 64 kB de mémoire flash et un port USB-1. Au moment de la rédaction de la demande, il était prévu d'utiliser la carte DSP SR2 ayant une capacité de calcul environ dix fois supérieure à SR1, ainsi qu'une vitesse de communication beaucoup plus importante de type USB-2 haute vitesse.

Le développement du code sur SR2 a donc été entrepris en février 2009 et un premier prototype fonctionnel basé sur cette carte a été réalisé en juin 2009. En septembre 2009, le développement de la troisième génération de la carte Signal Ranger, SR-MK3 (Figure 25), a toutefois été complété et ouvrait de nouvelles perspectives. Dotée d'un processeur point flottant 32 bits, avec une vitesse d'horloge de 600 MHz, cette carte est elle-même environ dix fois plus performante que la carte SR2. En plus d'être plus performant, le design de cette carte a été optimisé pour obtenir une carte de faible dimension et faible consommation. Entre autres avantages pour l'application en question, cette carte intègre six entrées 24 bits offrant une plage dynamique de 105 dB.



**Figure 25 – Carte DSP SR-MK3 utilisé dans le système final**

Des développements ont donc été réalisés pour implanter le système d'acquisition de signaux sur cette nouvelle plateforme. Il s'agira en fait de la première application de la nouvelle carte *Signal Ranger 3*. Parmi les travaux de programmation requis pour réaliser l'implantation du système sur la carte DSP SR3, mentionnons l'acquisition et le transfert des données temps réel à l'ordinateur, ainsi que la gestion des boutons de contrôle de la poignée de la sonde via l'interface I2C de la carte.

## 8.2 Carte de conditionnement de signaux ICP

Pour un système compact, une carte d'alimentation, de conditionnement de signaux pour préamplificateur ICP et de communication avec la sonde a dû être conçu (Figure 26). Les principales caractéristiques de cette carte d'expansion sont :

- Six entrées analogiques à gain fixe qui peuvent être configurées pour les capteurs ICP, DC et couplage AC;
- Un bus « full-duplex » RS422 avec des paires « uplink » et « downlink » liés au UART1 du DSP;
- Alimentation 3,3 V qui peut fournir jusqu'à 200 mA de courant à l'électronique externe.

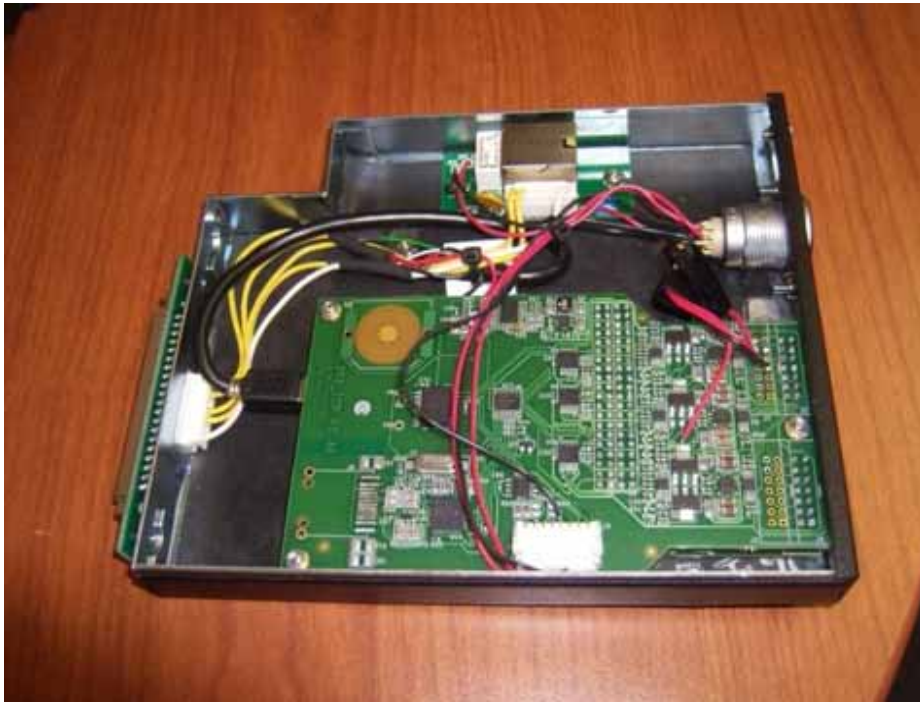


Figure 26 – Carte d'expansion SR-MK3 utilisé dans le système final

## 8.3 Ordinateur

Pour obtenir un système le plus compact et le plus facile d'utilisation possible, des recherches ont été effectuées afin d'identifier les ordinateurs portables dans lequel la carte DSP pouvait être directement intégrée. Les contraintes sur la sélection ont été les suivantes :

- Permettre l'installation de la carte DSP à l'intérieur de l'ordinateur;
- Fournir une alimentation électrique 5 V DC régulée;
- Fournir une connexion USB-2 interne;
- Avoir un boîtier robuste, conçu pour une utilisation en milieu industriel;
- Offrir une puissance de calcul suffisante pour assurer le traitement d'image en temps réel;
- Avoir un coût abordable.

Après des recherches, des démarches ont été effectuées auprès de quatre fabricants dont le produit présentait des possibilités. Aucun produit ne pouvait cependant répondre directement à nos spécifications. Des discussions ont donc été entreprises avec les fabricants d'ordinateur apparaissant offrir le meilleur potentiel et des essais ont été effectués sur trois modèles. Ces essais se sont arrêtés sur le *ToughBook ROCKY RT-M* du fabricant *AMREL*. Pour cet appareil, le fabricant a consenti à apporter certaines modifications afin de permettre l'installation de la carte DSP dans le compartiment normalement réservé au lecteur CD de l'ordinateur portable. La Figure 27 présente la carte DSP dans le compartiment aménagé de l'ordinateur.



**Figure 27 – Compartiment de l'ordinateur avec la carte SR-MK3  
et la carte de conditionnement de signaux et d'alimentation ICP**

Une caractéristique principale de cet ordinateur portable, par rapport aux autres, est sa puissance de calcul. Il offre un processeur à double cœur requis pour le traitement en parallèle des signaux des microphones et du traitement de l'image du système de repérage.



## 9 DÉVELOPPEMENT LOGICIEL

Pour permettre l'utilisation de ce système par le plus grand nombre d'utilisateurs possible, d'importants efforts ont été mis en œuvre pour développer un logiciel convivial et facile d'utilisation. Ce logiciel regroupe les fonctions qui permettent la mise en œuvre d'une mesure en mode cartographique et met à la disposition de l'utilisateur plusieurs fonctions de post-traitement pour l'analyse des cartes résultantes.

Le mode de mesure du logiciel permet de :

- Définir la zone de mesure à l'aide de l'interface assistant;
- Démarrer et arrêter la mesure;
- Sauvegarder la mesure.

Le mode de post-traitement du logiciel permet de :

- Ouvrir un fichier de mesure;
- Afficher une bande de fréquence ou le niveau global sur la carte de bruit;
- Modifier le type de mesure à afficher (Intensité, Pression ou Indice PI);
- Modifier le type de spectre à afficher (1/1, 1/3, 1/6, 1/12 d'octave ou FFT);
- Modifier le type d'unité à utiliser (dB, dBA ou unités linéaires);
- Modifier l'échelle de couleur;
- Sélectionner un point de la carte avec la souris pour obtenir le spectre en un point précis;
- Sélectionner une région de la carte avec la souris pour en obtenir le spectre moyen ou la puissance dans le cas d'une carte d'intensité.

Les sections suivantes présentent les grandes lignes de ce logiciel. Pour plus d'informations, on réfère le lecteur au guide d'utilisation disponible sur notre site Internet.<sup>4</sup>

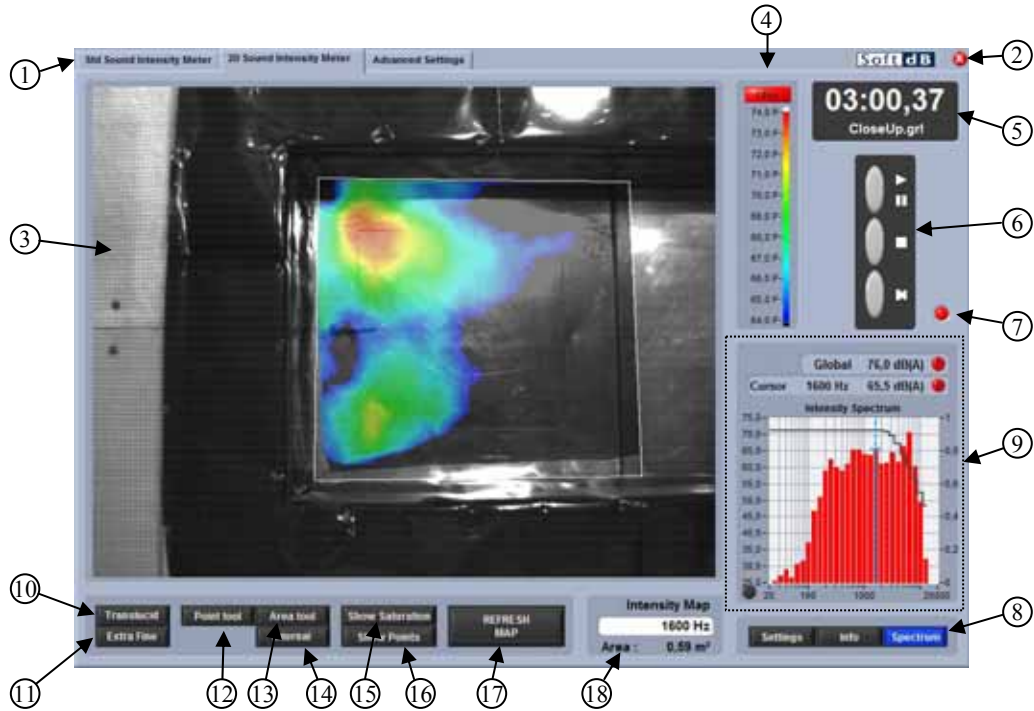
### 9.1 Interface principale

La Figure 28 présente l'interface principale du logiciel en mode cartographique<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> <http://www.softdb.com/2010/acoustic-products-ittrack.php>

<sup>5</sup> Le logiciel permet également une mesure standard d'intensité acoustique, i.e. sans cartographie. Voir le guide d'utilisation pour plus de détails sur ce mode.



