

INFLUENCE DE LA DIRECTIVITÉ DES SOURCES BRUYANTES SUR L'EXPOSITION SONORE DANS LES LOCAUX INDUSTRIELS

Pour réduire efficacement l'exposition des travailleurs au bruit dans l'entreprise, le préventeur peut utiliser des solutions spécifiques adaptées aux sources sonores les plus nuisantes. La connaissance des caractéristiques d'une source, et tout particulièrement de sa directivité, peut être d'un grand intérêt pour proposer, par exemple, un masquage partiel par écran ou cabine, un changement de sa position ou de son orientation, ou un traitement acoustique d'une des parois du local.

Cette étude montre comment la directivité de trois machines à bois a été caractérisée, en particulier en utilisant une méthode simplifiée d'intensimétrie acoustique permettant d'opérer rapidement à l'intérieur d'un local industriel. Une source de test, dont on connaît la directivité, a été choisie pour être comparée avec ces machines bruyantes. Les mesures montrent que les machines étudiées sont relativement peu directives.

Ces caractérisations effectuées, on a pu estimer quelle était l'influence de la directivité de telles machines bruyantes sur l'exposition sonore des travailleurs dans un local de production. Pour ce faire, des simulations du champ sonore ont été effectuées, pour une source directive et différents locaux, variant par leurs dimensions, leur traitement acoustique ou leur encombrement. De plus, des expérimentations avec les trois machines à bois et la source de test, comparées à une source omnidirectionnelle, ont permis d'évaluer les différences entre les champs sonores générés à l'intérieur de deux locaux réverbérants, l'un vide, l'autre encombré.

Les simulations montrent que la variabilité du champ sonore avec la directivité de la source n'est pas clairement liée aux caractéristiques des bâtiments, que ce soit leurs dimensions ou leur traitement acoustique. Les simulations, comme les expérimentations, mettent en évidence que, dans un local vide, la directivité des sources a une influence sur l'homogénéité du champ sonore distant de la source. Dans un local encombré, alors que d'autres machines, du stock, du mobilier, des installations participent largement à la diffusion des ondes sonores, le champ sonore distant de la source directive est faiblement influencé par la directivité de la source de bruit.

Pourtant, l'exposition sonore au poste de travail, sur la machine, est toujours liée à la position du travailleur par rapport à cette machine directive et peut varier de 4 à 8 dB(A) pour les machines à bois testées dans l'étude.

INTRODUCTION

Les machines bruyantes sont la cause de l'exposition des travailleurs au bruit dans les locaux industriels. Deux principaux moyens de lutte peuvent être déployés, le premier au niveau de la source et le second au niveau des

chemins de transmission. Très souvent, les caractéristiques acoustiques des machines ou des sources de bruit ne sont connues par leur puissance acoustique que de manière globale. Une connaissance plus précise des caractéristiques d'émission sonore des sources, et, plus particulièrement, de leur directivité peut aider le préventeur à envisager des

- Acoustique
- Bruit
- Exposition professionnelle
- Simulation
- Bâtiment industriel

► Jacques CHATILLON,
INRS, Département Ingénierie des équipements de travail

INFLUENCE OF SOURCE DIRECTIVITY ON NOISE LEVEL IN INDUSTRIAL WORKSHOPS

The prevention specialist can use specific solutions adapted to the most harmful noise sources for effectively reducing worker exposure to noise at companies. Knowing the characteristics of the source, especially its directivity, can be very helpful when proposing, for example, screen or cubicle partial masking, source position alteration or acoustic treatment on one of the room walls.

This study describes how the directivity of three woodworking machines was characterised, in particular using a simplified acoustic intensimetry method, which allows rapid operation in an industrial workshop. A test source of known directivity was selected for comparison with these noisy machines. Measurements show that the studied machines have relatively low directivities.

Once these characterisations had been performed, influence of the directivity of this kind of noisy machine on worker noise exposure in a production shop could be estimated. For this, noise field simulations were undertaken for a directive source and various workshops featuring different dimensions, acoustic treatment and room congestion. Moreover, experiments performed on the three woodworking machines and the test source, compared with a multidirectional source, permitted evaluation of the differences between the noise fields created inside two reverberating rooms, one empty and the other congested.

The simulations show that noise source variability with source directivity is not clearly linked to building characteristics, in terms of neither dimensions nor acoustic treatment. Both the simulations and the experiments reveal that source directivity in an empty room influences noise field uniformity at distance from the source. In a congested room, although other machines, stocks, furniture and installations contribute significantly to sound wave diffusion, the noise field at distance from a directive source is slightly influenced by the noise source directivity.

However, workstation noise exposure on a machine is invariably associated with the worker's position with respect to the machine and can vary from 4 to 6 dB(A) for the woodworking machines tested during this study.

- Acoustics
- Noise
- Occupational exposure
- Simulation
- Industrial building

solutions spécifiques et plus adaptées de réduction des niveaux de nuisance. Par exemple, ces solutions peuvent être un masquage partiel de la source, un changement de sa position ou de son orientation, ou bien un traitement acoustique partiel d'une paroi proche de la source. L'étude a pour but de caractériser la directivité de trois machines à bois bruyantes et d'évaluer l'influence de cette grandeur sur l'exposition sonore à l'intérieur d'un local de travail.

Une méthode de laboratoire est préalablement utilisée mettant en œuvre de nombreux mesurages de pression sonore autour de la source dans une chambre semi-anéchoïque. Les contraintes de mesurage couramment rencontrées dans l'industrie sont liées à l'organisation du travail et au local. Ce dernier est généralement réverbérant et comporte de nombreuses sources de bruit. L'organisation de la production fait que, très souvent, il est difficile d'accéder à la machine et pendant un temps suffisamment long. Pour satisfaire à ces contraintes, une méthode simplifiée et rapide de caractérisation de la directivité utilisant des mesures de l'intensité acoustique est validée.

Une fois les caractéristiques spatiales d'émission des sources connues, l'étude s'est focalisée sur l'influence de cette directivité sur l'exposition sonore à l'intérieur des locaux industriels au moyen de simulations et d'expérimentations.

CARACTÉRISATIONS DE LA DIRECTIVITÉ DES SOURCES

MÉTHODES

Caractérisation complète et caractérisation simplifiée

La caractérisation de la directivité d'une source bruyante peut être connue avec suffisamment de précision par des méthodes de laboratoire ou des méthodes normalisées en effectuant des mesurages de pression acoustique [1] ou des mesurages d'intensité acoustique [2, 3, 4].

Par exemple, au laboratoire, une caractérisation complète peut être effectuée en mesurant la pression sonore sur

de nombreux microphones balayant un hémisphère entourant la source. Cette technique est d'autant plus précise qu'on multiplie le nombre de points de mesure, mais nécessite alors la possibilité d'accéder à tout l'espace autour de la source et une grande stabilité temporelle de l'émission sonore. Les directivités d'une source de test et d'une scie à bois ont été mesurées par cette méthode dans une chambre semi-anéchoïque.

Dans un hall industriel, certaines contraintes peuvent gêner la mise en œuvre d'une telle technique. La présence d'autres sources bruyantes, comme la réverbération sur les murs du local, induisent souvent un niveau de bruit de fond élevé capable de masquer la source d'intérêt. De plus, les contraintes de production peuvent empêcher le déploiement d'une instrumentation lourde autour de la machine pendant un temps suffisamment long. Pour ces raisons, une caractérisation simplifiée de la directivité de la source doit être envisagée. En cartographiant l'intensité acoustique sur un parallélépipède rectangle entourant la source, le temps de mesurage peut être considérablement diminué par rapport à une mesure de pression, surtout en utilisant une technique de balayage. Les sources secondaires extérieures à l'enveloppe de mesurage peuvent également être éliminées, si leurs niveaux sont suffisamment stables dans le temps. Après avoir été validée par comparaison à une méthode de points fixes, cette technique de balayage a été utilisée sur la même source de test et sur deux machines à bois installées dans un hall de production.

Source de test et machines à bois utilisées

La source de test a été choisie car on peut calculer sa directivité. De plus, elle est théoriquement assez directive dans les fréquences moyennes audibles pour mettre en avant des différences de champ si elles existent. En effet, cette source montre un diagramme de directivité assez simple (sinus cardinal) avec un lobe principal suffisamment étroit (de l'ordre de 50° à 1 kHz). Il sera donc intéressant de comparer cette directivité à celle des machines bruyantes. D'autre part, dans les simulations du champ sonore dans un local industriel, les directivités de sources simulées ressemblent beaucoup à celle de la source de test et les comparaisons simulations-mesures seront facilitées.

