

HIÉRARCHISER LES ACTIONS DE RÉDUCTION TECHNIQUE DU BRUIT

Simulations numériques de l'exposition au bruit professionnel

- Bruit
- Acoustique prévisionnelle
- Simulation
- Machine

► *Léon THIERY,*
INRS, département Ingénierie des équipements
de travail

PRIORITISING NOISE REDUCING TECHNICAL ACTIONS DIGITAL SIMULATIONS OF OCCUPATIONAL NOISE EXPOSURE

An original analytical model has been used to simulate the impact of noise control measures for reducing daily noise exposure levels on noisy machines in the design of workstations and workplaces and the acoustics of industrial halls. Validated by real data, this model has been applied to simulating several occupational noise exposure situations and quantifying predictable acoustic improvements, when various noise reduction actions based on technical and organisational means are implemented. Results are discussed in relation to workstation and exposure situation typology. They highlight lines of action to be favoured at workshop design stage to achieve significant reductions in noise exposure and emphasise the advantage of acting at source through actions to curtail machine-emitted noise.

- Noise
- Predicted acoustics
- Simulation
- Machine

Un modèle analytique original a été utilisé pour simuler l'impact, dans un bilan d'exposition quotidienne au bruit au poste de travail, d'actions de réduction du bruit par des moyens techniques portant sur les machines, sur les postes de travail ou sur les locaux. Validé à l'aide de données réelles, ce modèle a été appliqué à la simulation de plusieurs types de situations d'exposition au bruit professionnel et à la quantification des gains acoustiques prévisibles quand différentes actions de réduction du bruit par des moyens techniques ou organisationnels sont mises en œuvre. Les résultats sont discutés en fonction de la typologie des postes de travail et des situations d'exposition. Ils mettent en évidence les voies d'action à privilégier en phase de conception d'un atelier pour obtenir des réductions d'exposition au bruit significatives et soulignent l'intérêt d'agir à la source, par des actions de réduction du bruit émis par les machines.

La prévention collective des risques liés à l'exposition au bruit professionnel passe par la réduction du bruit des machines et des équipements de travail, par la conception des postes de travail et par la correction acoustique des locaux [1, 2]. En considérant ces voies d'action, peut-on prévoir leur impact respectif pour atteindre un objectif de réduction de l'exposition au bruit aux postes de travail et en tenir compte quand il s'agit de concevoir un atelier ou de modifier son implantation ?

Les exigences réglementaires [1] étant basées sur le niveau d'exposition quotidienne au bruit - $L_{EX,8h}$ - il est indispensable de poser cette problématique en considérant les fluctuations quotidiennes du bruit reçu aux postes de travail. Or, ceci ne peut pas être aisément pris en compte dans les méthodes d'acoustique prévisionnelle [3, 4]. Dans le mesurage de l'exposition des travailleurs, ces fluctuations apparaissent bien mais ce type de mesure ne permet

pas de distinguer les diverses contributions des machines dans le bruit reçu à un instant donné, sauf dans quelques situations exceptionnelles [5].

C'est pourquoi un modèle original de l'exposition au bruit professionnel a été utilisé. A partir d'une description simplifiée du bruit émis par les machines, de la localisation des postes de travail et des caractéristiques acoustiques du local [6, 7], ce modèle estime le bruit reçu aux postes de travail en quantifiant les contributions de chaque source de bruit. De ce fait, il est possible d'évaluer l'impact d'action de réduction et de comparer leur efficacité en fonction d'une typologie des situations d'exposition.

La démarche suivie ici a consisté en premier lieu à simuler une situation réelle afin de montrer comment le modèle a été validé. Ensuite, des situations d'exposition professionnelle de divers types ont été simulées. Enfin, par comparaison des diverses simulations, on en déduit les voies de réduction

du bruit qu'il convient de privilégier, en fonction de la typologie des situations d'exposition.

Les résultats principaux sont présentés ici mais des précisions supplémentaires sont disponibles dans un autre document [8]. Le lecteur intéressé pourra y trouver une description détaillée du modèle et de sa validation, les résultats de simulations non présentées ici et des compléments sur l'incertitude d'estimation de l'exposition au bruit.

MÉTHODOLOGIE

MODÉLISATION DE L'EXPOSITION AU BRUIT

Le modèle analytique de l'exposition au bruit professionnel [8] prend en compte trois familles de paramètres :

■ les sources de bruit principales identifiées parmi les machines, les équipements de travail, les opérations manuelles bruyantes, chaque source m est définie par son emplacement et son émission acoustique $L_w(m)$;

■ l'absorption acoustique du local, prise en compte par la pente de décroissance du bruit par doublement de distance [2, 6, 7], notée DL^1 ;

■ le travail des opérateurs : il doit être scindé en plusieurs tâches, chacune étant définie par une zone de travail z et par la durée relative quotidienne de présence de l'opérateur dans chaque zone, $T(z)$.

Le contrôle de la distance séparant l'opérateur des machines bruyantes est un paramètre clé du modèle. Si une tâche doit être effectuée à proximité immédiate d'une machine bruyante m (intervention sur la machine en marche, par exemple), une zone de travail spécifique z , très proche de la machine, doit être définie ; leur distance est notée $R(z,m)$. Les autres tâches seront modélisées par des zones plus éloignées.

