inrs
Institut National de Recherche et de Sécurité

note scientifique & technique

Influence de la directivité des sources de bruit sur le champ acoustique rayonné dans un bâtiment industriel.

NS 254 NOTE SCIENTIFIQUE & TECHNIQUE

Juin 2005

Influence de la directivité des sources de bruit sur le champ acoustique rayonné dans un bâtiment industriel.

J. CHATILLON

NS 254

SOMMAIRE

Résumé : 1
1. Introduction 2
2. Méthodologie 3
2.1. Source de test utilisée 3
2.2. Caractérisation complète des sources 4
2.3. Caractérisation simplifiée des sources 4
2.4. Influence de la directivité des sources sur le champ rayonné en local industriel : critère de comparaison 5
2.5. Simulations des champs acoustiques 6
2.6. Mesures des champs acoustiques 8
2.7. Résumé des essais comparatifs 8
3. Résultats de la caractérisation de la directivité des sources 9
3.1. Caractérisation de la source de test 9
3.1.1. Caractérisation complète 9
3.1.2. Caractérisation simplifiée 10
3.2. Caractérisation complète de la scie à bois à lame circulaire 11
3.3. Caractérisation simplifiée de la raboteuse 12
3.4. Caractérisation simplifiée de la dégauchisseuse 12
3.5. Résumé : directivité des sources testées 12
3.5.1. Au sens de la norme ISO 14257 12
3.5.2. Emergence des niveaux dans le cas de l'intensimétrie 13
4. Résultats concernant l'influence de la directivité des sources sur le champ rayonné 14
4.1. Simulations 14
4.2. Mesures en bâtiment vide 16
4.2.1. Source de test en configuration A et B 16
4.2.2. Source de test en configuration C 16
4.2.2. Scie à bois 17
4.3. Mesures en bâtiment encombré 17
4.3.1. Source omnidirectionnelle et source directive 18
4.3.2. Raboteuse orientée 19
4.3.3. Dégauchisseuse et source omnidirectionnelle 20
5. Conclusions 20
6. Bibliographie 21
ANNEXE 1 : Directivité de la source de test, configuration A 22
ANNEXE 2 : Directivité de la scie à bois 25
ANNEXE 3 : Caractérisation simplifiée de la source de test en configuration A 27
ANNEXE 4 : Caractérisation simplifiée d'une raboteuse 29
ANNEXE 5 : Caractérisation simplifiée d'une dégauchisseuse 31
ANNEXE 6 : Indices de directivité des sources au sens de la norme ISO 14257 33
ANNEXE 7 : Estimation de la directivité sur le maillage intensimétrique 34
ANNEXE 8 : Simulations du champ à l'intérieur d'un bâtiment vide ou encombré 35

Résumé :

Afin d'améliorer la précision des calculs d'acoustique prévisionnelle, cette étude avait pour objectif de caractériser de manière simplifiée la directivité de sources de bruit, d'introduire cette directivité dans le calcul et d'en estimer l'influence sur le niveau de bruit rayonné dans un bâtiment industriel.
Des caractérisations complètes de la directivité d'une source de test et d'une scie à bois ont été effectuées en chambre semi-anéchoïque. Une méthode de caractérisation simplifiée a ensuite été appliquée dans un hall industriel sur une raboteuse et une dégauchisseuse. On a introduit la directivité de la source de test dans le calcul prévisionnel en simulant un ensemble varié de bâtiments industriels. Des mesures ont ensuite été effectuées avec différentes sources dans un bâtiment vide et un bâtiment encombré.
Les mesures comme les simulations montrent que, même si la source de test est assez directive, le champ rayonné dans un bâtiment est pratiquement celui d'une source omnidirectionnelle dès que le bâtiment est encombré. Ces résultats ne dépendent pas de l'orientation de la source, ni du traitement acoustique du bâtiment. Les machines à bois mesurées sont généralement peu directives. L'influence de leur directivité n'est pas négligeable au poste de travail mais elle est faible dans le reste du bâtiment si ce dernier est encombré.
Les directivités des machines mesurées dans l'étude sont un facteur du deuxième ordre pour ce qui est de l'exposition des travailleurs se trouvant loin de ces machines. Il n'apparaît pas indispensable d'introduire la directivité des machines bruyantes dans le logiciel d'acoustique prévisionnelle si l'on s'intéresse à l'efficacité des solutions de traitement acoustique de l'atelier.

Mots clés : ACOUSTIQUE – SOURCE DE BRUIT – RAYONNEMENT ACOUSTIQUE – MODÉLISATION – MESURE

1. Introduction

La caractérisation des sources de bruit s'effectue actuellement de manière fine, dans le milieu industriel ou en laboratoire, par des méthodes d'analyse complexes utilisant des instrumentations et des algorithmes de traitement parfois lourds à mettre en oeuvre. Qu'il s'agisse des méthodes d'intensimétrie [1], des méthodes de champ proche comme l'holographie [2] ou de la vibrométrie, ces techniques sont bien adaptées au laboratoire et s'intéressent à des échelles fines de compréhension des phénomènes mis en jeu, souvent dans le but de réduire le bruit à la source.

Au contraire, pour les utilisateurs de logiciels d'acoustique prévisionnelle dans les locaux industriels, la modélisation des sources de bruit a été longtemps mise au second plan au profit de l'étude des problèmes liés à la propagation des ondes sonores dans des milieux complexes. Il en résulte une modélisation des sources sonores se réduisant à une représentation monopolaire [3] dont la puissance acoustique est estimée globalement [4]. Ainsi, ces modèles extrêmement simplifiés ne prennent ils pas en compte la directivité et s'éloignent beaucoup des conditions réelles pour lesquelles les machines bruyantes, et plus généralement toutes les sources de bruit, ont évidemment des caractéristiques d'émission complexes. Cette lacune de modélisation peut nuire à la précision des résultats des calculs de cartographie sonore dans les ateliers dans le cas où les machines bruyantes sont de grandes dimensions ou bien comportent plusieurs sources. Cette imprécision peut conduire à proposer des solutions de correction acoustique sur-dimensionnées et coûteuses ou bien ne conduisant pas à une réduction suffisante de l'exposition sonore des salariés.

Il est donc nécessaire d'étudier l'intérêt de modéliser les sources de bruit de façon plus réaliste que par un simple monopole omnidirectionnel. Cette modélisation doit être reliée à une caractérisation des sources *in situ*, qui sera plus simple à mettre en œuvre que les méthodes de laboratoire. En effet, sur un site industriel en fonctionnement, les contraintes de mesurage sont de deux ordres. D'une part, l'environnement est complexe (locaux plus ou moins réverbérants, sources multiples, bruit de fond,…) et d'autre part, les contraintes en milieu industriel (sources non stationnaires impliquant un temps de mesurage court, instrumentation légère et facile à déployer) conduisent à n'effectuer que des estimations simples et rapides des caractéristiques spatiales et spectrales des sources.

L'étude comporte deux volets :

1) le choix et la validation d'une méthode simple de caractérisation de la directivité des sources de bruit,
2) l'estimation de l'influence de la directivité des sources sur le champ sonore rayonné en local industriel.

Le premier volet permet de connaître l'ordre de grandeur de la directivité de différentes machines réelles. La méthode de caractérisation est validée sur des sources artificielles dont les caractéristiques sont connues théoriquement et mesurées avec des méthodes de caractérisation fines. Elle est ensuite utilisée sur des machines réelles.
Le deuxième volet permet de donner, connaissant la directivité des sources utilisées, l'influence de cette directivité sur la cartographie sonore à l'intérieur d'un bâtiment industriel. Cette partie est validée par des simulations mais aussi par des mesures du champ acoustique créé par des machines ou des sources bruyantes à l'intérieur de bâtiments dont les caractéristiques sont connues.

Au final, il s'agit d'évaluer la nécessité d'introduire ou non la directivité des sources pour améliorer la précision des calculs d'acoustique prévisionnelle.

2. Méthodologie

2.1. Source de test utilisée

Pour valider les méthodes de caractérisation de la directivité nous avons utilisé une source connue qui est composée de 4 haut-parleurs bafflés montés en ligne dans un caisson (cf. figure 1).

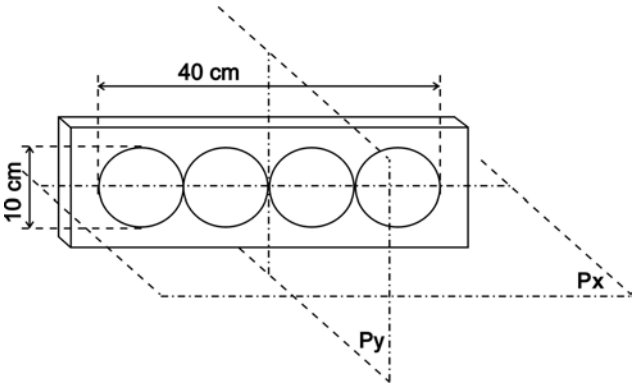


Figure 1 : Source directive de test

Si on assimile cette source à 4 monopoles rayonnant en phase, son diagramme de directivité est un sinus cardinal avec un lobe principal de largeur à –3 dB d'environ 50° à 1000 Hz dans le plan Px (cf. figure 1). Le diagramme de directivité réel est le produit de la directivité en sinus cardinal par celle d'un haut-parleur, et le caisson provoque une atténuation forte des niveaux à l'arrière des faces vibrantes. Cette source est par construction quatre fois moins directive dans le plan Py (cf. figure 1).
Trois configurations ont été utilisées pour cette source (cf. figure 2) :

A) la source étant posée sur un pied à une hauteur d'environ 1 m du sol, l'axe Y étant vertical (émission en direction d'une paroi du local),
B) la source étant posée sur un pied à une hauteur d'environ 1 m du sol, l'axe Y étant horizontal (émission en direction du plafond du local),
C) la source étant posée sur le sol, l'axe Y étant vertical (émission en direction d'une paroi du local).

Les deux premières configurations provoquent, en chambre semi-anéchoïque, une source image éloignée de 2 m de la source réelle. La configuration C permet de confondre la source réelle et sa source image pour les fréquences inférieures à 1 kHz, les deux sources étant séparées de 25 cm dans ce dernier cas.

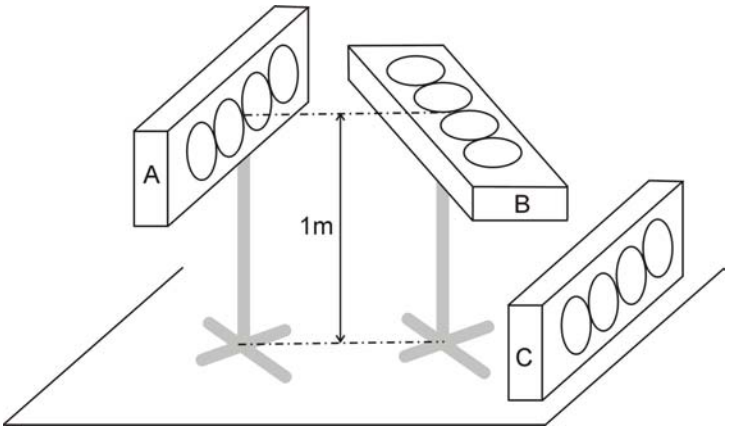


Figure 2 : Configurations pour la source

2.2. Caractérisation complète des sources

Une méthode de caractérisation complète des sources de bruit a d'abord été utilisée en chambre semi-anéchoïque. Elle consiste à mesurer la pression acoustique issue de la source en utilisant 1152 points de mesure de pression distribués sur une hémisphère de 2 mètres de rayon centrée sur la source (figure 3). Cette méthode lourde permet d'obtenir avec précision la directivité d'une source et les résultats peuvent alors être utilisés comme une référence pour valider les mesures simplifiées effectuées dans une deuxième phase.

Plusieurs sources ont été caractérisées par cette méthode complète en chambre semi-anéchoïque :

- la source de test directive émettant un bruit rose (125 Hz – 8 kHz) dans les trois configurations A, B et C,
- une scie à bois à lame circulaire utilisée à vide.

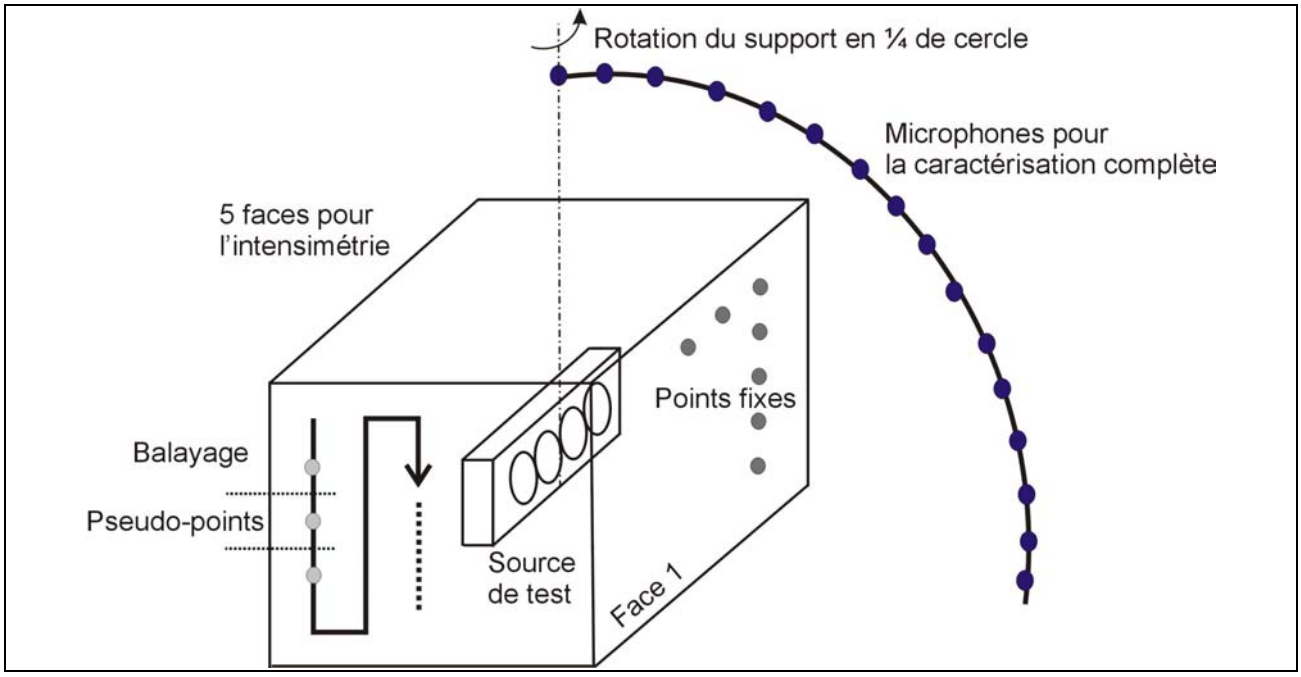


Figure 3 : Schéma des caractérisations de la source de test

2.3. Caractérisation simplifiée des sources

Le choix d'une méthode de caractérisation simplifiée obéit à plusieurs contraintes :

- la méthode doit pouvoir caractériser une source bruyante se trouvant dans un environnement industriel (locaux plus ou moins réverbérants, présence de sources multiples, présence d'un bruit de fond,…),
- le temps de mesurage doit rester raisonnable (quelques minutes),
- la méthode doit déployer une instrumentation légère.

Sachant que la caractérisation peut se faire soit par une mesure de pression acoustique, soit par une mesure d'intensité acoustique, la première contrainte donne l'avantage à l'intensité. En effet, si la mesure intensimétrique est effectuée sur une surface enveloppe entourant la source, elle permet de ne mesurer pratiquement que le flux sortant de cette surface enveloppe, sans être perturbée par les sources extérieures ou le bruit de fond stationnaires

L'intensimétrie acoustique par balayage permet d'obtenir, par bandes de fréquence, la puissance acoustique de chaque face d'un parallélépipède entourant une source bruyante, et donc d'estimer la puissance acoustique de la source toute entière. Plusieurs avantages sont réunis dans cette méthode, dont la rapidité de mesurage puisque le balayage entier d'une machine de quelques mètres

d'envergure peut s'effectuer en quelques minutes. Mais cette technique ne permet pas d'obtenir directement une information plus précise que la puissance de chaque face du parallélépipède, ce qui est insuffisant pour la caractérisation de la directivité.
Néanmoins, une variante de cette technique peut être adaptée pour obtenir une estimation de la répartition spatiale de l'énergie sonore émise par la machine bruyante : c'est la méthode des pseudo-points. Elle consiste à utiliser la méthode de balayage en enregistrant les signaux temporels provenant de la sonde intensimétrique durant tout le balayage. On effectue alors un découpage du signal en temps et on calcule l'intensité en des positions moyennes de la sonde intensimétrique qu'on appelle pseudo-points (figure 3).
Pour valider la méthode des pseudo-points, on a mesuré en chambre semi-anéchoïque l'intensité acoustique sur une surface parallélépipédique enveloppant la source de test directive composée de 4 haut-parleurs avec une méthode d'intensimétrie par points fixes (Figure 3). On a ensuite comparé les résultats avec la méthode par balayage et construction des pseudo-points.

Cette méthode de caractérisation simplifiée a ensuite été utilisée dans un environnement plus complexe. Dans le hall des machines à bois de l'INRS, on a estimé, par balayage intensimétrique et calcul des pseudo-points, la directivité de deux machines à bois : une dégauchisseuse et une raboteuse. Elles ont été utilisées à vide afin d'émettre un bruit stable durant le temps de la caractérisation simplifiée (environ 20 minutes).

2.4. Influence de la directivité des sources sur le champ rayonné en local industriel : critère de comparaison

Les directivités des sources étant caractérisées, on a évalué leur influence, expérimentalement et par simulation, sur le champ acoustique rayonné dans un local industriel :

- soit en comparant le champ acoustique créé par une source directive et celui créé par une source omnidirectionnelle de même puissance,
- soit en comparant le champ acoustique créé par une source directive pour deux orientations différentes dans le local.

Le champ acoustique, dans l'ensemble du bâtiment industriel, peut être séparé en deux zones distinctes :

1) le champ proche de la machine ou champ direct qui influence principalement l'exposition du salarié se trouvant au poste de travail, sans que les caractéristiques du local aient une importance prépondérante,
2) le champ éloigné de la machine ou champ réverbéré qui influence l'exposition de tous les autres salariés se trouvant ailleurs dans le local, dont les caractéristiques acoustiques sont alors primordiales.

