



HAL
open science

Simulations numériques appliquées à la quantification des incertitudes sur le niveau d'exposition quotidienne au bruit.

L. Thiery

► **To cite this version:**

L. Thiery. Simulations numériques appliquées à la quantification des incertitudes sur le niveau d'exposition quotidienne au bruit.. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 274, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 2008, 38 p., ill., bibliogr. hal-01420200

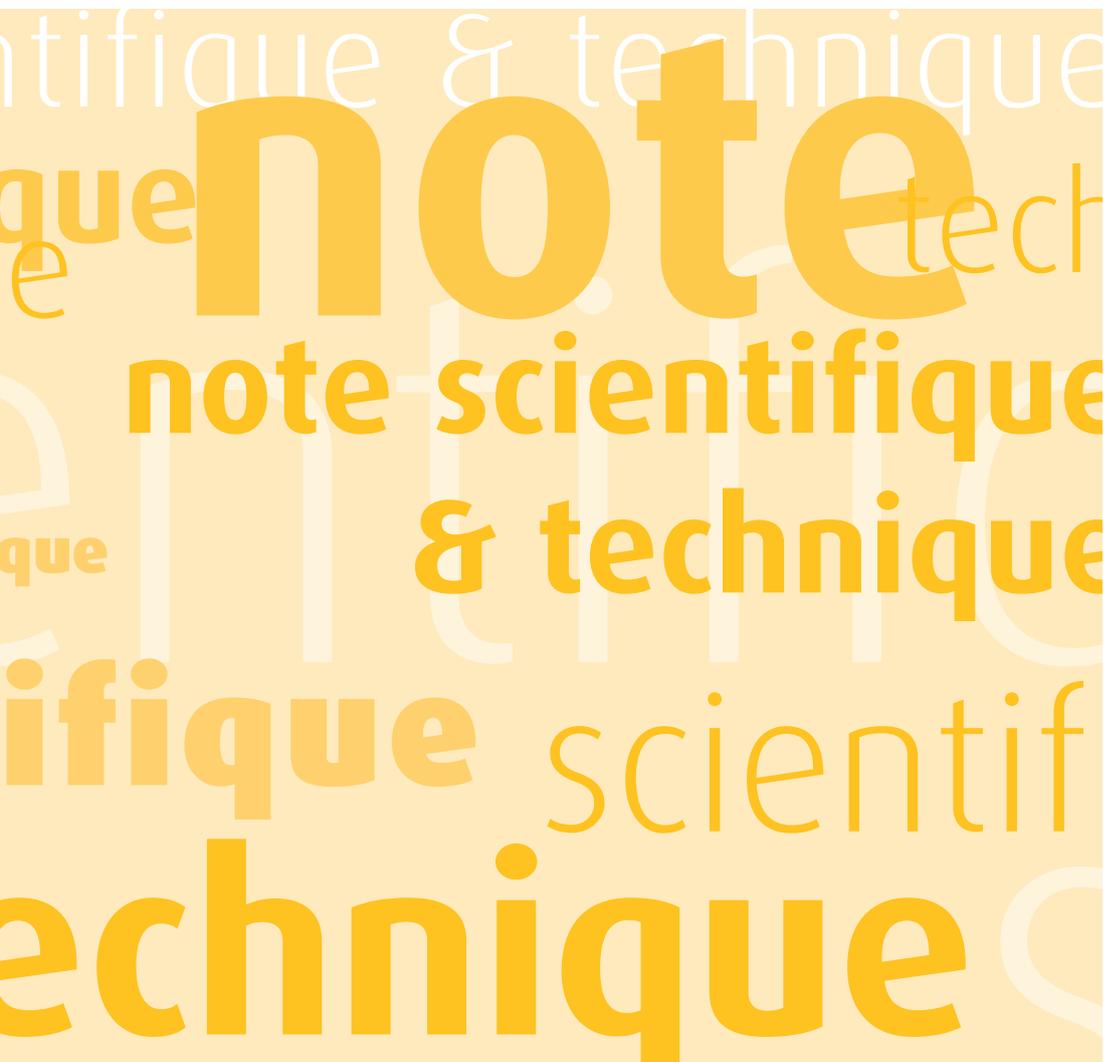
HAL Id: hal-01420200

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01420200>

Submitted on 20 Dec 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**Simulations numériques appliquées
à la quantification des incertitudes
sur le niveau d'exposition
quotidienne au bruit**

Simulations numériques appliquées à la quantification des incertitudes sur le niveau d'exposition quotidienne au bruit

Léon Thiéry
INRS, Département Ingénierie des équipements de travail

NS 274
juin 2008

Résumé

Dans la pratique de la métrologie de l'exposition au bruit en milieu professionnel, le résultat de mesurage s'accompagne d'une incertitude parfois relativement élevée, qui résulte de la méconnaissance des effets de divers facteurs, liés aux machines utilisées, aux modes opératoires, à l'organisation du travail, etc. Sur site, il est généralement impossible d'identifier, parmi tous ces facteurs, ceux qui sont les plus déterminants dans le résultat et dans l'incertitude finale. Pour clarifier cette problématique, un modèle analytique de l'exposition au bruit professionnel a été développé. Ce modèle schématise un atelier en prenant en compte la position des machines et leur émission acoustique, la pente de décroissance du bruit par doublement de distance dans le local de travail, les emplacements de travail des opérateurs avec leur durée relative de présence dans chaque zone. A chaque paramètre du modèle est attribué une plage de variation qui simule l'incertitude sur la variable correspondante. Ce modèle a été validé expérimentalement par des mesures effectuées dans un local d'essai. Il a été appliqué à des configurations d'exposition au bruit et à des schémas d'ateliers conçus pour simuler tout d'abord des situations d'exposition simples, puis des situations d'exposition complexes. Douze configurations ont ainsi été étudiées, de types variés : conduite d'une machine bruyante en poste de travail fixe puis mobile, pilotage d'une ligne comprenant plusieurs machines, exposition à un bruit de type « événement acoustique rare », effet sur un opérateur du bruit généré par un poste de travail voisin très bruyant. Dans chaque configuration, les résultats permettent d'identifier d'où proviennent les principales contributions dans l'exposition sonore totale et quels sont les facteurs prépondérants dans l'incertitude du résultat. On en déduit plusieurs conclusions pratiques, relatives aux mesures sur site de la puissance acoustique des machines ou celles des caractéristiques acoustiques des locaux, ainsi qu'à la métrologie de l'exposition des travailleurs au bruit.