1	Sélection du mode de mesure : standard, 2D, ou réglage des paramètres avancés.
2	Cette fonction ferme l'application.
3	La carte de bruit de la mesure est affichée dans cette zone.
4	Affiche l'échelle de couleur de la carte de bruit. Les paramètres de l'échelle de couleur sont accessibles en cliquant sur celle-ci
5	Indicateur du temps écoulé depuis le début de la mesure. Le nom du fichier est situé sous l'indicateur du temps écoulé
6	Boutons de contrôle de la mesure : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bouton supérieur : Débute et pause la mesure.</li> <li>• Bouton central : Arrêt et sauvegarde la mesure.</li> <li>• Bouton inférieur : Lance la procédure de définition de la zone (voir section 10.1).</li> </ul>
7	Indicateur de la saturation
8	Affichages secondaires : Trois palettes sont disponibles (voir section 9.2)
10	Permet de modifier l'affichage de la carte de bruit en mode translucide, opaque ou affichage de l'arrière-plan seulement.
11	Permet de sélectionner la résolution de l'affichage : extra fin, (1 pixel), fin (3 pixels carré), médium (7 pixels carré) et grossier (11 pixels carré).
12	Permet d'obtenir le spectre à un point spécifique.
13	Permet de sélectionner une zone de la carte de bruit et d'évaluer le spectre moyen ou la puissance associée à cette surface.
14	Permet de calculer la valeur interne ou externe de la zone sélectionnée.
15	Permet d'afficher les points de saturation de la mesure sur la carte de bruit.
16	Permet d'afficher les coordonnées de tous les points de mesure dans la carte de bruit.
17	Lance le processus de calcul de la carte de bruit. Ce calcul est nécessaire lorsque l'utilisateur modifie le type de mesure, le type de spectre, la bande spectrale affichée ou les unités. Le bouton d'actualisation clignote lorsque la carte doit être recalculée.
18	Sélection de la bande de fréquence à afficher.

**Figure 28 – Interface logicielle du mode 2D**

## 9.2 Paramètres de mesure et d'affichage

La section de gauche en bas du menu principal permet de régler les paramètres de mesure courants et l'affichage de résultats. Trois palettes sont disponibles pour le mode de cartographie d'intensité: Settings, Info et Spectrum (Figure 29).

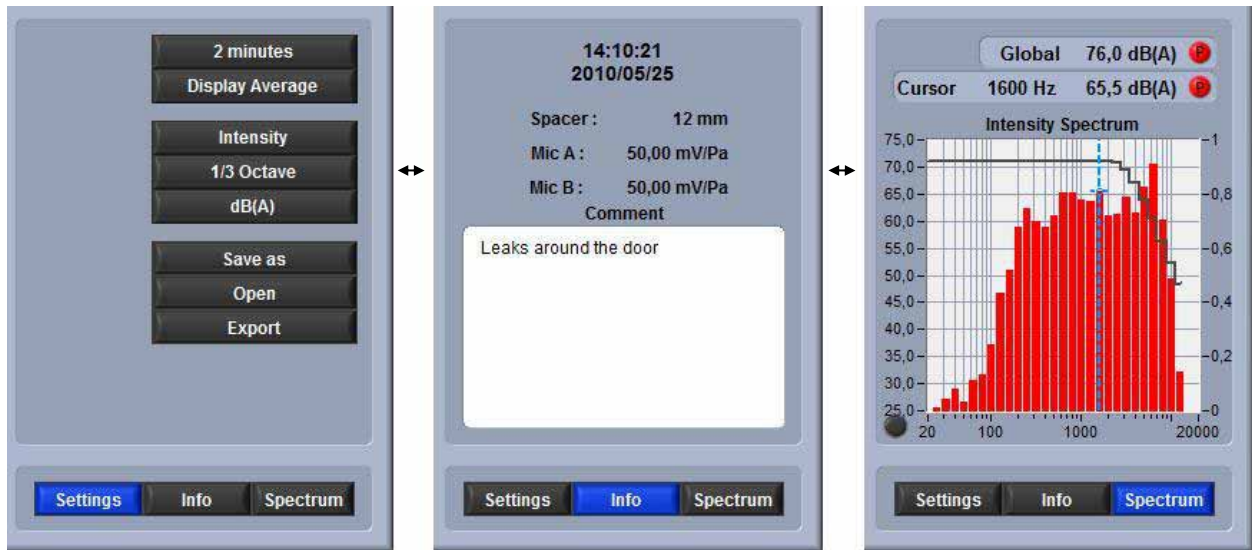


Figure 29 – Palettes du mode 2D

### 9.2.1 Palette des paramètres de la mesure

Cette palette affiche les paramètres disponibles à l'utilisateur.



Les paramètres de cette palette sont, du haut vers le bas (voir guide d'utilisation pour plus d'informations) :

- Durée de la mesure : de 10 secondes à 15 minutes;
- Mode d'affichage du spectre: valeurs moyennes ou instantanées;
- Mode d'affichage du spectre : 1/1, 1/3, 1/6, 1/12 d'octave ou en bandes fines FFT;
- Unités d'affichage : dB, dB(A) ou linéaires ( $\text{Pa rms}^2$  or  $\text{W/m}^2$ ).

Figure 30 – Palette des paramètres de la mesure en mode 2D

### 9.2.2 Palette des informations de la mesure

Cette palette affiche les informations pertinentes d'un fichier de mesure.

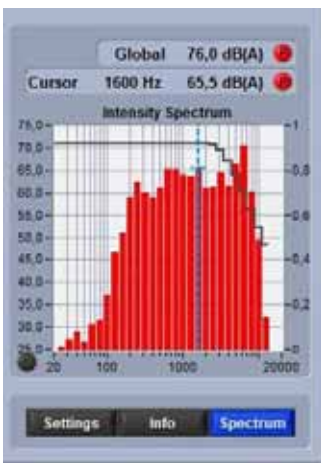


- Heure et date de la mesure;
- Espaceur microphonique utilisé;
- Étalonnage des microphones;
- Commentaires de l'utilisateur. Ce champ de texte peut être rempli par l'utilisateur afin d'ajouter des informations pertinentes associées à une mesure.

Figure 31 – Palette des informations de la mesure du mode 2D

### 9.2.3 Palette du spectre de la mesure

Cette palette présente le spectre de la carte de bruit affichée.



- Niveau global;
- Niveau du curseur;
- Spectre;
- Indice de couverture de la mesure (section 5.4).

Figure 32 – Palette du spectre de la mesure en mode 2D

## 10 FONCTIONNEMENT ÉTAPE PAR ÉTAPE DU MODE CARTOGRAPHIQUE

Cette section résume les principales étapes pour effectuer une mesure. Pour plus d'informations, le lecteur est référé au guide d'utilisation disponible sur notre site Internet<sup>6</sup>. Les images présentées dans cette section sont tirées d'un rapport d'expertise et de diagnostic de source effectué à la société Plombco<sup>7</sup>, grâce au système développé dans le cadre de cette activité.

### 10.1 Définition de la zone

La cartographie acoustique est une représentation du champ sonore sur un plan géométrique. Par conséquent, la définition de la superficie et de la perspective du plan est nécessaire. Le système *I-Track* permet de réaliser cette procédure facilement étape par étape. Pour lancer la procédure, il suffit de brancher la caméra numérique dans un port USB de l'ordinateur portable et d'appuyer sur le bouton de définition de zone (9.1 élément 6) sur la sonde ou dans l'interface du mode 2D. Les boutons sont identifiés « OK », « Retour » et « Annuler » pendant cette procédure. Les mêmes boutons sont accessibles à partir de l'interface logicielle.

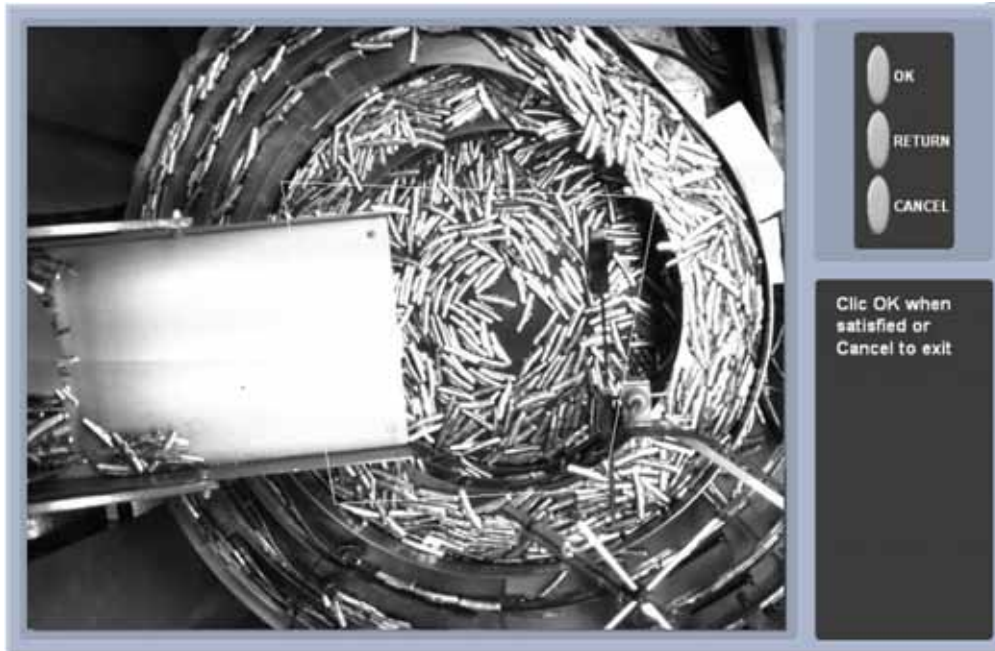
#### 10.1.1 Image de l'arrière-plan

Pour capturer l'image de l'arrière-plan, il suffit de retirer le filtre infrarouge et de centrer la caméra sur la source de bruit mesurée. L'utilisateur appuie sur le bouton « OK » lorsque l'image est satisfaisante.

---

<sup>6</sup> <http://www.softdb.com/2010/acoustic-products-ittrack.php>

<sup>7</sup> F. Sgard, H. Nélisse, Diagnostic des sources de bruit à un poste de travail du département des pesées en plomb de la société Plombco, rapport d'expertise IRSST, août 2010.



**Figure 33 – Image de l'arrière-plan  
(cas du bol vibrant pour la sélection des pesées, société Plombco)**

### ***10.1.2 Validation de l'éclairage de l'environnement***

L'utilisateur replace le filtre infrarouge sur la caméra après la confirmation de l'arrière-plan et appuie ensuite sur le bouton « OK ». Le logiciel vérifie la présence de parasites infrarouges dans l'éclairage de l'environnement, tels que les ampoules incandescentes. Le logiciel affiche sur l'image les parasites localisés en rouge s'il y a lieu. Cet avertissement est ignoré lorsqu'aucun parasite n'est détecté.