Si on s'intéresse au champ proche, les caractéristiques en directivité mesurées sur la machine suffisent à évaluer l'exposition d'un salarié selon sa position au poste de travail.
Si on s'intéresse au champ réverbéré, les comparaisons doivent exclure le champ à proximité des sources et sont alors effectuées pour des points éloignés de plus de 4 mètres des sources. Ces comparaisons sont donc effectuées en soustrayant les cartographies en dB(A) obtenues avec l'une et l'autre source, sans prendre en compte le champ proche évalué à moins de 4 mètres, et en traçant l'histogramme des différences (figure 4). Les niveaux de puissance des sources sont utilisés dans le calcul afin que la reconstruction en dB(A) soit effectuée comme si les sources émettaient un bruit rose.

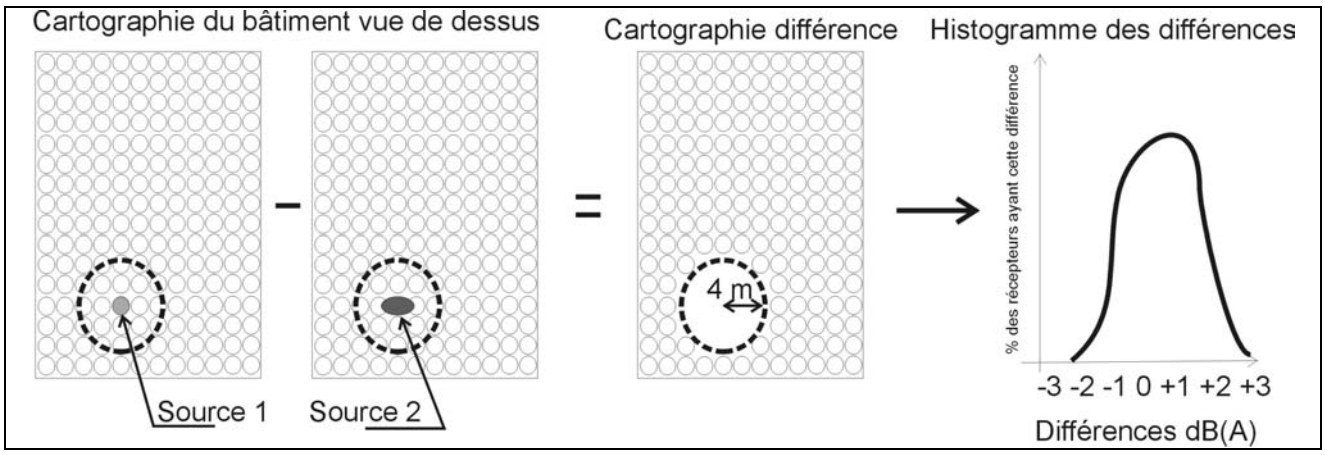


Figure 4 : Outil de mesure des différences de champ

2.5. Simulations des champs acoustiques

Le logiciel d'acoustique prévisionnelle RayPlus permet de calculer des cartographies du niveau sonore dans un bâtiment industriel modélisé par un ensemble de plans dont on définit les coefficients de réflexion (Sabine). Le calcul est basé sur un tir de rayons issus des sources sonores modélisées. Les rayons perdent de l'énergie à chaque réflexion avant d'atteindre des cellules de réception dont les niveaux sonores cumulés définissent la cartographie. Le logiciel a été modifié afin de prendre en compte, en tant que paramètre d'entrée, la directivité de la source de bruit. Cette modification du logiciel attribue une pondération énergétique aux rayons tirés dans le local selon leur orientation dans l'espace. Elle a été validée avec les restrictions suivantes :

- la directivité est définie en site (0 à 180°) et en azimut (0° à 360°),
- la caractérisation de cette directivité doit donc être complètement effectuée (sur tous les angles), on ne peut se contenter d'une caractérisation partielle,
- la source est ponctuelle,
- il y a une seule source.

Ces conditions impliquent que seule la directivité de la source de test en configuration C peut être introduite dans le logiciel RayPlus. Pour une source en hauteur (source de test en configuration A ou B, machine bruyante), la source image due à la réflexion sur le sol provoque un champ additionnel. La figure Figure 5(a) montre que le champ total (P+P') est connu sur l'enveloppe de mesure hémisphérique de la directivité, dans le cas de la caractérisation complète, mais on ne sait pas le propager en dehors de cette enveloppe : on ne peut pas en déduire P_1+P'_1. Dans la configuration C, la source et sa source image sont pratiquement confondues, on pourra donc faire l'hypothèse qu'on a affaire à une source unique : on sait propager la pression P pour en déduire la pression P_1 (figure Figure 5b).

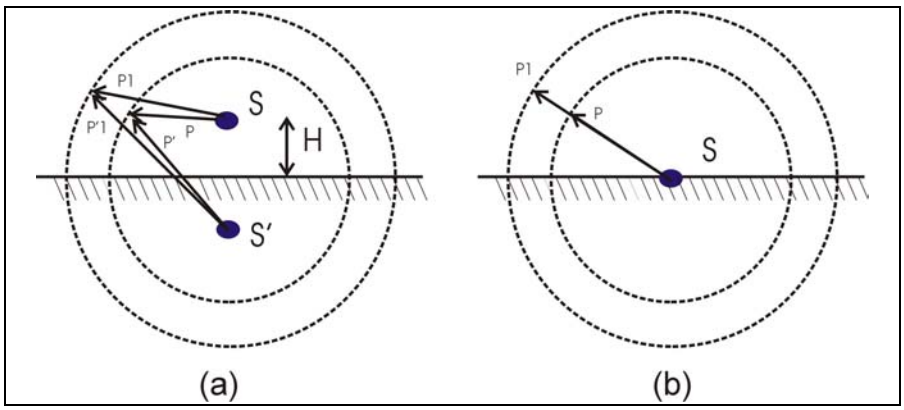


Figure 5 : Caractérisation d'une source sur une hémisphère :
(a) source en hauteur avec source image,
(b) (b) source posée sur le sol

Dans les simulations, on a utilisé le même code de calcul, que la source soit directive ou omnidirectionnelle. La source est placée dans un coin des bâtiments à 4 m des murs définissant le coin. La source directive est orientée tour à tour suivant 4 directions parallèles aux 4 murs de chacun des bâtiments simulés.
Les simulations ont utilisé un ensemble de 10 bâtiments parallélépipédiques de dimensions variées et représentatifs des halls industriels couramment rencontrés (cf. tableau 1). Ces bâtiments comportent ou non, suivant le cas, des toits pentus (sheds) ou plats, et des détails architecturaux (portes, fenêtres, cloisons hétérogènes).

bâtiment	L m	l m	h m	S m^2	V m^3	toit	détails architecturaux
1	29,6	7,7	3,7	228	843	plat	non
2	22	11,85	3,9	261	1017	plat	nombreux
3	32	21,6	11,1	691	7672	3 sheds pentus	non
4	30	25	4,25	750	3188	2 sheds peu pentus	nombreux
5	45	17	8,8	765	6732	1 shed moyennement pentu	nombreux
6	42	24	6,9	1008	6955	1 shed peu pentu	peu nombreux
7	42,5	24,5	6,6	1041	6872	1 shed peu pentu	nombreux
8	60	20,4	7,8	1224	9547	1 shed moyennement pentu	nombreux
9	60	34	7,86	2040	16034	2 sheds peu pentus	nombreux
10	75	40	8,3	3000	24900	2 sheds peu pentus	peu nombreux

Tableau 1 : Caractéristiques des bâtiments simulés

Chaque bâtiment possède au départ un traitement acoustique de référence. Pour chacun de ces bâtiments, on a simulé deux cas plus réverbérants et deux cas plus assourdis afin d'avoir au total 5 cas de traitement acoustique par bâtiment. On utilise donc finalement 50 bâtiments dont le traitement acoustique varie de manière à obtenir des bâtiments très réverbérants (décroissance spatiale inférieure à 1 dB(A) par doublement de distance ou coefficient alpha Sabine moyen de 0,06) jusqu'à des bâtiments très assourdis (décroissance spatiale supérieure à 5 dB(A) ou coefficient alpha Sabine moyen de 0,9). La Figure 6 montre l'ensemble des pentes des décroissances spatiales pour les 50 bâtiments simulés vides.

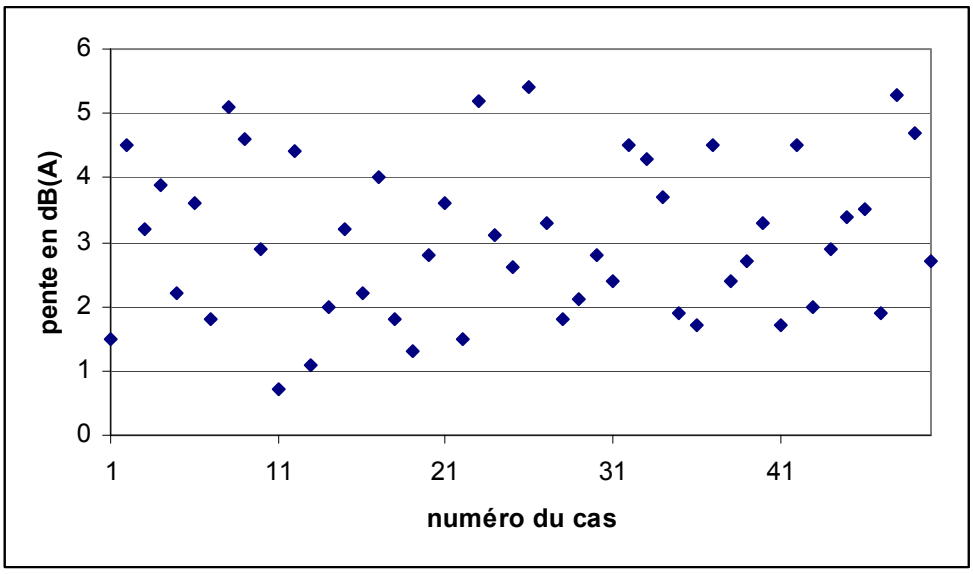


Figure 6 : Pentes des décroissances spatiales des 50 cas simulés

Les bâtiments sont d'abord simulés vides, puis en introduisant un encombrement uniforme jusqu'à une hauteur de 1,5 m au dessus du sol. Cet encombrement limite à 2,5 m le libre parcours moyen des rayons tirés par le noyau de calcul avant qu'ils ne repartent dans une direction quelconque.

Pour évaluer l'influence de la directivité de la source dans les bâtiments, on se sert finalement d'une base de données mettant en oeuvre 5 configurations de sources (source omnidirectionnelle et source directive orientée dans 4 directions différentes), 10 bâtiments différents, vides ou encombrés, chacun avec 5 traitements acoustiques, soit 500 cas simulés.

2.6. Mesures des champs acoustiques

Les mesures ont été effectuées dans deux halls différents.
Le bâtiment d'essai de l'INRS :

- c'est un parallélépipède rectangle de 7,70 m par 30 m et de 3,70 m de hauteur,
- il est vide,
- il est assez réverbérant (décroissance spatiale inférieure à 2,5 dB(A) par doublement de distance ou coefficient alpha Sabine moyen de 0,26).

On y a testé une source omnidirectionnelle, la source de test directive, et la scie à lame circulaire.
Le hall d'essai des machines à bois de l'INRS est typique d'un atelier industriel :

- c'est un parallélépipède rectangle de 11 m par 26 m et de 8,30 m hauteur,
- il est encombré,
- il est assez réverbérant (temps de réverbération T_r = 2,8 s à 1 kHz).

On a testé dans ce dernier bâtiment une source omnidirectionnelle, la source de test directive, une dégauchisseuse et une raboteuse.
La source omnidirectionnelle est la source sonore de référence MARTA qui sert habituellement à mesurer les décroissances spatiales à l'intérieur des bâtiments industriels.

2.7. Résumé des essais comparatifs

Le tableau 2 résume l'ensemble des comparaisons effectuées.

	Champs comparés		
Type d'essai	1ère source	2ème source	Bâtiment(s)
Simulations	Omnidirectionnelle	Source test	Ensemble de 10 bâtiments (vides et encombrés) chacun avec 5 traitements acoustiques différents
	Source test	Source test [orientée différemment]	
Mesures	Omnidirectionnelle	Source test	Bâtiment d'essais
	Omnidirectionnelle	Scie à bois	
	Source test	Source test [orientée différemment]	
	Scie à bois	Scie à bois [orientée différemment]	
	Omnidirectionnelle	Source test	Hall d'essais des machines à bois
	Omnidirectionnelle	Dégauchisseuse	
	Raboteuse	Raboteuse [orientée différemment]	

Tableau 2 : résumé des essais comparatifs

3. Résultats de la caractérisation de la directivité des sources

3.1. Caractérisation de la source de test

3.1.1. Caractérisation complète

Les diagrammes de directivité de la source de test mesurés en chambre semi-anéchoïque sont montrés dans l'annexe 1 pour les configurations A, B et C. Ces diagrammes sont figurés en représentant l'hémisphère englobant la source vue de dessus (cf. figure 7). En annexe, ils sont figurés par octave ou en dB(A) rosi en niveau relatif.

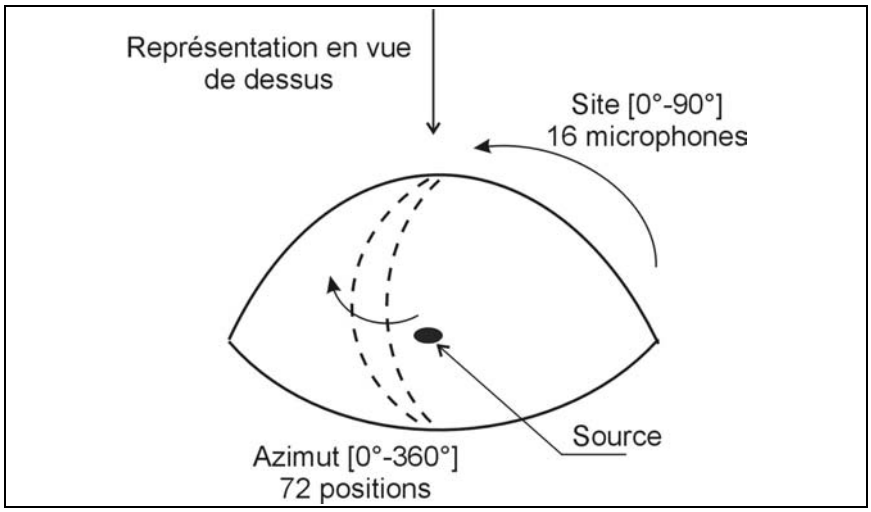


Figure 7 : Représentation des diagrammes de directivité pour la caractérisation complète

En configuration A, la source de test présente une directivité marquée en azimut. Par exemple, son lobe principal à 2 kHz est de l'ordre de 25° de largeur à –3 dB. Le caisson masque fortement l'émission sonore à l'arrière, où les niveaux peuvent être, par exemple à 2 kHz, de 14 à 25 dB en dessous des niveaux à l'avant.

En configuration B, la source de test émet vers le haut. Son diagramme de directivité est 4 fois plus large en site qu'en azimut, comme on l'attend par construction de la source.
En configuration C, le diagramme ressemble beaucoup à celui de la configuration A, mais la source réelle et son image sont pratiquement confondues. Les maxima sont alors situés en site près du sol.

3.1.2. Caractérisation simplifiée

a) validation

La figure 8 montre les cinq faces du parallélépipède englobant la source test pour la mesure de l'intensité acoustique (balayage et pseudo-points).

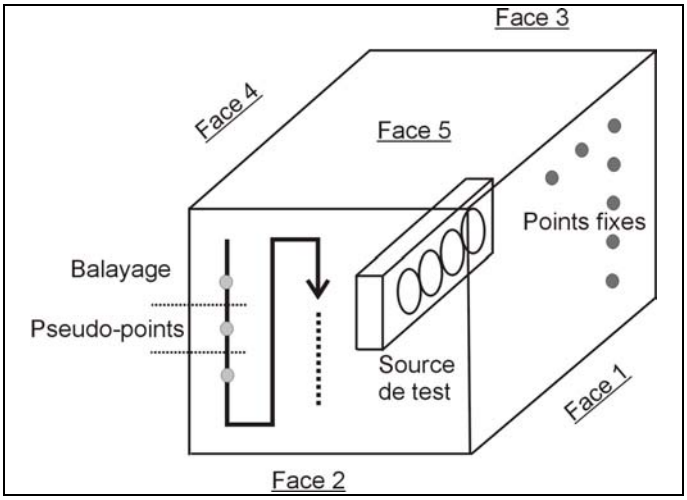


Figure 8 : définition des 5 faces englobant la source dans le cas de la mesure intensimétrique

La figure 9 permet de comparer deux cartographies de l'intensité acoustique (pour l'octave centrée à 4 kHz) mesurée sur la face 1 avec chacune des méthodes (81 points fixes et balayage et calcul des pseudo-points). On y remarque une bonne adéquation entre les deux caractérisations. Cette adéquation peut être chiffrée par un indicateur global, pour chacune des faces et octave par octave.