Sommaire

	Page
1 INTRODUCTION	1
2 FORMULATION DU MODELE	2
2.1 Propagation acoustique dans le local.....	2
2.2 Modélisation de l'exposition au bruit	4
2.3 Machines et sources de bruit	5
2.4 Incertitudes sur les variables d'entrée	5
2.5 Estimation de l'incertitude sur le niveau de bruit $L_{Ex,8h}$	6
2.6 Termes prépondérants d'incertitude.....	7
3 TYPOLOGIE DES SITUATIONS D'EXPOSITION SIMULEES	7
3.1 Analyse de données réelles	7
3.2 Tests préalables	8
3.3 Sources de bruit.....	8
3.4 Caractéristique acoustique du local	9
3.5 Caractéristiques des postes de travail.....	9
3.6 Désignation des configurations simulées	10
4 RESULTATS	12
4.1 Postes de travail du type conduite d'une ou plusieurs machines.....	12
4.2 Postes de conduite de machine et présence d'un événement acoustique rare	13
4.3 Postes de travail exposés aux bruits des postes voisins : influence du local	14
5 DISCUSSION ET CONCLUSIONS	15
6 REFERENCES	18
7 LISTE DES TABLEAUX.....	19
ANNEXE 1 : RESULTATS DES 12 SIMULATIONS.....	23
ANNEXE 2 : EXPRESSION DE L'EXPOSITION SONORE PARTIELLE $E_{M,Z(R)}$ ET DES TERMES D'INCERTITUDE	37

1 Introduction

Lors de mesures du bruit reçu par les travailleurs, il est fréquent de constater des variations d'amplitude des niveaux de bruit qui excèdent 10 dB(A), dès lors que le mesurage se prolonge sur plusieurs heures [1]. Ce constat résulte de plusieurs facteurs : les modifications des conditions d'utilisation des machines, l'alternance des tâches et des emplacements de travail, l'effet sur un opérateur du bruit généré par le travail de ses voisins, etc. Sur site il est souvent impossible d'identifier les facteurs qui provoquent une variation de l'exposition, pour plusieurs raisons : le nombre élevé des facteurs en cause et leur imbrication, la co-activité des opérateurs, etc.

Dans le domaine des mesures de la puissance acoustique émise par les machines, des questions pratiques se posent, liées au coût de ce type de mesure. Jusqu'où faut-il étendre l'effort de mesure ? Quelle incertitude peut-on accepter sur une mesure de puissance acoustique, vu la variabilité des conditions d'emploi des machines, de leurs réglages et modes de fonctionnement ? Dans le domaine de l'acoustique des locaux, la pente de décroissance spatiale DL est mesurée pour fournir un indicateur réglementaire [2, 3] de la qualité acoustique du local industriel. Mais dès que le local a une géométrie complexe et n'est pas homogène, on peut mesurer des valeurs DL différentes selon les emplacements de mesure choisis.

Ces constats qui résultent des conditions de mesurage in situ, induisent plusieurs questions. Jusqu'où faut-il pousser l'échantillonnage, afin que les mesures reflètent correctement l'exposition des travailleurs ? Quel facteur peut être négligé dans le mesurage ? A quoi attribuer un poids prépondérant, dans le niveau d'exposition sonore quotidien et dans son incertitude ? Dans les mesures de la puissance acoustique des machines ou celles des caractéristiques acoustiques d'un local, quel pourrait être le degré de précision souhaitable ? La précision de ces mesures a déjà fait l'objet d'études, portant notamment sur les paramètres des codes d'essai de mesure de la puissance acoustique des machines [4] et sur les caractéristiques d'absorption acoustiques des parois d'un local [5]. Toutefois, les éléments de réponses disponibles relatifs aux incertitudes de ces variables d'entrée des programmes d'acoustique prévisionnelle [6 à 9] ne suffisent pas pour évaluer leur impact dans l'exposition des travailleurs au bruit, dès lors que cette exposition résulte de différentes phases d'exposition et de circonstances d'exposition au bruit qui varient dans le temps de travail.

Pour apporter des éléments de réponse à cette problématique et afin de quantifier le poids respectif des différents facteurs déterminant l'exposition au bruit professionnel, un modèle numérique a été développé. Il schématise les conditions de l'exposition professionnelle au bruit parmi un groupe de travailleurs d'un atelier en prenant en compte la position des machines et leur émission acoustique, la pente de décroissance du bruit par doublement de distance dans le local de travail DL et les emplacements de travail des opérateurs avec leur durée relative de présence dans chaque zone. Ce modèle a été validé par comparaison à des mesures effectuées dans un local d'essai, dans différentes configurations simples.

Ensuite, ce modèle a été appliqué pour simuler différentes situations d'exposition au bruit et y quantifier le poids respectif des facteurs liés soit aux machines et à l'émission du bruit, soit au local et à la valeur de la pente DL, soit à l'organisation du travail (proximité d'une machine très bruyante, présence ou absence d'événement acoustique rare et intense, etc). Les paramètres d'entrée des simulations furent définis à partir de données réelles, mesurées dans quelques ateliers de types très variés. Ces données réelles furent collectées lors

d'interventions en entreprise, s'insérant dans une étude INRS visant à étendre le modèle d'acoustique prévisionnelle à la prévision de l'exposition sonore aux postes de travail. Ces interventions ont permis de noter les emplacements des machines et leur niveau de puissance acoustique, les emplacements des postes de travail et les valeurs des pentes de décroissance du bruit dans les locaux. A partir de cet ensemble d'informations et de tests préalables, douze configurations d'exposition ont été retenues *in fine*.

Ce rapport présente les résultats des douze simulations. Il indique le niveau d'exposition sonore et son incertitude totale, montre graphiquement l'exposition sonore partielle attribuée à chaque tâche et quantifie le poids respectif de chaque terme d'incertitude.