Quand l'opérateur est présent dans la zone de travail z , on évalue le bruit qu'il reçoit en distinguant les contributions de chaque source de bruit m . Ceci a été modélisé par une fonction analytique du niveau de pression acoustique $L_p(z,m)$, qui dépend en fait de trois variables : $L_w(m)$ niveau de puissance

acoustique de la machine m , $R(z,m)$ distance séparant la zone z de la machine m , DL caractéristique de l'absorption acoustique du local. La durée de présence de l'opérateur dans la zone z étant $T(z)$, on en déduit une exposition sonore partielle $E(z,m)$, exprimée en $Pa^2 \cdot h$ et définie par :

$$E(z,m) = T(z) * (0.32E-8) * 10^{0.1 L_p(z,m)}$$

Dans la suite de ce texte, l'exposition sonore partielle $E(z,m)$, reçue dans une zone z du fait du bruit émis par la source m , sera exprimée en points d'exposition, selon l'équivalence suivante :

100 points d'exposition = 1 $Pa^2 \cdot h$ = exposition à un niveau de bruit de 85 dB(A) durant 8 h.

L'intérêt de l'exposition sonore partielle $E(z,m)$ est d'être additive simplement [9], ce qui n'est pas le cas avec les niveaux de bruit exprimés en décibels. Ainsi l'exposition quotidienne d'un travailleur résulte de la somme des termes $E(z,m)$ sur l'ensemble des machines (ou sources de bruit) m et sur l'ensemble des zones de travail z occupées par ce travailleur durant sa journée de travail.

La description complète de ce modèle a été donnée ailleurs [8] mais quelques précisions peuvent être signalées :

■ pour refléter les nombreuses imprécisions des données, une incertitude est attribuée à toutes les variables d'entrées du modèle et le résultat final quantifie l'incertitude sur $L_{EX,8h}$ en indiquant d'où elle provient ;

■ pour interpréter les termes d'exposition sonore partielle $E(z,m)$, il faut tenir compte des valeurs respectives de $L_w(m)$ et de $R(m,z)$;

■ trois expressions analytiques du modèle ont été utilisées pour tenir compte de la propagation acoustique en champ lointain (quand $R > 3$ m), en champ proche ($R \leq 1$ m) et dans l'espace intermédiaire ;

■ la validation du modèle a été effectuée à l'aide de valeurs mesurées dans un local d'essai et dans plusieurs ateliers réels.

D'UNE SITUATION D'EXPOSITION RÉELLE À SA MODÉLISATION

Une configuration réelle d'exposition au bruit professionnel, prise dans une menuiserie industrielle, a été simu-

lée en premier lieu. Cette entreprise ayant fait l'objet d'une étude d'acoustique prévisionnelle, les données mesurées sur site ont permis de valider le modèle utilisé ici. A partir de cette simulation initiale et en ne changeant qu'un petit nombre des paramètres d'entrée du modèle, il a été possible de simuler des situations d'exposition très différentes de la configuration initiale.

Quelles sont les caractéristiques de cette situation de travail ? Dans un secteur d'une grande menuiserie industrielle, on s'intéresse à un opérateur qui subit le bruit de 6 machines très bruyantes alors que son travail est non bruyant en lui-même. Sa tâche principale (pendant environ 80 % du temps) consiste à trier des pièces de bois en sortie d'une opération de sciage de petites pièces, réalisée par d'autres opérateurs sur deux scies identiques et alimentées en continu. Cette tâche de tri se déroule dans une zone étendue (d'environ 15 m²), située à une distance comprise entre 1 et 7 m des scies. Trois machines bruyantes composant une ligne automatique de ponçage sont situées à environ 7 m de la zone de tri. Cet opérateur a également une tâche de manutention (pendant environ 20 % du temps) qui se déroule dans une zone de travail plus éloignée des sources de bruit.

Lors de l'étude réalisée dans cette entreprise, le niveau d'exposition quotidienne au bruit $L_{EX,8h}$ mesuré pour cet opérateur s'élevait à 88 dB(A). De nombreuses autres informations furent collectées : désignation et emplacement des machines, mesure de leurs niveaux de puissance acoustique, mesure de DL pour quantifier l'absorption acoustique du local. Pour les machines, les résultats principaux sont indiqués dans le *Tableau 1*. Pour le local, les mesures de DL étaient comprises entre 3,8 et 4,7 dB(A). Les informations collectées sur site ont été prises comme données d'entrée du modèle pour simuler la configuration initiale, avec une valeur de DL fixée à 4 dB. Par la simulation, on a estimé que le niveau du bruit $L_{EX,8h}$ était égal à 87,8 dB(A). Les valeurs simulées et mesurées de $L_{EX,8h}$ étant très proches, la simulation initiale est validée.

¹ La valeur du paramètre DL est comprise entre 0 et 6 dB. Dans un local industriel réverbérant (sans aucun traitement acoustique) la valeur de DL peut être voisine de 2 dB ; dans un local absorbant (avec un bon traitement acoustique), elle peut être proche de 5 dB.

D'autres comparaisons ont permis également de valider la modélisation [8].