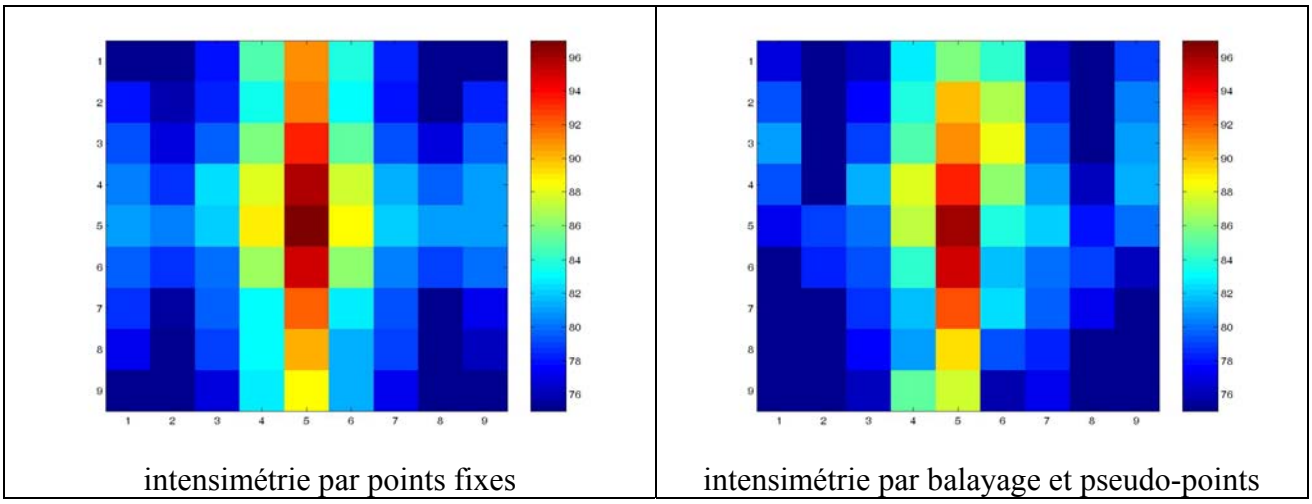


Figure 9 : Exemple de résultat comparé (face n°1, octave centrée à 4 kHz)

On calcule l'erreur quadratique moyenne (pour tous les points du maillage) entre la valeur de l'intensité obtenue par la mesure avec la méthode des points fixes et la valeur de l'intensité obtenue par la mesure avec la méthode du balayage et des pseudo-points. Les résultats sont montrés sur la figure 10. Quelle que soit la bande de fréquence considérée, l'erreur quadratique moyenne varie de

1,5 dB à moins de 3 dB pour les 4 faces verticales (faces 1 à 4), elle atteint 2,5 à 4 dB pour la face 5 horizontale qui est la face supérieure horizontale du parallélépipède englobant la source. Pour cette face placée à une hauteur de 2 mètres, on comprend que l'erreur augmente vu les difficultés de l'opérateur pour faire les balayages. Sur les autres faces, on admettra que la valeur maximale de l'erreur permet de valider la méthode de balayage et de calcul des pseudo-points.

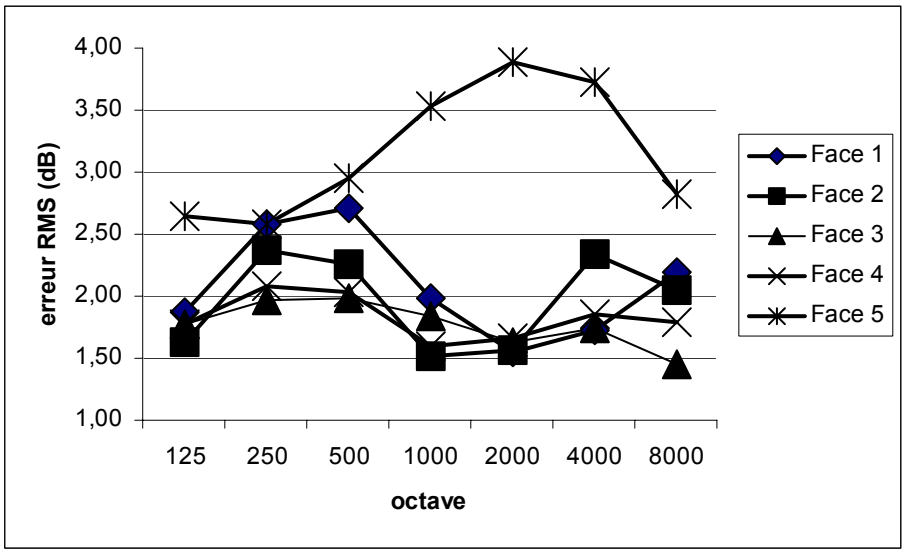


Figure 10 : Erreur quadratique moyenne entre les valeurs de l'intensité obtenue par points fixes et par pseudo-points

b) résultats

Les résultats de la caractérisation simplifiée de la source de test en configuration A sont montrés en annexe 3. Les commentaires sur la directivité de cette source sont effectués au paragraphe 3.1.1. (caractérisation complète). On peut pourtant remarquer, en annexe 3, l'émergence de plus en plus grande avec la fréquence, des niveaux de la face vibrante.
Les résultats de cette caractérisation simplifiée seront comparés à ceux des machines à bois.

3.2. Caractérisation complète de la scie à bois à lame circulaire

La photographie 1 en annexe 2 montre la scie et le bras en quart de cercle portant les microphones. La scie comporte un moteur supplémentaire sur le plateau, permettant la mise en fonction de l'entraînement des planches à scier, mais ce moteur était hors fonction pendant les essais, de plus, la scie fonctionnait à vide. Dans ces conditions, le bruit provient principalement du moteur d'entraînement de la lame, mais aussi de la lame elle même.

Les résultats complets sont montrés en annexe 2, où l'on peut voir une directivité :

- très peu marquée dans l'octave centrée sur 125 Hz puisqu'on a 4 dB de dynamique seulement (différence entre les niveaux les plus forts et les plus faibles), et un diagramme relativement régulier, avec un petit effet de masquage du moteur de chargement,
- un peu plus marquée dans les octaves centrées sur 250 ou 500 Hz (10 dB de dynamique), avec une accentuation de l'effet de masquage du moteur de chargement,
- très peu marquée à 1 kHz,
- moyennement marquée (6 à 8 dB de dynamique) dans les octaves de 2 à 4 kHz, avec un diagramme assez complexe, montrant un peu des directions énergétiques à environ plus ou moins 45° d'une perpendiculaire à la lame,
- assez marquée dans l'octave 8 kHz (11 dB de dynamique), avec un diagramme montrant 4 directions énergétiques à plus ou moins 45° d'une perpendiculaire à la lame, dont une est de très faible niveau.

Finalement, en dB(A) rosi, on peut voir, s'étalant sur une dynamique d'environ 4 dB, un diagramme assez uniforme mais laissant deviner des directions énergétiques privilégiées à environ plus ou moins 45° d'une perpendiculaire à la lame.
En comparant les diagrammes montrés en annexe 1 avec ceux montrés en annexe 2, on en déduit que la scie est beaucoup moins directive que la source de test. De plus, les diagrammes montrant à peu près les quatre directions énergétiques décrites précédemment font que l'effet de la directivité risque d'être assez faible dans un bâtiment industriel.

Par contre, en champ proche, et donc pour un opérateur se trouvant au poste de travail de cette machine, son exposition sonore peut varier de 4 à 5 dB(A) selon sa position par rapport à la scie.

3.3. Caractérisation simplifiée de la raboteuse

La raboteuse comporte une aspiration (hors fonction pendant les essais) et deux ouïes permettant le passage des planches à raboter (cf. photographie 2 en annexe 4).
Les résultats des mesures intensimétriques sont montrés dans l'annexe 4. On y remarque que la majeure partie de l'énergie sonore émise se trouve plutôt dans les octaves 250 Hz à 1 kHz.
D'autre part, on remarque que les deux ouïes d'approvisionnement de la machine sont les principales sources de bruit, le rayonnement a donc lieu de manière privilégiée sur deux côtés. Pour un opérateur au poste de travail, l'exposition sonore varie de 3 à 5 dB(A) selon qu'il se trouve devant une face comportant les ouïes ou devant une face sans ouverture.
Si l'on compare les contrastes des représentations de l'intensité pour la source de test (cf. annexe 3) et pour la raboteuse (cf. annexe 4), on constate sur toutes les octaves un bien plus faible contraste des intensités issues de la raboteuse : la raboteuse est beaucoup moins directive que la source de test. Cette observation qualitative est complétée par des calculs d'indices de directivité équivalents dans le paragraphe 3.5.2.

3.4. Caractérisation simplifiée de la dégauchisseuse

Les résultats des mesures intensimétriques sont montrés dans l'annexe 5. On y remarque que la majeure partie de l'énergie sonore émise se trouve dans les octaves 250 Hz et 1 kHz, et dans une moindre partie dans l'octave 500 Hz (le moteur de la dégauchisseuse tourne à un peu moins que 5000 tours/minute, provoquant un spectre de raies dont le fondamental est à 80 Hz, et des raies énergétiques à 100, 250, 325, 650, 970, et 1300 Hz).
L'outil est la principale source de bruit, le rayonnement a lieu de manière privilégiée sur le haut de la machine (cf. photographie 3 en annexe 5). Pour un opérateur au poste de travail, l'exposition sonore varie de 6 à 8 dB(A) selon qu'il se trouve juste au dessus de l'outil ou aux extrémités du plateau.
Si l'on compare les contrastes des représentations de l'intensité pour la source de test (cf. annexe 3) et pour la dégauchisseuse (cf. annexe 5), on constate dans les octaves 500 Hz ou 1 kHz un contraste à peu près équivalent pour les deux sources. La raboteuse est au moins aussi directive que la source de test pour ces fréquences. Cette observation qualitative est complétée aussi par des calculs d'indices de directivité équivalents dans le paragraphe 3.5.2.

3.5. Résumé : directivité des sources testées

3.5.1. Au sens de la norme ISO 14257

La directivité de la source de test (4 haut-parleurs) et de la scie peuvent être estimées au sens de la norme ISO 14257 [6] puisqu'on en a fait un mesurage complet par points sur une hémisphère.
Au sens de la norme ISO 14257, les indices de directivité s'expriment, tiers d'octave par tiers d'octave, en calculant la puissance sonore mesurée sur un cercle entourant la source et les écarts

minimum et maximum à cette puissance globale quand elle est mesurée sur des secteurs angulaires plus petits (30° par méthode glissante, ou ceux des points de mesure par méthode de points fixes).
Cette norme tolère, pour une source sonore de référence supposée être omnidirectionnelle, que les indices de directivité restent à l'intérieur d'un gabarit borné par ±2 dB jusqu'à 630 Hz, croissant linéairement de ±2 dB à ±8 dB de 630 à 1000 Hz, ±8 dB au dessus de 1000 Hz.
On pourra comparer les indices des sources testées avec ce gabarit, afin d'en déduire si les sources sont plutôt directives ou omnidirectionnelles.

Pour la source de test, dans les configurations A, B, et C, les indices de directivité au sens de la norme sont tracés en annexe 5 :

- en azimut la source est assez directive dans les configurations A et C (indices de 15 à 25 dB pour une fréquence supérieure à 1 kHz), elle peut être considérée comme omnidirectionnelle dans la configuration B, mais seulement sur sa face avant, en raison du bafflage.
- en site, la source est omnidirectionnelle dans la configuration A, la directivité est marquée dans la configuration B (10 à 30 dB d'indices pour une fréquence supérieure à 1 kHz), la directivité est moyenne dans la configuration C (10 à 15 dB d'indice au dessus de 1 kHz).

Pour la scie, les mêmes tracés sont montrés en annexe 5. On remarque que la scie présente une directivité relativement peu marquée, sauf en basse-fréquence (< 800 Hz) où les indices de directivité sortent du gabarit ±2 dB.

3.5.2. Emergence des niveaux dans le cas de l'intensimétrie

Dans le cas des mesures intensimétriques, nous avons accès à un maillage rectangulaire sur 5 faces entourant les sources, et il n'est pas possible, dans le cas quelconque, de vouloir estimer la directivité sur les angles principaux que sont le gisement et site. Par contre, afin d'avoir une estimation de la directivité de la source, on peut estimer, comme dans le cas de la norme ISO 14257, l'émergence des niveaux par rapport à la valeur moyenne sur des lignes parcourant les faces.
Cette émergence a été calculée pour les trois sources (source de test en configuration A, raboteuse et dégauchisseuse) en parcourant des lignes de pseudo-points montrées sur la Figure 11. Ces lignes sont horizontales pour les parcours sur 4 faces verticales (balayage dit « horizontal »), ou successivement verticales puis horizontale pour les parcours sur 3 faces (balayage dit « vertical »).
Pour un balayage donné, on calcule, tiers d'octave par tiers d'octave, la valeur moyenne de l'intensité acoustique sur une ligne, puis le niveau maximal et le niveau minimal de la différence entre tous les pseudo-points et cette valeur moyenne. La différence est calculée en lissant les niveaux sur 3 pseudo-points successifs afin d'éviter les valeurs singulières. On garde ensuite le plus grand des maxima et le plus petit des minima de toutes les lignes d'un balayage donné. Ces valeurs sont de même nature que les indices de directivité de la norme ISO 14257, même si elles n'y sont pas comparables, vu la différences des balayages (sur des cercles ou sur des parallélépipèdes rectangles).

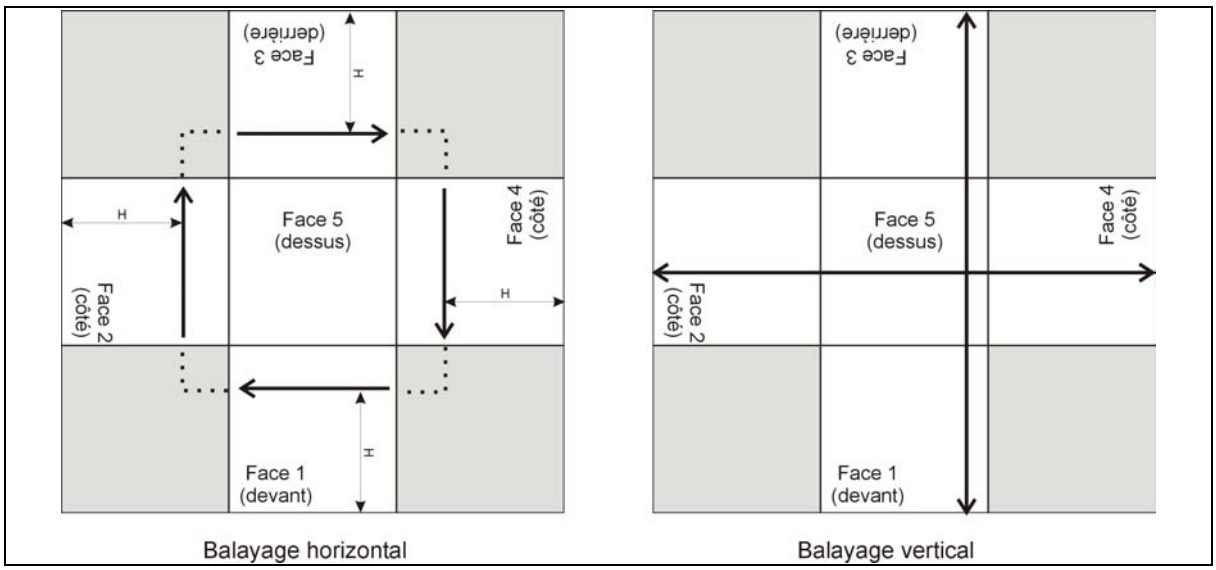


Figure 11 : Balayages des faces par ligne dans le cas de l'intensimétrie

Les résultats sont présentés dans l'annexe 7.
On y remarque que pour le balayage dit « horizontal » la source de test en configuration A présente des maxima toujours supérieurs aux 2 machines à bois sauf dans les tiers d'octave de 1000 à 1600 Hz où la dégauchisseuse montre des émergences supérieures de quelques dB. La raboteuse est toujours beaucoup moins directive que la dégauchisseuse. Dès qu'on atteint des fréquences de l'ordre de 2 kHz, la source de test devient beaucoup plus directive que les machines.
Pour le balayage dit « vertical », on remarque que la dégauchisseuse est plus directive que la source de test jusqu'à 2500 Hz environ. La raboteuse est toujours moins directive que les deux autres sources.

Finalement, à l'observation de ces valeurs,

- la dégauchisseuse est assez directive en basse-fréquence (émission vers le haut), peu en haute-fréquence.
- la raboteuse est peu directive, quelle que soit la fréquence.

4. Résultats concernant l'influence de la directivité des sources sur le champ rayonné

4.1. Simulations

Les différences de champ [niveaux source omnidirectionnelle]-[niveaux source directive de test en configuration C] sont exploitées sous forme d'histogramme comme celui montré à titre d'exemple sur la Figure 12.
Ce résultat est obtenu dans un des bâtiments simulés. Ce bâtiment vide de 24 x 42 m contient environ 950 cellules de réception de l'énergie sonore, dont environ 930 sont éloignées de plus de 4 mètres de la source, et servent à tracer l'histogramme. La position moyenne des différences des champs est de 5 dB(A) et plus de 80 % des cellules donnent une différence comprise entre 4 et 6 dB(A).

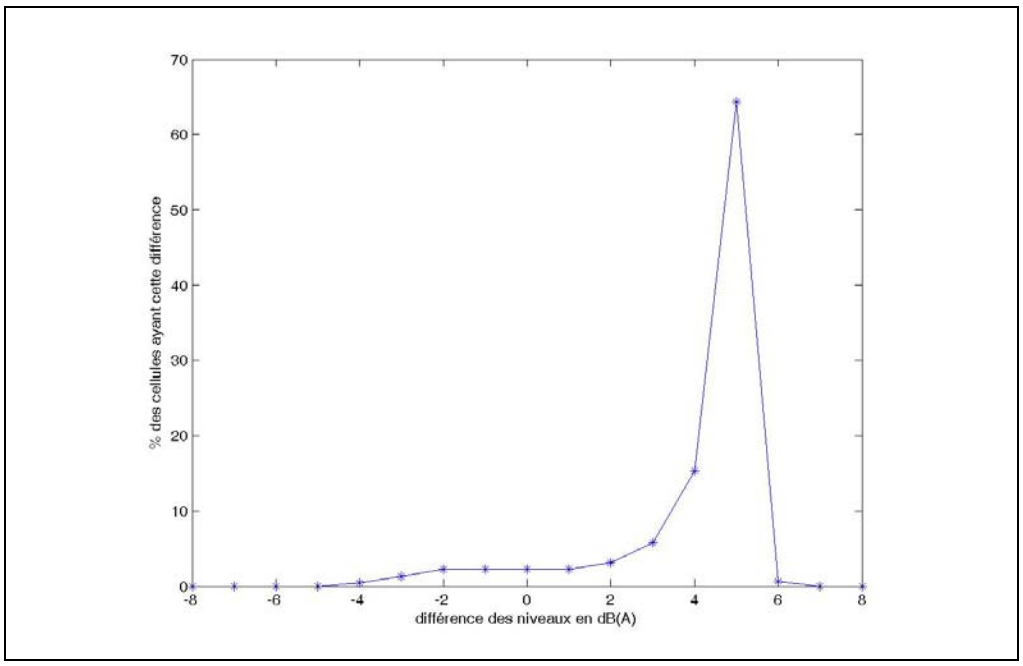


Figure 12 : Exemple d'histogramme des différences des niveaux pour un bâtiment simulé

Les histogrammes présentent très souvent une position moyenne positive : les niveaux sont plus élevés en moyenne dans le bâtiment avec la source omnidirectionnelle.
L'ensemble des histogrammes obtenus est détaillé dans l'annexe 8.
Le tableau 3 résume les résultats des différentes simulations. L'orientation de la source « ouest », « est », « nord » et « sud » signifie que le lobe principal de la source directive est dirigé respectivement vers la gauche, vers la droite, vers le haut et vers le bas du bâtiment vu de dessus.
Pour un bâtiment vide, les niveaux sont plus élevés d'environ 2,6 à 5,3 dB(A). Les histogrammes sont assez resserrés, la dispersion des différences de niveau est faible, 80 % des différences sont à ± 1 dB(A) de la valeur moyenne.
Dès que le bâtiment est encombré, les différences moyennes de niveau se réduisent entre 1,7 et 2,8 dB(A). La dispersion des différences est encore plus faible que dans le cas des bâtiments vides.
La variabilité des résultats d'un bâtiment à l'autre est plus grande que la variabilité avec le traitement acoustique ou l'orientation de la source. Ces deux derniers paramètres n'ont donc pas montré de manière cohérente leur influence sur les résultats.
La précision attendue du logiciel de calcul étant de l'ordre de 1 à 3 dB(A), les simulations montrent qu'il n'y a pas d'influence notable de la directivité d'une source relativement directive telle que la source test en configuration C, dès que le bâtiment est encombré.