2 Formulation du modèle

Pour estimer le bruit reçu par des travailleurs dans un atelier, le modèle analytique qui a été élaboré relie les trois types de données suivantes : les sources de bruit, les caractéristiques acoustiques du local, l'organisation spatiale et temporelle du travail. Ce modèle utilise la pente de décroissance par doublement de distance du niveau de bruit dans le local, DL, pour exprimer la relation $L_p(R, L_w, DL)$ entre le niveau du bruit généré en un point situé à la distance R d'une source de niveau de puissance acoustique L_w dans un local caractérisé par la pente de décroissance DL. Les hypothèses simplificatrices courantes dans les études d'acoustique prévisionnelle intérieure ont été reprises : sources ponctuelles, émission du bruit continue durant la journée de travail, local homogène.

Cette relation de base a été étendue afin de prendre en compte trois caractéristiques importantes dans la modélisation de l'exposition des travailleurs au bruit :

- possibilité d'être situé à moins de 3 m de distance d'une source de bruit, contraignant à intégrer dans le modèle la propagation acoustique en champ proche,
- prise en compte de machines dont le fonctionnement quotidien est discontinu,
- multiplicité des lieux et des durées d'exposition au bruit durant la journée de travail.

On précise ci-dessous comment ces caractéristiques ont été prises en compte dans la formulation du modèle utilisé.

2.1 Propagation acoustique dans le local

La pente de décroissance du bruit par doublement de distance DL [10] caractérise la propagation acoustique dans un local quand la distance entre la source de bruit et le point de mesure se compte en dizaines de mètres. Dans le modèle adopté ici, on a supposé que sa validité était acceptable dès 3 m de distance. Par contre, pour simuler l'exposition sonore reçue près d'une machine, quand l'opérateur est à moins de 3 m de la source de bruit, une adaptation a été réalisée afin de prendre en compte le champ proche.

Cette adaptation a consisté à exprimer la relation classique $L_p(r) = f(L_w(m), r, DL)$ sous une forme valide même quand r est proche de 1 m, en appliquant les hypothèses suivantes, relatives à la décroissance du niveau sonore en fonction de la distance :

- pour une distance inférieure à 1 m : application de la décroissance en champ libre, ce qui suppose implicitement la prédominance du champ direct. Dans ce cas, la pente de décroissance vaut 6 dB ;

- pour les distances supérieures à 3 m : application de la pente de décroissance DL, mesurée dans le local, ce qui permet de prendre en compte le champ réverbéré ;
- pour les distances comprises entre 1 et 3 m : la formulation découle de la contrainte de continuité de la fonction $L_p(r)$ et de sa dérivée en r , aux points $r = 1$ m et 3 m, ce qui suppose qu'il s'agit seulement d'une zone de transition.

Sous ces hypothèses, le paramètre de décroissance spatiale mesuré DL a été généralisé en introduisant une fonction nommée FDL(r,DL) dépendant de la distance r et de la décroissance spatiale DL du local. Cette fonction a été définie ainsi :

[1]

- si $r = 1$ m
FDL(r,DL) est une constante, égale à la pente de décroissance du bruit en champ libre :
 $FDL(r,DL) = 10 \cdot \log_{10}(4) \sim 6,02$
Cette constante a été notée K dans la suite du texte.
- si $r > 1$ m et $r = 3$ m
$$FDL(r,DL) = \frac{K - DL}{4} (r^3 - 6r^2 + 9r) + DL$$
- si $r > 3$ m
 $FDL(r,DL) = DL$

En transposant les relations précédentes dans l'expression qui relie le niveau de bruit L_p en un point au niveau de puissance acoustique L_w émis par la source, on obtient les relations définissant la fonction $L_p(r,L_w,DL)$:

[2]

- si $r = 1$ m
 $L_p(r,L_w,DL) = L_w - 10 \cdot \log_{10}(4\pi/q) - K \cdot \log_2(r)$
- si $r > 1$ m et $r = 3$ m
$$L_p(r,L_w,DL) = L_w - 10 \cdot \log_{10}(4\pi/q) - DL \cdot \log_2(r) - (K - DL) \cdot \frac{(r^3 - 9r^2 + 27r - 19)}{12 \cdot \ln(2)}$$
- si $r > 3$ m
$$L_p(r,L_w,DL) = L_w - 10 \cdot \log_{10}(4\pi/q) - DL \cdot \log_2(r) - (K - DL) \cdot \frac{2}{3 \cdot \ln(2)}$$

La continuité des fonctions $L_p(r,L_w,DL)$ et FDL(r,DL) quand $r = 1$ m et $r = 3$ m a été illustrée par la figure 1, dans le cas où $DL = 2,5$ dB.

Dans ces relations :

- r est la distance entre la source (supposée ponctuelle) et le point d'observation ;
- L_w est le niveau de puissance acoustique de la source ;
- L_p est le niveau de pression acoustique généré à une distance r par la source ;
- DL est la pente de décroissance du niveau de bruit dans le local par doublement de distance, qui caractérise la propagation acoustique dans local ;

- q est un paramètre (nommé le facteur de directivité) dépendant de la position de la source de bruit par rapport au sol. On a supposé ici que toutes les sources étaient placées sur le sol, soit $q = 2$. (Note : si des sources placées en hauteur devaient être modélisées, il faudrait prendre $q = 1$) ;
- $K = 10 \cdot \log_{10}(4) \cong 6,02$ (constante de la pente de décroissance en champ libre).

Cette formulation a été validée par comparaison à des mesures effectuées dans un local d'essai, à des distances de mesure de la source comprises entre 1 et 20 m. Les écarts entre mesures et modèle sont inférieurs à 0.5 dB(A) dans tous les cas testés.