Dans la suite de cette présentation, les simulations seront présentées sur une figure comprenant deux parties (cf. Figure 1) :

■ un plan schématique d'atelier. La position des machines bruyantes a été indiquée par des ronds rouges. Le repérage des machines (de M1 à M6) permet de consulter les précisions du *Tableau 1*. Les zones de travail ont été spécifiées par des rectangles verts. Leur désignation (Z1, Z2, etc.) et la durée de présence quotidienne de l'opérateur (en %) dans chaque zone sont indiquées.

■ un graphique composé de barres indiquant le résultat de la simulation. La hauteur de chaque barre quantifie, en points d'exposition, l'exposition sonore partielle $E(z,m)$. A chaque zone de travail correspond une couleur spécifique pour les barres indiquant les contributions des machines. Le résultat global est indiqué en points et en niveau de bruit $L_{EX,8h}$ en dB(A).

POSTES DE CONDUITE DE MACHINES BRUYANTES

Pour simuler un poste de conduite de machine bruyante, on modifie dans la configuration initiale la zone de travail principale de l'opérateur, en réduisant son étendue et la distance R entre la zone de conduite et la machine (M5). Ici, R est compris entre 1 et 3 m.

La *Figure 2* montre que la contribution de la machine conduite par l'opérateur est devenue prépondérante dans le bilan d'exposition. Les postes de conduite de machines bruyantes ont fait l'objet d'autres simulations, qui toutes ont mis en évidence le même résultat : dès qu'un opérateur est contraint par la nature de son travail à demeurer à courte distance d'une machine bruyante pendant un pourcentage notable de son temps de travail, cette machine bruyante détermine principalement l'exposition de cet opérateur. Dans des situations réelles, il est possible qu'un poste de conduite sur machine soit situé non pas à 2 m environ de distance de la machine (comme dans la simulation) mais encore plus près. Dans ce cas, il est certain que l'exposition au bruit sera accrue, avec une contribution de la machine conduite encore plus prépondérante que sur l'exemple de la *Figure 2*.

TABLEAU 1

Désignation des machines et caractéristiques de leur émission acoustique. La tâche principale de l'opérateur se situe en sortie des scies M4 et M5

Repère	Désignation	Niveau de puissance acoustique, L_w dB(A)	Incertitude sur L_w dB(A)	Régime d'utilisation de la machine
M1	Délinieuse	100,7	2	Permanent
M2	Ponceuse A	103,7	2	Permanent
M3	Ponceuse B	102	2	Permanent
M4	Scie circulaire	100	2	Permanent
M5	Scie circulaire	100	2	Permanent
M6	Broyeur	105	4	Intermittent : 6 % du temps (soit 30 min / 8 h)

FIGURE 1

Simulation de l'exposition au bruit dans un poste de tri

(a) partie gauche : schéma d'atelier montrant les emplacements des machines (repérées de M1 à M6) et les 2 zones de travail (repérées Z1 et Z2, avec le pourcentage de temps passé quotidiennement dans chaque zone).

(b) partie droite : exposition sonore partielle reçue par l'opérateur quand il est présent dans une zone de travail (Z1, Z2) du fait du bruit émis par une machine (de M1 à M6), exprimée en points d'exposition (100 points = 85 dB(A) pendant 8 h).

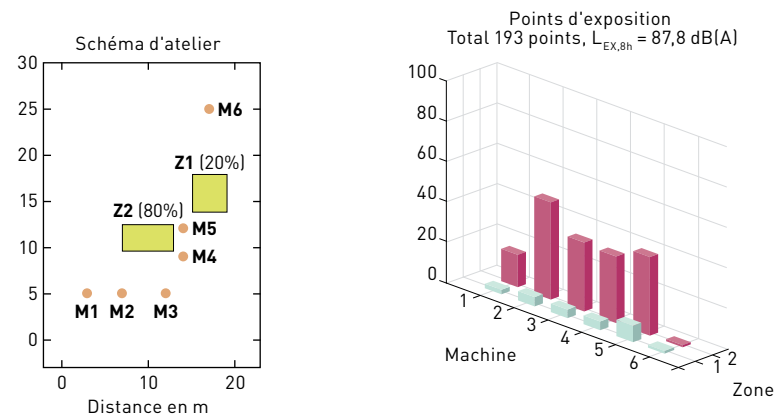
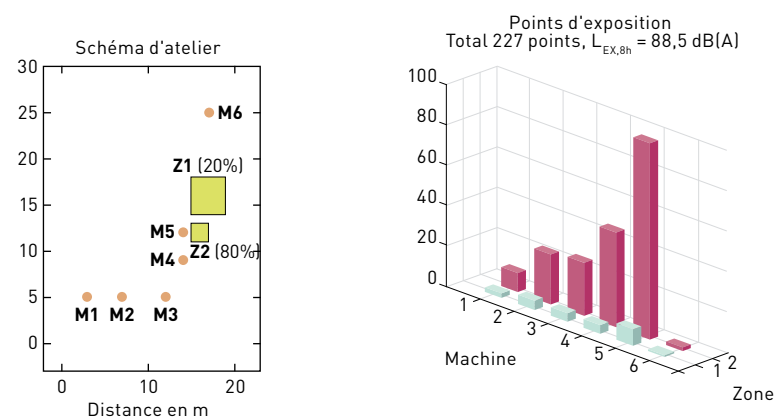


FIGURE 2

Simulation d'un poste de conduite de machine bruyante (situé à 2 m environ de la machine 5)

(a) Schéma d'atelier ; (b) exposition sonore partielle reçue par l'opérateur.