La source de test est composée de quatre haut-parleurs en ligne dans un caisson (cf. Figure 1) émettant un bruit rose dans les octaves allant de 125 Hz à 8 kHz. Le diagramme de directivité théorique de cette source est celui d'un haut-parleur convolué avec celui d'une ligne, il ressemble approximativement, pour les fréquences les plus hautes, à un sinus cardinal. Le lobe principal a une largeur théorique d'environ 50° à -3 dB à 1 kHz dans le plan Px.

Par construction, la source est quatre fois moins directive dans le plan Py. De plus, les niveaux transmis à l'arrière sont très affaiblis par le caisson.

Trois configurations cette source sont utilisées (cf. Figure 2):

- A) source à 1 mètre du sol, émission dirigée vers un mur,
- B) source à 1 mètre du sol, émission dirigée vers le plafond,
- C) source posée au sol, émission dirigée vers un mur.

Dans le cas d'un sol réfléchissant, les deux premières configurations créent une source image à 2 mètres en dessous de la source réelle. La troisième permet de confondre la source réelle et son image, pour une bande de fréquence allant jusqu'à 1 kHz environ.

La scie à bois utilisée dans l'étude (cf. Figure 3) est installée dans la chambre semi-anéchoïque. Cette machine est approximativement un cube de 1,20 m de côté, la lame de scie mesurant 30 cm de diamètre. Le système de chargement, comportant un petit moteur sur le dessus, n'est pas utilisé. La lame de scie et son moteur d'entraînement sont les principales sources de bruit.

Les deux autres machines à bois sont une raboteuse et une dégauchisseuse. La raboteuse est un parallélépipède rectangle d'environ 1 m x 1 m x 1,2 m. Son système d'aspiration des sciures est hors fonction pendant les essais. Le passage des planches à raboter s'effectue par deux ouïes situées sur deux côtés verticaux opposés, entre lesquelles se trouve l'outil (cf. Figure 4 gauche). La principale source de bruit provient de ces deux ouïes. La dégauchisseuse (cf. Figure 4 droite) ressemble à la scie à bois à cause de sa table, mais elle est beaucoup plus longue (2,5 m). L'outil est un cylindre émergeant sur la table. Il est la principale source de bruit externe. Son moteur électrique d'entraînement est

FIGURE 1

Source de test
Test source

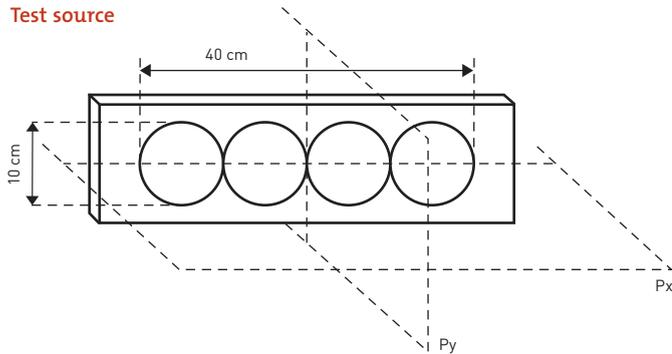


FIGURE 2

Trois configurations de la source de test
Three test source configurations

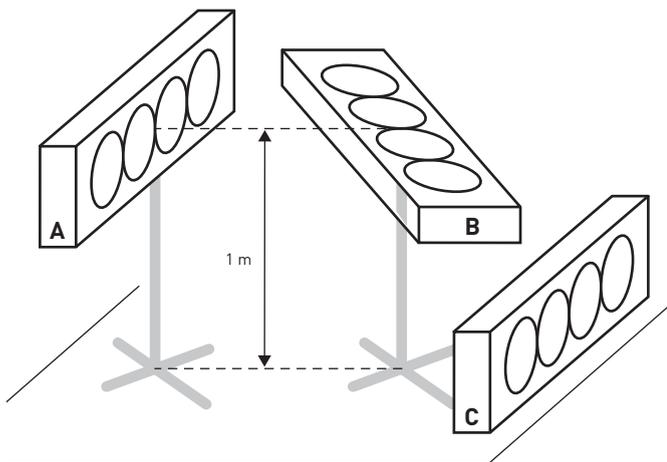


FIGURE 3

Scie installée en chambre sourde (et vue des microphones pour mesurer la pression acoustique sur un hémisphère)
Saw installed in an acoustic chamber (and view of microphones used for measuring acoustic pressure on one hemisphere)

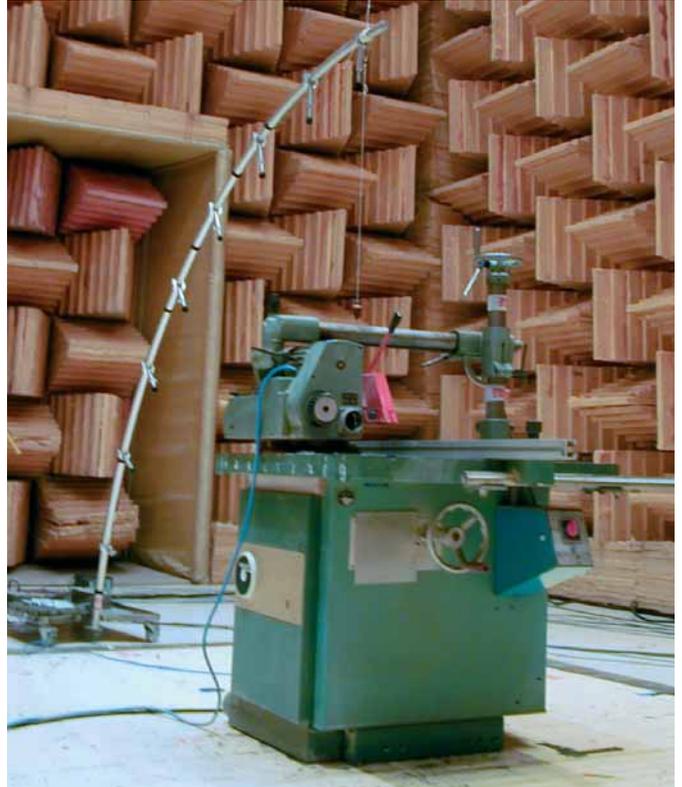


FIGURE 4

Raboteuse (gauche) et dégauchisseuse (droite) sur site
Planing (left) and surface-planing (right) machines on site



une deuxième source de bruit importante, rayonnant à l'extérieur par la vibration transmise aux capotages.

Caractérisations expérimentales

Les caractérisations complètes de la source de test dans ses trois configurations ont été effectuées en chambre semi-anéchoïque. Des mesures de pression ont été effectuées sur un hémisphère de 2 mètres de rayon entourant la source. Cet hémisphère est échantillonné par 16 points en vertical (angle de site, entre 0° et 90°), et 72 dans le sens horizontal (azimut, tous les 5°). La *Figure 5* montre le principe de ces mesures. La caractérisation complète permet donc de définir 16 x 72 = 1152 points de mesure de pression sur l'hémisphère entourant la source afin d'obtenir la directivité avec suffisamment de précision, même aux fréquences les plus hautes (octave centrée à 8 kHz).

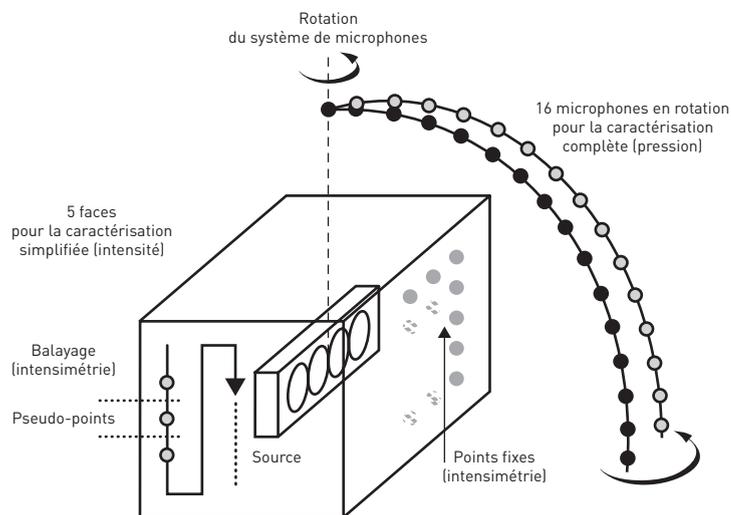
Une caractérisation plus simple a aussi été effectuée par une cartographie de l'intensité acoustique sur un parallélépipède rectangle entourant la source (cf. *Figure 5*). Le balayage continu d'une des faces du parallélépipède est découpé en plusieurs parties, chacune correspondant alors à un pseudo-point de mesure identifiable à celui qui serait obtenu par une méthode d'intensimétrie par points fixes. Afin de valider la méthode de balayage et de calcul des pseudo-points, une mesure classique par points fixes a d'abord été effectuée sur la source de test.