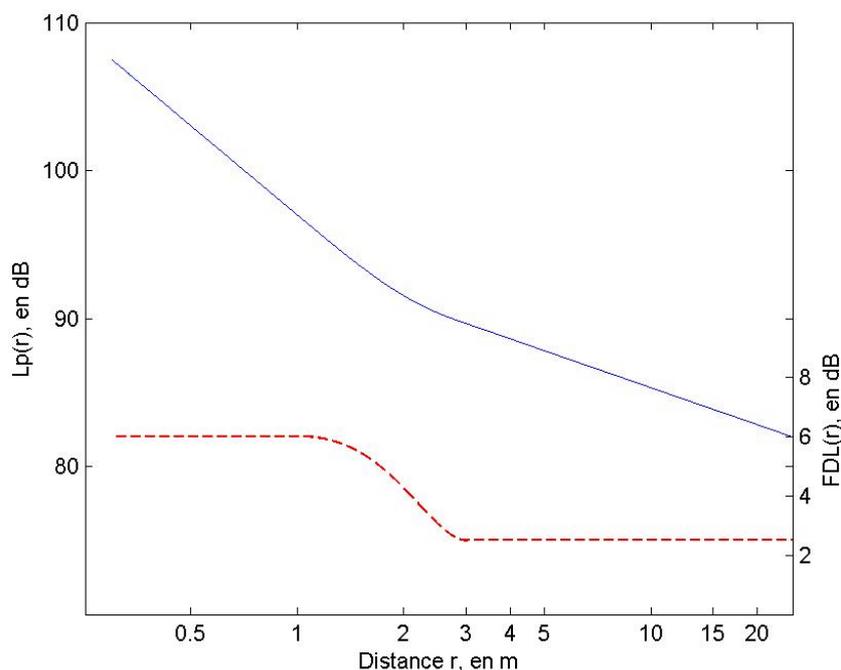


Figure 1 : Illustration de la continuité de la fonction $L_p(r, L_w, DL)$ [trait plein, échelle de gauche] et de la fonction $FDL(r, DL)$ [trait pointillé, échelle de droite] quand $r = 1$ m et $r = 3$ m, caractéristiques de la propagation acoustique dans le modèle utilisé (exemple tracé avec $DL = 2,5$ dB).

2.2 Modélisation de l'exposition au bruit

Pour modéliser l'exposition au bruit d'un groupe d'opérateurs durant une journée de travail, on a décomposé leur travail en différentes tâches et en appliquant le schéma suivant : chaque tâche est caractérisée par deux paramètres : sa localisation dans une zone z d'étendue spécifiée, sa durée quotidienne $T(z)$ (exprimée en valeur relative par rapport à 8 heures).

Ensuite, l'effet du bruit émis par chaque source de bruit dans cette zone de travail a été calculé par le niveau de bruit défini ci-dessus, $L_p(r, L_w(m), DL)$, où r spécifie la distance entre la source m et la zone de travail z considérée.

A ce niveau de bruit correspond une exposition sonore partielle $E_{m, z(r)}$, en $\text{Pa}^2 \cdot \text{h}$ définie par :

$$E_{m, z(r)} = T(z) \cdot (0,32E-8) \cdot 10^{0,1 \cdot L_p(r, L_w(m), DL)} \quad [3]$$

où $T(z)$ est la durée quotidienne relative (sur 8h) de la présence de l'opérateur dans la zone z [ce qui impose la valeur de la constante $0,32E-8 = 8 \cdot (2 \cdot 10^{-5})^2$]

En appliquant dans l'équation [3] les trois relations définissant, en fonction de r , les valeurs de $L_p(r, L_w, DL)$ définies précédemment (cf équation [2]), on en déduit les expressions de $E_{m,z(r)}$ indiquées en annexe 2, utilisées ultérieurement dans le calcul des termes d'incertitudes.

L'exposition sonore partielle d'un couple de données (m, z) étant une grandeur additive, l'exposition sonore quotidienne totale $E_{A,T}$ a été calculée par la somme, sur tous les couples de données (m, z) des termes d'exposition sonore partielles :

$$E_{A,T} = \sum_m \sum_z E_{m,z(r)}. \quad [4]$$

L'exposition sonore totale $E_{A,T}$ équivaut à un niveau d'exposition quotidienne au bruit $L_{Ex,8h}$ en dB(A) :

$$L_{Ex,8h} = 10 * \log_{10}[E_{A,T} / 0,32E-8]. \quad [5]$$

2.3 Machines et sources de bruit

La modélisation des sources de bruit a repris les hypothèses de base de l'acoustique prévisionnelle : source ponctuelle, omnidirectionnelle, caractérisée par un niveau de puissance acoustique L_w , émettant en mode continu.

Toutefois, ce modèle a été adapté afin de prendre en compte deux caractéristiques de l'exposition au bruit. La première adaptation concerne le fonctionnement intermittent des machines, durant une journée de travail, qui a été pris en compte en associant au niveau de puissance acoustique $L_w(m)$ de chaque machine sa durée relative quotidienne d'émission.

La seconde adaptation résulte de la nécessité, en présence de sources de bruit non permanentes, de distinguer deux types d'opérateurs : ceux qui pilotent une machine bruyante, avec la contrainte d'être présent quand la machine fonctionne et ceux qui ne pilotent pas la machine et n'ont pas de contrainte de présence auprès de la machine. En l'absence de contrainte, l'intermittence de l'émission acoustique de la machine a été prise en compte en pondérant sa puissance acoustique W par la durée relative d'émission. Par contre, la contrainte de présence de l'opérateur dans une zone de travail spécifiée z quand la machine m est en mode émission a été prise en compte dans le modèle en introduisant un lien entre m et z . Ceci a permis de simuler des opérations manuelles bruyantes qui ne se réalisent qu'en présence de l'opérateur.

2.4 Incertitudes sur les variables d'entrée

Le modèle analytique utilisé est donc basé sur une équation $L_p(R, L_w, T, DL)$. Elle relie le niveau de bruit reçu par un opérateur situé pendant une durée T à la distance R d'une machine émettant un niveau de puissance acoustique L_w , dans un local dont la pente de décroissance du bruit est DL .

Des incertitudes ont été appliquées aux 4 variables de ce modèle. Pour L_w , T et DL , l'étendue de leur domaine de variation a été spécifié.

Pour l'incertitude en distance, une autre méthode a été appliquée : en ayant supposé chaque source de bruit ponctuelle et localisée de façon fixe (en X_m, Y_m), l'incertitude en distance découle de l'étendue de la zone de travail z , définie en coordonnées cartésiennes par dXz ,

dYz. Ces données initiales ont été transformées en distance R et dR, pour chaque couple source de bruit et zone de travail (m, z). La transformation de ces variables a été effectuée en calculant la distance R entre la source m et un point situé aléatoirement dans la zone de travail z, puis en réitérant 3 000 fois le tirage aléatoire uniforme du point situé dans la zone de travail. La valeur de R a été estimée par la moyenne de la distribution des distances ainsi obtenues, la valeur de dR par le demi intervalle de confiance à 95 % de la distribution.

Selon l'amplitude des variations appliquées aux variables d'entrée du modèle, on peut spécifier des configurations d'exposition très différentes. Par exemple quand dR < 1 m, on caractérise un poste de travail fixe, et si dR = 3 m le poste de travail est mobile.