		Pour 50 bâtiments simulés	
Bâtiments	Orientation de la source	Moyenne des positions moyennes	Moyenne du pourcentage des cellules se trouvant à ± 1 dB(A) de la position moyenne
Vides	ouest	5,1 dB(A)	81 %
	est	5,3 dB(A)	62 %
	nord	2,6 dB(A)	84 %
	sud	3,9 dB(A)	80 %
Encombrés	ouest	2,8 dB(A)	89 %
	est	2,8 dB(A)	90 %
	nord	1,7 dB(A)	95 %
	sud	2,8 dB(A)	96 %

Tableau 3 : Résultats synthétiques des simulations

4.2. Mesures en bâtiment vide

4.2.1. Source de test en configuration A et B

La source de test (4 haut-parleurs) a été installée dans le bâtiment d'essais de l'INRS afin de comparer le champ acoustique dans le cas où la source est en configuration A (lobe principal orienté vers un mur) avec celui où la source est en configuration B (lobe principal orienté vers le plafond).
La résultats sont montrés sur la Figure 13. On y a tracé l'histogramme des différences de niveaux en dB(A) des points de mesure situés à plus de 4 mètres du centre des sources pour les deux configurations. Ces différences montrent une valeur moyenne de 2 dB(A) et sont dans la fourchette 1 à 3 dB(A) pour plus de 95 % des points de mesure.
Alors que la source de test est relativement directive, les différences de champ restent cantonnées dans une fourchette relativement étroite et de valeur moyenne faible. La mesure effectuée montre que l'orientation de la source directive affecte peu le champ dans l'ensemble du bâtiment.

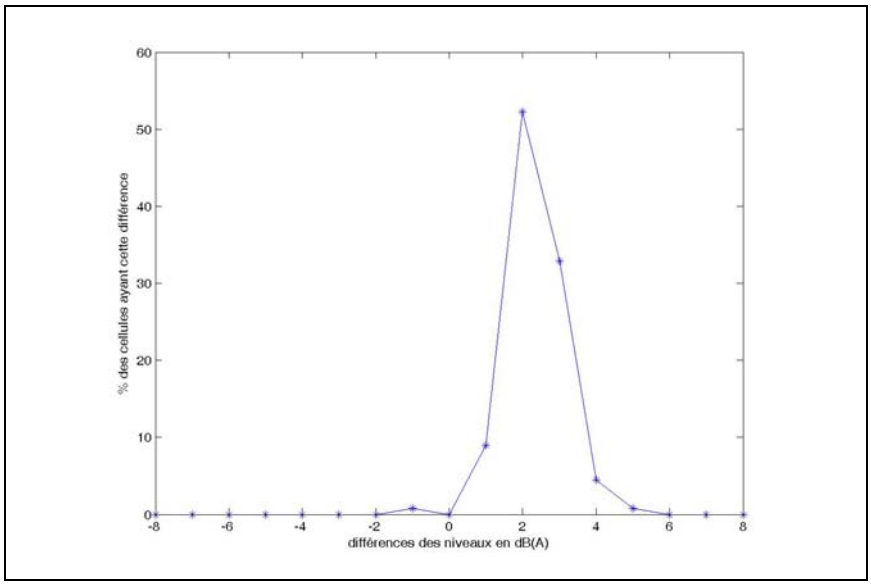


Figure 13 : Différences mesurées des niveaux des cellules pour deux orientations de la source test

4.2.2. Source de test en configuration C

La source de test a été installée en configuration C dans le bâtiment d'essais (lobe principal orienté vers un mur proche). On y a mesuré le champ afin de le comparer à celui obtenu en simulation, et à celui obtenu par la mesure dans le cas d'une source omnidirectionnelle (source sonore de référence MARTA).
Les résultats sont montrés sur la Figure 14. On y a tracé l'histogrammes des différences de niveaux en dB(A) des points de mesure situés à plus de 4 mètres du centre des sources. Le calcul en dB(A) est corrigé du spectre de la source afin d'obtenir les niveaux en dB(A) que donnerait une source émettant un bruit rose.
Ces différences montrent une valeur moyenne de 3 dB(A) et sont dans la fourchette 2 à 4 dB(A) pour plus de 95 % des points de mesure.
La mesure effectuée montre là encore que la directivité de la source de test affecte assez peu le champ dans l'ensemble du bâtiment.

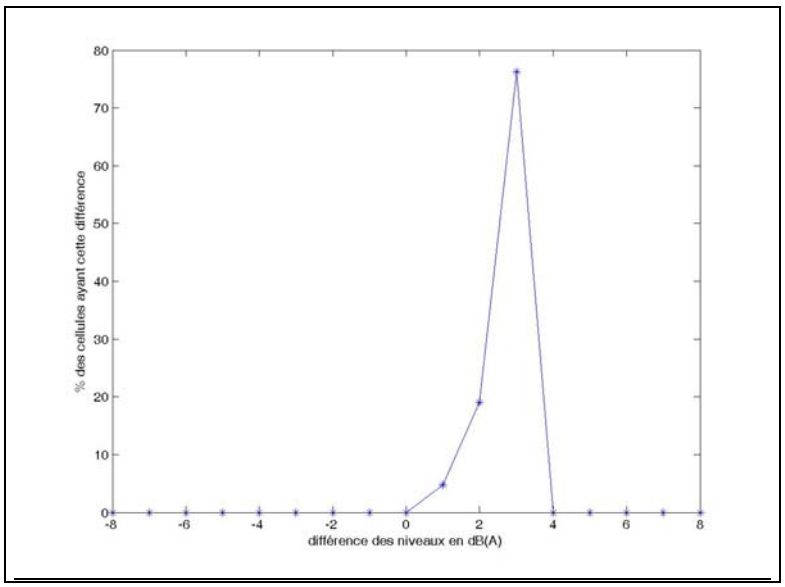


Figure 14 : Différences mesurées des niveaux des cellules entre la source omnidirectionnelle et la source directive

4.2.2. Scie à bois

La scie a été installée dans le bâtiment d'essais afin de mesurer aussi un champ complet et de le comparer avec un champ provoqué par une source omnidirectionnelle. Deux essais différents ont été conduits avec la scie : lame de la scie parallèle et perpendiculaire aux murs les plus longs.
Les résultats sont présentés sur la Figure 15. Le calcul en dB(A) est corrigé du spectre de chacune des sources afin d'obtenir les niveaux en dB(A) que donnerait une source émettant un bruit rose.
Ces différences montrent une valeur moyenne de 3 dB(A) et sont dans la fourchette 2 à 4 dB(A) pour plus de 95 % des points de mesure.
La mesure effectuée montre que la faible directivité de la scie affecte assez peu le champ dans l'ensemble du bâtiment. L'orientation de la scie n'a aucune influence.

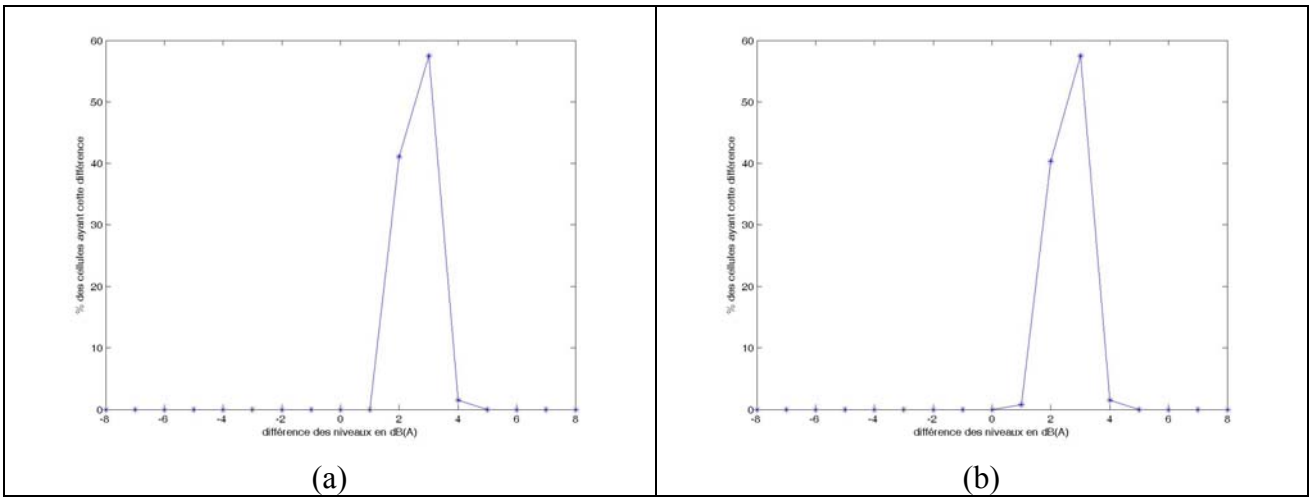


Figure 15 : Différences des niveaux des cellules entre la source omnidirectionnelle et la scie ; (a) lame perpendiculaire à la longueur du bâtiment ; (b) lame parallèle à la longueur du bâtiment

4.3. Mesures en bâtiment encombré

On a mesuré le champ acoustique provoqué par des machines bruyantes ou par des sources artificielles omnidirectionnelle ou non à l'intérieur du hall d'essais des machines à bois. Le champ

acoustique est mesuré sur une grille métrique de 2 lignes de 3 microphones sur 18 colonnes, les 2 rangées parcourant les 2 zones non encombrées de l'atelier (cf. figure 16).

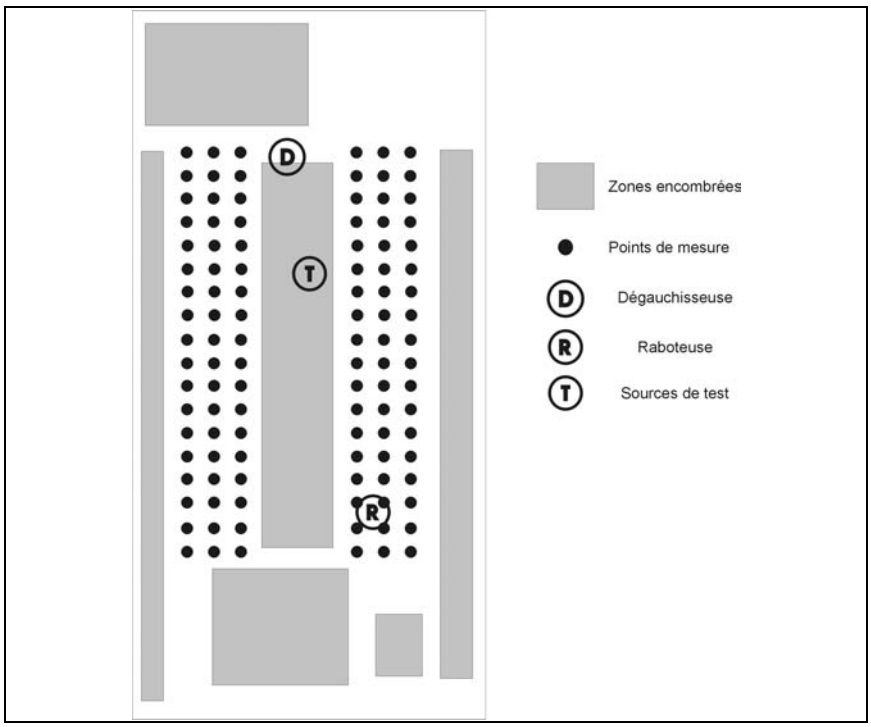


Figure 16 : Schéma du bâtiment, position des points de mesures et des sources

On comparera les champs mesurés afin d'estimer l'influence de la directivité des sources à l'intérieur de ce bâtiment industriel typique relativement réverbérant et assez encombré.

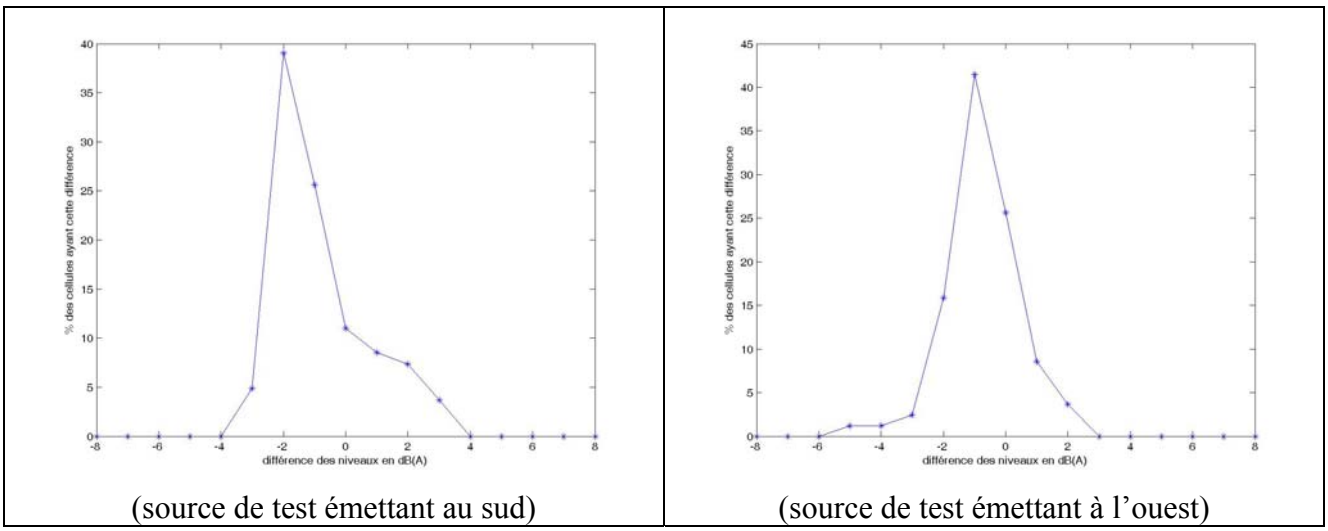
4.3.1. Source omnidirectionnelle et source directive

On a mesuré le champ acoustique provoqué par la source omnidirectionnelle (source sonore de référence MARTA) en fonctionnement dans le hall afin de le comparer avec celui obtenu avec la source de test composée de 4 haut-parleurs (en configuration C, c'est-à-dire au sol). Les sources sont centrées au même point. La source directive émet successivement au sud et à l'ouest dans le bâtiment.

Les résultas sont montrés sur la figure 17. On y a tracé l'histogramme des différences de niveaux en dB(A) des points de mesure situés à plus de 4 mètres du centre des sources pour les deux configurations (source directive émettant au sud, puis à l'ouest). Le calcul en dB(A) est corrigé du spectre de chacune des sources afin d'obtenir les niveaux en dB(A) que donnerait une source émettant un bruit rose. Ces différences montrent une valeur moyenne de –2 dB(A) pour environ 40% des points de mesure (émission au sud) ou de –1 dB(A) pour plus de 40% des points de mesure (émission à l'ouest). Les niveaux sont un petit plus faibles avec la source omnidirectionnelle. Alors que la source de test est relativement directive, les différences de champ restent cantonnées dans une fourchette relativement étroite et de faible valeur moyenne.

Ce résultat s'explique par la diffusion : les objets réverbérants constituant l'encombrement agissent comme des sources secondaires ré-émettant dans toutes les directions.

Au final, l'influence de la directivité de la source sonore sur le champ rayonné est inférieure à 2 dB(A) en moyenne dans le cas de ce bâtiment encombré.



(source de test émettant au sud) (source de test émettant à l'ouest)

Figure 17 : Histogramme des différences des niveaux des points de mesure pour les deux orientations de la source directive

4.3.2. Raboteuse orientée

On a mesuré le champ acoustique provoqué par la raboteuse en fonctionnement dans le hall d'essais des machines à bois. La raboteuse, caractérisée précédemment par une émission privilégiée des deux côtés de ses ouies de chargement, est orientée selon deux configurations : les ouies émettent dans le sens de la longueur du bâtiment puis les ouies émettent dans le sens de la largeur du bâtiment. On comparera le champ obtenu dans chacune de ces configurations.

Les résultas sont montrés sur la figure 18. On y a tracé l'histogramme des différences de niveaux en dB(A) des points de mesure situés à plus de 4 mètres du centre de la raboteuse. Le calcul en dB(A) est corrigé du spectre de la raboteuse afin d'obtenir les niveaux en dB(A) que donnerait une machine émettant un bruit rose. Ces différences montrent une valeur moyenne nulle pour plus de 25% des points de mesure, le reste s'étalant bien symétriquement autour de cette valeur moyenne.

L'orientation de la raboteuse n'a donc aucune influence notable sur le champ rayonné dans le bâtiment.