On en conclut que pour réduire efficacement l'exposition au bruit à un poste de conduite de machine bruyante, il est nécessaire de réduire l'exposition sonore partielle liée à la machine conduite. Ceci est envisageable en réduisant le temps de présence de l'opérateur à proximité immédiate de la machine qu'il conduit ou en réduisant le bruit émis par la machine.

RÉDUIRE LE TEMPS DE PRÉSENCE PRÈS DES SOURCES DE BRUIT

Supposons qu'une tâche de type « conduite d'une machine bruyante » puisse être assumée correctement sans que l'opérateur soit contraint de demeurer « en permanence » à moins de 3 m de distance de sa machine. Dans cette éventualité, quel serait l'impact dans l'exposition au bruit de cet opérateur d'une réduction de son temps de présence à proximité immédiate de la machine qu'il conduit ?

Pour répondre à cette question, reprenons la configuration de la *Figure 2* en réduisant à 60 % (au lieu de 80 %) le pourcentage du temps de l'opérateur dans la zone la plus exposée, au profit de la zone qui l'est moins. Les résultats de la simulation sont indiqués dans le *Tableau II*. Le gain s'élève à 29 points. Le niveau du bruit $L_{EX,8h}$ est réduit de 0,6 dB(A).

On en conclut que la réduction du temps de présence à proximité de la machine bruyante est une voie d'action qui ne peut être négligée, mais l'exemple proposé ici montre qu'une telle action ne permettra pas d'abaisser significativement le niveau d'exposition quotidienne au bruit pour des postes de travail du type conduite de machine bruyante.

RÉDUIRE LE BRUIT ÉMIS PAR LES MACHINES

Considérons le poste du conducteur de machines bruyantes (cf. *Figure 2*) en supposant que le bruit émis par les machines 4 et 5 soit réduit de 5 dB par un changement d'outillage. S'agissant de deux scies circulaires, le gain de 5 dB correspond au remplacement de lames de scies classiques par des lames multicouches à bruit réduit. Le résultat (cf. *Tableau III*) montre une réduction de 2,8 dB du niveau $L_{EX,8h}$. Le gain

devient significatif, alors que ce n'était pas le cas par la réduction du temps de présence de l'opérateur auprès de la machine bruyante. On en conclut que la réduction de l'exposition au bruit à des postes du type conduite de machines bruyantes passe prioritairement par la réduction du bruit émis par ces machines bruyantes.

ENCOFFRER LES MACHINES AUTOMATIQUES BRUYANTES

En présence de machines bruyantes ayant un mode de fonctionnement automatique, leur encoffrement est une possibilité pour réduire la propagation du bruit émis. Quel est l'impact d'un encoffrement sur deux types de postes de travail ?

Considérons tout d'abord le poste de conduite d'une machine bruyante (M5) et la configuration de la *Figure 2*. Pour simuler l'encoffrement des machines (M4 et M5), on suppose qu'il équivaut à une réduction de 8 dB de leur niveau de puissance acoustique. Les résultats du *Tableau IV* montrent un gain de 4,2 dB(A).

Considérons maintenant le poste de tri (configuration présentée sur la *Figure 1*). Après simulation de l'encoffrement des deux machines (M4 et M5), les résultats sur le poste de tri sont indiqués dans le *Tableau V*. Le gain est de 2 dB(A). Cette réduction est significative, mais est plus limitée qu'au poste de conduite.

AGIR SUR TOUTES LES SOURCES PRINCIPALES DE BRUIT

Supposons que soient combinées les actions de réduction du bruit des machines évoquées précédemment : choix d'outillage « à bruit réduit » sur deux machines (M4 et M5) et encoffrement de deux machines automatiques bruyantes (M2 et M3). Dans ce cas toutes les sources de bruit dominantes aux deux postes de travail étudiés sont prises en compte. Quel serait l'effet de ces actions combinées ? Dans la simulation, ces actions sont prises en compte par une réduction du niveau de bruit émis de 5 dB en cas de changement d'outillage et de 10 dB en cas d'encoffrement.

Le résultat de ces actions sur le poste de conduite de la machine (M5)

TABLEAU II

Simulations de l'exposition au bruit à un poste de conduite de machine bruyante. Résultat d'une action réduisant le temps de présence de l'opérateur (de 80 à 60 % du temps quotidien) auprès de la machine qu'il conduit

	Points d'exposition	Niveau de bruit $L_{EX,8h}$ dB(A)
Avant	227	88,5
Après	198	87,9
Gain	29	0,6

TABLEAU III

Simulations de l'exposition au bruit à un poste de conduite de machine bruyante. Résultat d'un changement d'outillage, réduisant le bruit émis par deux machines bruyantes (dont celle que conduit l'opérateur) de 5 dB

	Points d'exposition	Niveau de bruit $L_{EX,8h}$ dB(A)
Avant	227	88,5
Après	120	85,7
Gain	107	2,8