ÉVALUATION DE LA DIRECTIVITÉ DES SOURCES PAR LA CARACTÉRISATION COMPLÈTE

La caractérisation complète de la source de test montre l'allure du diagramme de directivité attendu : un lobe principal dont la largeur diminue lorsque la fréquence augmente, des lobes secondaires apparaissant aux fréquences les plus hautes, un masquage de l'énergie sonore à l'arrière du caisson. La *Figure 6* montre un exemple de diagrammes de directivité mesurés pour la source de test en configuration A pour les octaves centrées à 1 et 8 kHz. Ces diagrammes sont représentés comme des vues de dessus de l'hémisphère entourant la source émettant sur le côté droit de la figure. L'azimut varie de 0 à 360° autour du cercle, le site varie de 0 à 90° sur le rayon du cercle.

FIGURE 5

Principe des caractérisations complète et simplifiée Simplified, full characterisation principle



La scie à bois (*Figure 3*) a été caractérisée par la même méthode, alors que la lame tournait à vide afin d'enregistrer un bruit stable durant tout le temps de déploiement du système de microphones rotatifs (un peu moins d'une heure).

La *Figure 7* montre un exemple de diagrammes de directivité de la scie mesurés pour les octaves centrées à 1 et 8 kHz. Ces diagrammes sont représentés avec la même échelle de niveaux que ceux de la *Figure 4* afin de comparer la directivité de la scie avec celle de la source de test. Une vue schématique de dessus de la scie et de sa lame est superposée sur le diagramme de gauche. On peut noter qualitativement que la scie semble moins directive que la source de test à 1 kHz, les niveaux étant relativement uniformes. A 8 kHz, on observe nettement des émissions plus énergétiques à plus ou moins 45° du plan de la lame, ressemblant à des ailes de papillon.

Ces caractérisations complètes permettent d'estimer les index de directivité des sources au sens de la norme ISO 14257 [5]. Cette norme propose de calculer des index de directivité en comparant le niveau de pression moyen rayonné par la source sur un cercle ou un demi-cercle entourant celle-ci avec le maximum et le minimum de ce niveau sur des secteurs angulaires plus étroits et sur le même cercle. Les cercles sont balayés en azimut et les demi-cercles

en site. La norme définit un gabarit en fréquence (en valeur absolue : 2 dB jusqu'à 630 Hz, 2 à 8 dB jusqu'à 1 kHz, 8 dB au-dessus de 1 kHz) encadrant les index maxima et minima d'une source alors réputée « omnidirectionnelle ».

En traçant les index ainsi définis de la source de test et de la scie, on peut déduire si ces sources sont plutôt directives ou plutôt omnidirectionnelles. La *Figure 8* montre les index mesurés de la source de test en configuration A et ceux de la scie, chaque tracé contient aussi le gabarit de la source omnidirectionnelle défini dans la norme ISO 14257.

Pour la source de test en configuration A et C, les index de directivité croissent de 15 à 25 dB pour l'azimut dès que la fréquence est supérieure à 1 kHz. La source de test est évidemment plutôt directive en azimut pour ces deux configurations, alors qu'elle l'est beaucoup moins en site si l'on oublie l'effet de masquage dû à l'arrière du caisson.

Même si tous les résultats ne sont pas détaillés dans cet article, on a vérifié que pour la configuration B, au contraire, la directivité est plus grande en site qu'en azimut, comme la géométrie de la source de test l'explique facilement.

Pour la scie, les tracés des index comparés au gabarit de l'ISO 14257 révèlent une machine dont l'émission sonore est très peu directive, même si les index sortent un peu du gabarit pour

FIGURE 6

Source de test en configuration A : exemples de diagrammes de directivité (gauche octave centrée à 1 kHz, droite à 8 kHz)
 Test source in configuration A: examples of directivity diagrams (1 kHz-centred octave on left, 8 kHz-centred octave on right)

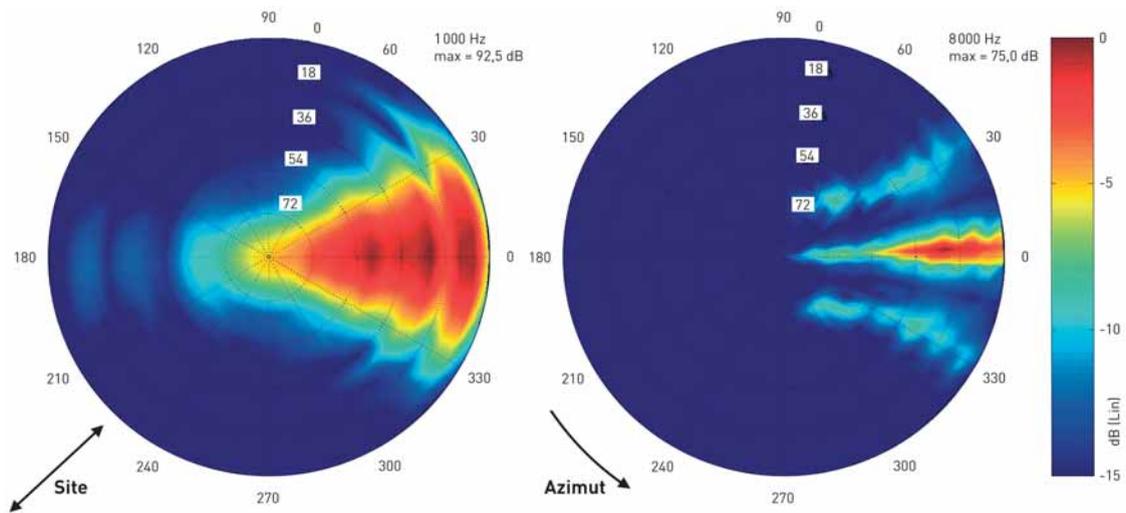
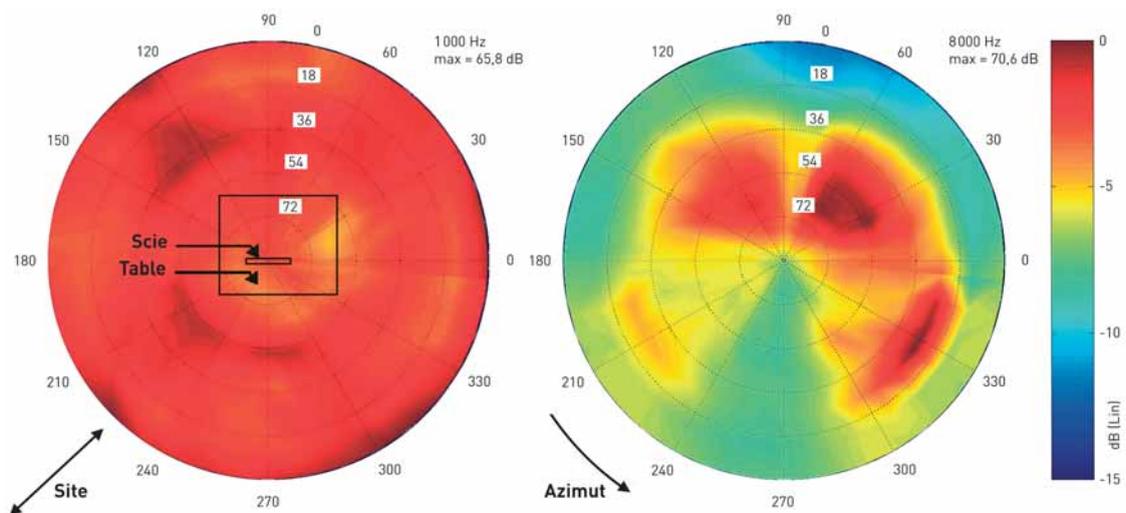


FIGURE 7

Scie ; exemples de diagrammes de directivité (gauche octave centrée à 1 kHz, droite à 8 kHz)
 Saw: examples of directivity diagrams (1 kHz-centred octave on left, 8 kHz-centred octave on right)



les tiers d'octave compris entre 200 et 800 Hz.

Finalement, il y a une très grande différence dans les directivités des deux sources puisque la source de test est plutôt directive et la scie ne l'est pratiquement pas. Ces observations pourront avoir des conséquences importantes sur l'homogénéité du niveau de bruit rayonné par ces sources dans un local industriel.