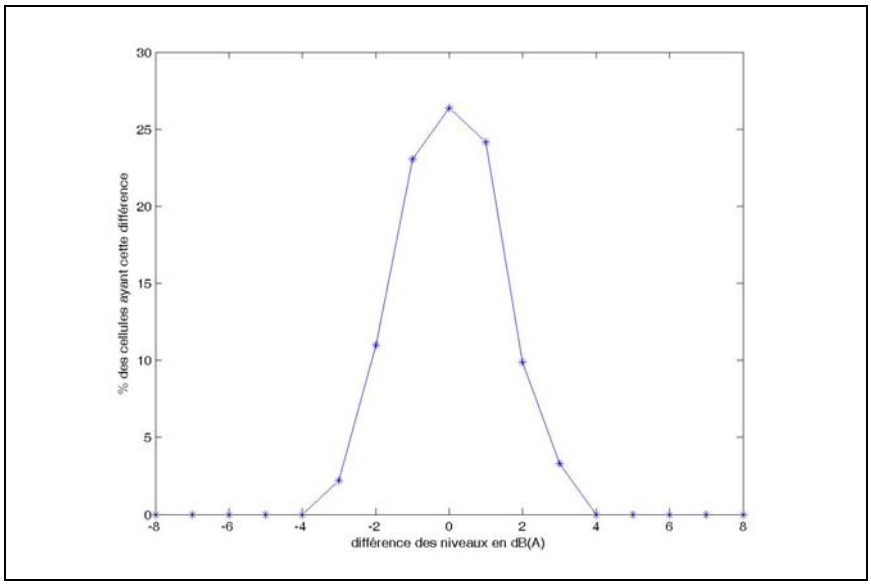


Figure 18 : Histogramme des différences des niveaux des points de mesure distants de plus de 4 m de la raboteuse, pour les deux orientations de la raboteuse

4.3.3. Dégauchisseuse et source omnidirectionnelle

De la même façon qu'au paragraphe précédent, on a mesuré le champ acoustique provoqué par la dégauchisseuse, puis par une source omnidirectionnelle (source sonore de référence MARTA) placée sur le plateau de la dégauchisseuse.
On rappelle que la dégauchisseuse a été préalablement caractérisée, et qu'elle montre un rayonnement privilégié vers le plafond du bâtiment.

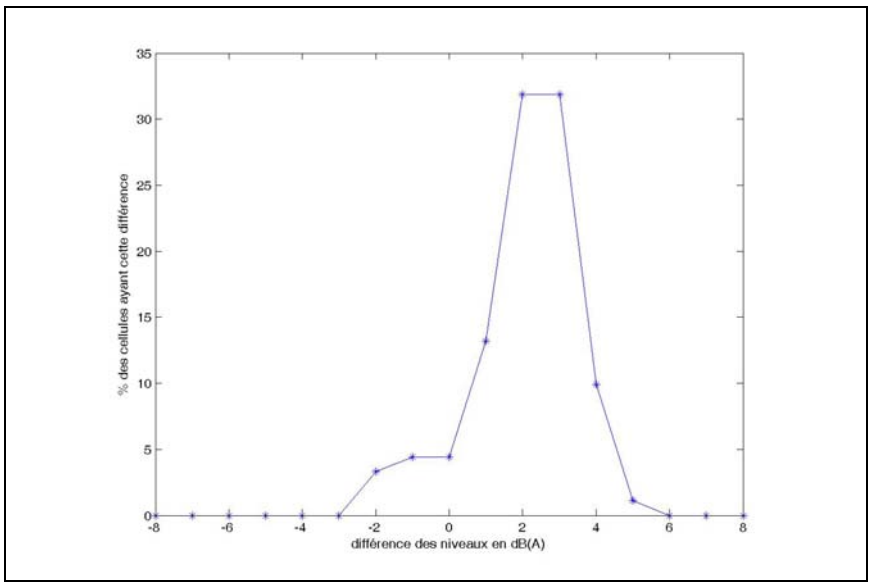


Figure 19 : Histogramme des différences des niveaux des points de mesure provoqués par la dégauchisseuse et par la source omnidirectionnelle

Les résultats sont montrés sur la figure 19. On y tracé l'histogramme des différences de niveaux en dB(A) des points de mesure situés à plus de 4 mètres du centre de la dégauchisseuse. Les différences résultent de la soustraction [niveaux de la source omnidirectionnelle] – [niveaux de la dégauchisseuse]. Le calcul en dB(A) est corrigé du spectre de la dégauchisseuse ou la source de référence afin d'obtenir les niveaux en dB(A) que donneraient ces sources émettant un bruit rose.
Ces différences montrent une valeur moyenne de 2 à 3 dB(A) pour 66% des cellules, le reste s'étalant de –2 à +6 dB(A). Les niveaux sont donc un peu plus élevés dans le cas de la source omnidirectionnelle (qui émet plus à l'horizontale que la dégauchisseuse), mais ces différences restent faibles.
La directivité de la dégauchisseuse réduit de 2 à 3 dB(A) le champ rayonné dans le bâtiment par rapport à celui d'une source omnidirectionnelle.

5. Conclusions

Une méthode de caractérisation simplifiée des sources et machines bruyantes a été choisie et validée sur une source artificielle connue (source de test composée de 4 haut-parleurs). Cette méthode utilise une mesure de l'intensité acoustique par un balayage d'une surface enveloppant la machine à caractériser. On reconstruit ensuite des pseudo-points sur la surface.
Cette méthode a ensuite été appliquée sur des machines bruyantes (raboteuse, dégauchisseuse) placées en local industriel afin d'estimer leur directivité. D'autre part, une scie a été caractérisée finement en chambre semi-anéchoïque. Les différents résultats montrent que :

- la scie est pratiquement omnidirectionnelle au sens de la norme ISO 14257 même si on voit apparaître quatre directions privilégiées à 45° du plan de la lame,
- la raboteuse émet de manière prépondérante par ses ouïes, mais est peu directive,

- la dégauchisseuse émet vers le haut, et présente une directivité marquée en basse fréquence.

Ces machines à bois testées à vide ne montrent donc pas toutes une directivité marquée même si l'émission sonore a lieu dans des directions privilégiées.

Ces constatations peuvent avoir une importance sur l'exposition sonore des travailleurs se trouvant à proximité des machines, puisque les niveaux sonores peuvent y varier de 4 à 6 dB(A) selon la position de l'opérateur.

La directivité mesurée des sources a pu être introduite dans le logiciel de calcul prévisionnel RayPlus en se limitant à une source caractérisée au sol. Cette modification du logiciel a permis d'effectuer un certain nombre de simulations.

Quand on s'éloigne des sources, les simulations montrent que le champ moyen d'une source aussi directive que la source de test peut être différent d'environ 5 dB(A) de celui d'une source omnidirectionnelle si le bâtiment est vide. Par contre, dès que le bâtiment est encombré, ces écarts se réduisent à environ 2 dB(A). Ils sont à l'intérieur de la fourchette d'incertitude du logiciel de calcul.

On retrouve, par les mesures, des écarts moyens de l'ordre de 1 à 3 dB(A), du même ordre de grandeur que la précision espérée de la mesure.

Avec les machines à bois testées dans l'étude, et en considérant qu'un hall industriel est plutôt un bâtiment encombré, il apparaît que la directivité des sources est un facteur du deuxième ordre pour ce qui est de l'exposition des travailleurs se trouvant loin des machines.

L'exposition au poste de travail reste par contre soumise plus fortement à la directivité des sources de bruit. A proximité des machines, l'étendue et la directivité des sources ont une influence qui n'est pas restituée par le code de calcul.

Dans le reste du bâtiment, il n'apparaît pas indispensable d'introduire la directivité des machines bruyantes dans le logiciel d'acoustique prévisionnelle si l'on s'intéresse principalement à l'efficacité des solutions de traitement acoustique du local.

6. Bibliographie

[1] GADE S., Sound Intensity. Theory, instrumentation and applications. Technical Review, 1982, **3**, pp 3-39.

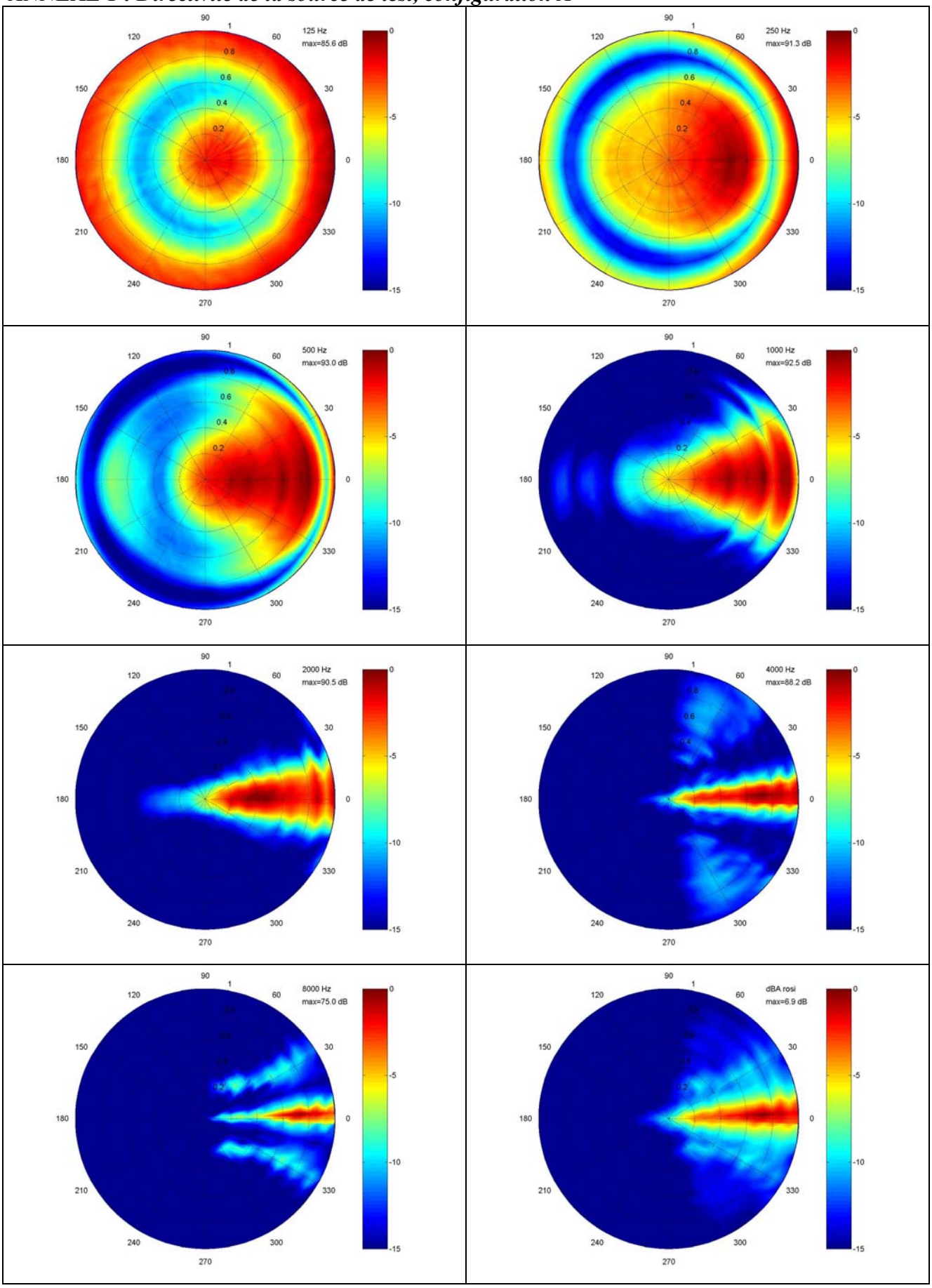
[2] LAVILLE F., SIDKI M., NICOLAS J. Spherical acoustical holography using sound intensimetry measurements : theory and simulation. Acustica, 1992, **76**, pp 193-198.

[3] PLANEAU V. et SALSI S., Manuel d'utilisation RayPlus. Document de travail IET - NP/01DT-010/VP. Février 2001.

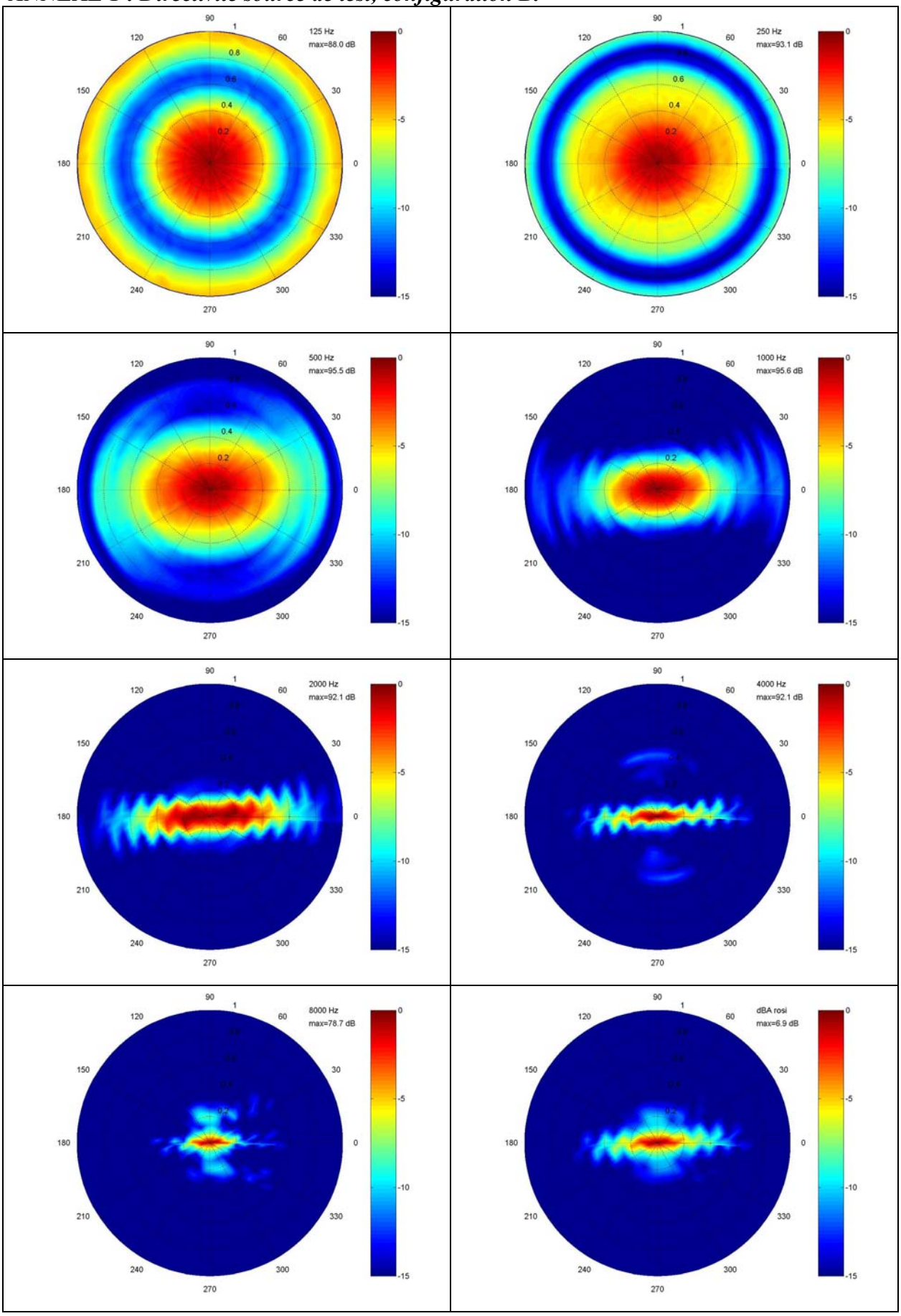
[4] Série des normes ISO-3740 traitant de la détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique.

[5] Norme ISO 14257:2001 (Octobre 2001) Acoustique - Mesurage et description paramétrique des courbes de décroissance sonore spatiale dans les locaux de travail en vue de l'évaluation de leur performance acoustique.

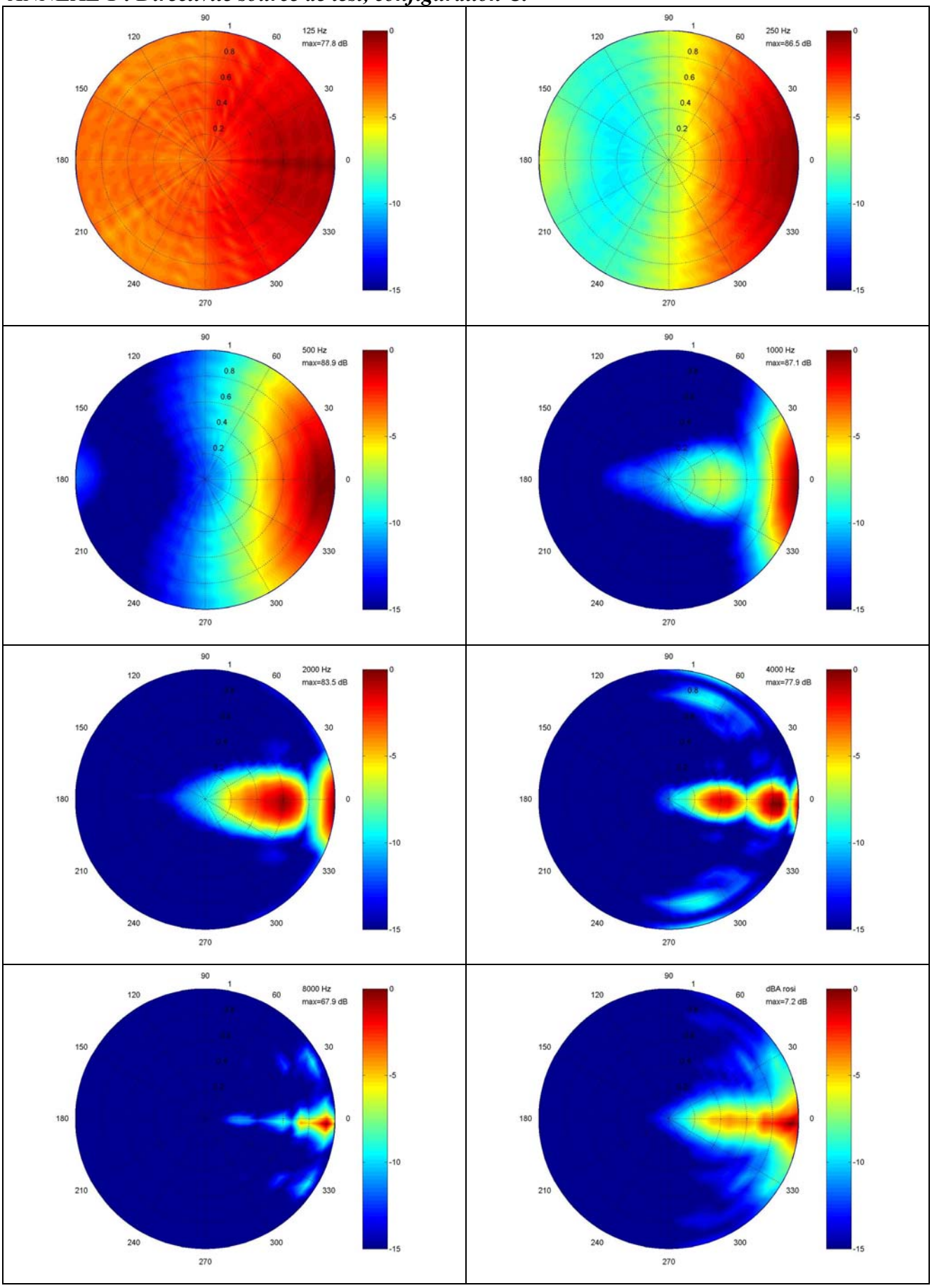
ANNEXE 1 : Directivité de la source de test, configuration A



ANNEXE 1 : Directivité source de test, configuration B.