Les valeurs d'incertitude appliquées *in fine* seront donc spécifiées pour chaque type de situation d'exposition simulée, dans le chapitre 3.

2.5 Estimation de l'incertitude sur le niveau de bruit $L_{EX,8h}$

La méthode des simulations de Monte Carlo a été appliquée pour estimer l'intervalle de confiance à 95 % du niveau d'exposition quotidienne au bruit $L_{EX,8h}$. Cette méthode consiste à réitérer 10 000 tirages aléatoires des valeurs d'entrée, selon une loi de distribution multidimensionnelle sur tout l'espace de variation. A toutes les variables d'entrée X du modèle, une loi de distribution uniforme dans l'intervalle [- dX, + dX] a été appliquée. Chaque tirage fournit une valeur de $L_{EX,8h}$ basée sur des valeurs d'entrée équiprobables. L'ensemble des tirages donne une distribution de 10 000 résultats équiprobables. On en déduit l'intervalle de confiance de $L_{EX,8h}$ par les percentiles 2,5 % et 97,5 % de cette distribution.

Dans le cas du problème traité ici, concernant des fonctions non linéaires et non symétriques, cette méthode est reconnue [11] comme une référence méthodologique. La figure 2 présente une distribution résultant de 10 000 tirages aléatoires de valeurs $L_{EX,8h}$ effectués selon cette méthode, et indique en plus de l'histogramme les percentiles 2,5 % et 97,5 % desquels on déduit l'intervalle de confiance de $L_{EX,8h}$.

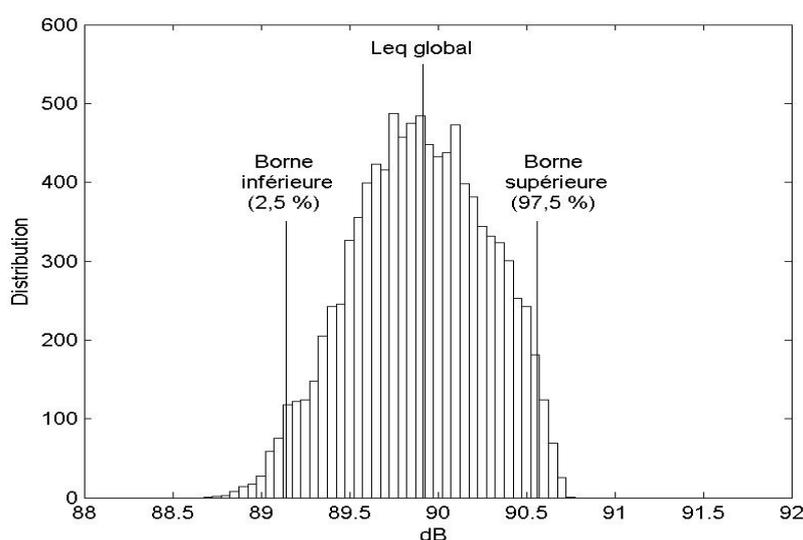


Figure 2 : Exemple illustrant la méthode des simulations numériques du niveau d'exposition quotidienne au bruit. Histogramme de la distribution de 10 000 valeurs équiprobables du $L_{EX,8h}$ quand les paramètres d'entrées du modèle varient selon une loi aléatoire uniforme.

2.6 Termes prépondérants d'incertitude

L'incertitude totale sur le niveau d'exposition quotidienne au bruit $L_{EX,8h}$ résulte de la combinaison d'un grand nombre de termes élémentaires d'incertitudes. Par exemple, en simulant 5 sources et 5 zones de travail, avec les 4 variables du modèle, on arrive à 100 termes. Pour identifier aisément parmi tous ces termes ceux qui déterminent une part prépondérante dans l'incertitude totale, leur expression a été calculée à partir de l'exposition sonore partielle, définie par l'équation [3] et en élaborant une présentation graphique des résultats destinée à identifier immédiatement les termes prépondérants.

La méthode des dérivées partielles [12] a été appliquée pour exprimer les termes d'incertitudes dans le cas des deux variables linéaires du modèle (T et W). Par contre, pour les deux autres variables, R et DL, cette méthode a été adaptée afin de prendre en compte des variations d'amplitude élevée par rapport à la grandeur elle-même (exemple : des variations dR de l'ordre de 1 m quand R vaut 2 m). L'adaptation a consisté à calculer ces deux termes d'incertitudes par leur accroissement fini, au lieu des dérivées partielles habituelles. Ce calcul a été validé par comparaison des simulations à des résultats mesurés dans un local d'essai disponible. L'expression des termes d'incertitudes partielle et leur calcul font l'objet de l'annexe 2.

3 Typologie des situations d'exposition simulées

3.1 Analyse de données réelles

Compte tenu du grand nombre de simulations possibles, la typologie des situations d'exposition a été définie en plusieurs étapes. La première étape a consisté à reprendre des comptes rendus d'interventions réalisées en entreprises. Menées dans le cadre d'études INRS antérieures ou d'actions d'assistance en entreprises, quatre interventions ayant donné lieu à des rapports confidentiels ont été utilisées pour extraire différentes informations :

- Entreprise A. Secteur d'activité : extrusion de plastique. Informations collectées : plan d'atelier, mesures de la puissance acoustique des machines, mesures de la décroissance du bruit dans le local, description de l'organisation du travail (nature, localisation et durée relative des tâches), niveaux d'exposition au bruit mesurés pour trois catégories d'opérateurs.
- Entreprise B. Secteur d'activité : verrerie. Informations collectées : plan d'atelier, analyse détaillée de l'organisation du travail par ligne de production (nature, localisation et durée relative des tâches), niveaux d'exposition au bruit mesurés pour un groupe d'opérateurs.
- Entreprise C. Secteur d'activité : fabrication de boîtes métalliques. Informations collectées : plan d'atelier, mesures de la puissance acoustique des machines, mesures de la décroissance du bruit dans le local, description de l'organisation du travail (nature, localisation et durée relative des tâches), niveaux d'exposition au bruit mesurés pour trois catégories d'opérateurs.
- Entreprise D. Secteur d'activité : menuiserie industrielle. Informations collectées : plan d'atelier, mesures de la puissance acoustique des machines, mesures de la décroissance du bruit dans le local, description de l'organisation du travail (localisation et durée relative des tâches), niveaux d'exposition au bruit mesurés pour plusieurs opérateurs.