## **10.2 Délimitation de la zone de mesure**

Les limites du plan dans lequel s'effectueront les mesures sont définies par les quatre coins d'un quadrilatère. Pour définir ces points, il suffit de positionner l'axe de la sonde défini par les deux microphones perpendiculairement au plan de mesure à chaque position et d'appuyer sur « OK ». Pour redéfinir un point, il suffit d'appuyer sur « Retour ». Il est important de positionner la sonde perpendiculairement au plan de mesure puisque les informations obtenues pendant ce processus sont impliquées dans la procédure d'étalonnage du plan. Un mauvais positionnement de la sonde par rapport au plan pourrait occasionner des erreurs de perspective et du plan de mesure.

### 10.3 Étalonnage du plan géométrique

Pour définir le plan de mesure en termes de surface et de perspective, il suffit de placer la sonde perpendiculairement au plan et d'appuyer sur « OK ». Les informations recueillies par cette procédure définissent la transformation de la perspective et la superficie de chaque pixel. L'étalonnage du plan de mesure conclut la procédure de délimitation de la zone. La fenêtre de dialogue se ferme et la zone délimitée apparaît dans l'interface principale. L'utilisateur est maintenant prêt à exécuter une mesure. La même zone délimitée peut être utilisée pour plusieurs mesures si la caméra et la source de bruit n'ont pas été déplacées entretemps.

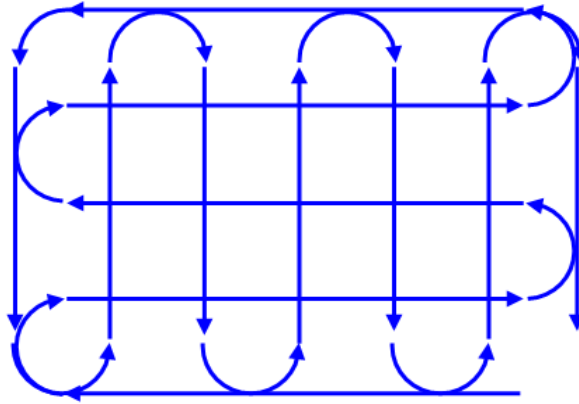
### 10.4 Mesure de la carte de bruit

Une mesure de cartographie doit être précédée du processus de définition de la zone de mesure afin de fournir les informations nécessaires du plan géométrique de la mesure. Une même zone ainsi définie peut être utilisée pour plusieurs mesures si la configuration de la caméra et la même source de bruit sont utilisées à condition d'être à la position d'origine. L'utilisateur doit appuyer simplement sur le bouton « RUN » sur la sonde ou sur l'interface pour amorcer une mesure en mode 2D. Les boutons de la poignée et ceux de l'interface se mettent en surbrillance :

- Rouge – La sonde se trouve à l'extérieur des limites de la zone et l'acquisition est en pause jusqu'à ce qu'elle retourne à l'intérieur de la zone.
- Vert – La sonde se trouve à l'intérieur des limites de la zone et l'acquisition est en cours.
- Jaune – Pause de la mesure par l'utilisateur.

La vitesse de balayage maximale recommandée est de 0,5 m/s. Cette limite de vitesse de balayage est cruciale pour obtenir un échantillon acoustique circonscrit à une petite région de l'espace. Plus les échantillons acoustiques peuvent être attribués à de petites régions, plus la carte résultante sera en mesure d'illustrer les variations spatiales du champ mesuré. Avec une fenêtre temporelle d'intégration de 0,125 s et une vitesse de balayage de 0,5 m/s, l'échantillon acoustique est moyenné sur un parcours de 6,25 cm qui est la limite acceptable pour obtenir une carte représentative. Un balayage plus lent améliorera la représentativité spatiale de la carte.

La sonde doit balayer perpendiculairement toute la surface du plan géométrique défini. Il est recommandé d'utiliser la méthode de balayage ISO 9614-2 afin d'uniformiser la distribution des échantillons de mesure (Figure 34). Un balayage multicouche est recommandé afin d'affiner la carte de bruit et obtenir un meilleur ratio de couverture.



**Figure 34 – Méthode de balayage recommandée par la norme ISO 9614-2**

Le ratio de couverture est le rapport entre la zone couverte par les échantillons de mesure et la surface totale de la mesure. Un ratio se rapprochant de 1 signifie une bonne couverture et se traduit par une bonne représentativité. Par contre, un ratio se rapprochant de 0 signifie une mauvaise couverture et une faible représentativité des résultats (voir 5.4).

Une bonne pratique de mesure à adopter est de se concentrer sur la position de la sonde plutôt que de regarder le déplacement de la sonde à l'écran de l'ordinateur. Pour observer le déroulement de la mesure à l'écran, il suffit de mettre la mesure en pause en sortant de la zone de mesure ou en appuyant sur le bouton « Pause ». L'acquisition est arrêtée et la mesure est sauvegardée automatiquement lorsque l'utilisateur appuie sur le bouton « Arrêt » sur la poignée ou dans l'interface logicielle. L'arrêt et la sauvegarde d'une mesure se produisent également lorsque la durée de mesure spécifiée par l'utilisateur est écoulée (voir section 9.2.1).

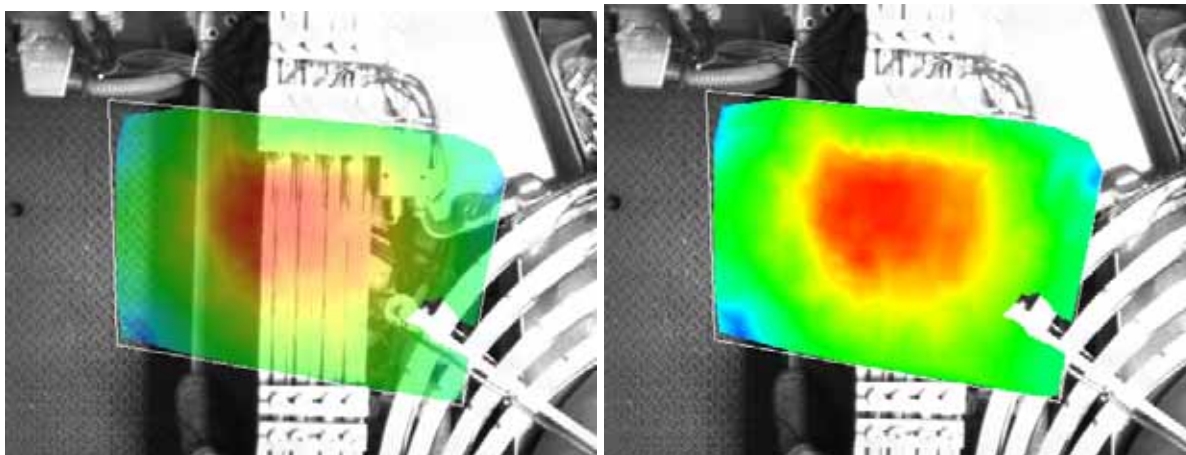
## 10.5 Affichage des résultats et post-traitement

Il est recommandé d'actualiser la carte de bruit après une mesure afin d'obtenir un résultat plus précis. Cette actualisation est effectuée en appuyant sur le bouton de rafraîchissement de l'interface principale (voir Figure 28, élément 17). Pendant la mesure, des approximations sont effectuées pour rendre le calcul plus rapide. Lorsque la mesure est effectuée, l'utilisateur peut afficher plusieurs aspects de cette mesure tel que décrit dans les sections suivantes.

### 10.5.1 Mise en forme de la carte de bruit

#### 10.5.1.1 Apparence

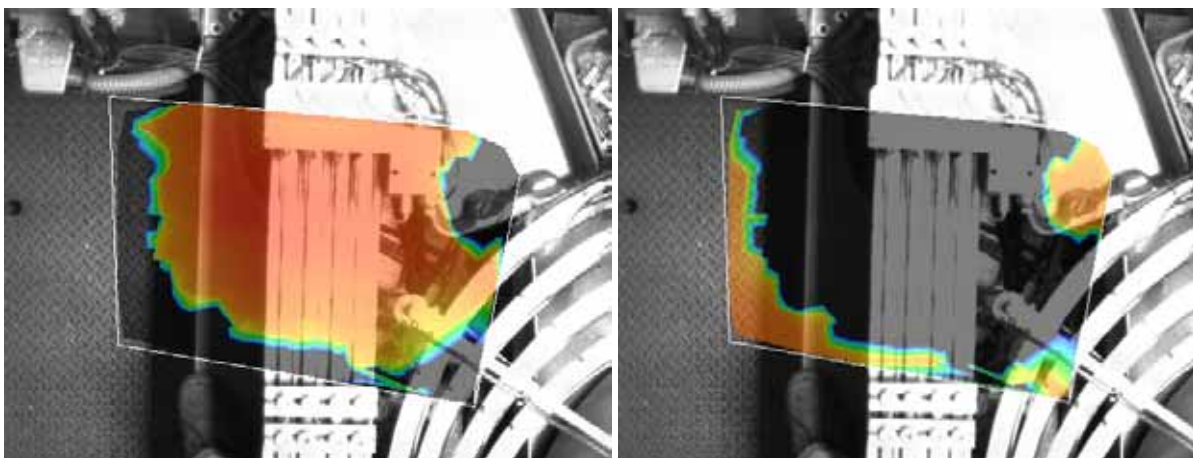
L'apparence de la carte de bruit peut être soit transparente, soit opaque selon le choix de l'utilisateur. Il est également possible de ne faire apparaître que l'arrière-plan. Les images utilisées aux fins d'exemple dans les sections suivantes proviennent du rapport effectué pour la société Plombco et sont associées à un système de convoyeur présent à cette usine. Ces options de visualisation permettent de mettre en valeur certains aspects de la carte de bruit.



**Figure 35 – Mise en forme des cartes de bruit (transparent et opaque)**

### 10.5.1.2 Échelle de couleur

L'échelle de couleur peut être modifiée pour mettre en valeur certains phénomènes. Par exemple, le sens de l'intensité peut être sélectionné et les extremums peuvent être définis par l'utilisateur ou laissés en mode automatique. La Figure 36 présente deux ajustements d'échelle de couleur complémentaires, soit l'intensité positive et l'intensité négative.



**Figure 36 - Affichage de l'intensité positive (gauche) et négative (droite)**

Lorsque l'intensité positive est affichée, ce n'est que l'énergie sortante qui est visible, l'énergie la plus forte est affichée en rouge et la plus faible en bleu. L'énergie entrante (négative) est alors affichée en noir (Figure 36, gauche). Alors que lorsque l'intensité négative est affichée (Figure 36, droite), c'est l'énergie entrante qui est mise en évidence. De manière analogue au cas précédent, l'intensité la plus forte dans ce sens est en rouge alors que la plus faible est en bleu. L'intensité positive sera affichée en noir pour ce cas.