ÉVALUATION DE LA DIRECTIVITÉ DES SOURCES PAR UNE CARACTÉRISATION SIMPLIFIÉE

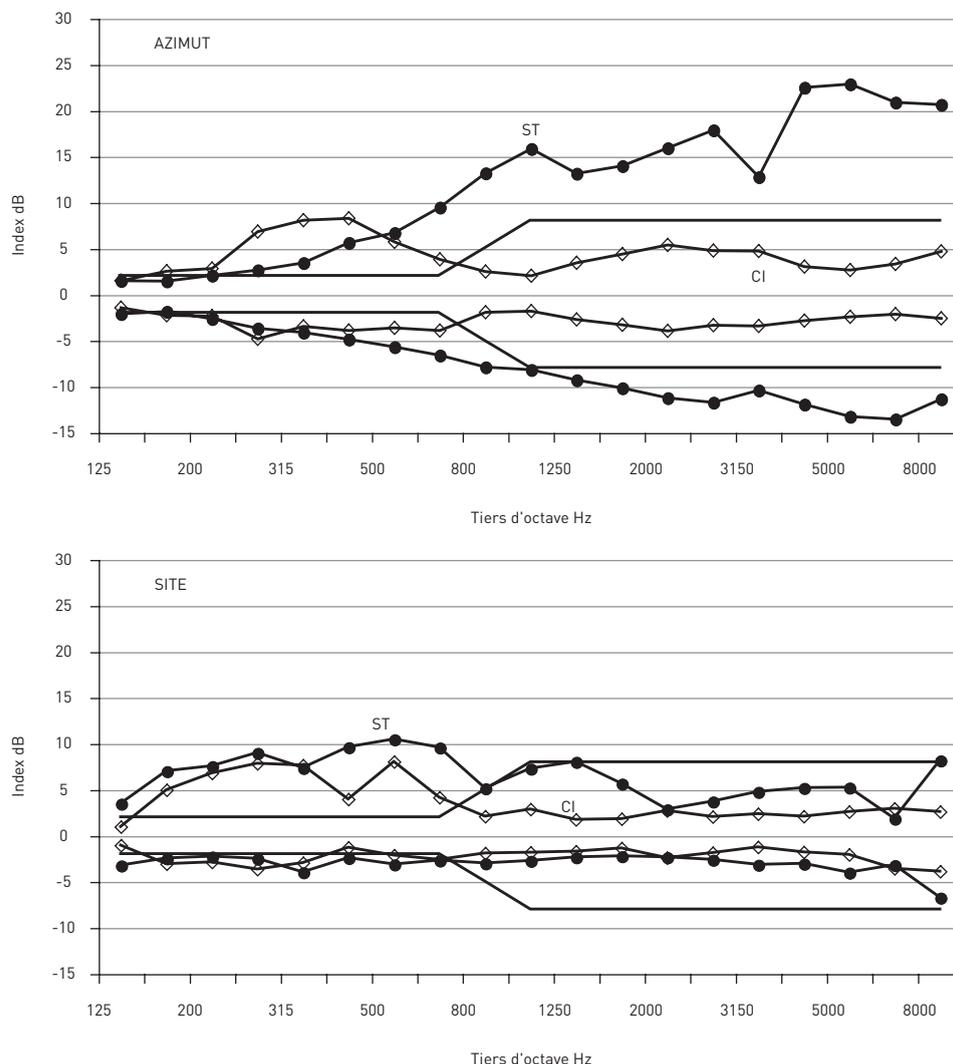
Des caractérisations simplifiées ont été effectuées à l'aide de la méthode du balayage intensimétrique, d'abord celle de la source de test en chambre sourde, puis celle des deux machines à bois dans un hall industriel. Comme précédemment pour la scie, les deux machines à bois tournent à vide afin

d'enregistrer un bruit très stable durant le balayage de la sonde intensimétrique (10 à 20 minutes pour les 5 faces).

La cartographie de la source de test en configuration A a été effectuée en balayant les cinq faces d'un parallélépipède rectangle virtuel entourant la source. Chaque face est balayée en deux minutes environ et l'enregistrement des signaux issus de la sonde intensimétrique durant cette période est ensuite

FIGURE 8

Index de directivité de la source de test en configuration A (cercles noirs ST), de la scie (losanges blancs CI), et gabarit de la source omnidirectionnelle selon l'ISO 14257 (ligne continue)
 Test source directivity index in configuration A (black circles ST) for the saw (white diamonds CI) and width of omnidirectional source according to ISO 14257 (solid line)



découpé en 81 sous-signaux d'une durée approximative de 1,5 seconde. Chacune de ces 81 tranches correspond alors à un pseudo-point sur la face balayée. La Figure 9 indique comment sont représentées en vue éclatée, sur les figures suivantes, les cinq faces entourant la source.

La Figure 10 montre deux exemples de cartes d'intensité obtenues pour la source de test en configuration A pour les octaves centrées à 1 et 8 kHz. On peut y remarquer l'effet de la fréquence sur la directivité en azimut, déjà mentionné pour la caractérisation complète.

La cartographie de l'intensité acoustique rayonnée par les deux machines à

FIGURE 9

Représentation des cartes d'intensité
 Intensity chart representation

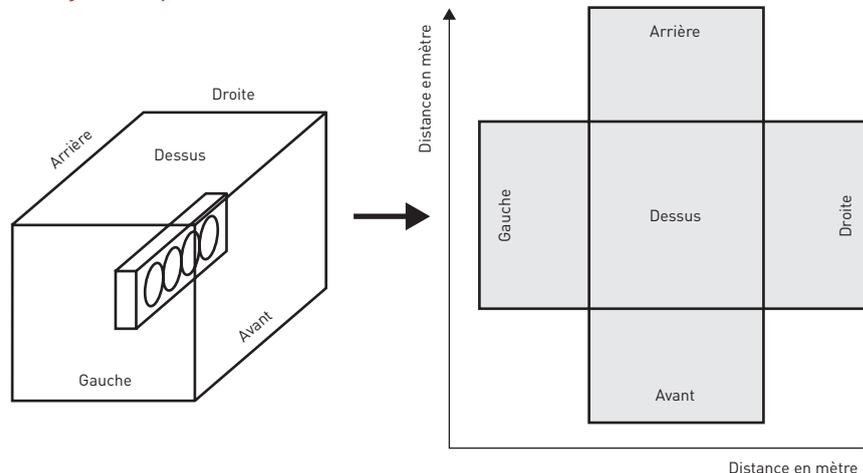


FIGURE 10

Source de test en configuration A : exemples de cartes d'intensité (1 kHz; 8 kHz)
 Test source in configuration A: examples of intensity mapping (1 kHz; 8 kHz)