TABLEAU IV

Simulations de l'exposition au bruit à un poste de conduite de machine bruyante. Résultat après encoffrement de deux machines bruyantes (dont celle que conduit l'opérateur)

	Points d'exposition	Niveau de bruit $L_{EX,8h}$ dB(A)
Avant	227	88,5
Après	95	84,7
Gain	132	4,2

TABLEAU V

Simulations de l'exposition au bruit à un poste de tri, non bruyant en lui-même, après encoffrement de deux machines bruyantes proches

	Points d'exposition	Niveau de bruit $L_{EX,8h}$ dB(A)
Avant	193	87,8
Après	122	85,8
Gain	71	2,0

TABLEAU VI

Simulations de l'exposition au bruit à un poste de conduite de machine bruyante. Résultat d'actions de réduction portant sur 4 machines (encoffrement de deux machines bruyantes et usage d'outillage à bruit réduit pour les deux autres)

	Points d'exposition	Niveau de bruit $L_{EX,8h}$ dB(A)
Avant	227	88,5
Après	68	83,3
Perte	159	5,2

TABLEAU VII

Simulations de l'exposition au bruit à un poste de tri, non bruyant en lui-même, après que l'opérateur ait été chargé, pendant 30 min par jour, d'alimenter un broyeur

	Points d'exposition	Niveau de bruit $L_{EX,8h}$ dB(A)
Avant	193	87,8
Après	275	89,3
Gain	82	1,5

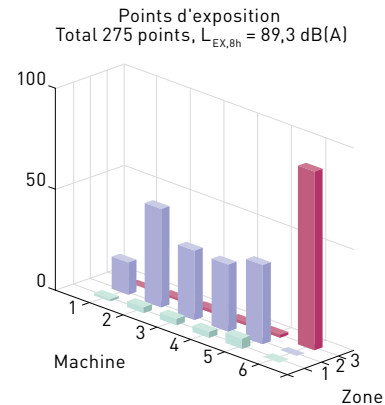
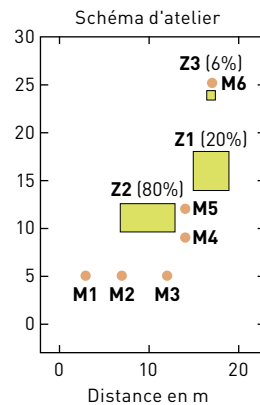
est indiqué dans le *Tableau VI*. Le gain obtenu au poste de conduite s'élève à 5,2 dB. Pour le poste de tri, la même simulation conduit à un gain de 5,4 dB. Ces exemples confirment que pour obtenir des gains significatifs à différents postes de travail, il faut réduire le bruit des machines les plus bruyantes.

LIMITER L'IMPACT DES ÉVÉNEMENTS ACOUSTIQUES RARES

Parmi les machines et sources de bruit, certaines peuvent émettre des bruits très intenses mais pendant des durées relativement brèves. Dans ce cas, on parle « d'événements acoustiques rares ». De tels événements [9, 10] sont provoqués par exemple par des opérations manuelles bruyantes telles que des phases de martelage métallique, par l'usage de machines telles qu'un broyeur ou d'outils très bruyants tels qu'une meuleuse, par des bruits d'équipements tels que des détentes d'air comprimé, etc. Quel peut être l'impact d'événements acoustiques rares et intenses dans un bilan d'exposition quotidienne au bruit ?

FIGURE 3

Simulation d'un poste de tri, quand le travail comprend une tâche très bruyante et rare (alimentation du broyeur M6 pendant 6 % du temps quotidien)



Parmi les machines indiquées sur le *Tableau I*, le broyeur génère un bruit qui entre dans cette catégorie. Son émission acoustique domine celle des autres machines de l'atelier mais elle est limitée en durée à 30 minutes par jour. Dans les simulations présentées précédemment, aucune exposition sonore partielle liée au broyeur n'apparaît (cf. sur les *Figures 1* et *2* la machine M6), mais les postes de travail étaient éloignés de 10 à 15 m environ du broyeur. Qu'en est-il sur un poste de travail plus proche ?

Considérons l'opérateur chargé du tri étudié antérieurement (cf. la configuration de la *Figure 1*) et supposons que sans modifier sa tâche principale (le tri), il assure une tâche annexe nouvelle : alimenter le broyeur. Lorsque le broyeur est utilisé, son alimentation impose à l'opérateur de rester à proximité (R compris entre 0,5 et 1,5 m). Dans cette configuration nouvelle, les résultats de la simulation sont présentés sur la *Figure 3* et dans le *Tableau VII*.

La contribution du broyeur (M6) est devenue prépondérante dans le bilan d'exposition. Alors que la tâche d'alimentation du broyeur ne dure que 30 min par jour, c'est elle qui détermine le plus l'exposition quotidienne au bruit de cet opérateur. Comparé à la configuration initiale, cette tâche annexe entraîne un accroissement du niveau de bruit $L_{EX,8h}$ de 1,5 dB(A).

Cet exemple montre que la conception des postes de travail doit prendre en compte l'exposition au bruit susceptible de résulter d'opérations épisodiques mais extrêmement bruyantes. Leur contribution dans l'exposition au

bruit de certains travailleurs peut être prépondérante.