Plusieurs configurations d'ateliers et de postes de travail à simuler ont été définies à l'aide de ces données réelles. Composée d'un ensemble de machines, une configuration d'atelier spécifie la position et le niveau de puissance acoustique de chaque source de bruit. Le travail d'un groupe d'opérateur est défini par quelques tâches, en spécifiant leur emplacement à proximité des machines et leur durée quotidienne relative.

L'ensemble des données réelles étudiées antérieurement a permis d'établir une typologie des configurations d'atelier et des postes de travail qu'il serait souhaitable de simuler :

- atelier où l'implantation des machines est espacée, ou au contraire rapprochée,
- machines indépendantes ou regroupées en lignes de fabrication,
- poste de travail fixe, de type commande d'une machine,
- poste mobile, de type surveillance de plusieurs machines,
- opérateur effectuant une tâche annexe très bruyante,
- poste de travail non bruyant exposé au bruit des postes voisins.

3.2 Tests préalables

La seconde étape a consisté, à partir des données réelles indiquées ci-dessus, à constituer un ensemble de 7 configurations d'ateliers et de 25 postes de travail, puis à simuler tous ces cas. Les résultats ayant fait apparaître de nombreuses redondances, ils furent utilisés pour sélectionner les configurations les plus significatives puis pour optimiser les simulations et identifier les circonstances dans lesquelles telle variation d'un paramètre du modèle prend un poids déterminant ou demeure, au contraire, négligeable.

Ceci a conduit à spécifier un ensemble de caractéristiques pour les sources de bruit, pour les locaux et pour l'organisation du travail. Ces caractéristiques sont indiquées ci-après, avant de présenter la sélection finale, comprenant douze configurations d'exposition.

3.3 Sources de bruit

Les machines et les sources de bruit ont été définies pour englober différents niveaux de puissance acoustique et des modes d'émission continus ou intermittents durant le temps de travail. Leurs caractéristiques sont indiquées dans le tableau 1.

Type de source	Niveau de puissance acoustique L_w , en dB(A)	Incertitude dL_w , en dB(A)	Durée quotidienne de fonctionnement
Machines bruyantes	de 100 à 105 dB(A)	2 dB(A)	8 h
Equipements annexes (exemple : système transfert)	90 dB(A) environ	3 dB(A)	8 h
Soufflette de nettoyage	108 dB(A)	4 dB(A)	5 min par jour
Broyeur	105 dB(A)	4 dB(A)	30 min par jour

Tableau 1 : Caractéristiques des types de sources de bruit utilisées dans les simulations.

Les sources de bruit (numérotées m) ont été caractérisées par les variables et les incertitudes suivantes :

- coordonnées de la source : X_m, Y_m ;
- niveau de puissance acoustique : valeur comprise entre $(L_w - dL_w)$ et $(L_w + dL_w)$;
- durée d'émission quotidienne relative (par rapport à 8h).

Notes sur les caractéristiques des sources de bruit du modèle utilisé :

- *Les sources ont été supposées ponctuelles. Une machine de grande taille peut être modélisée par plusieurs sources ponctuelles proches.*
- *Aucune variation dans la position des sources n'a été introduite dans le modèle car ce sont les zones de travail (et leur distance à chaque source) qui sont variables.*
- *Quand les machines ont un régime d'émission du bruit relativement stable, l'incertitude sur le niveau de puissance acoustique a été fixée à $dL_w = 2 \text{ dB(A)}$. Par contre, pour simuler une opération manuelle bruyante dont l'émission acoustique n'est pas stable, telle que l'usage d'une soufflette ou l'alimentation d'un broyeur, l'incertitude a été accrue à 4 dB(A) .*
- *La durée relative quotidienne d'émission du bruit n'a pas été affectée d'une incertitude, car ceci aurait le même effet qu'une modification du niveau de puissance acoustique.*

Pour comparer les valeurs indiquées au tableau 1 à d'autres informations, on peut signaler l'équivalence suivante, entre le niveau de pression acoustique L_p généré à 1 m d'une source et son niveau de puissance acoustique L_w : $L_p(1 \text{ m}) \sim (L_w - 8 \text{ dB})$.

Dans la définition des situations d'exposition, des sources de types différents ont été associées, en limitant à 8 le nombre des sources de bruit.

3.4 Caractéristique acoustique du local

L'effet de l'acoustique du local a été simulé par la pente de la décroissance du bruit par doublement de distance DL , fixée généralement à 4 dB(A) , avec une incertitude dDL de $\pm 1 \text{ dB(A)}$. Quelques simulations ont été réalisées avec une valeur DL réduite à $3,5 \text{ dB(A)}$ et des incertitudes dDL de $0,5$ ou 1 dB(A) .

3.5 Caractéristiques des postes de travail

Les postes de travail ont été définis dans des ateliers de $30 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ environ, de surface suffisante pour y répartir 8 sources de bruit.

Le travail d'un opérateur a été schématisé par plusieurs tâches. Chaque tâche se déroule dans une zone z de l'atelier, rectangulaire, définie par les coordonnées du milieu (X_z, Y_z) et par l'étendue des variations (dX_z, dY_z) . Chaque tâche est associée à une durée quotidienne relative T_z , avec son incertitude dT_z .

Quand une tâche se déroule à proximité immédiate d'une machine, l'amplitude des variations dX_z et dY_z a été contrôlée afin de rester cohérent avec la notion de distance minimum à la source : après transformation des coordonnées initiales en distance R et dR (selon les indications données en 2.4), il est nécessaire de borner dR tel que $dR < R$.

Pour modéliser des postes de conduite de machine, la conception des zones de travail a été effectuée afin d'obtenir *in fine*, une distance entre la machine et la zone de travail telle que $R = 2$ m environ. De plus, ont été distingués les postes de travail fixes (où la surface de la zone de travail est inférieure à 1 m^2 , correspondant à $dR = 0,5$ m) et les postes de travail peu mobiles (où la surface de la zone de travail est inférieure à 4 m^2 , correspondant à $dR = 1$ m).

Pour simuler le travail d'un opérateur en champ proche d'une source, une tâche spécifique a été définie correspondant à une zone de surface très réduite, afin de rester cohérent avec la modélisation ponctuelle des sources.