En ce qui concerne les extrêmes, ils peuvent être laissés en mode automatique, soit comprenant les niveaux maximum et minimum de la carte de bruit ou être sélectionnés manuellement par l'utilisateur. Par exemple, la Figure 37 montre une échelle de couleur automatique et une échelle de couleur fixée sur les dix dB supérieurs de la mesure. Les niveaux supérieurs au maximum fixé

de l'échelle de couleur sont blancs et les niveaux en dessous du minimum fixé de l'échelle de couleur sont noirs. L'ajustement manuel peut être utile pour mieux localiser les sources de bruit.

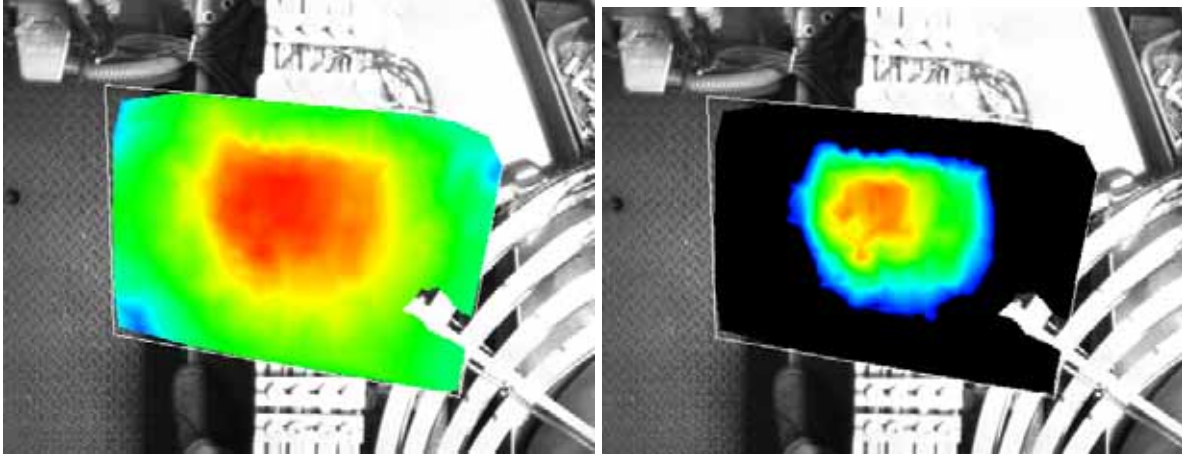


Figure 37 – Échelle de couleur automatique (gauche) et manuelle (droite)

### **10.5.2 Affichage d'une bande spectrale particulière ou du niveau global**

La carte de bruit peut être affichée pour n'importe quels des bandes spectrales ou du niveau global, peu importe la bande spectrale utilisée pour le balayage. Ceci permet d'accorder plus de liberté dans le traitement des données et l'analyse de ces dernières.

### **10.5.3 Type de spectre**

Le type de spectre peut être sélectionné parmi les options suivantes peu importe le type utilisé lors du balayage :

- 1/1, 1/3, 1/6 ou 1/12 d'octave
- Bandes fines FFT.

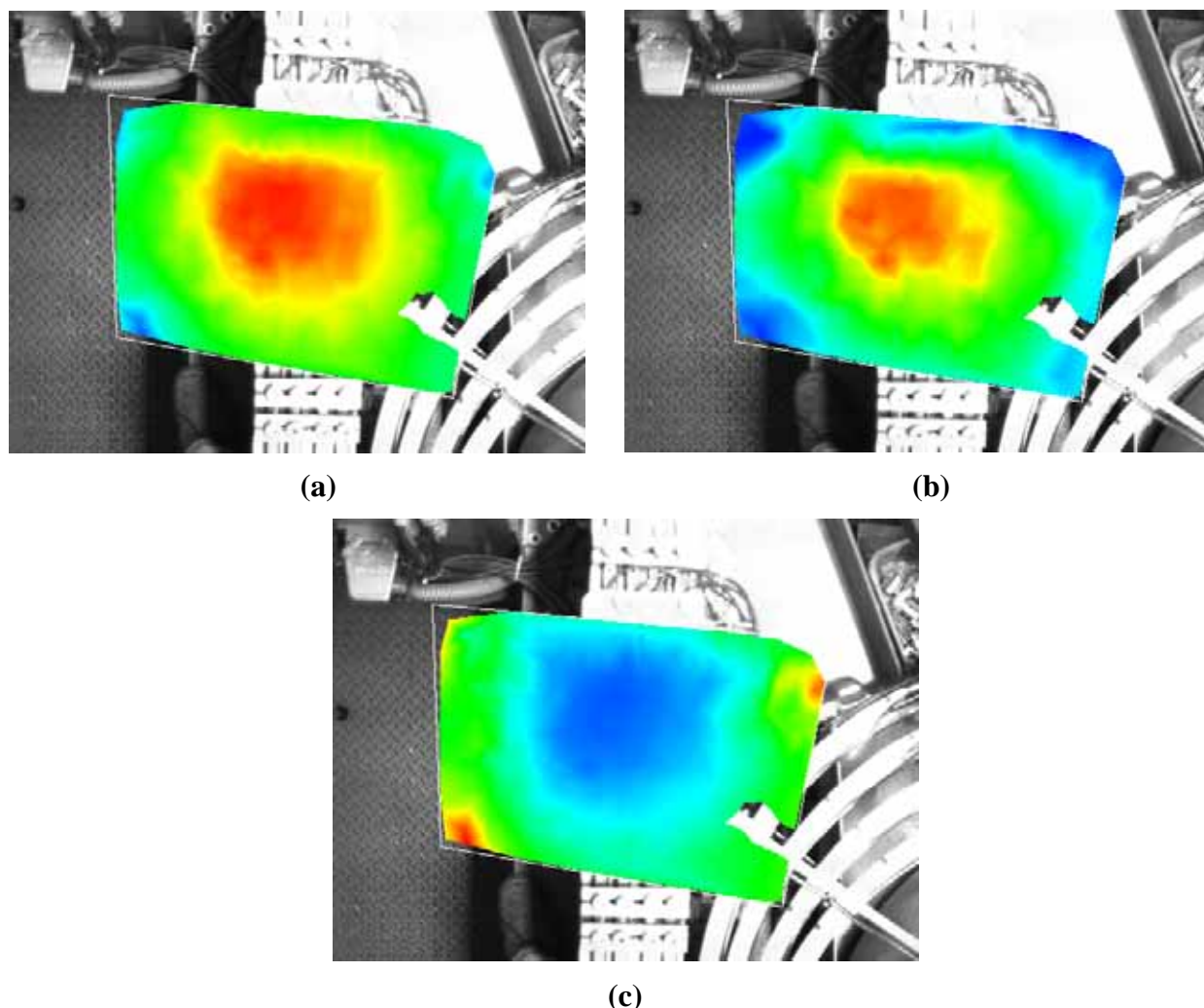
Il est à noter que le type de spectre choisi a une influence sur les bandes disponibles pour l'affichage de la carte de bruit.

### **10.5.4 Unités**

Les unités utilisées pour la représentation des résultats sont les dB, dBA et unités linéaires ( $W/m^2$  ou  $Pa^2(rms^2)$ ). Ces unités sont celles utilisées à la fois pour l'affichage spectral et la carte de bruit.

### 10.5.5 Type de mesure

Les types de mesure accessibles sont les mesures d'intensité acoustique, les mesures de pression acoustique et les mesures d'indice PI (Pression / Intensité). Tous ces types de mesures (Figure 38)Figure 38 peuvent être accessibles à partir du même fichier de mesure, peu importe le type de mesures sélectionné pour le balayage.



**Figure 38 – Intensité acoustique (a), pression acoustique (b) et indice PI (c)**

L'indice PI est le rapport de la pression acoustique sur l'intensité acoustique. Lorsque ce rapport est près de 1, le vecteur d'intensité est directement dans la direction de l'axe des microphones, ce qui veut dire que la mesure d'intensité représente correctement le flux d'énergie dans cette direction. En contrepartie, lorsque le rapport est plus élevé, la direction du flux d'énergie n'est pas dans l'axe des microphones, ce qui se traduit par une moins bonne évaluation du flux d'énergie.

Sur la(c)

Figure 38, l'image de l'indice PI présente une tache bleue localisée sur la source de bruit; cette tache bleue signifie un faible indice PI et par conséquent une bonne mesure d'intensité acoustique pour cette zone de mesure. Cependant, l'indice PI se détériore lorsque la sonde s'éloigne de la source de bruit, ce qui signifie que le vecteur d'intensité n'est plus perpendiculaire au plan de mesure. En somme, l'indice PI peut être utilisé pour quantifier la qualité d'une mesure d'intensité acoustique. Plus les valeurs sont faibles, plus la mesure d'intensité est représentative.

### 10.5.6 Outils de sélection

L'outil de sélection ponctuel (Figure 39, gauche) permet de cliquer sur la carte de bruit et d'obtenir le spectre et le niveau global obtenus à cet endroit. L'outil de sélection de surface (Figure 39, droite) quant à lui permet de délimiter une région de la zone de mesure et d'en calculer le spectre et le niveau global moyen, ou de calculer la puissance acoustique dans le cas d'une mesure d'intensité acoustique. Pour ce dernier cas, les niveaux résultants représentent la puissance totale passant par la surface définie.

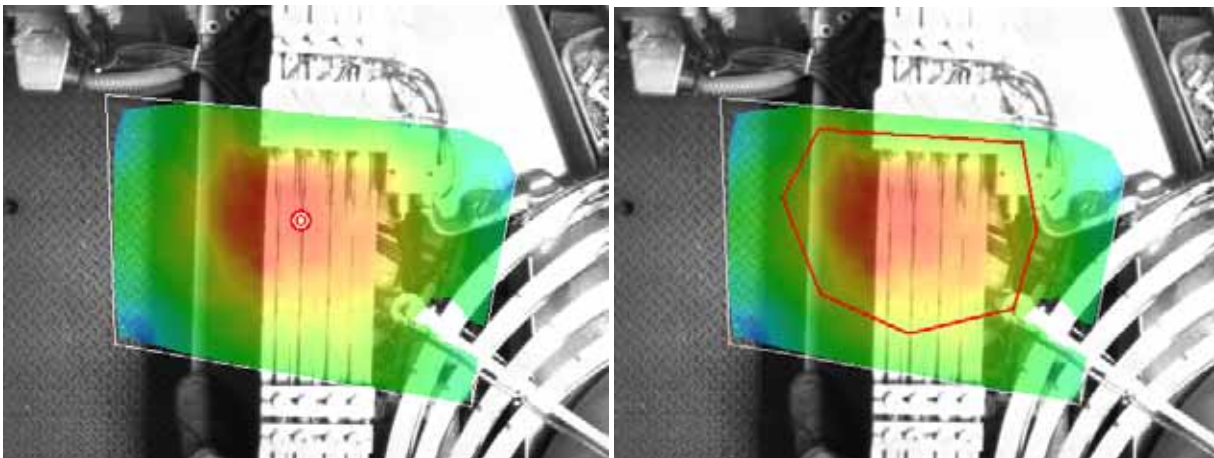


Figure 39 – Outil de sélection ponctuel (gauche) et de sélection de surface (droite)

### 10.5.7 Outil d'exportation

L'outil d'exportation permet d'exporter les données d'un fichier sous la forme d'un tableau en format Excel et d'une image bitmap regroupés dans un dossier. Ces fichiers d'exportation sont étroitement liés aux paramètres utilisés pour la représentation de la carte de bruit. Par exemple, si une région est sélectionnée avec l'outil de sélection, c'est le spectre moyen qui sera exporté dans le tableau de même que la région sélectionnée qui sera affichée sur l'image produite. De même, les paramètres de type de spectre, d'unités, de type de mesures et d'échelle de couleur seront ceux utilisés lors de l'exportation.