ELOIGNER LES DIFFÉRENTES LIGNES DE PRODUCTION

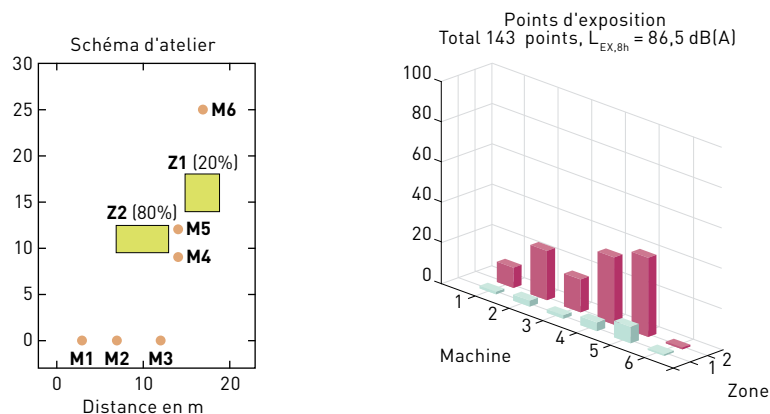
Quand le poste de travail est du type conduite d'une machine bruyante, l'éloignement du poste de cette machine ne peut être que très limité, à la fois en distance et en durée. Par contre, s'il s'agit d'un type de poste non bruyant en lui-même et que le travail de l'opérateur n'est pas lié à celui de machines bruyantes proches, quel est l'effet dans le bilan de bruit de cet opérateur d'un éloignement de ces machines bruyantes ?

Considérons le poste de tri étudié précédemment (configuration de la *Figure 1*) : situé en sortie des machines M4 et M5, il ne peut être très éloigné de ces deux machines. Par contre on a vu que ce poste non bruyant en lui-même était exposé au bruit généré par la ligne de production composée des machines M1 à M3. Supposons que cette ligne de production soit éloignée du poste de tri de 5 m de plus par rapport à la configuration initiale, ce qui conduit la configuration de la *Figure 4*.

Le résultat numérique est indiqué sur le *Tableau VIII*. L'éloignement des 3 machines bruyantes entraîne un gain de 1,3 dB(A) sur le niveau $L_{EX,8h}$ au poste de tri. Ce gain peut paraître limité. Toutefois, la *Figure 4b* permet d'en connaître la raison : ceci provient des termes d'exposition sonore partielle des machines 4 et 5, qui sont restés identiques à ce qu'ils étaient initialement (cf. *Figure 1b*).

FIGURE 4

Simulation d'un poste de tri, après éloignement d'une distance accrue de 5 m de la ligne de ponçage comprenant les machines M1, M2 et M3



Cet exemple montre l'intérêt d'un accroissement des distances entre différentes lignes de production ou entre machines bruyantes. Quand des postes de travail non bruyants en eux-mêmes doivent être placés dans l'atelier, il est souhaitable de les placer suffisamment éloignés des sources principales de bruit.

TRAITER ACOUSTIQUEMENT LE LOCAL

Dans les simulations précédentes, on a supposé que le local était moyennement absorbant et conservait les mêmes caractéristiques acoustiques (la pente de décroissance du bruit par doublement de distance était fixée à DL = 4 dB). Quel effet entraînerait une modification de l'acoustique du local sur l'exposition au bruit aux postes de travail ?

Pour répondre à cette question, la distance entre les sources de bruit et les postes de travail doit être suffisante pour que l'effet du local ne reste pas masqué. Une configuration spécifique a donc été définie dans ce but, qui est présentée sur la Figure 5a. Le poste de travail est non bruyant en lui-même et comprend deux zones de travail éloignées d'une distance de 5 à 10 m des machines bruyantes.

Supposons en premier lieu que ce local soit médiocre sur le plan acoustique, soit une valeur du paramètre DL fixée à 3 dB. Le résultat apparaît sur la Figure 5b. Ensuite, simulons une amélioration de l'acoustique du local : un traitement du plafond peut conduire à accroître la valeur de DL à 4,5 dB. Avec ce nouveau paramètre, le résultat de la

simulation apparaît sur la Figure 6b. Le Tableau IX résume les résultats principaux.

La réduction du bruit découlant du traitement acoustique du plafond de l'atelier est de 3,5 dB sur le poste de travail simulé dans cet exemple. Le gain obtenu croît si la distance séparant le poste de travail et les machines bruyantes croît également. En améliorant l'absorption acoustique du local, un gain est perceptible sur des postes de travail situés à des distances supérieures à 5 m des machines bruyantes. Sur les postes de travail situés à une distance d'une machine bruyante inférieure à 3 m, aucun effet lié au local ne peut être mis en évidence.

DISCUSSION, CONCLUSION

Pour diminuer l'exposition au bruit aux postes de travail, les simulations numériques montrent quelles voies d'action privilégier parmi la réduction du bruit des machines, la modification des postes de travail ou l'amélioration de l'acoustique des locaux. Ces simulations ne constituent pas un catalogue de bonnes ou de mauvaises solutions mais illustrent, à l'aide de plusieurs exemples, quelles sont les priorités qu'il est souhaitable d'adopter pour atteindre un objectif de réduction du bruit aux postes de travail.