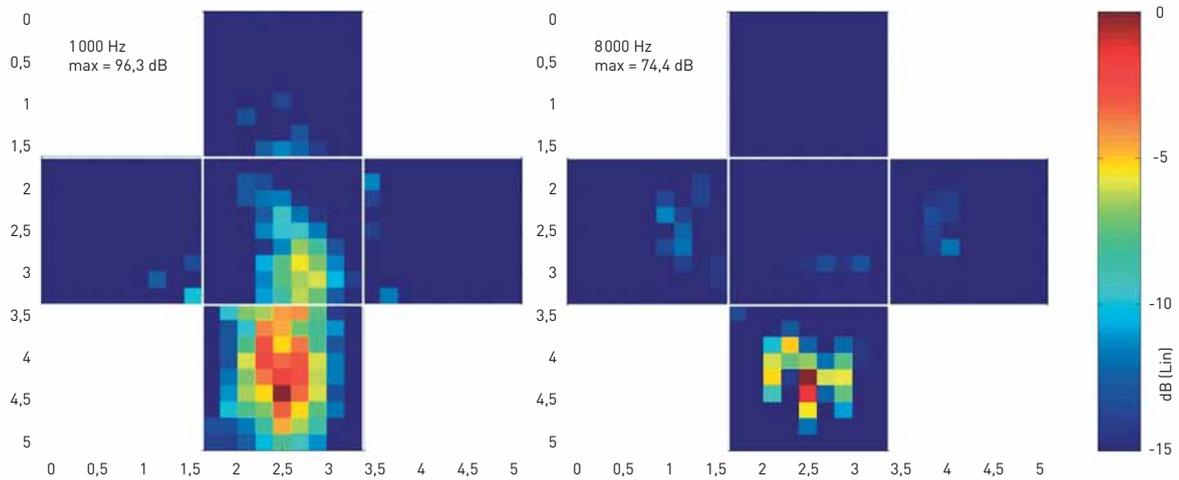
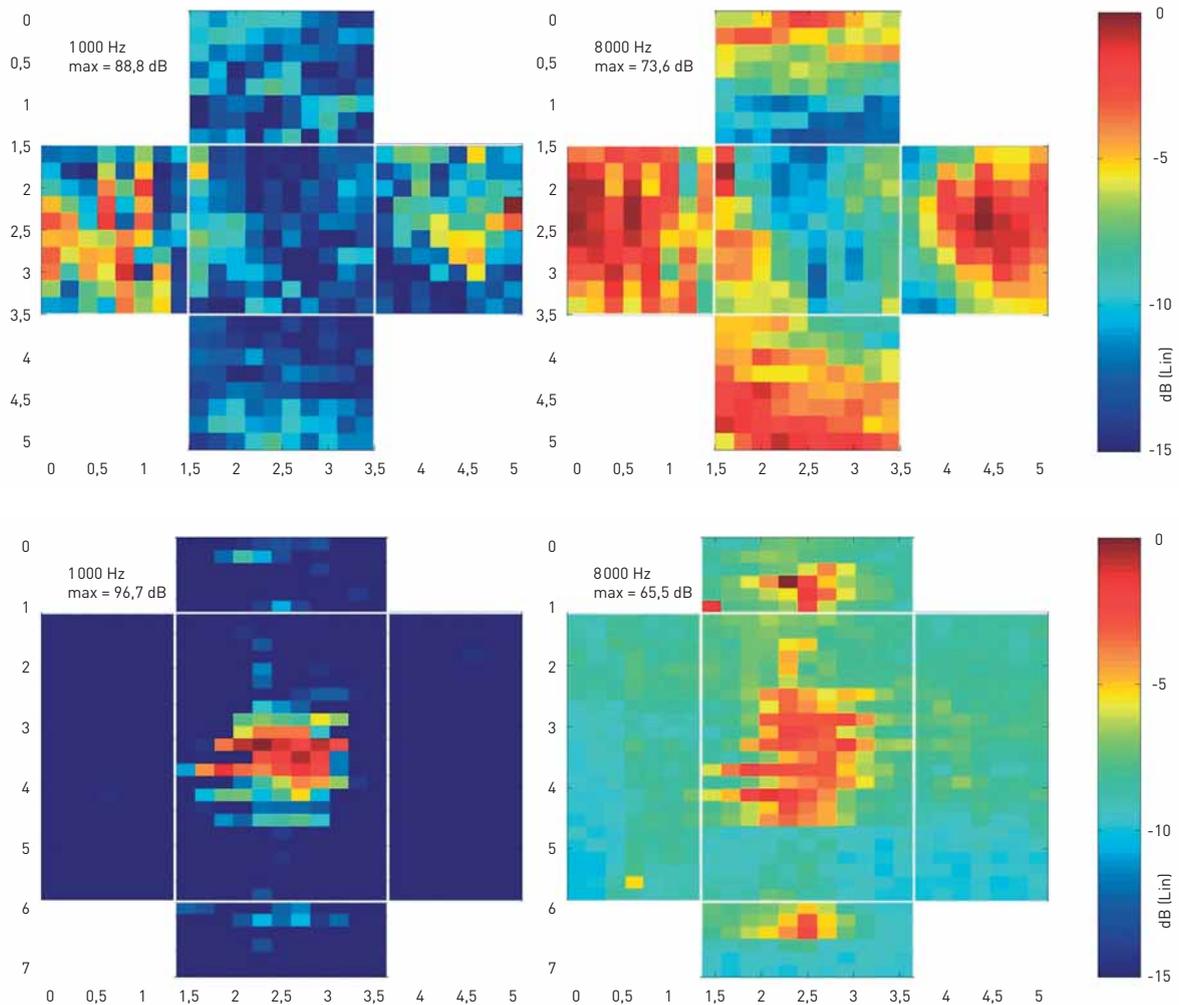


FIGURE 11

Raboteuse (haut) et dégauchisseuse (bas) ; exemples de cartographie d'intensité (gauche 1 kHz; droite 8 kHz)
 Planing (top) and surface-planing (bottom) machines; examples of intensity mapping (1 kHz left; 8 kHz right)



bois a été effectuée de la même façon que pour la source de test. Les faces du parallélépipède entourant les machines sont évidemment différentes de celles de la source de test puisque les dimensions des machines à bois sont plus grandes. La raboteuse est caractérisée en accumulant 80 pseudo-points sur les faces verticales et 100 pour le dessus du parallélépipède. La dégauchisseuse l'est en accumulant 70 ou 140 points par face verticale et 250 sur le dessus car c'est une machine plutôt longue et étroite.

La *Figure 11* montre deux exemples de cartographies de l'intensité acoustique rayonnée par chacune des machines pour les octaves centrées à 1 et 8 kHz. On y remarque que la raboteuse semble peu directive puisque les niveaux sont assez uniformes sur la représentation en fausses couleurs. Pourtant, les ouïes de chargement (à droite et à gauche sur la cartographie) montrent, en basse fréquence, des émissions plus énergétiques que le reste de la machine. En haute fréquence, cette observation n'est pas aussi claire car le spectre de la raboteuse est principalement en dessous de 2 kHz.

Pour la dégauchisseuse, l'outil se trouvant sur le dessus de la table est clairement la source de bruit, et la table

agit comme un réflecteur renvoyant les émissions les plus énergétiques vers le plafond du local. L'observation qualitative de telles cartographies semble indiquer que la dégauchisseuse est plus directive que la raboteuse.

Représentées en dB(A), les mêmes cartographies de l'intensité acoustique rayonnée montreraient des différences, entre deux faces du parallélépipède, qui atteindraient 4 à 6 dB(A).

Ces caractérisations simplifiées en intensité ne permettent pas d'estimer la directivité des sources selon la norme ISO 14257, comme cela a été montré pour les caractérisations complètes en pression. Pour comparer la directivité des trois sources, des index de directivité spécifiques peuvent être définis, par exemple en calculant l'intensité moyenne sur une ligne parcourant une face du parallélépipède, comparée avec les niveaux maximum et minimum trouvés sur cette ligne. Les lignes de comparaison ainsi définies peuvent parcourir les faces du parallélépipède dans deux directions : horizontale et verticale (*Figure 12*).

Pour une ligne de comparaison donnée, la différence des maxima et minima de la ligne avec sa valeur moyenne

est calculée pour définir, par tiers d'octave, les index de directivité spécifiques.

Même si ce calcul ressemble à celui effectué pour définir les index de directivité de la norme ISO 14257, les valeurs trouvées ne seront évidemment pas comparables, puisque l'on balaye, dans un cas, des cercles ou des demi-cercles sur un hémisphère, et, dans l'autre cas, les côtés d'un carré ou des lignes droites sur des plans.

La *Figure 13* montre les index calculés par cette dernière méthode. Les index de la source de test augmentent avec la fréquence, comme ceux calculés par la méthode décrite dans la norme ISO 14257 même si le balayage sur les côtés d'un carré conduisent à des index plus importants en basse fréquence que ceux attendus. Les valeurs des index de la raboteuse montrent que cette machine est beaucoup moins directive que la source de test. Au contraire, la dégauchisseuse est plus directive que la source de test en basse fréquence pour les balayages verticaux. Ces observations sont conformes aux premières observations effectuées sur les cartes d'intensité montrées en exemple sur la *Figure 11*.

FIGURE 12

Lignes de comparaison parcourant les faces du parallélépipède entourant la source, et nécessaires à l'établissement des index de directivité spécifiques
 Comparison lines running across faces of parallelepiped surrounding source; required for establishing specific directivity indices