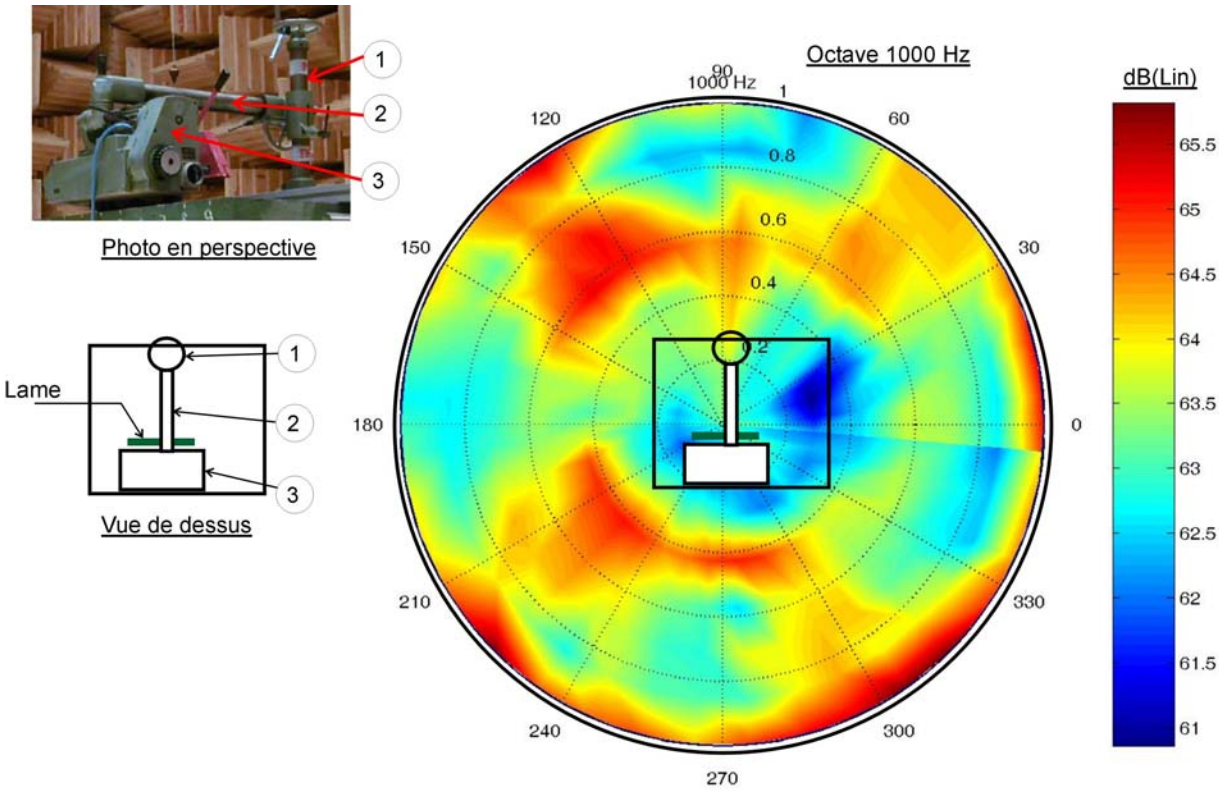
ANNEXE 1 : Directivité source de test, configuration C.

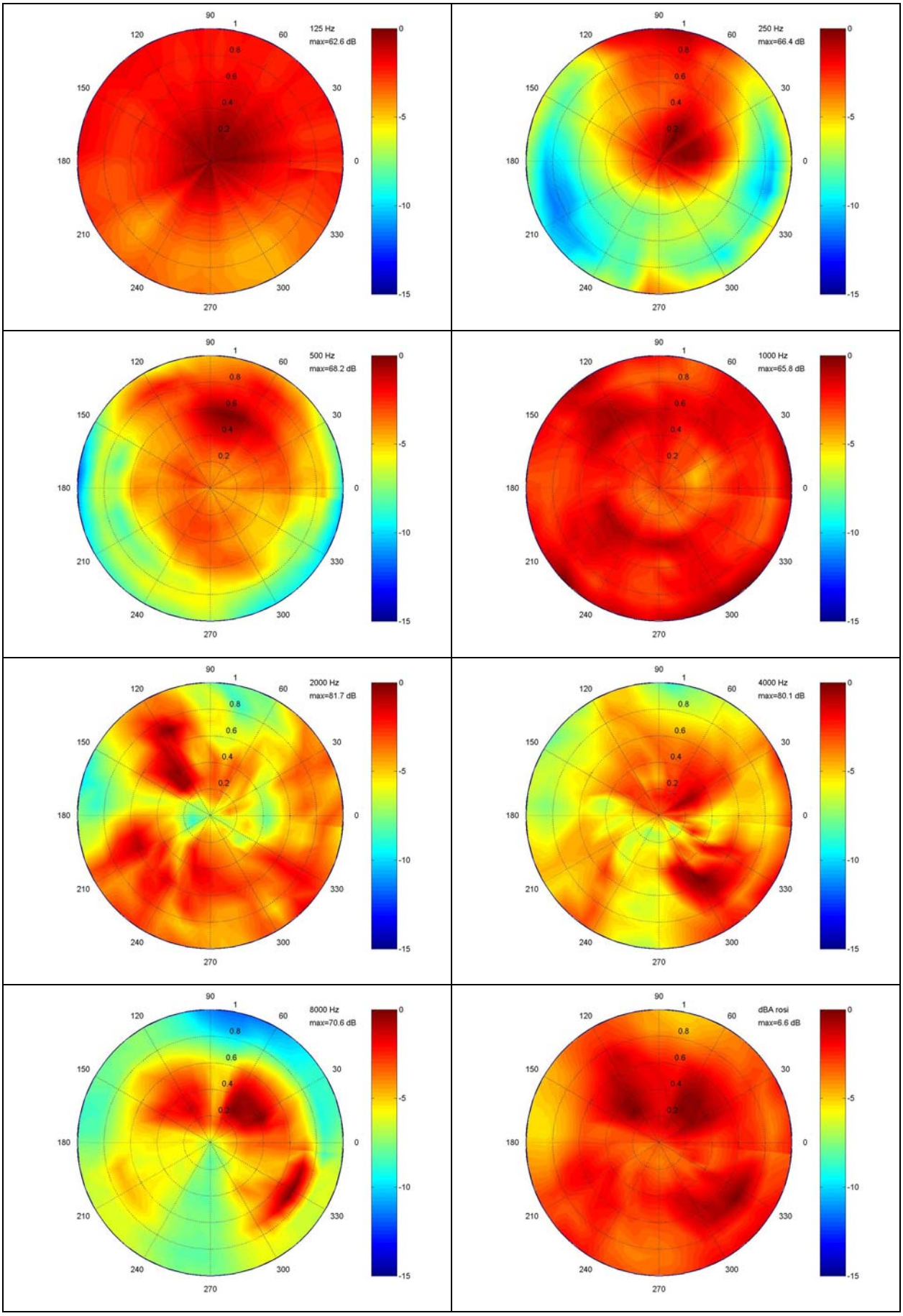


ANNEXE 2 : Directivité de la scie à bois

Photographie 1 :
Scie à bois en chambre semi-anéchoïque

La scie est positionnée, à l'intérieur de l'hémisphère, comme indiqué sur la figure ci-dessous.

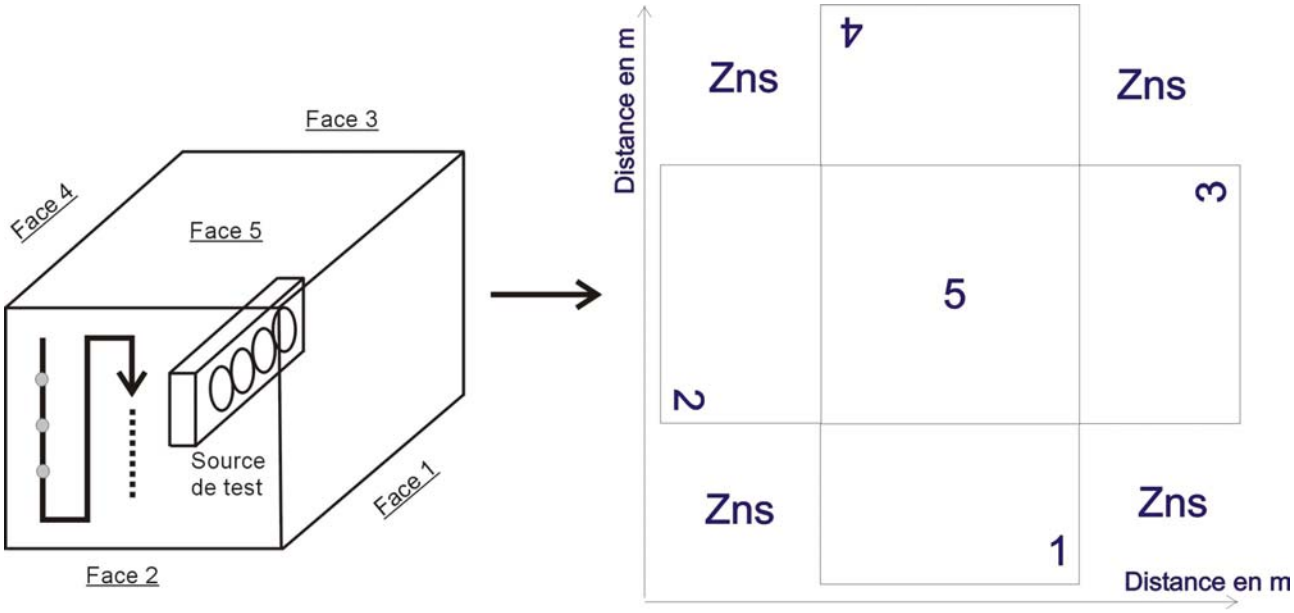


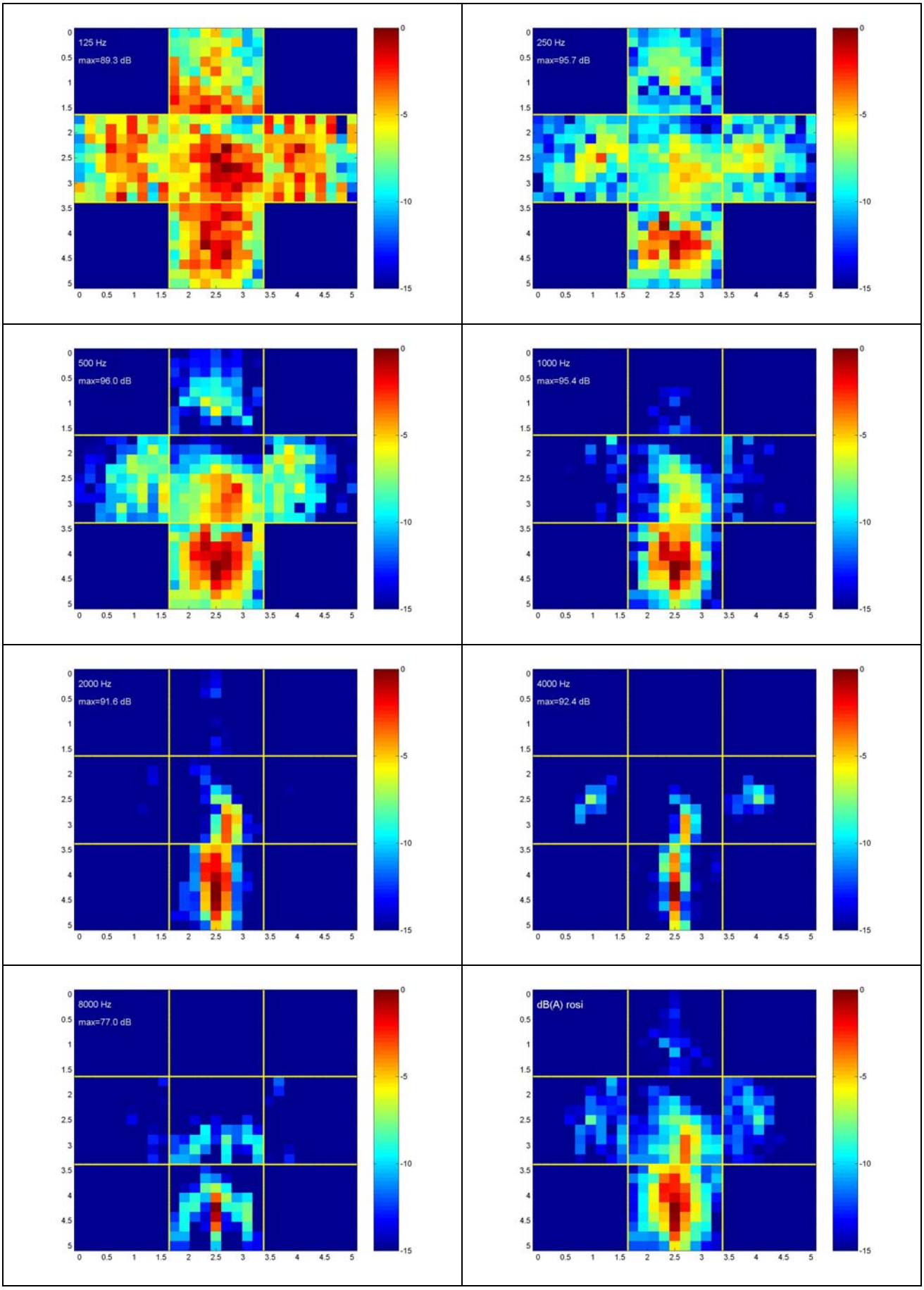

125 Hz
max=62.6 dB
250 Hz
max=66.4 dB
500 Hz
max=68.2 dB
1000 Hz
max=65.8 dB
2000 Hz
max=81.7 dB
4000 Hz
max=80.1 dB
8000 Hz
max=70.6 dB
dBA rosi
max=6.6 dB

ANNEXE 3 : Caractérisation simplifiée de la source de test en configuration A

Les 5 faces (quatre côtés et le dessus) sont montrées dans une représentation éclatée comme indiqué dans la figure ci-dessous. Les images ont toutes la même dynamique, et les zones non-significatives (Zns) de l'image sont portées à la dynamique la plus basse. Les axes verticaux et horizontaux sont en mètres.

Les faces verticales sont balayées sur un maillage de 9 lignes horizontales (tous les 20 cm, hauteur 1,80 m), les lignes, d'une longueur de 1,80 mètre permettent d'obtenir 9 pseudo-points (équidistance, tous les 20 cm). On a donc 81 points par face verticale.
La face horizontale (dessus) mesure elle aussi 1,80 m par 1,80 m et est divisée aussi en 9 lignes de 9 pseudo-points séparés de 20 cm. On a donc aussi 81 points sur cette face.
La source complète est donc caractérisée par 405 pseudo-points.



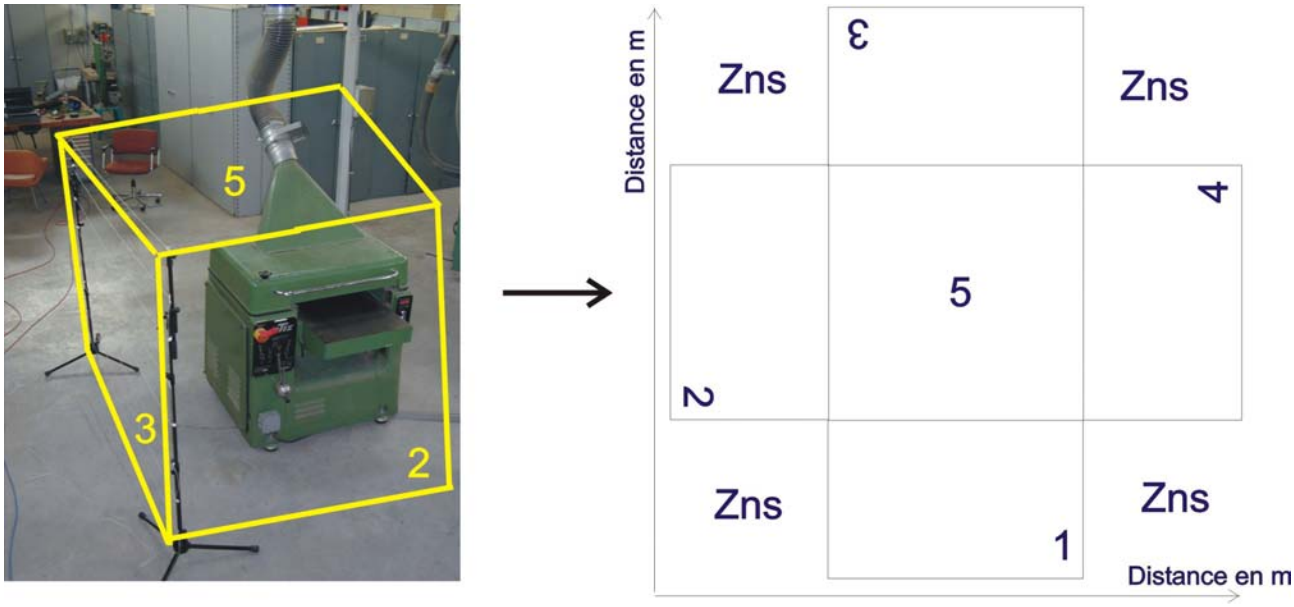

125 Hz
max=89.3 dB
250 Hz
max=95.7 dB
500 Hz
max=96.0 dB
1000 Hz
max=95.4 dB
2000 Hz
max=91.6 dB
4000 Hz
max=92.4 dB
8000 Hz
max=77.0 dB
dB(A) rosi