## 11 VALIDATION ET ÉVALUATION DU SYSTÈME

### 11.1 Validation

Afin d'évaluer la qualité des résultats fournis par ce nouveau système de cartographie, développé par Soft dB, des tests ont été effectués par des personnes externes à la compagnie Soft dB dans les laboratoires du Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS). Les mesures ont été réalisées par des chercheurs et professionnels scientifiques de l'IRSST et de l'Université de Sherbrooke après une formation délivrée par la compagnie Soft dB. Deux types de tests ont été pratiqués : (i) la mesure de la puissance acoustique d'une source de référence à l'aide de deux sondes intensimétriques différentes<sup>8</sup> et d'une antenne microphonique et (ii) la cartographie de l'intensité acoustique transmise par une paroi hétérogène. Pour la première validation, l'objectif était de voir si la puissance acoustique évaluée par le système de Soft dB correspondait à celles fournies par les deux autres systèmes ainsi que dans les spécifications de la source de référence. En ce qui concerne le second test, il s'agissait de voir si le système de cartographie permettait de repérer des défauts acoustiques dans le montage de la paroi. Les deux sections suivantes présentent les résultats des mesures de ces deux tests.

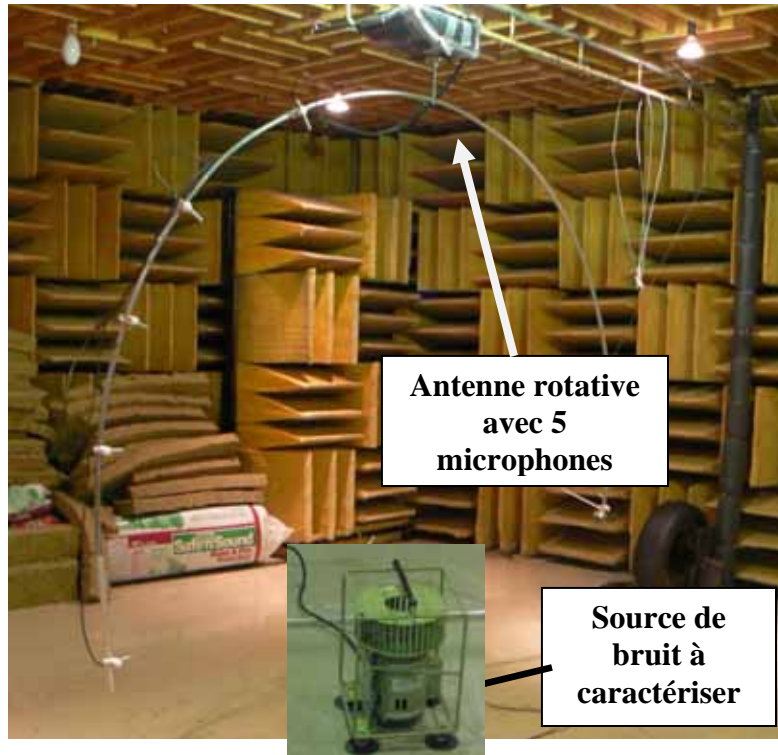
#### 11.1.1 Puissance acoustique d'une source de référence

La source de référence considérée est une source aérodynamique *Acculab* délivrant un niveau global de puissance acoustique de 94 dB (Figure 40). Sa puissance acoustique a été mesurée dans la salle semi-anéchoïque du GAUS par 3 techniques. Premièrement, une antenne semi-circulaire rotative constituée de 5 microphones 1/2" *B&K* situés en champ lointain a été utilisée (Figure 41).

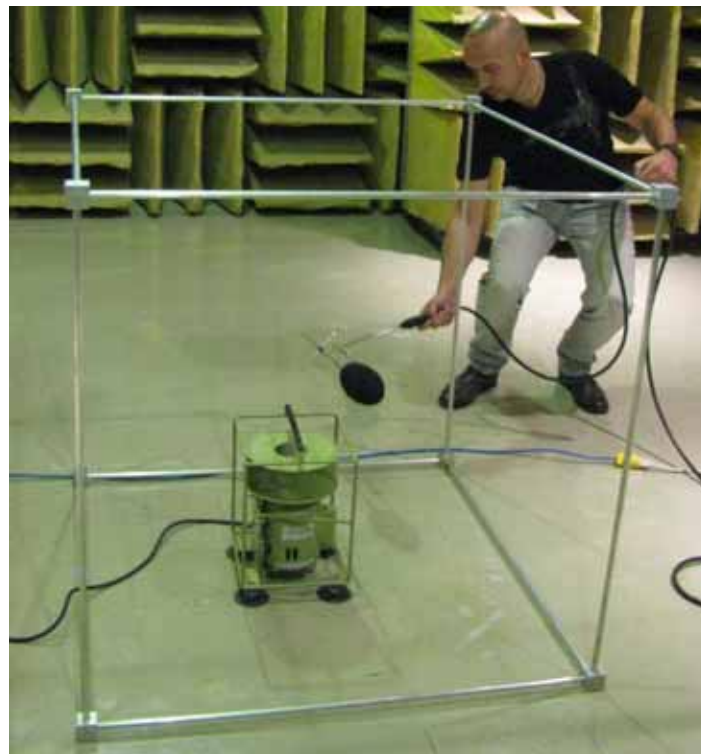


**Figure 40 – Source de référence testée**

<sup>8</sup> Les deux sondes testées étaient celle de la compagnie SoftdB et celle de la compagnie Bruel&Kjaer, fabricant reconnu de matériel de mesure, souvent considéré comme la référence.



**Figure 41 – Mesure de la puissance acoustique d'une source de référence à l'aide d'une antenne microphonique**



**Figure 42 – Mesure de la puissance acoustique d'une source de référence à l'aide de la sonde intensimétrique de SoftdB**

Deuxièmement, la puissance acoustique a été mesurée avec la technique de balayage avec la sonde intensimétrique de Soft dB (Figure 42). Enfin, la technique de balayage avec la sonde intensimétrique de *Bruël & Kjaer* a été utilisée (Figure 43). Les 5 faces d'un cube de dimensions 1m x 1m x 1m ont été balayées l'une après l'autre<sup>9</sup>. La puissance traversant chaque face est obtenue par multiplication de l'intensité acoustique moyenne par l'aire de chaque face. La puissance acoustique totale est obtenue par sommation des puissances traversant chaque face. Les deux systèmes ont été calibrés avant utilisation à l'aide d'un calibrateur dédié aux sondes intensimétriques. La calibration a été révérifiée après utilisation. Les niveaux de puissance acoustique par tiers d'octave mesurés pour chacune des 3 techniques ainsi que la courbe de référence fournie par le manufacturier sont présentés à la Figure 44. On constate un bon accord entre les 3 approches notamment entre les 2 techniques de balayage. Les 3 techniques sous-estiment néanmoins les niveaux de puissance acoustiques spécifiés par le manufacturier. Ces premiers tests indiquent que nous pouvons avoir confiance dans le système de mesure intensimétrique développé dans la cadre de ce projet.



**Figure 43 – Mesure de la puissance acoustique d'une source de référence à l'aide d'une sonde intensimétrique Brüel&Kjaer (gauche) photo de la sonde intensimétrique Brüel&Kjaer (droite)**

<sup>9</sup> Un espacement microphonique de 12 mm est utilisé pour les deux sondes intensimétriques.