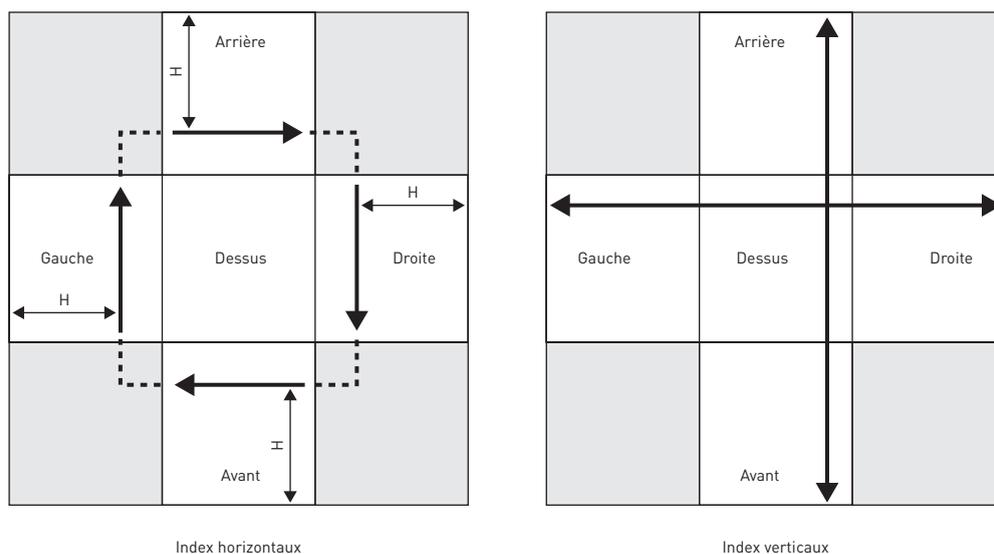
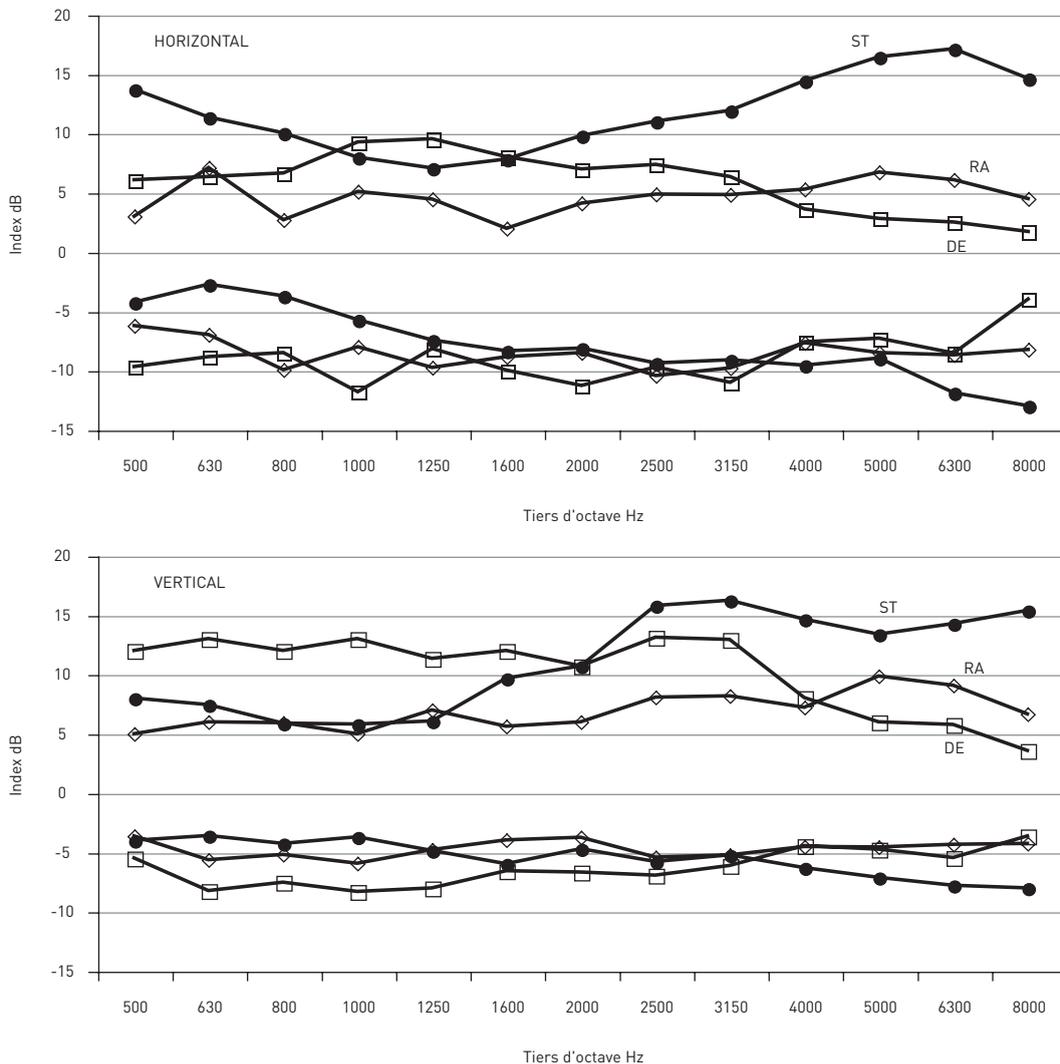


FIGURE 13

Index de directivité horizontaux et verticaux calculés sur les cartes d'intensité de la source de test (cercles noirs ST), la raboteuse (losanges blancs RA) et la dégauchisseuse (carrés blancs DE)

Horizontal and vertical directivity indices calculated from test source intensity charts (black circles ST), planing machine (white diamonds RA) and surface-planing machine (white squares DE)



INFLUENCE DE LA DIRECTIVITÉ SUR LE BRUIT RAYONNÉ EN LOCAL INDUSTRIEL

CRITÈRE DE COMPARAISON

La directivité d'une source étant évaluée, son influence sur le bruit rayonné en local industriel peut être estimée au moyen de simulations ou de mesurages. Dans les deux cas, cette influence est calculée, dans un bâtiment donné, en comparant le champ acoustique rayonné

par une source omnidirectionnelle avec celui induit par une source directive, ou bien en comparant le champ acoustique de la même source directive dont on modifiera l'orientation.

Dans un local industriel, le champ acoustique comporte deux zones distinctes :

■ le champ direct, proche de la source, qui influence principalement l'exposition sonore de l'opérateur de la machine. Dans ce cas, les niveaux de bruit sont étroitement liés à la puissance acoustique de la machine et à sa directivité, les caractéristiques acoustiques du local restant d'importance secondaire ;

■ le champ réverbéré, loin de la source, qui influence principalement les travailleurs se trouvant dans le reste du bâtiment. Les niveaux de bruit reçus sont toujours liés à la machine, mais, l'énergie sonore subissant de nombreuses réflexions sur les parois du local, ils sont alors très influencés par les caractéristiques acoustiques du bâtiment considéré.

Si l'on s'intéresse au premier point, la directivité - quantifiée - de la machine bruyante donne immédiatement une estimation de l'exposition sonore de l'opérateur, selon sa position au poste de travail. Comme nous sommes principa-

lement intéressés par le second point, les comparaisons de champ acoustique excluront les niveaux de bruit trop proches de la machine, par exemple ceux à moins de 4 mètres de la source. Cette distance n'est pas choisie au sens du champ proche de la source, comme il est classiquement défini en acoustique pour une grandeur de source et une longueur d'onde données, mais le choix résulte plutôt de considérations sur la position d'un opérateur devant une machine bruyante. En effet, un opérateur posté à plus de 4 mètres d'une machine n'est probablement pas l'opérateur de la machine en question.

Afin de donner des résultats indépendants du spectre de la source, la puissance acoustique de la source est soustraite, octave par octave, au bruit obtenu dans le bâtiment. Cette opération conduit à définir des cartographies en bruit rose dans les bâtiments testés. De plus, les résultats sont pondérés (A) afin d'être évalués comme des résultats classiques d'exposition sonore. Ces cartographies du bruit mesuré ou simulé en local industriel se présentent comme des ensembles de cellules décrivant un plan parallèle au plancher du local et situé à la hauteur des oreilles d'un opérateur. On compare alors deux cartographies en soustrayant, octave par octave, les niveaux de bruit des mêmes cellules obtenus dans chacun des cas (source omnidirectionnelle comparée à source directive, ou même source directive comparée sur deux orientations différentes). Pour simplifier l'analyse des résultats, des histogrammes des différences obtenues sont ensuite analysés. La *Figure 14* décrit ce processus : le nombre de cellules conduisant à une différence donnée construit l'histogramme en ordonnée, fonction de la différence en abscisse.

LOGICIEL DE SIMULATION UTILISÉ

Dans le cas des simulations, un logiciel d'acoustique prévisionnelle permet de calculer le niveau de bruit rayonné dans un bâtiment industriel. Ce logiciel (RayPlus Acoustique, développé par l'INRS) est basé sur un modèle de tirs de rayons et de réflexions spéculaires sur des plans définissant le local. Chaque réflexion sur un plan, caractérisé par son coefficient « alpha Sabine », permet au rayon de perdre de l'énergie par absorption. Quand un rayon croise une cellule de réception, son énergie est accumulée

dans la cellule, jusqu'à convergence des niveaux dans les cellules. Le code de calcul de ce logiciel, au départ capable de simuler plusieurs sources omnidirectionnelles, a été modifié afin d'accepter la directivité d'une source. Le logiciel est alors limité à la simulation d'une seule source et cette restriction ne permet d'envisager que la source de test en configuration C (source et source image confondues). Les autres configurations de la source de test, comme les machines à bois, comportant toutes des sources secondaires, ne peuvent être simulées par ce code modifié. Pour les comparaisons, le même code de calcul modifié est utilisé, que la source soit omnidirectionnelle ou directive.