Si l'opérateur pilote une machine non automatique m , quand la machine fonctionne il est contraint d'être présent dans une zone z proche de cette machine. Cette contrainte a été prise en compte en spécifiant un lien entre m et z dans les données d'entrée du modèle. Ceci a été appliqué également pour simuler deux opérations manuelles bruyantes, de durée quotidienne relativement réduite et variable d'un jour à l'autre :

- usage d'une soufflette : $R = 0,5$ m $dR = \pm 0,2$ m ; durée quotidienne de la tâche comprise entre 2,5 et 7,5 min (soit $1 \pm 0,5$ % en valeur relative),
- alimentation manuelle d'un broyeur : $R = 1$ m, $dR = \pm 0,5$ m ; durée quotidienne de la tâche comprise entre 10 et 50 min (soit 6 ± 4 % en valeur relative).

3.6 Désignation des configurations simulées

Les 12 configurations d'exposition choisies *in fine*, numérotées de 1 à 12, se répartissent parmi trois familles de postes de travail :

- Famille A : Postes de travail du type conduite d'une ou plusieurs machines. Simulations 1 à 4.
- Famille B : Postes de travail du type conduite d'une machine avec présence d'un événement acoustique rare. Simulations 5 à 8.
- Famille C : Postes de travail peu ou pas bruyants, exposés aux bruits générés aux postes voisins. Simulations 9 à 12.

Les simulations 1 à 9 s'enchaînent selon le diagramme de la figure 3. S'agissant de postes de travail de type conduite de machines, toutes ces simulations ont été effectuées en gardant les caractéristiques acoustiques du local ($DL = 4$ dB, $dDL = \pm 1$ dB). La mise en évidence des caractéristiques acoustiques du local a été effectuée selon le diagramme de la figure 4 : il rappelle la simulation 9, et présente les simulations 10 à 12.

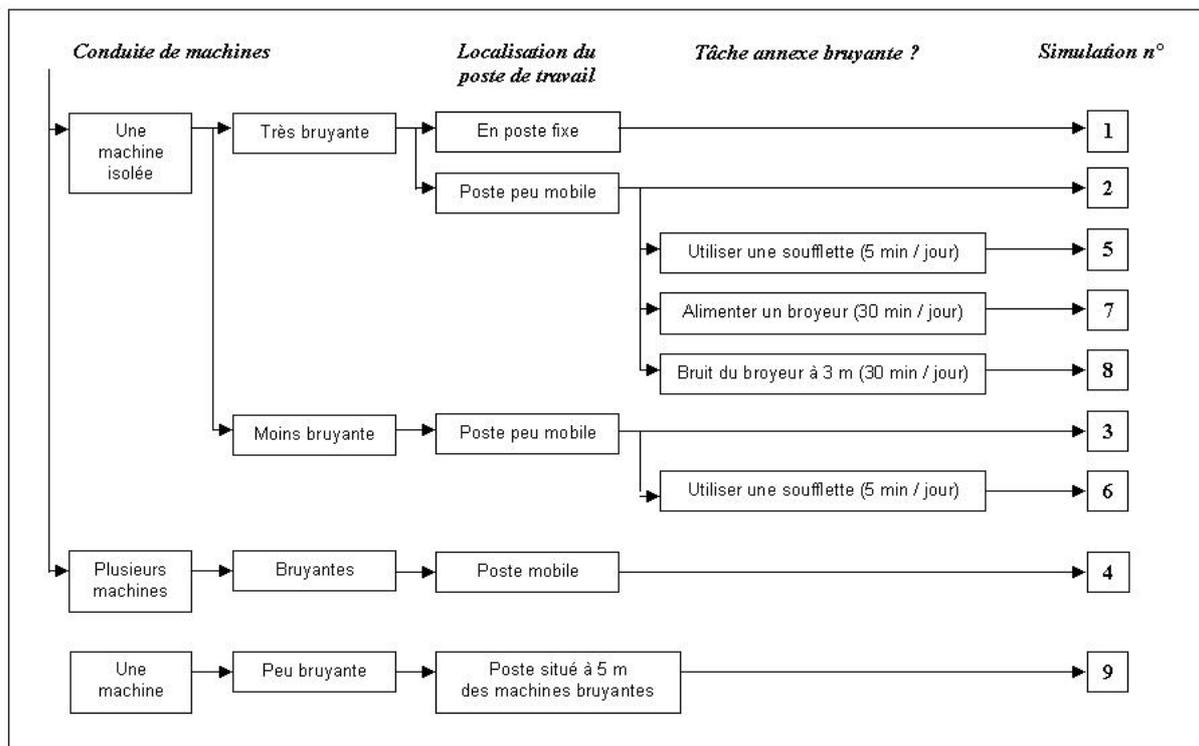


Figure 3 : Diagramme présentant les simulations relatives à des postes de conduite de machines selon les modifications appliquées aux paramètres d'entrées