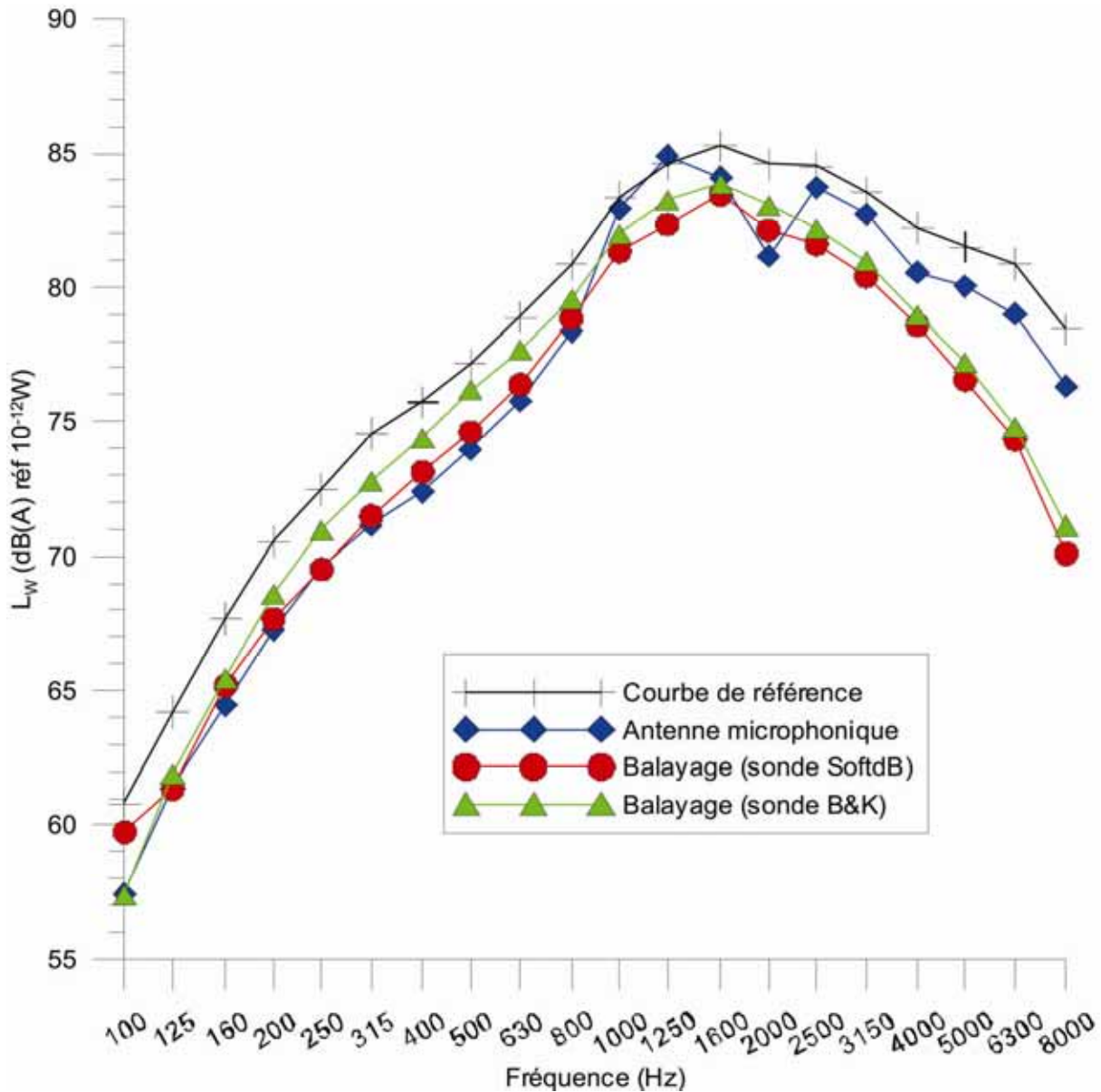
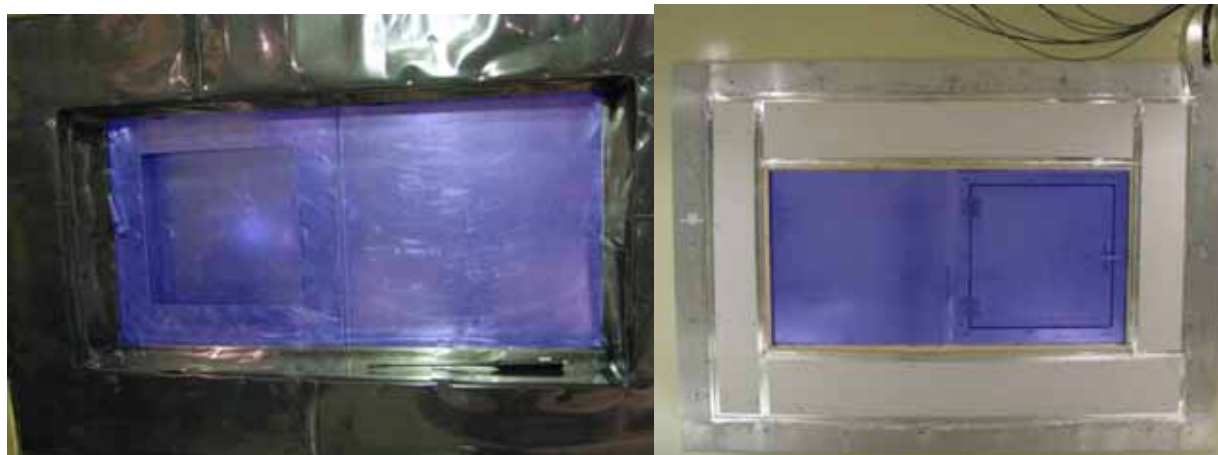


Figure 44 – Niveaux de puissance acoustique par tiers d'octave de la source testée, mesurés par 3 techniques, et courbe de référence du fabricant de la source

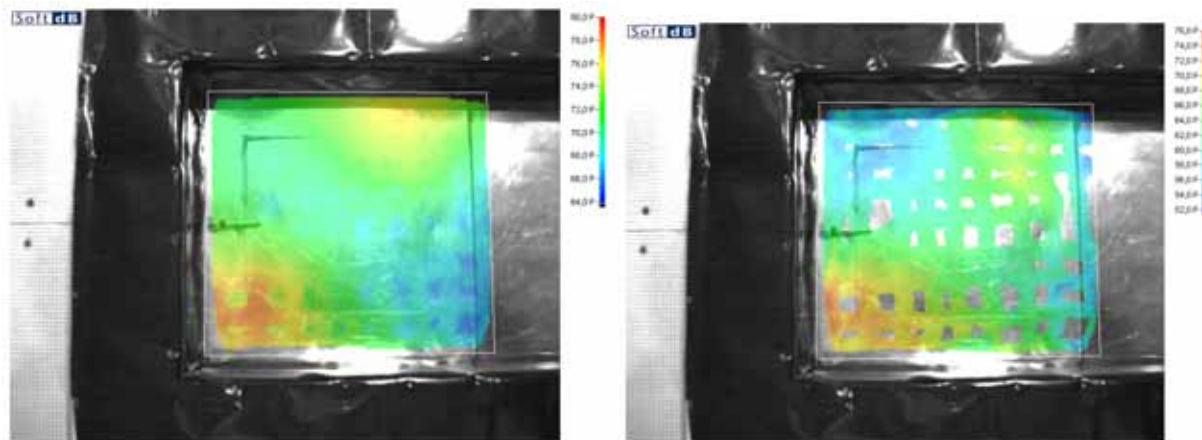
### 11.1.2 Localisation de défauts acoustiques dans une paroi

Dans un second temps, on s'est intéressé à la localisation de fuites acoustiques sur une paroi constituée d'un panneau métallique comportant une trappe. Le panneau est placé entre une chambre réverbérante, côté émission et une chambre semi-anéchoïque, côté réception (Figure 45). Le panneau est excité acoustiquement côté émission par un champ diffus et rayonne de l'autre côté. Le système de cartographie intensimétrique de Soft dB est utilisé pour mesurer l'intensité acoustique. La zone du panneau comportant la trappe est balayée à l'aide de la sonde.



**Figure 45 – Structure étudiée - côté réception, chambre semi-anéchoïque (gauche) côté émission, chambre réverbérante (droite)**

La Figure 46 montre les résultats obtenus pour la cartographie de l'intensité acoustique globale (de 100 Hz à 12500 Hz) et l'intensité acoustique dans la bande de tiers d'octave 6300 Hz, là où l'intensité acoustique est maximale. On constate que l'intensité acoustique maximale se situe dans le coin gauche en bas de la porte indiquant un problème d'étanchéité. Un contrôle minutieux du montage a effectivement montré un défaut dans ce coin. On constate que cette technique de cartographie acoustique peut aider à déceler des sources de bruit secondaires comme les fuites acoustiques.



**Figure 46 – Carte d'intensité acoustique globale (gauche) et dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale 6300 Hz (droite)**

## 11.2 Évaluation et questionnaires

Afin de proposer un système de mesure simple, convivial et répondant le mieux possible aux besoins d'utilisateurs potentiels, il a été décidé, dès le début du projet, de rendre disponible le premier prototype développé à un groupe d'utilisateurs à des fins d'évaluation. Outre les

chercheurs de l'IRSST qui ont agi en tant qu'utilisateurs internes, le système de mesure a été envoyé à un groupe de quatre évaluateurs externes. Deux de ces évaluateurs sont des consultants en acoustique (donc familier avec des mesures acoustiques), un autre un intervenant du réseau de la santé et le dernier, un ingénieur travaillant pour une compagnie dans laquelle des tests ont été effectués avec la sonde. Les deux consultants ont reçu, tour à tour, le système pour une période d'évaluation d'environ deux semaines. Dans le cas des deux autres évaluateurs, leur évaluation a été faite lors d'une visite en usine où des mesures ont été effectuées avec le système afin d'identifier des sources de bruit sur des machines bruyantes. À la suite de leurs essais, chaque évaluateur devait remplir un questionnaire portant sur différents aspects du système. Les thèmes couverts par le questionnaire sont : i) ergonomie de la sonde; ii) interface et procédures de mesure; iii) appréciation globale du système. Pour chaque thème les évaluateurs devaient répondre, sur une échelle d'appréciation de 1 (très mauvais) à 5 (excellent), à des points sous-jacents. De même, les évaluateurs pouvaient ajouter des commentaires pour chaque thème. Les questionnaires remplis pour chacun des évaluateurs sont présentés à l'Annexe B.

En général, les commentaires sont assez positifs, mais certains points d'amélioration ont été soulevés par les évaluateurs tant externes qu'internes. Certains de ces points ont été retenus et les modifications suivantes ont été apportées à la sonde, à la caméra, à l'interface graphique et aux algorithmes de calcul :

- La conception de la sonde et de la poignée a été revue afin de rendre le tout un peu plus léger, maniable et mieux équilibré.
- Le système de caméra a été revu et inclut maintenant un objectif grand-angle qui permet de positionner la caméra plus près de la machine à étudier tel que décrit à la section 6.2, contribuant de ce fait au côté pratique du dispositif.
- L'interface graphique a subi de nombreuses modifications. Le système d'échelle de couleur pour la visualisation des cartes a été simplifié. De même, la façon de visualiser les intensités négative et positive a été complètement revue.
- Des informations visuelles à l'écran ont été ajoutées (ex. nom du fichier traité).
- L'exportation des données a été corrigée et sensiblement bonifiée.
- Les outils graphiques de post-traitement des cartes ont été améliorés (sélection de zones, points de couverture, etc.).
- L'indicateur de qualité de couverture est maintenant affiché sur le graphique du spectre.
- L'algorithme d'interpolation servant à calculer et à générer les cartes de couleurs a été complètement revu puisqu'il pouvait donner, tel que mentionné par un évaluateur, des résultats aberrants pour certaines configurations.

## 12 CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de développer un appareil de cartographie d'intensité acoustique pour l'identification de sources de bruit en milieu industriel. L'identification est la première étape du processus de réduction du bruit en milieu industriel. C'est une étape très importante, car c'est sur cette dernière que seront basés le développement et la mise en œuvre des traitements. L'appareil développé dans le cadre de cette activité rend l'étape d'identification plus accessible aux hygiénistes industriels par la facilité d'interprétation qu'offre la cartographie d'intensité. En plus d'identifier les sources de bruit, la cartographie d'intensité peut mettre en lumière des pistes de solution quant aux traitements possibles.

Pour être utilisé en milieu industriel, cet appareil devait répondre aux exigences en termes de portabilité, facilité d'utilisation, et de performance. La portabilité du système a été obtenue en limitant le nombre d'éléments à interconnecter de façon manuelle, objectif atteint notamment en intégrant une carte de traitement de signal à l'ordinateur. Sur un site, la mise en place des éléments du système peut être réalisée en quelques minutes. De plus, la robustesse de ces éléments en fait un appareil approprié pour les mesures en milieu industriel.

L'efficacité de ce système se manifeste par l'utilisation d'une plateforme de traitement de signal de haute performance associée à un ordinateur puissant. Le raffinement des algorithmes de calcul a également permis d'améliorer la performance du système en limitant les temps de calcul tout en améliorant la définition des cartes produites. En outre, le repérage automatique en temps réel de la sonde dans le plan de balayage est l'élément le plus significatif en termes d'efficacité, car il permet de diminuer radicalement le temps de mise en œuvre d'une mesure par rapport aux autres techniques de cartographie.