BÂTIMENTS SIMULÉS

Une base de données de dix bâtiments industriels a été utilisée pour les simulations. Les caractéristiques acoustiques et dimensionnelles de ces bâtiments industriels typiques sont connus grâce aux relevés effectués par des préventeurs. Leurs dimensions varient de 22 à 75 mètres (longueur), de 7 à 40 mètres (largeur) et de 3,7 à 11,1 mètres (hauteur). Ils peuvent être à toit plat ou à sheds et peuvent éventuellement être décrits par de nombreux détails architecturaux (portes, fenêtres, murs hétérogènes, etc.).

Chaque bâtiment est simulé avec son traitement acoustique constaté sur le terrain mais aussi avec quatre autres traitements fictifs : deux plus absorbants et deux plus réverbérants. Ce choix des traitements des murs et plafonds (les planchers industriels restent en béton) permet de définir cinq classes de bâtiments simulés, depuis les plus réverbérants (coefficient Sabine moyen d'environ 0,06) jusqu'au plus assourdis (coefficient Sabine moyen d'environ 0,9).

Chaque bâtiment peut aussi être vide ou encombré. Dans le cas d'un bâtiment dit encombré, une absorption volumique et une diffusion des rayons sont prises en compte dans un volume étalé sur toute la surface du plancher et s'arrêtant à une hauteur de 1,5 mètre du plancher. Ce volume ajouté permet de simuler un bâtiment encombré par des machines, stocks, mobilier, etc. Ses caractéristiques font que le libre parcours moyen d'un rayon dans le volume est de l'ordre de 2,5 m avant absorption

(partielle) et diffusion dans une direction aléatoire.

La source omnidirectionnelle ou directive est posée dans un coin du local (à 4 m de chacun des murs du coin). Dans le cas de la simulation de la source de test en configuration C, le lobe principal du diagramme de directivité peut être pointé dans quatre directions différentes, repérées ouest, est, nord et sud, comme si l'on voyait le bâtiment industriel par le dessus dans un repère géographique.

Ces configurations permettent de définir 400 cas de simulations : 10 bâtiments, 5 traitements acoustiques, 2 cas d'encombrement, 4 cas d'orientation de source chacun comparé à la source omnidirectionnelle placée dans les mêmes conditions.

RÉSULTATS DES SIMULATIONS

Les résultats des simulations, pour les 50 bâtiments et les 4 orientations de source, sont les suivants :

1) la différence entre les champs obtenus lorsque la source est directive et lorsqu'elle est omnidirectionnelle est en moyenne de 4,2 dB(A) lorsque les bâtiments sont vides. Cette moyenne diminue à 2,5 dB(A) quand ils sont encombrés ;

2) le pourcentage des cellules dont les niveaux restent dans l'intervalle ± 1 dB(A) autour des valeurs moyennes précisées ci-dessus est en moyenne de 77 % lorsque les bâtiments sont vides. Cette moyenne croît à 92 % quand ils sont encombrés.

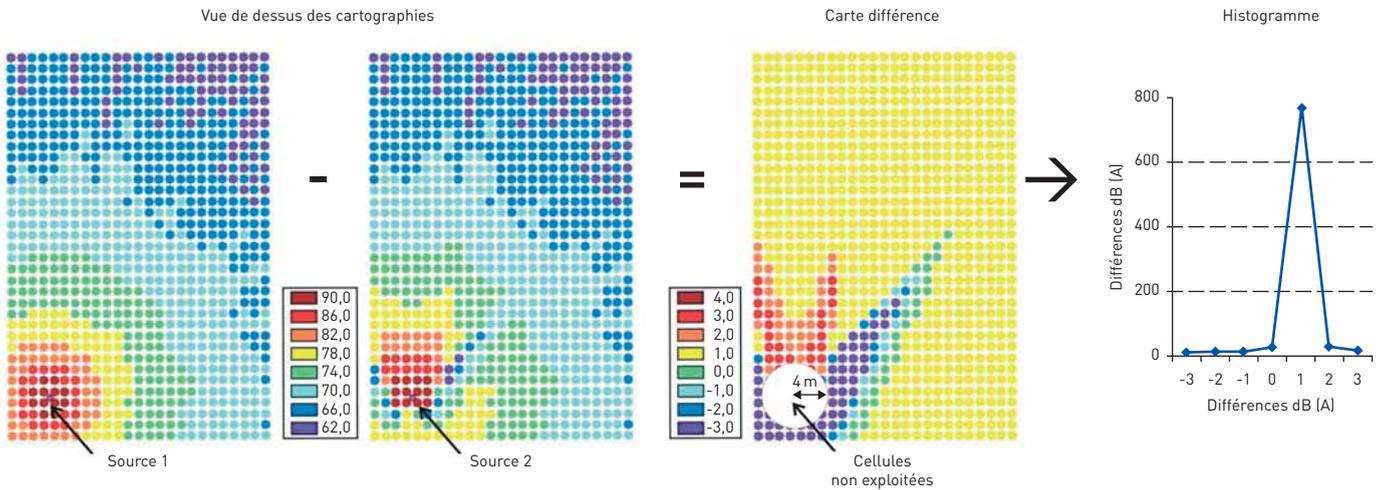
Une analyse plus fine des résultats, non détaillée ici, a permis de vérifier si la variabilité des différences de champ sonore était liée à certains paramètres de simulation. D'une part, à traitement acoustique équivalent, quel que soit le bâtiment, les différences de champ sont du même ordre de grandeur. D'autre part, pour un même bâtiment, quel que soit le traitement acoustique, il n'y a pas non plus de différences notables.

Ces constatations ne montrent aucune cohérence entre les différences de champ et les paramètres de simulation (type du bâtiment, traitement acoustique). Seul l'encombrement du bâtiment semble jouer un rôle prépondérant dans les différences de champ.

FIGURE 14

Critère de comparaison : histogramme des cartographies différences

Comparison criterion: histogram of mapping differences



Des études antérieures ont montré que la précision globale du logiciel était de l'ordre de 1 à 3 dB(A). Comme les simulations ne montrent pas de différence moyenne entre les champs plus grande que 3 dB(A) dès que le bâtiment est encombré, on en déduit qu'il n'y a pas de différence notable entre la source omnidirectionnelle et la source directive, dès que la bâtiment contient suffisamment d'objets capables de provoquer une diffusion importante des ondes acoustiques. Au contraire, dans les bâtiments vides, la directivité de la source a une influence directe sur la distribution des niveaux sonores, mais cette influence n'est pas liée de façon explicite aux caractéristiques du bâtiment.

ESSAIS

Différents essais ont été effectués dans deux halls de taille moyenne. Le premier est vide et réverbérant (coefficient Sabine moyen de 0,26) et mesure 30 m x 7,7 m x 3,7 m. Le deuxième est un petit atelier de production encombré par des machines à bois, du stock, du mobilier, des gaines de ventilation ou d'aspiration, etc. Ses dimensions sont 26 m x 11 m x 8,3 m, et il est aussi assez réverbérant avec un coefficient Sabine moyen de l'ordre de 0,2.

Dans les deux ateliers, les comparaisons des champs mesurés s'effectuent entre les niveaux sonores provoqués

TABLEAU I

Résultats expérimentaux (Vm : valeur moyenne des différences de champ sonore ; Pm : pourcentage des cellules dont les niveaux restent à ± 1 dB(A) de la valeur moyenne). Abréviations : ST (source de test), SO (source omnidirectionnelle)
 Experimental results (Vm = mean value of noise field differences; Pm = percentage of cubicles in which noise levels remain at mean value ± 1 dB(A)). Abbreviations: ST (test source), SO (omnidirectional source)

	Configuration des sources	Vm	Pm
Atelier vide	ST (config. A) et ST (config. B)	2 dB(A)	97 %
	SO et ST (config. C)	3 dB(A)	96 %
	SO et scie orientée au sud	3 dB(A)	100 %
	SO et scie orientée à l'ouest	3 dB(A)	98 %
	Scie orientée au sud et scie orientée à l'ouest	0 dB(A)	99%
Atelier encombré	SO et ST (config. C) orientée au sud	2 dB(A)	80 %
	SO et ST (config. C) orientée à l'ouest	1 dB(A)	84 %
	Raboteuse orientée à l'ouest et orientée au nord	0 dB(A)	75 %
	SO et dégauchisseuse	2,5 dB(A)	67 %

par une source omnidirectionnelle et une source directive, ainsi qu'entre deux orientations différentes de la même source directive.

La source omnidirectionnelle est la source MARTA dont le spectre est bien connu et dont les index de directivité sont en accord avec la norme ISO 14257.

La source de test (dans les configurations A, B, ou C), la scie, la raboteuse et la dégauchisseuse décrites précédemment sont utilisées comme sources

directives. Ces sources sont soit orientées différemment soit remplacées par la source omnidirectionnelle selon les essais (voir le Tableau I). Les machines à bois fonctionnent toujours à vide (comme lors de leur caractérisation) afin d'obtenir un champ stable durant le temps de mesure.