Les résultats ont montré que la réduction du bruit émis par les machines les plus bruyantes est la voie d'action

TABLEAU VIII

Simulations de l'exposition au bruit à un poste de tri, non bruyant en lui-même, après éloignement d'un ensemble de machines très bruyantes (la ligne de ponçage)

	Points d'exposition	Niveau de bruit L _{EX,8h} dB(A)
Avant	193	87,8
Après	143	86,5
Gain	50	1,3

TABLEAU IX

Bilan d'une amélioration de l'acoustique du local (DL accru de 3 à 4,5 dB) sur un poste non bruyant en lui-même, éloigné de 5 et 10 environ des machines bruyantes

	Points d'exposition	Niveau de bruit L _{EX,8h} dB(A)
Avant	182	87,6
Après	82	84,1
Gain	100	3,5

prioritaire pour différentes raisons. En considérant les postes de travail du type conduite de machines bruyantes, il est apparu que la réduction du bruit émis (ou l'encoffrement, en cas de machine automatique) n'a pas vraiment d'alternative pour réduire efficacement le bruit à ces postes de travail. Si une réduction du temps de présence à proximité immédiate des machines est envisageable, il a été montré que cette mesure ne peut suffire et qu'elle doit être associée à une action de réduction du bruit des machines elles-mêmes pour que le gain soit appréciable. En considérant les postes de travail non bruyants en eux-mêmes mais exposés au bruit de machines proches, les résultats ont montré qu'un gain acoustique résultait de l'éloignement des machines bruyantes, mais que ce gain restait limité si une machine bruyante ne pouvait être suffisamment éloignée du poste de travail non bruyant considéré.

Sur la localisation des postes de travail, les résultats ont montré qu'une majoration importante de l'exposition pouvait intervenir dès lors que le travail de l'opérateur le contraint à rester très près (environ 1 m) de la machine ou de la source de bruit. Ce peut être le cas

FIGURE 5

Simulations de l'exposition au bruit à un poste de travail non bruyant en lui-même, éloigné de 5 à 10 m environ des machines bruyantes, quand le local est médiocre sur le plan acoustique ($DL = 3$ dB)

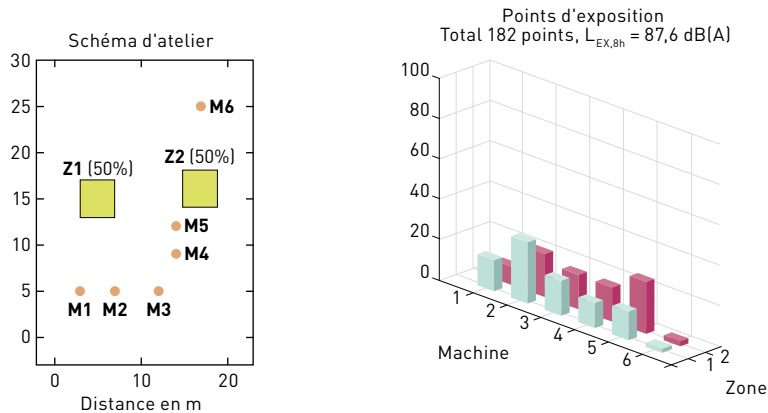
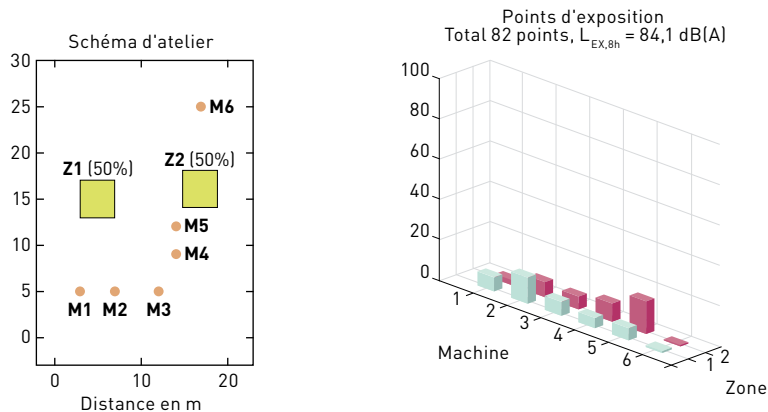


FIGURE 6

Simulations de l'exposition au bruit à un poste de travail non bruyant en lui-même, éloigné de 5 à 10 m environ des machines bruyantes, quand le local est bon sur le plan acoustique ($DL = 4,5$ dB)



lors de phases de récupération d'incidents de production, d'usage épisodique d'une machine très bruyante (telle qu'un broyeur), ou d'opération manuelle bruyante (meulage, martelage métallique, etc.) Dans ce cas, des événements acoustiques rares peuvent se produire, et il a été montré que leur contribution dans l'exposition quotidienne au bruit pouvait être dominante, même lorsque leur durée totale n'excédait pas quelques dizaines de minutes par jour. Il faut donc identifier ce qui provoque de tels événements et étudier comment les limiter en nombre et réduire leur impact acoustique, par des mesures d'isolement, d'éloignement, ou par changement de technologie.