La facilité d'utilisation de cet appareil a été obtenue en développant une interface utilisateur conviviale qui exige peu de connaissances techniques de la part de l'utilisateur. En outre, l'aspect compact et la connectivité réduite du système facilitent son utilisation en milieu industriel. Une courte formation suivie d'une mesure supervisée peut suffire à montrer le fonctionnement de l'appareil pour la prise de mesure.

Le résultat final de ce développement est un appareil performant, novateur et actuellement sans équivalent, compte tenu de son prix (30 000 \$), pour la détection de sources en milieu industriel. Ce dernier permet d'identifier rapidement les sources de bruit et de donner des pistes de solution pour la mise en œuvre de traitements. En addition, les cartes de bruit produites peuvent être utilisées pour vulgariser l'interprétation des phénomènes en cause et par conséquent faciliter la communication des résultats auprès des intervenants. L'appareil a été présenté aux hygiénistes du réseau lors d'une présentation en octobre 2010 et les possibilités qu'il offre ont suscité un vif intérêt de leur part.

Le système de cartographie développé dans le cadre de cette activité a été validé en laboratoire et évalué par plusieurs utilisateurs qui ont contribué à son amélioration tout au long du processus de développement. Le système a par ailleurs déjà été utilisé en industrie pour plusieurs projets de nature diverse. Parmi ces projets, notons le diagnostic de poste de travail dans une fabrique de pesées de plomb, la mise en œuvre de traitement à la source sur des machines d'une usine de pièces électroniques, le contrôle de l'isolation acoustique de l'encoffrement d'une machine dans

une aluminerie et l'identification des phénomènes acoustiques responsables du fort niveau de bruit dans la soufflerie d'une usine de pièces aéronautiques. En plus des bénéfices recherchés, cet appareil a permis de mettre en lumière certains phénomènes acoustiques difficilement représentables avec une technique classique. Ces résultats ont ouvert d'autres possibilités quant au calcul des cartes de bruit et à la représentation graphique de mesures d'intensité acoustique.

## 13 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Brüel & Kjær, «Noise Source Identification». Site B&K, [En Ligne].  
<http://www.bksv.com/pdf/Bp1908.pdf> (lien vérifié le 3 mai 2011)
- [2] Brüel & Kjær, «Non Stationary STSF». Site B&K, [En Ligne].  
<http://www.bksv.com/pdf/Bp1726.pdf> (lien vérifié le 3 mai 2011)
- [3] Christensen, J. J. et Hald, J. «Beamforming». Site B&K, [En Ligne]. Technical Review  
No. 1 (2004) <http://www.bksv.com/pdf/Bv0056.pdf> (lien vérifié le 3 mai 2011)
- [4] Patrat, J. C. et al., «Application d'une technique de localisation acoustique à  
l'établissement d'une cartographie d'intensité acoustique» Congrès Français  
d'Acoustique, Lille, France, 2002
- [5] Emiel Tijs, Hans-Elias de Bree et Steven Steltenpool, «Scan & Paint: a novel sound  
visualization technique». Site Microflown, [En Ligne]  
[http://www.microflown.com/files/media/library/Publications/Nearfield/2010\\_scanpaint\\_internoise.pdf](http://www.microflown.com/files/media/library/Publications/Nearfield/2010_scanpaint_internoise.pdf) (lien vérifié le 3 mai 2011)

## Annexe A. Développement du système de repérage spatial

La première étape du projet a été de faire une revue des systèmes envisageables pour réaliser le positionnement de la sonde. Suite à cette revue, trois solutions apparaissaient possibles :

1. Système *Flock of Bird* (FOB) (tel que celui utilisé pour le développement du prototype en 2004);
2. Système basé sur le repérage par ultrason;
3. Système basé sur le repérage de DEL infrarouge.

Des travaux préliminaires ont été effectués pour chacune de ces options afin d'en établir les possibilités et les limites. Les paragraphes ci-dessous décrivent plus en détail ces trois systèmes.

### Système *Flock of Bird* (ondes magnétiques pulsées)

C'est le système de repérage spatial qui a été utilisé pour la réalisation du prototype dans le projet de 2004. Le FOB, fabriqué par la compagnie *Ascension Technology*<sup>10</sup>, utilise une génération d'ondes pulsées magnétiques. Ce système est composé d'une base d'émission, d'un récepteur et d'un boîtier contenant l'électronique nécessaire à l'acquisition et au traitement du signal lié au positionnement. Une fois le récepteur du FOB placé sur la sonde, le système de repérage permet de transférer les coordonnées spatiales de la sonde à chaque bloc d'acquisition d'une mesure acoustique.

Des discussions ont eu lieu avec la compagnie *Ascension Technology* pour commencer la mise en œuvre d'un protocole de communication entre notre carte DSP (dédiée à l'acquisition et mesure acoustique) et leur carte électronique gérant le positionnement. Bien que cet appareil ait permis de développer le premier prototype de sonde d'intensimétrie à repérage spatial, cette solution a toutefois présenté plusieurs inconvénients :

- Technologie sensible aux fortes perturbations électromagnétiques;
- Câble de liaison de gros calibre dont la longueur ne peut être facilement modifiée;
- Portée de 1,2 m avec transmetteur normal (maximum de 3 m avec le plus gros transmetteur);
- Prix du système de base à 4 000 \$ (CAN);
- Dépendance du système d'intensité final à une technologie propriétaire.

### Système *eBeam Projection WhiteBoard*

Lors d'une recherche sur d'autres systèmes de repérage, un système de repérage alternatif a été identifié, soit le système *eBeam Projection WhiteBoard* de *Ludia*<sup>11</sup>. Ce dernier est utilisé en enseignement et sert à localiser les coordonnées d'un crayon-feutre sur un tableau blanc pour ultimement afficher son contenu sur un écran d'ordinateur.

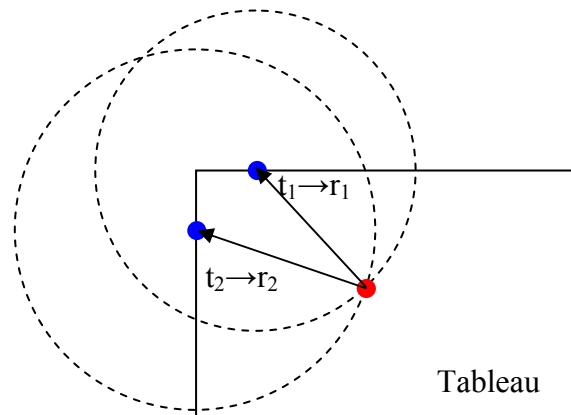
---

<sup>10</sup> [http://www.ascension-tech.com/docs/Flock\\_of\\_Birds.pdf](http://www.ascension-tech.com/docs/Flock_of_Birds.pdf)

<sup>11</sup> [www.ludia.com](http://www.ludia.com)

Le fonctionnement de cet appareil est basé sur les ultrasons et localise une source ultrasonique située sur le feutre par le biais de récepteurs ultrasoniques localisés sur un des coins du tableau. Le principe utilisé pour effectuer cette tâche n'est pas divulgué, mais est sans doute réalisé par l'analyse des retards temporels entre les signaux captés par les récepteurs ultrasoniques.

En premier lieu, une impulsion ultrasonique est émise à un temps donné. Le signal est alors reçu par un premier récepteur à un temps  $t_1$  puis par un second à un temps  $t_2$ . Ces durées de propagation se traduisent ensuite par une distance de propagation. En second lieu, les distances de propagation sont reportées sous la forme de cercles dont le rayon est la distance de propagation de la source au récepteur et le centre étant la position du récepteur en question. L'intersection de ces deux cercles est la position du feutre (Figure A1).



**Figure A1 - Illustration du principe utilisé pour le système *eBeam Projection WhiteBoard***

Des recherches ont été effectuées afin de développer un dispositif de repérage à partir de ce principe. Pour fonctionner, ce principe nécessite que l'émetteur et les récepteurs soient omnidirectionnels. À cet effet, *Measurement Specialties* propose des transducteurs piezo offrant ce genre de performance<sup>12</sup> (Figure A2) :



**Figure A2 - Transducteurs omnidirectionnels à ultrasons**

<sup>12</sup> [http://www.meas-spec.com/product/t\\_product.aspx?id=2490](http://www.meas-spec.com/product/t_product.aspx?id=2490)

Bien que cette approche semble intéressante, plusieurs problèmes liés à cette technologie nous sont apparus :

- Les essais techniques effectués par des tierces parties et dont les résultats ont été publiés sur Internet ont énoncé une difficulté à obtenir une précision supérieure à 2 cm;
- La procédure de calibration est trop complexe pour l'utilisateur grand public;
- La correspondance entre les coordonnées fournies par le dispositif et la localisation correspondante sur une image ou système de la photographie devait se faire manuellement.

Pour ces raisons, il a été décidé d'abandonner cette approche.

### **Système de repérage spatial par repérage de DEL infrarouge**

L'idée de départ provient du projet « Multi-Touch Whiteboard using the Wiimote »<sup>13</sup> de Johnny Chung Lee. Ce système utilise le dispositif de détection de points infrarouges de la télécommande de la console *Nintendo Wii*<sup>TM</sup>.

Dans la console *Nintendo Wii*<sup>TM</sup>, le repérage de la manette est basé sur le repérage de points infrarouges générés par des diodes électroluminescentes (DEL) émettant à la longueur d'onde de 940 nm. Ce dispositif permet de déterminer les coordonnées de ces points dans le repère visuel du capteur (coordonnées cartésiennes 1024 x 768).

Les performances obtenues résultent notamment des caractéristiques suivantes :

- Le capteur *Multiple Object Tracking* (MOT), fruit d'une coopération entre *PixArt* et *Nintendo*<sup>TM</sup> effectue une partie du traitement d'image;
- Ce capteur est optimisé pour la bande de longueurs d'onde centrée sur 940 nm et un filtre optique passe-bande permet une grande immunité à la lumière parasite;
- Seules les coordonnées calculées sont envoyées par Bluetooth et non le flux vidéo complet.



**Figure A3 – Nintendo<sup>TM</sup> - PixArt Mot Sensor**

Bien que la réalisation d'un système semblable soit possible, ce capteur très spécifique est réservé à l'usage exclusif de *Nintendo*<sup>TM</sup> et n'est pas disponible à l'usage public actuellement.