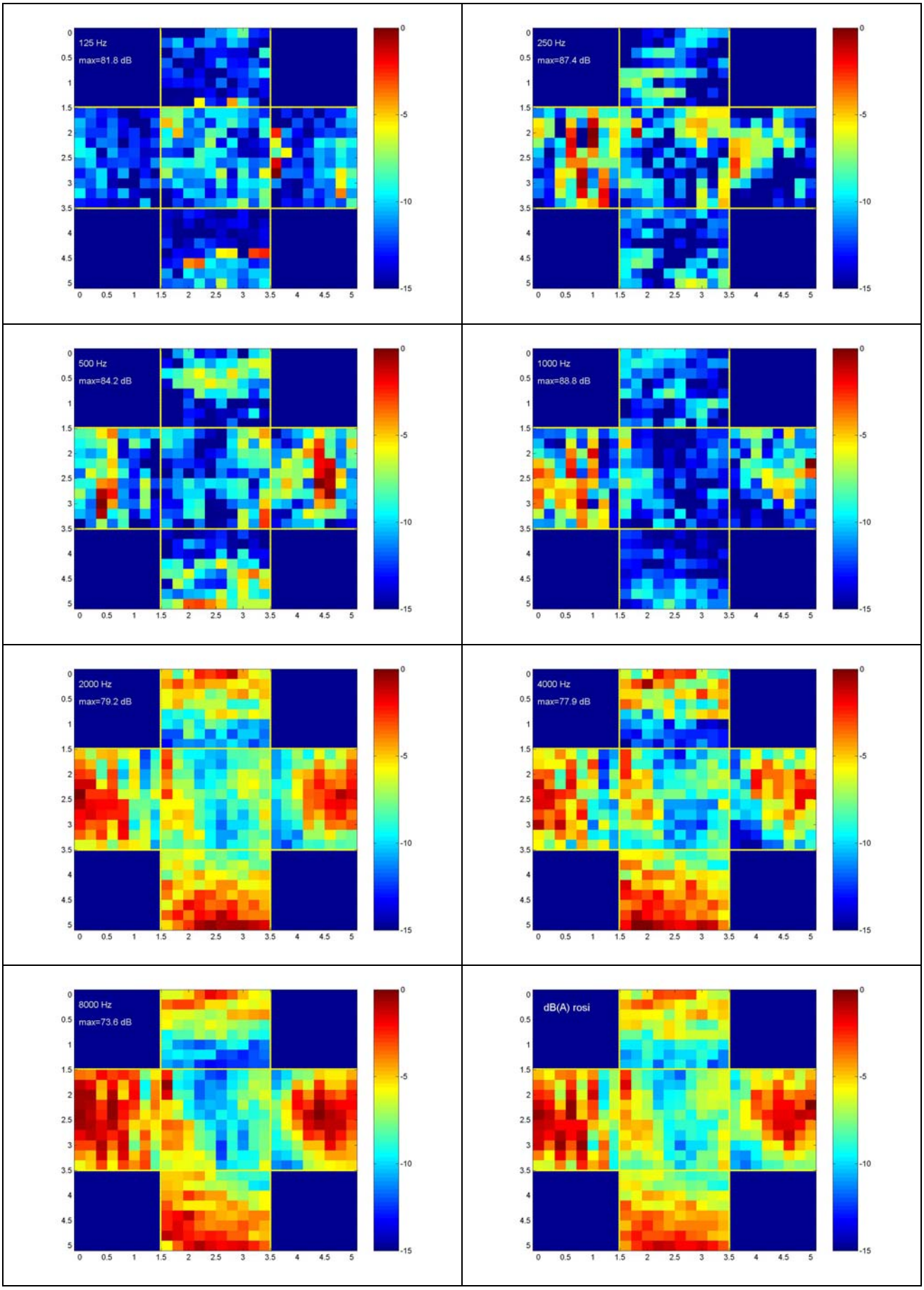
ANNEXE 4 : Caractérisation simplifiée d'une raboteuse

Photographie 2 : Raboteuse

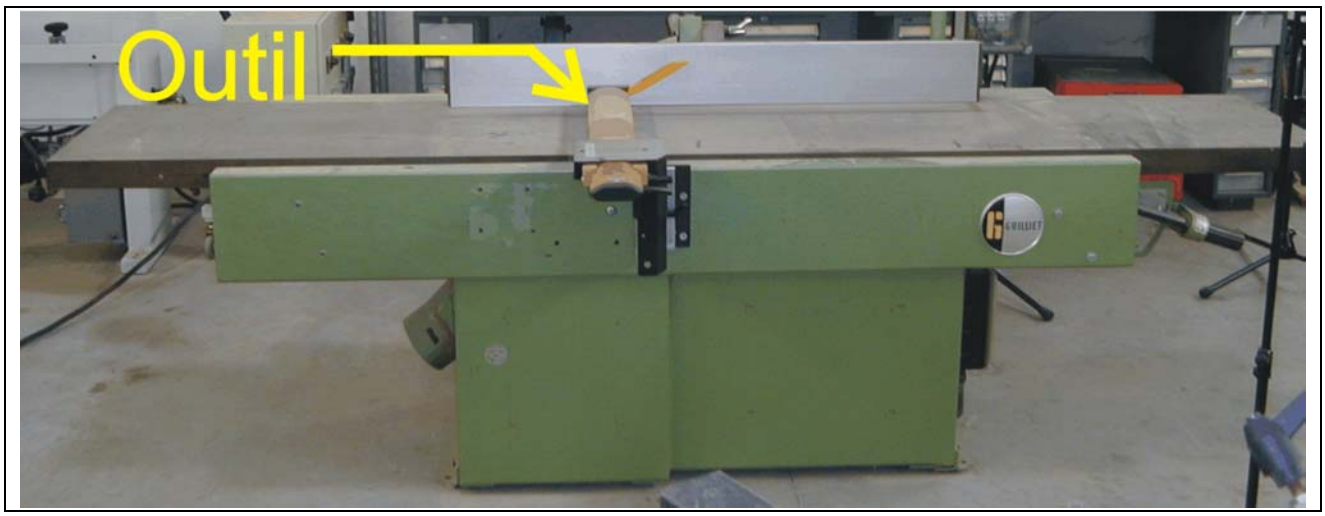
Les 5 faces (quatre côtés et le dessus) sont montrées dans une représentation éclatée comme indiqué dans la figure ci-dessous. Les images ont toutes la même dynamique, et les zones non-significatives (Zns) de l'image sont portées à la dynamique la plus basse. Les axes verticaux et horizontaux sont en mètres.

Les faces verticales sont balayées sur un maillage de 8 lignes horizontales (tous les 20 cm, hauteur 1,60 m), les lignes, d'une longueur de 2 mètres permettent d'obtenir 10 pseudo-points (équidistance, tous les 20 cm). On a donc 80 points par face verticale.
La face horizontale (dessus) mesure elle 2 m par 2 m et est divisée aussi en 10 lignes de 10 pseudo-points séparés de 20 cm. On a donc 100 points sur cette face.
La machine complète est donc caractérisée par 420 pseudo-points.




125 Hz
max=81.8 dB
250 Hz
max=87.4 dB
500 Hz
max=84.2 dB
1000 Hz
max=88.8 dB
2000 Hz
max=79.2 dB
4000 Hz
max=77.9 dB
8000 Hz
max=73.6 dB
dB(A) rosi

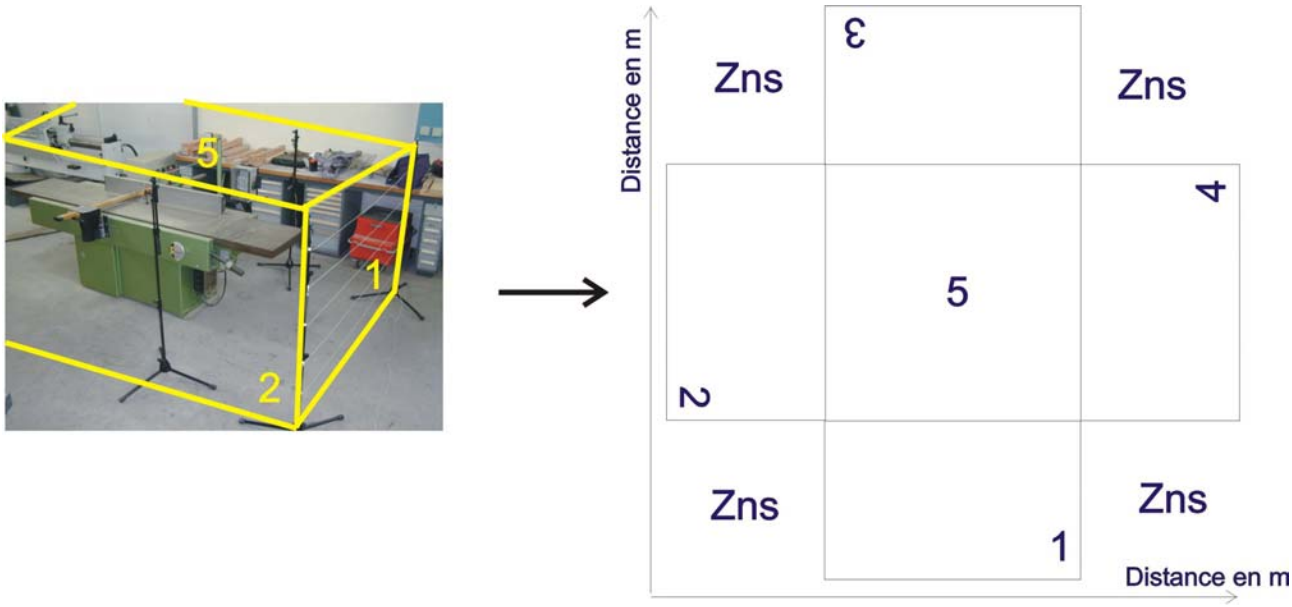
ANNEXE 5 : Caractérisation simplifiée d'une dégauchisseuse

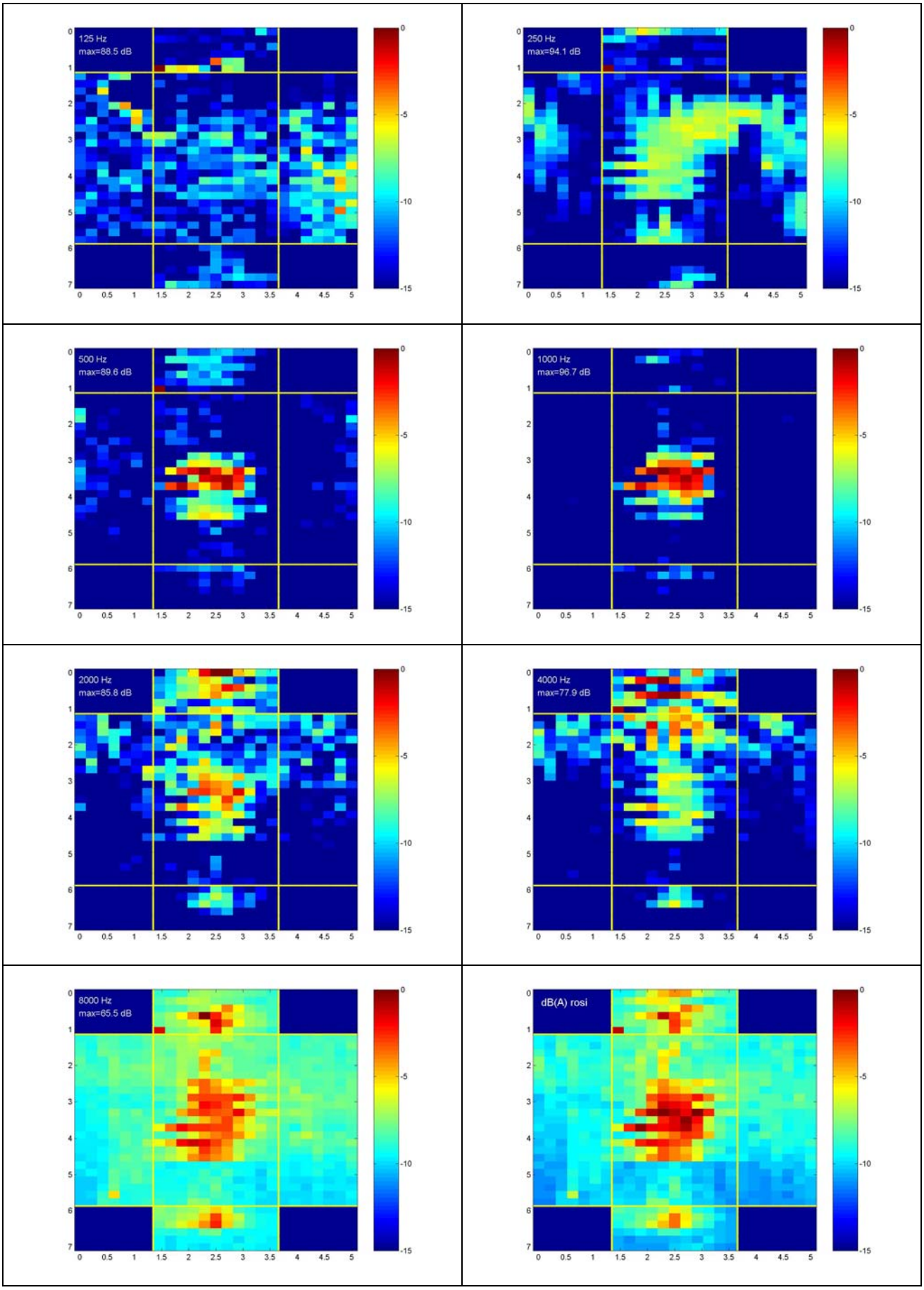


Photographie 3 : Dégauchisseuse

Les 5 faces (quatre côtés et le dessus) sont montrées dans une représentation éclatée comme indiqué dans la figure ci-dessous. Les images ont toutes la même dynamique, et les zones non-significatives (Zns) de l'image sont portées à la dynamique la plus basse. Les axes verticaux et horizontaux sont en mètre.

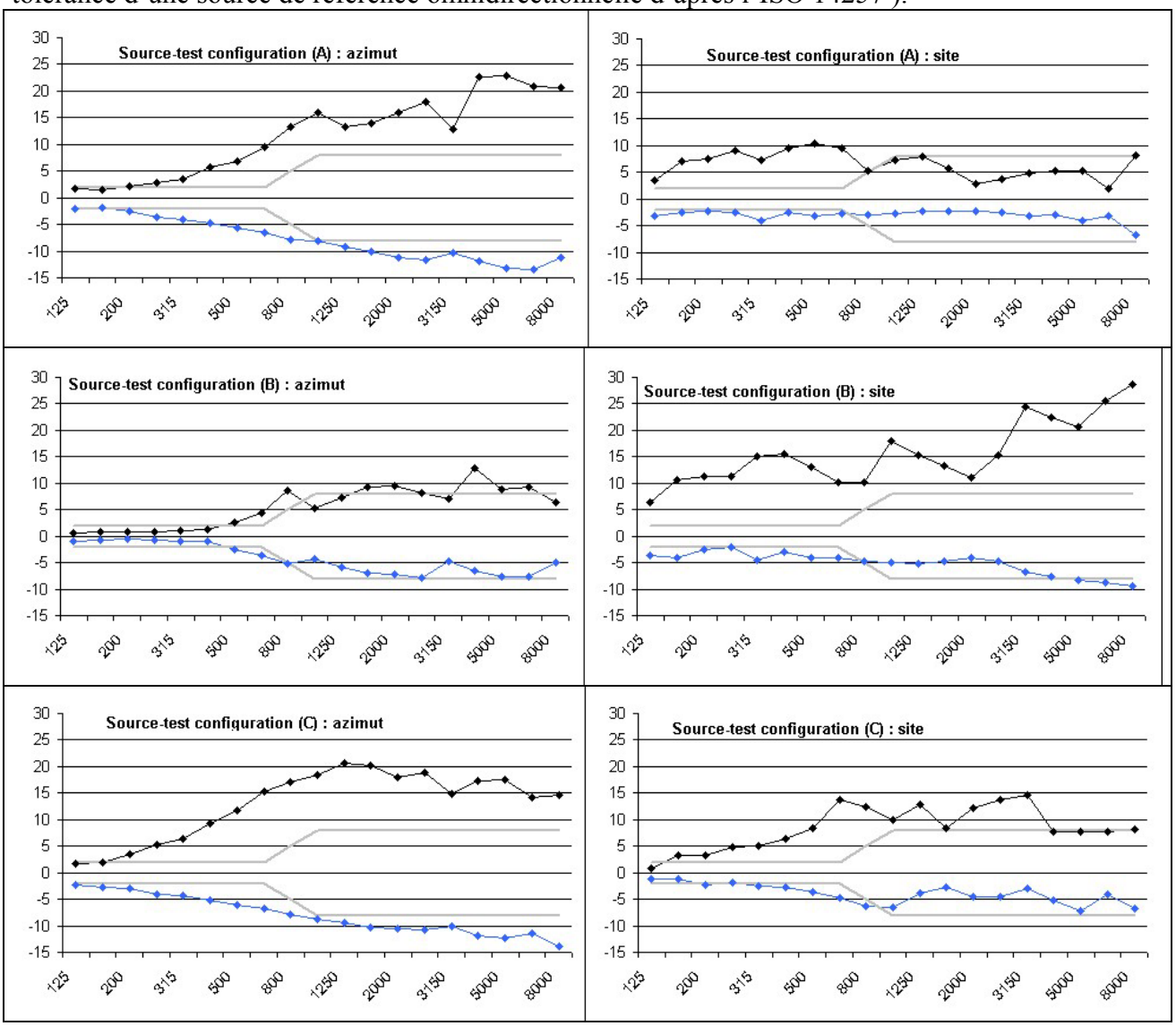
Les faces verticales sont balayées sur un maillage de 6 lignes horizontales (tous les 20 cm, hauteur 1,35 m), les lignes, d'une longueur de 2 mètres (sur la largeur de la machine) ou de 4 mètres (sur la longueur de la machine) permettent d'obtenir 11 pseudo-points (équidistance, tous les 20 cm).
La face horizontale (dessus) mesure elle 4 m par 2 m et est divisée aussi en lignes puis pseudo-points séparés de 20 cm.
La machine complète est donc caractérisée par 700 pseudo-points.