Dans le premier hall, les cartes de champ sont construites par 6 x 28 mesures de pression effectuées sur des microphones déplacés sur une grille métrique, sur toute la surface du sol puisque ce

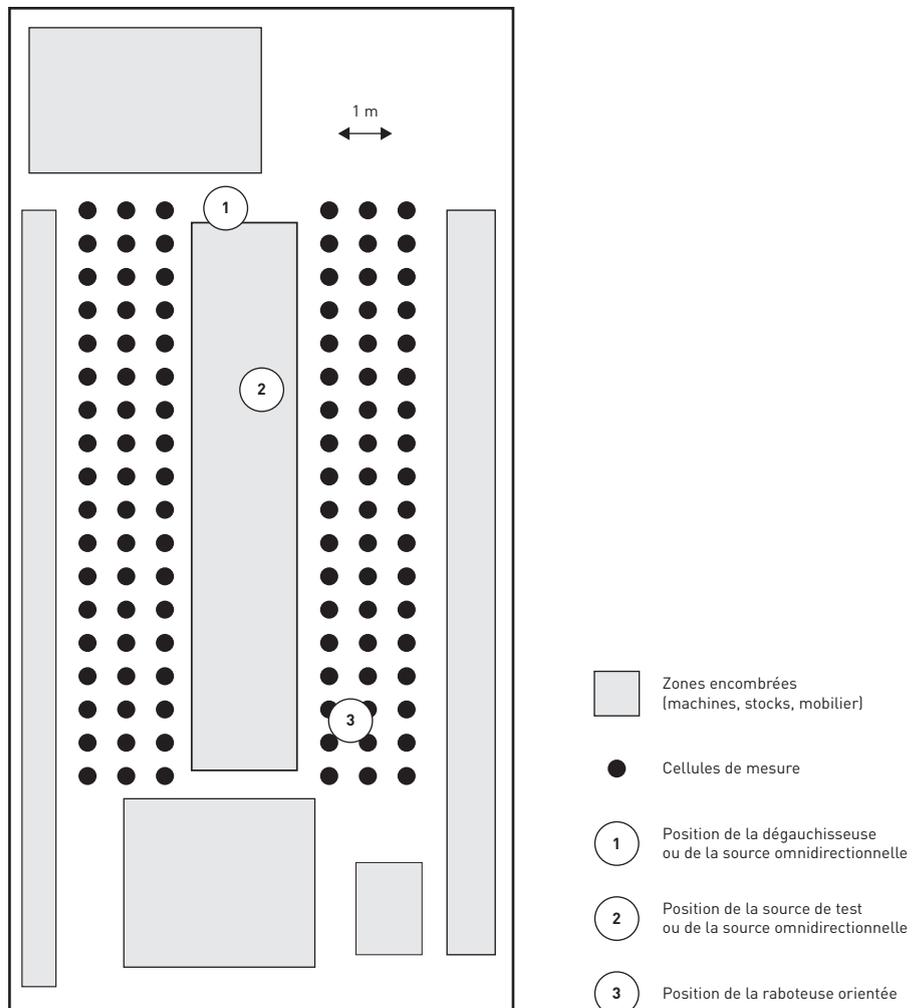
bâtiment est vide. Dans le deuxième atelier, deux longs couloirs permettent de déployer les microphones sur 6 lignes de 18 cellules (Figure 15), la surface restante étant très encombrée. Comme dans le cas des simulations, les comparaisons sont exploitées au moyen d'histogrammes des différences calculées cellule par cellule, après avoir soustrait aux spectres mesurés le spectre d'émission de la source (pour obtenir un bruit rose). De nouveau, les cellules à moins de 4 mètres de la source sont exclues de la comparaison. Le Tableau I montre les résultats des expérimentations.

Dans le hall vide, la directivité de la source de test conduit à des modifications moyennes du champ atteignant 3 dB(A). Les histogrammes obtenus, très étroits, montrent que presque toutes les cellules donnent des différences comprises dans un intervalle à ± 1 dB(A) de la valeur moyenne. Même si la source de test est assez directive, les comparaisons entre les champs provoqués quand on change son orientation, ou quand on la remplace par la source omnidirectionnelle, montrent que la distribution des niveaux sonores est à peu près la même. La scie provoque des différences, avec la source omnidirectionnelle, du même ordre que la source de test, même si sa directivité est plus faible, mais les champs mesurés quand la scie est tournée de 90° sont pratiquement identiques. Ceci est probablement dû au diagramme de directivité symétrique de la scie, avec une forme d'ailes de papillon à $\pm 45^\circ$ d'une parallèle à la lame (Figure 7).

Dans l'atelier encombré par de nombreux objets diffusants, les différences sont moins importantes, mais les histogrammes un peu plus étalés. Comparées à la source omnidirectionnelle, la source de test conduit à des différences de champ de l'ordre de 1 à 2 dB(A) en moyenne et la dégauchisseuse à des différences de 2,5 dB(A). Si ces valeurs peuvent être considérées à l'intérieur de l'intervalle de précision de la mesure, les différences de champ ne sont pas réellement significatives. La raboteuse ne provoque pas de différences de champ selon son orientation dans le hall encombré, ce qui s'explique aussi bien par sa faible directivité que par la diffusion due à l'encombrement. Finalement, la diffusion par tous les objets présents dans le deuxième atelier contribue à diminuer l'influence de la directivité des

FIGURE 15

Atelier de production vu de dessus
Production workshop seen from above



sources et conduit à un champ relativement comparable à celui d'une source omnidirectionnelle.

DISCUSSION

Les directivités de trois machines à bois ont été caractérisées par deux méthodes. La méthode d'intensimétrie par balayage a été validée et permet une estimation rapide de la directivité dans un local industriel. Dans la bande de fréquence étudiée, qui correspond à la gamme d'intérêt pour la prévention des surdités professionnelles, les index de directivité des machines à bois ont été quantifiés en utilisant la norme ISO

14257 ou bien une mesure équivalente. Les résultats montrent des machines relativement peu directives. Cette constatation ne suffit pas à prouver que le champ sonore provoqué par de telles machines dans un local industriel est équivalent à celui provoqué par une source omnidirectionnelle.

C'est pourquoi le champ sonore a été simulé dans le cas d'une source directive à l'intérieur d'un ensemble de bâtiments industriels différents par leurs caractéristiques acoustiques, dimensionnelles ou d'encombrement. Les cartes de bruit calculées ont été comparées à celles induites par une source omnidirectionnelle. Les différences atteignent en moyenne 4 dB(A) à distance de la source. Elles montrent que la répartition du champ acoustique est

bien liée à la directivité de la source dans un bâtiment vide. Par contre, cette répartition n'est pas clairement liée aux caractéristiques du bâtiment. Dès que le bâtiment n'est plus vide mais contient des objets participant à la diffusion des ondes acoustiques, le champ sonore n'est plus très différent - en moyenne 2,5 dB(A) - que la source soit directive ou non.

Les essais effectués dans deux halls industriels confirment ces observations. Le champ sonore est bien influencé par la directivité de la source dans un bâtiment vide mais l'influence de la directi-

tivité de la source est atténuée par la diffusion dès que le bâtiment est encombré.

Avec les machines testées dans cette étude, on déduit que l'exposition sonore des travailleurs travaillant loin des sources bruyantes est quasi indépendante de la directivité des machines, dès que l'atelier est encombré, ce qui est évidemment le cas de la majorité des halls de production.

Néanmoins, les cartographies de l'intensité acoustique effectuées lors de l'étape de caractérisation de la directi-

tivité des machines montrent que l'exposition sonore des travailleurs au poste de travail peut varier de 4 à 8 dB(A) selon leur position devant la machine bruyante. La position de l'opérateur en champ proche reste un facteur fondamental de l'exposition sonore.

Reçu le : 26/10/2005

Révisé le : 29/06/2006

Accepté le : 03/07/2006

BIBLIOGRAPHIE

[1] ISO 3745:2003 Décembre 2003 - Acoustique. Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique - Méthodes de laboratoire pour salles anéchoïques et semi-anéchoïques.

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

[3] ISO 9614-1:1993 Juin 1993 - Acoustique. Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit. Partie 1 : mesurages par points

[4] ISO 9614-2:1996 Août 1996 - Acoustique. Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit. Partie 2 : mesurages par balayage.

[5] 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.

[6] A. M. ONDET and J. L. BARBRY - Modelling of sound propagation in fitted workshops using ray tracing. J. Acoust. Soc. Am. 85, 787 (1989)