Après avoir testé le système de Lee basé sur une télécommande *Nintendo Wii*<sup>TM</sup>, un prototype a été conçu à partir de DEL et d'une webcam *Microsoft VX-3000* dont le capteur CMOS est

<sup>13</sup> <http://johnnylee.net/projects/wii/>

sensible à cette longueur d'onde lorsque le filtre anti-infrarouge est retiré. Un programme de vision artificielle de base fut développé à partir d'*OpenCV* pour réaliser ce système de repérage prototype. Ce premier système prototype a permis de valider la pertinence et le potentiel de cette approche. Ces essais ont par ailleurs permis d'identifier des problématiques de mise en œuvre, notamment la fréquence de rafraîchissement de l'image (un élément important pour assurer le repérage adéquat de la sonde) et la présence de sources infrarouges parasites (telles que le soleil, certaines lumières incandescentes et des éléments réfléchissant ces sources lumineuses).

Considérant le faible coût de cette technologie de positionnement par DEL par rapport au système *Flock of Bird*, mais aussi que cette technologie permettait de s'affranchir de la dépendance à l'utilisation d'une technologie propriétaire, il fut décidé d'entreprendre le développement du système de repérage à DEL. Bien que ce choix entraîna beaucoup plus de temps et d'efforts que prévu initialement au projet pour cet aspect de positionnement, il nous est apparu comme la meilleure option à développer.

### **Minimisation des sources infrarouges parasites**

Afin de remédier au problème des sources parasites, une approche synchrone a été testée. Cette approche consistait à synchroniser la source infrarouge avec la prise d'images de la caméra dans le but de soustraire les sources infrarouges indésirables lors de la détection des sources infrarouges de la sonde. Le concept consistait à prendre une image sur deux avec les DEL de la sonde éteinte et l'autre avec les DEL allumées, et à soustraire ces images pour extraire les sources parasites. Il s'agissait en fait de la même approche que celle énoncée précédemment, mais appliquée de façon dynamique.

Bien que cette approche semble infaillible en théorie, en pratique elle se butait à différents problèmes techniques, dont la synchronisation de l'alimentation des DEL avec l'ouverture de la caméra aux fréquences requises. En effet, dans le cas d'une DEL pilotée par une des sorties de la carte DSP *Signal Ranger II*, elle-même pilotée par un port USB, lorsque la commande était lancée, via le programme sous *Windows*, c'est l'ordinateur qui décidait du moment exact de l'envoi de la commande au port USB avec un délai de l'ordre de 5 ms. Par la suite, la caméra devait être déclenchée elle aussi par un port USB, puis une autre commande vers les DEL pour l'extinction, suivie d'une autre acquisition, étaient demandées à la caméra. Lorsque tous ces délais étaient pris en compte, la synchronisation était rarement parfaite et peu prévisible en raison de la gestion des appels USB par le système d'exploitation. Par conséquent, la fréquence de rafraîchissement du positionnement était devenue trop élevée pour les besoins.

Pour qu'un tel système puisse fonctionner de façon adéquate, la DEL devrait être contrôlée directement à partir de la caméra elle-même éliminant les problèmes de délai USB et les problèmes de durées d'exposition variables. À cet effet, quelques caméras permettent cette mise en œuvre par le biais d'un connecteur, à même la caméra<sup>14</sup>. Cependant, cette option fut écartée pour le moment en raison du coût élevé de ces caméras et de la complexité du montage.

---

<sup>14</sup> Thorlabs DCU223M ou NI Smart Cameras



## Annexe B. Réponses aux questionnaires d'évaluation

Cette annexe contient les réponses aux questionnaires fournis à quatre utilisateurs lors de l'évaluation du premier prototype (Mai 2010).

### Questionnaire d'évaluation du système de cartographie basé sur l'intensimétrie (Utilisateur #1)

Légende :

- 5** : Excellent
- 4** : Bon
- 3** : Passable
- 2** : Mauvais
- 1** : Très mauvais
- 0** : Sans opinion

#### Ergonomie de la sonde

	1	2	3	4	5
Poids			X		
Confort de la poignée / prise en main			X		
Longueur du câble				X	
Maniabilité				X	
Boutons de commandes				X	
Taille de la sonde				X	

*Commentaires additionnels sur l'ergonomie de la sonde :*

Sonde dont le poids est déséquilibré ce qui amène une torsion du poignet qu'il faut contrebalancer. Cela peut devenir inconfortable à la longue.

**Interface & procédures de mesure**

	1	2	3	4	5
Calibration de la sonde					
Installation de la caméra					
Définition de la zone visuelle					
Convivialité lors de la prise de mesures					
Réglage des paramètres en phase d'acquisition					
Réglage des paramètres lors du « post-processing »					
Pertinence des quantités physiques présentées					
Convivialité de l'interface graphique					
Pertinence des indicateurs visuels lors de l'acquisition					
Exportation des données					

*Commentaires additionnels sur l'interface et les procédures de mesures :*

**Appréciation globale du système**

	1	2	3	4	5
Autonomie électrique					
Robustesse de l'ensemble					
« Packaging »					
Poids de l'ensemble					
Encombrement de l'ensemble					
Facilité de connexion des câbles					

*Commentaires additionnels sur l'appréciation globale du système (points forts, points faibles):*

**Questionnaire d'évaluation du système de cartographie basé sur l'intensimétrie  
(utilisateur #2)**

Légende :

- 5** : Excellent
- 4** : Bon
- 3** : Passable
- 2** : Mauvais
- 1** : Très mauvais
- 0** : Sans opinion

**Ergonomie de la sonde**

	1	2	3	4	5
Poids				X	
Confort de la poignée / prise en main				X	
Longueur du câble					X
Maniabilité				X	
Boutons de commandes				X	
Taille de la sonde			X		

*Commentaires additionnels sur l'ergonomie de la sonde :*

**Interface & procédures de mesure**

	1	2	3	4	5
Calibration de la sonde					
Installation de la caméra					
Définition de la zone visuelle					X
Convivialité lors de la prise de mesures				X	
Réglage des paramètres en phase d'acquisition					
Réglage des paramètres lors du « post-processing »					
Pertinence des quantités physiques présentées				X	
Convivialité de l'interface graphique					X
Pertinence des indicateurs visuels lors de l'acquisition					X
Exportation des données					

*Commentaires additionnels sur l'interface et les procédures de mesures :*

**Appréciation globale du système**

	1	2	3	4	5
Autonomie électrique N/A					
Robustesse de l'ensemble				X	
« Packaging »				X	
Poids de l'ensemble			X		
Encombrement de l'ensemble			X		
Facilité de connexion des câbles				X	

*Commentaires additionnels sur l'appréciation globale du système (points forts, points faibles):*

**Questionnaire d'évaluation du système de cartographie basé sur l'intensimétrie  
(Utilisateur #3)**

Légende :

- 5** : Excellent
- 4** : Bon
- 3** : Passable
- 2** : Mauvais
- 1** : Très mauvais
- 0** : Sans opinion

**Ergonomie de la sonde**

	1	2	3	4	5
Poids				X	
Confort de la poignée / prise en main				X	
Longueur du câble					X
Maniabilité				X	
Boutons de commandes					X
Taille de la sonde					X

*Commentaires additionnels sur l'ergonomie de la sonde :*

Il y a amélioration à faire concernant le diamètre du câble et son poids. Il est désirable de le rendre plus petit et léger afin de faciliter son déplacement.

Amélioration future suggérée : Sonde d'intensimétrie sans fil?

**Interface & procédures de mesure**

	1	2	3	4	5
Calibration de la sonde	SANS OPINION				
Installation de la caméra			X		
Définition de la zone visuelle			X		
Convivialité lors de la prise de mesures				X	
Réglage des paramètres en phase d'acquisition				X	
Réglage des paramètres lors du « post-processing »					X
Pertinence des quantités physiques présentées				X	
Convivialité de l'interface graphique				X	
Pertinence des indicateurs visuels lors de l'acquisition					X
Exportation des données	SANS OPINION				

*Commentaires additionnels sur l'interface et les procédures de mesures :*

Plusieurs facteurs limitent l'utilisation du système de cartographie sur le terrain :

Lors de l'installation de la caméra : Les obstacles empêchant de localiser la caméra là où la source est entièrement couverte par la zone visuelle.

Lors de la définition de la zone visuelle et de la prise de mesure : Les obstacles entre la source et la caméra.

De par ces facteurs, nous n'avons pas pu utiliser ce système dans certains projets en usine.

**Appréciation globale du système**

	1	2	3	4	5
Autonomie électrique				X	
Robustesse de l'ensemble					X
« Packaging »				X	
Poids de l'ensemble			X		
Encombrement de l'ensemble				X	
Facilité de connexion des câbles					X

*Commentaires additionnels sur l'appréciation globale du système :*

Lorsque nous effectuons des relevés sur le terrain pour mieux déterminer la nature des bruits, nous favorisons les instruments qui nous aident à être efficaces. Considérant la complexité d'utilisation du système de cartographie et tous les facteurs empêchant son utilisation sur le terrain, ce système n'est pas pratique pour nous.

### Questionnaire d'évaluation du système de cartographie basé sur l'intensimétrie (Utilisateur #4)

Légende :

- 5** : Excellent
- 4** : Bon
- 3** : Passable
- 2** : Mauvais
- 1** : Très mauvais
- 0** : Sans opinion

#### Ergonomie de la sonde

	1	2	3	4	5
Poids			X		
Confort de la poignée / prise en main				X	
Longueur du câble			X		
Maniabilité				X	
Boutons de commandes				X	
Taille de la sonde				X	X

*Commentaires additionnels sur l'ergonomie de la sonde :*

Sonde longue sur son axe

Câble pourrait être plus long.

**Interface & procédures de mesure**

	1	2	3	4	5
Calibration de la sonde	SANS OPINION				
Installation de la caméra				X	
Définition de la zone visuelle			X		
Convivialité lors de la prise de mesures				X	
Réglage des paramètres en phase d'acquisition				X	
Réglage des paramètres lors du « post-processing »		X			
Pertinence des quantités physiques présentées				X	
Convivialité de l'interface graphique				X	
Pertinence des indicateurs visuels lors de l'acquisition				X	
Exportation des données	SANS OPINION				

*Commentaires additionnels sur l'interface et les procédures de mesures :*

Bug à certains « Load » et « Sound Power »

Amélioration à apporter au niveau de l'échelle. Et si on veut notre propre échelle?

Rajouter échelle avec exportation de l'image.

Indiquer 1/3 et 1/1 au graphique.

[Commentaire illisible]

Indiquer le nom de fichier lorsque « Load ».

Possibilité de zoomer le graphique lorsque 1/12 oct.

**Appréciation globale du système**

	1	2	3	4	5
Autonomie électrique			X		
Robustesse de l'ensemble			X		
« Packaging »					
Poids de l'ensemble					X
Encombrement de l'ensemble					X
Facilité de connexion des câbles					X

*Commentaires additionnels sur l'appréciation globale du système :*

Point fort : facilité de mesure, convivial, simple d'utilisation

Point faible : [Commentaire illisible], [Commentaire illisible], réglage des échelles pas clair