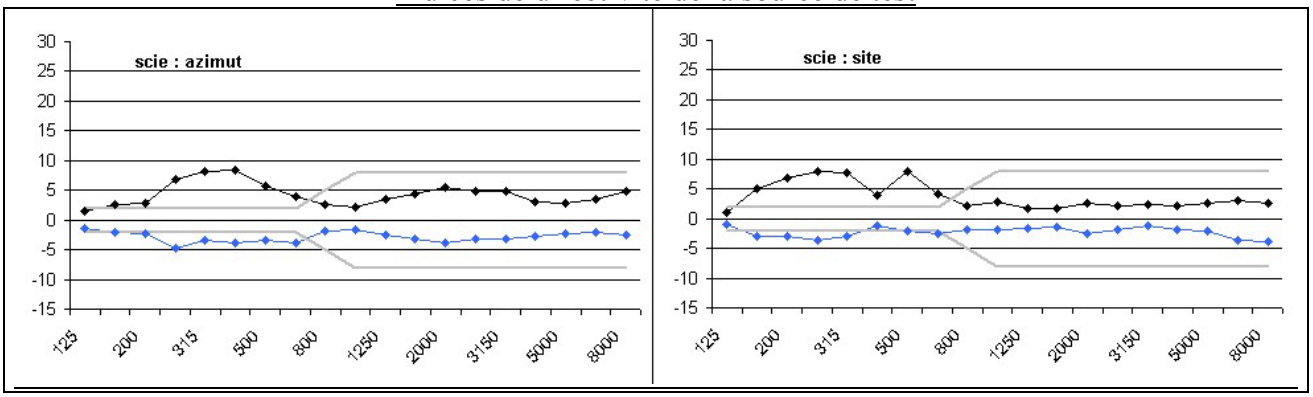

125 Hz
max=88.5 dB
250 Hz
max=94.1 dB
500 Hz
max=89.6 dB
1000 Hz
max=96.7 dB
2000 Hz
max=85.8 dB
4000 Hz
max=77.9 dB
8000 Hz
max=65.5 dB
dB(A) rosi

ANNEXE 6 : Indices de directivité des sources au sens de la norme ISO 14257

(abscisses : tiers d'octave ; ordonnées dB ; maxima en noir, minima en bleu ; en grisé gabarit de tolérance d'une source de référence omnidirectionnelle d'après l'ISO 14257).



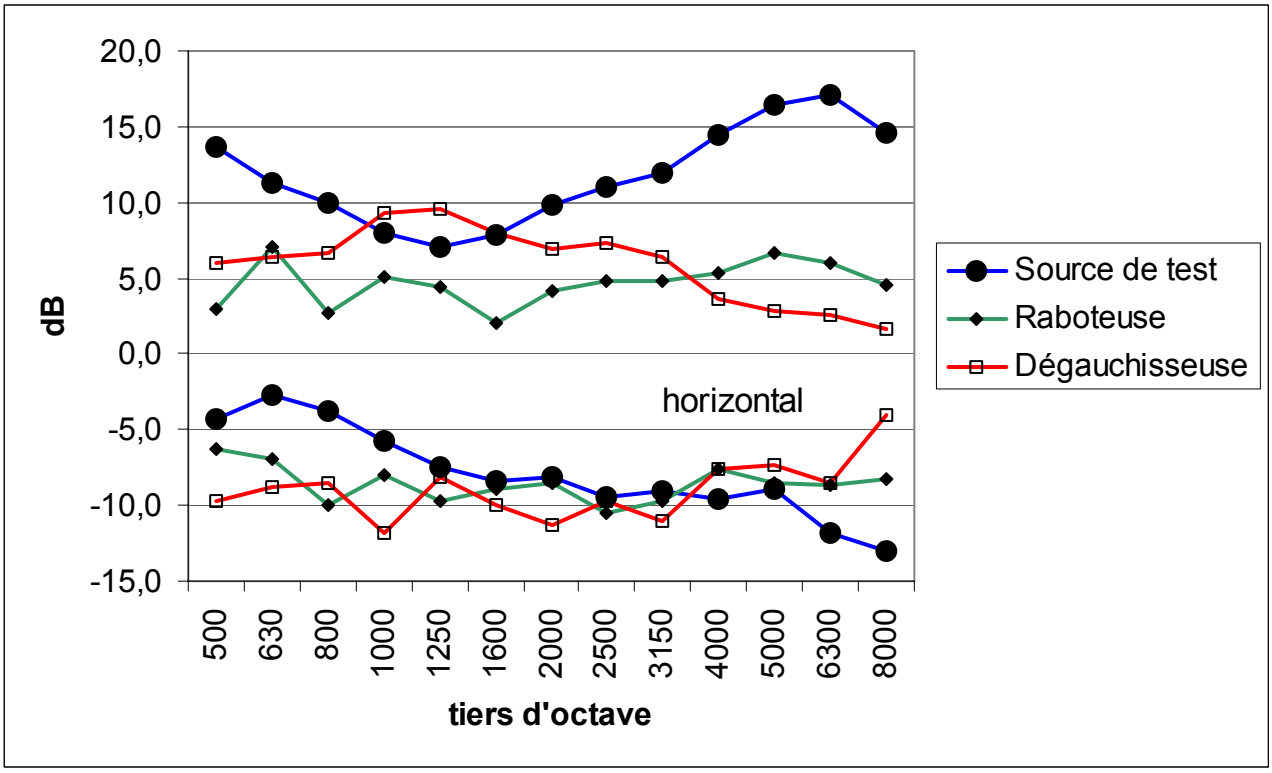
Indices de directivité de la source de test

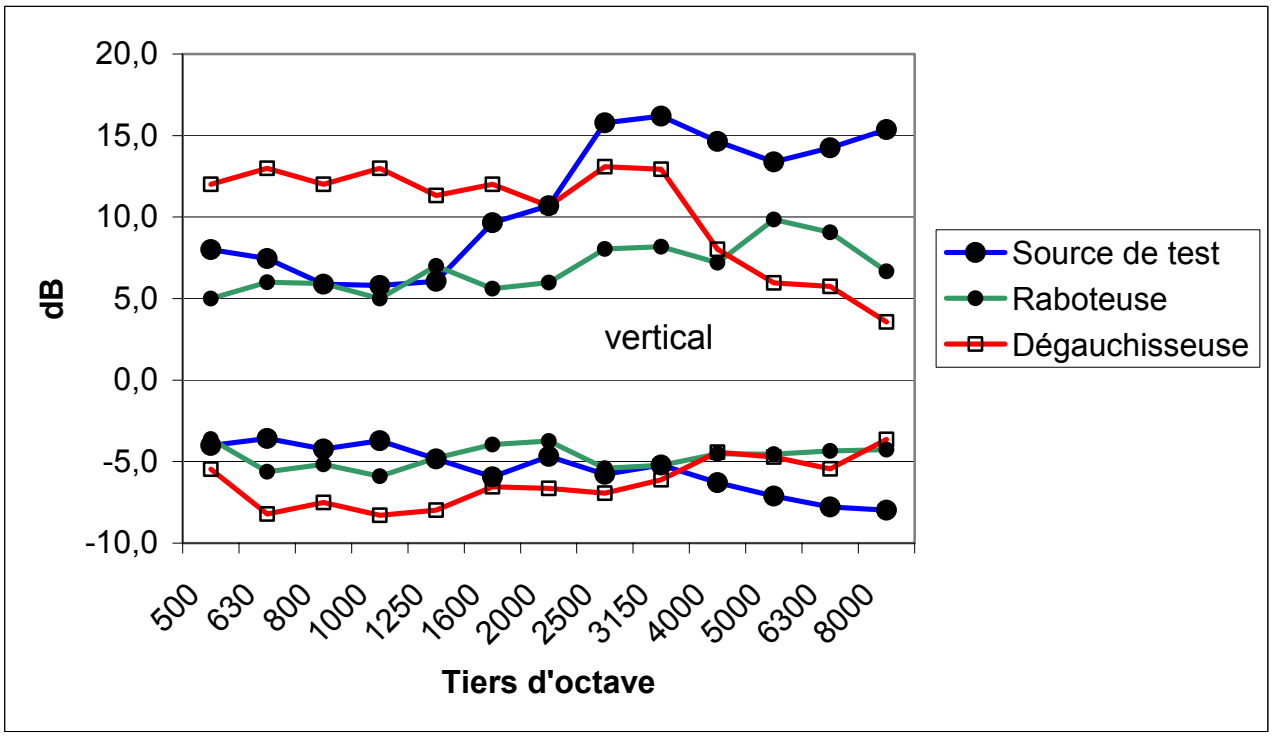


Indices de directivité de la scie

ANNEXE 7 : Estimation de la directivité sur le maillage intensimétrique

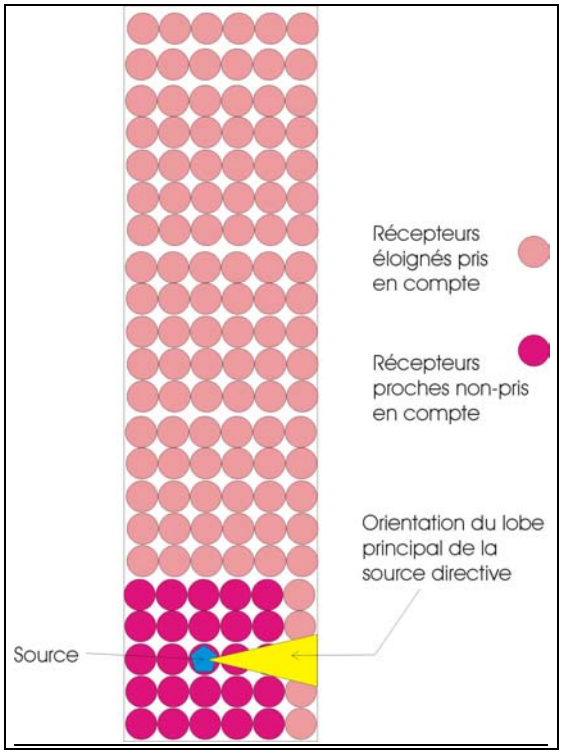
« Indices » de directivité calculés par une méthode de parcours des faces, et de comparaison de la valeur moyenne sur une ligne avec les valeurs lissées des pseudo-points.
La source de test est en configuration A.





ANNEXE 8 : Simulations du champ à l'intérieur d'un bâtiment vide ou encombré

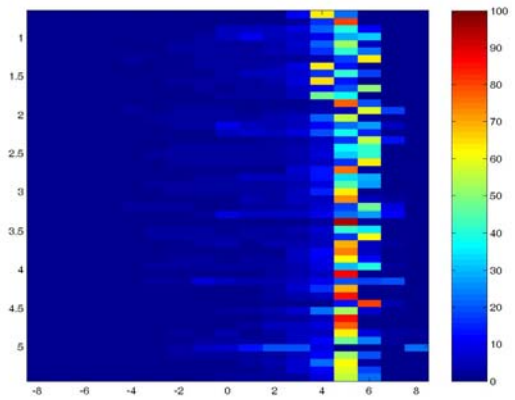
Le moyen de comparaison est la différence des champs entre la source directive et une source omnidirectionnelle pour une zone éloignée de la source (distances supérieures à 4 m).



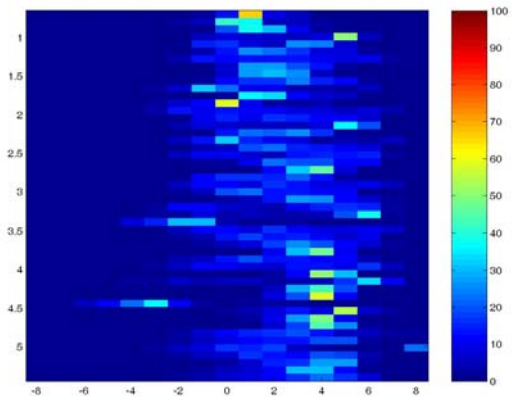
Bâtiment simulé vu de dessus : position de la source et définition des zones « rapprochée » et « éloignée » de la source.
La source est orientée successivement aux quatre points cardinaux.

Les différences entre les niveaux sonores provoqués par la source omnidirectionnelle et les niveaux provoqués par la source directive sont représentés sous forme d'histogramme du pourcentage des cellules de réception ayant une certaine différence de niveau.
Pour la représentation des histogrammes des différences entre les niveaux en dB(A) trouvés dans les cellules de réception éloignées de la source :

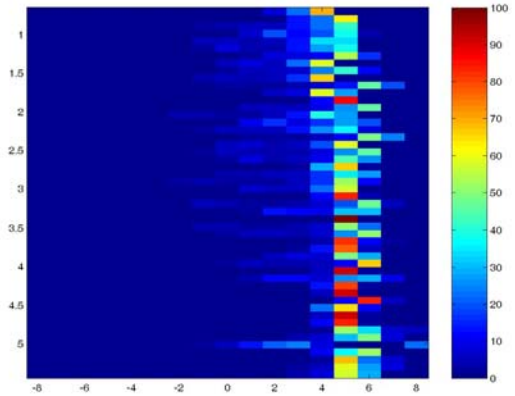
- On a empilé les 50 histogrammes des 10 bâtiments x 5 cas pour une position de source,
- Les ordonnées sont les pentes des décroissances spatiales (les bâtiments les plus réverbérants sont en haut),
- Les abscisses sont les différences de niveaux en dB(A) entre cellules pour la source omnidirectionnelle moins la source directive, le pas est de 1 dB(A),
- Les histogrammes sont normés en pourcentage, chaque point de l'histogramme montre le pourcentage des cellules (cas omnidirectionnel) qui diffèrent en niveau de X dB(A) par rapport aux mêmes cellules (cas directif).



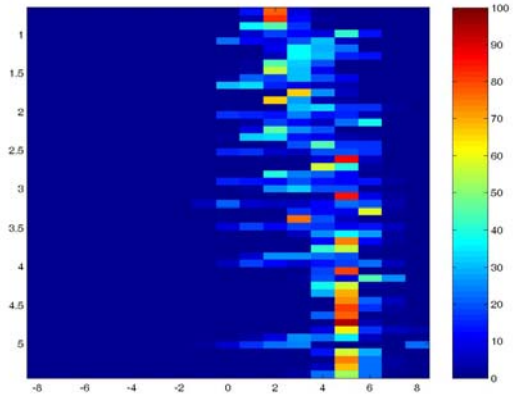
Bâtiment vide : source orientée à l'est



Bâtiment vide : source orientée au nord

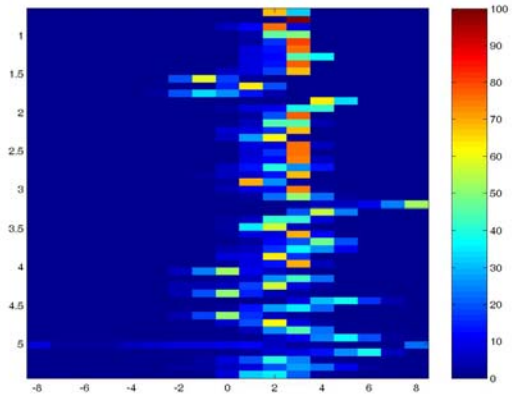


Bâtiment vide : source orientée à l'ouest

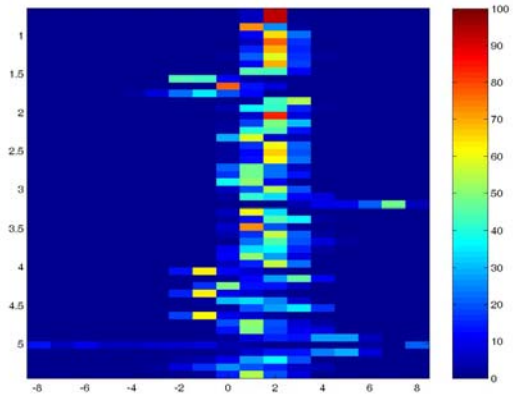


Bâtiment vide : source orientée au sud

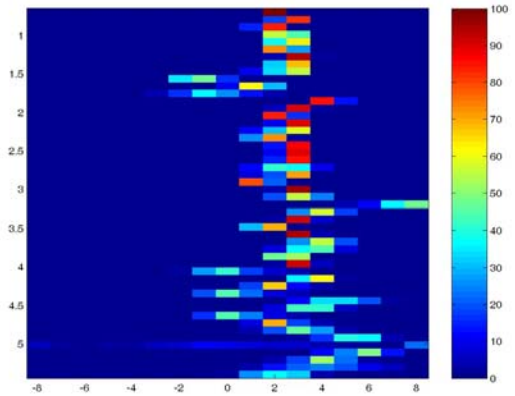
Les bâtiments sont toujours plus longs que larges (de 1,2 fois à 3,8 fois, en moyenne 1,9 fois plus longs que larges), la source directive orientée à l'est ou à l'ouest présente donc un axe acoustique parallèle à la largeur. Si elle est orientée au sud ou au nord, l'axe acoustique devient parallèle à la longueur. La source étant dans le coin sud-ouest du bâtiment, son lobe principal rencontre rapidement une paroi quand elle est orientée au sud ou à l'ouest.



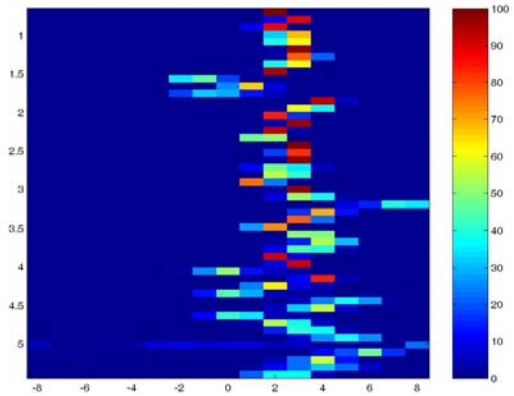
Bâtiment encombré : source orientée à l'est



Bâtiment encombré : source orientée au nord



Bâtiment encombré : source orientée à l'ouest



Bâtiment encombré : source orientée au sud

COLLECTION DES NOTES SCIENTIFIQUES & TECHNIQUES

Les notes scientifiques et techniques présentent des travaux de synthèse élaborés par des experts en hygiène et sécurité du travail, en particulier de l'INRS : résultats d'études, comptes rendus de séminaires et de colloques, etc.

Sur la base de ces documents peuvent être réalisées des publications plus concises dans des revues scientifiques et/ou de prévention.

Institut National de Recherche et de Sécurité

Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
Siège social : 30, rue Olivier-Noyer 75680 Paris cedex 14 • Tél. 01 40 44 30 00
Fax 01 40 44 30 99 • Internet : www.inrs.fr • e-mail : info@inrs.fr
Centre de Lorraine : avenue de Bourgogne BP 27 54501 Vandœuvre cedex
Tél. 03 83 50 20 00 • Fax 03 83 50 20 97