Pour les locaux de travail, les résultats confirment que le renforcement de l'absorption acoustique des parois (pla-

fond, murs) permet un gain acoustique notable aux postes de travail éloignés d'au moins 5 m de distance des machines bruyantes. Par contre le gain ne peut être très significatif aux postes de travail situés à proximité des machines bruyantes.

L'approche utilisée est analytique. Son originalité est d'identifier clairement les facteurs déterminants de l'exposition au bruit à des postes de travail, en tenant compte des fluctuations en temps des activités professionnelles et des circonstances de l'exposition. Alors que les logiciels d'acoustique prévisionnelle fournissent une vue étendue sur le bruit d'un atelier, dont le résultat est typiquement une carte de bruit, le modèle présenté ici fournit une vue en profondeur, limitée à quelques postes de travail. Une question en découle : les

résultats issus des exemples présentés peuvent-ils être étendus ? En considérant les autres simulations [8], effectuées avec des schémas d'atelier et des paramètres très différents, il est clair que dans un type spécifique de poste de travail on retrouve toujours les mêmes tendances dans les résultats. La typologie des situations étudiées est donc la clé pour tirer profit des résultats dans d'autres situations.

Toutefois, ces simulations numériques ont plusieurs limites qu'il ne faut pas oublier. La première découle de la simplification des données d'entrées du modèle, compensée partiellement par l'introduction de termes d'incertitude. Ensuite, la modélisation des machines comme des sources ponctuelles est une simplification commode mais éloignée de la réalité. De plus, les sources de bruit mobiles (engins, chariots, etc.) ne sont pas prises en compte dans le modèle utilisé. Cependant, l'objectif n'étant pas de se substituer à l'étude de solutions de réduction du bruit applicable dans un atelier réel, ces résultats éclairent le choix de voies d'action à privilégier en amont, en phase de conception pour obtenir des réductions de bruit significatives par des moyens techniques ou par l'organisation du travail.

Signalons enfin, après avoir confirmé l'importance de la réduction du bruit des machines, que diverses solutions techniques existent (telles que le remplacement d'un outillage classique par un outillage à faible bruit, les encoffrements, etc.), présentées ailleurs [11]. De plus, lors d'achat de machines, il est possible de prendre en compte le bruit dans le cahier des charges, et d'acheter, parmi une famille de machines, celles qui sont les moins bruyantes.

Reçu le : 18/05/2009

Accepté le : 20/07/2009

POINTS À RETENIR

- La simulation numérique permet de mieux hiérarchiser les voies d'action en termes de réduction d'exposition au bruit.
- Les résultats des simulations confirment que la réduction du bruit émis par les machines les plus bruyantes reste prioritaire.
- Une majoration importante de l'exposition au bruit apparaît lorsque l'opérateur est contraint par sa tâche à rester à moins d'un mètre des sources de bruit.
- Le renforcement de l'absorption acoustique des parois du local apporte un gain notable aux postes situés à plus de cinq mètres des sources bruyantes.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Décret relatif aux prescriptions de sécurité et de santé applicables en cas d'exposition des travailleurs aux risques dus au bruit et modifiant le code du travail. Décret n° 2006-892 du 19 juillet 2006. *Journal Officiel de la République Française*, 20 juillet 2007. Ou : *Code du travail*, article R. 4434-1.

[2] Arrêté du 30 août 1990 du Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Formation Professionnelle relatif à la correction acoustique des locaux de travail. *Journal Officiel de la République Française* du 27 septembre 1990.

[3] ONDET A.M., BARBRY J.L. - Préviation des niveaux sonores dans les locaux industriels encombrés à l'aide du logiciel d'acoustique prévisionnelle RAYSCAT. INRS, *Cahiers de notes documentaires*, 142, 41-53, 1991.

[4] HODGSON M. - Experimental evaluation of simplified models for predicting noise levels in industrial workrooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 103, 4, 1933-1939, 1998.

[5] THIERY L. - Estimation de l'exposition au bruit de six groupes de travailleurs. *Notes scientifiques et techniques*, INRS, NS 259, 2006.

[6] ONDET A.M., SUEUR J. - Development and validation of a criterion for assessing the acoustic performance of industrial rooms. *J. Acoust. Soc. Am.*, 97, 3, 1727-1731, 1995.

[7] Norme NF EN ISO 11690-3. Acoustique – Pratique recommandée pour la conception de locaux de travail à bruit réduit contenant des machines – Partie 3 : propagation du son et prévision du bruit dans les locaux de travail. *ISO* (Genève), 1999.

[8] THIERY L. - Simulations numériques appliquées à la quantification des incertitudes sur le niveau d'exposition quotidienne au bruit. *Notes scientifiques et techniques*, INRS (Paris), NS 274, 2008.

[9] THIERY L., CANETTO P. - Evaluer et mesurer l'exposition professionnelle au bruit. INRS, ED 6035, 2009.

[10] Norme EN ISO 9612. Acoustique - Détermination de l'exposition au bruit en milieu de travail – Méthode d'expertise. AFNOR, 2009.

[11] CANETTO P., JEANJEAN G. - Techniques de réduction du bruit en entreprise : Exemples de réalisations. INRS, ED 997, 2007.