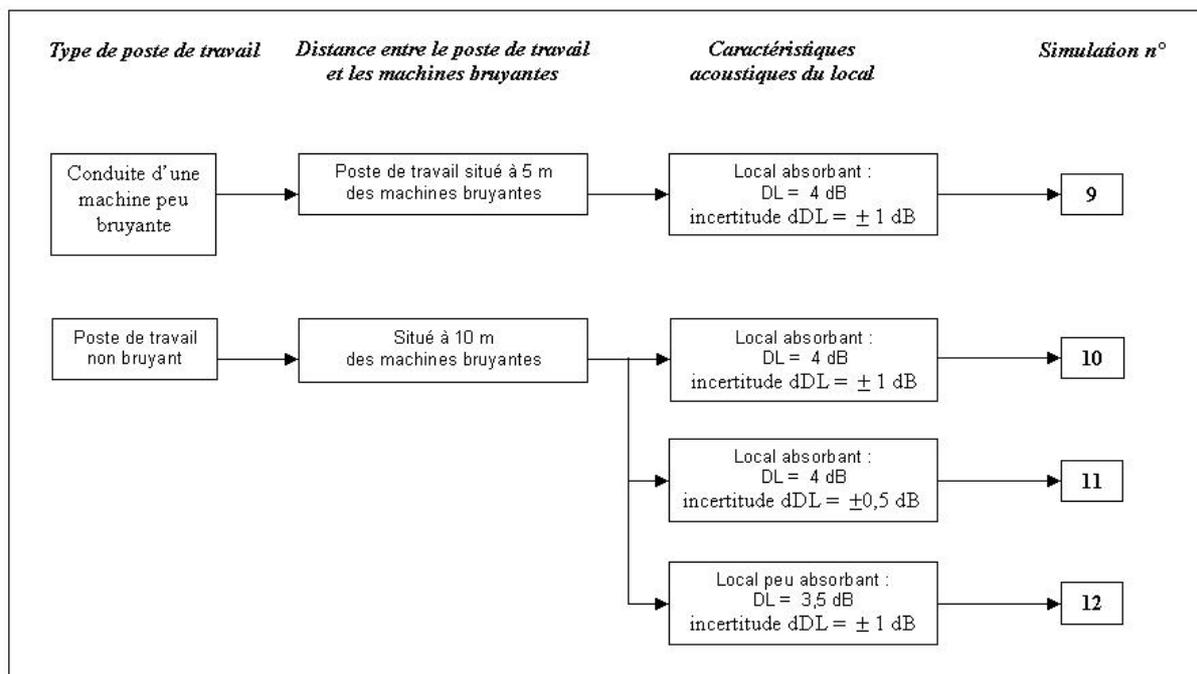


Figure 4 : Diagramme présentant les simulations relatives à la mise en évidence sur $L_{EX,8h}$ des effets de modifications appliquées aux paramètres acoustiques du local

4 Résultats

Les résultats numériques principaux sont indiqués dans les tableaux 2, 3 et 4 en distinguant les trois familles de postes de travail désignées en 3.6.

Dans l'annexe 1 ont été regroupés la totalité des résultats des douze simulations. Chaque simulation y fait l'objet d'une figure comprenant différentes informations : les résultats numériques essentiels, deux graphiques rappelant les données initiales, deux graphiques indiquant les autres résultats (voir en début d'annexe 1 les spécifications facilitant la lecture de ces figures). Il est nécessaire de se référer à l'annexe 1 pour comprendre d'où viennent les résultats énoncés ci-dessous.

4.1 Postes de travail du type conduite d'une ou plusieurs machines

Une configuration simple a été étudiée en premier lieu (voir annexe 1, simulations 1 et 2) : celle d'un opérateur conduisant une machine bruyante et relativement isolée, située dans un atelier où les machines sont éloignées les unes des autres d'environ 8 m (cas de machines indépendantes, séparées par des aires de stockage). Le poste de travail est situé à la distance moyenne de 2 m de la machine bruyante [$L_w = 104 \pm 2$ dB(A)].

Les simulations 1 et 2 correspondent à cette configuration initiale simple. La différence entre les deux simulations ne porte que sur l'étendue de la zone de travail : limitée à environ 1 m² pour le poste fixe de la simulation 1, elle a été accrue à environ 4 m² pour le poste légèrement mobile de la simulation 2, tout en conservant la même distance moyenne ($R = 2$ m) entre la machine et le poste de travail.

Les résultats des simulations 1 et 2 montrent que les valeurs $L_{EX,8h}$ ne diffèrent que de 0,2 dB(A) et confirment que l'exposition sonore de cet opérateur résulte quasiment exclusivement du bruit émis par la machine qu'il conduit. Par contre les intervalles de confiance sur $L_{EX,8h}$ s'élèvent respectivement à 1,4 et à 3,1 dB(A).

Deux termes d'incertitudes ont un poids notable dans ces 2 simulations :

- le terme en L_w , lié au niveau de puissance acoustique de la machine et à ses variations de ± 2 dB(A) (sous l'effet des modifications de réglages, de matières, etc),
- le terme lié à R , la distance entre la machine et l'opérateur.

La simulation 1, relative au poste de travail fixe (défini par $R = 2 \pm 0,4$ m), montre que le poids du terme en L_w est prépondérant sur celui en R . Après accroissement de l'étendue de la zone de travail ($R = 2 \pm 0,9$ m), la simulation 2 montre que le poids du terme d'incertitude en R est devenu comparable à celui du terme en L_w (quand la variation initiale est $dL_w = \pm 2$ dB(A)). Dans la simulation 2, la valeur de l'incertitude totale sur $L_{EX,8h}$ est doublée et cet accroissement est lié à la possibilité pour l'opérateur d'être situé parfois à environ 1 m de la machine, en champ acoustique proche (phases d'alimentation, de réglages) ou d'être situé à 3 m de distance (surveillance, contrôle, évacuation).

Dans la simulation 3, on examine ce qui se passe quand l'opérateur conduit, en poste peu mobile, une machine bruyante non plus isolée mais située à proximité d'autres machines bruyantes. On a supposé que trois machines de même puissance acoustique étaient situées

à environ 4 m, l'opérateur conduisant la machine placée entre les deux autres. Les résultats ont confirmé que les deux machines proches apportent une contribution significative au niveau d'exposition au bruit $L_{EX,8h}$. L'incertitude globale est de 2,7 dB(A) et provient de deux termes prépondérants, tous deux liés à la machine que conduit cet opérateur : les termes en L_w et en R . Dans les conditions de la simulation [trois machines identiques, $L_w = 100 \pm 2$ dB(A)], les poids des termes d'incertitudes liés aux deux machines proches restent négligeables par rapport à ceux de la machine que conduit l'opérateur.

Dans la simulation 4, l'opérateur est chargé de conduire une ligne de production comprenant plusieurs machines, avec des tâches localisées auprès des différentes machines de la ligne. Le travail de l'opérateur étant lié à l'ensemble de la ligne, sa durée de présence dans chaque zone de travail a été supposée connue de façon assez approximative. Cette configuration a été schématisée par une ligne comprenant deux machines bruyantes reliées par un système de transfert (peu bruyant). Le travail de l'opérateur se déroule dans 4 zones. Les niveaux de puissance acoustique des deux machines bruyantes sont peu différents ($L_w = 100 \pm 2$ dB dans le cas de la machine 1 ; $L_w = 102 \pm 2$ dB dans le cas de la machine 3) ; les zones de travail situées près des deux machines bruyantes ont été définies par les mêmes paramètres ($R = 2,3 \pm 1$ m ; $T = 35 \pm 20$ %). Les résultats montrent que l'incertitude globale a été estimée à 4,2 dB(A). Deux termes d'incertitudes dominent : le terme en L_w lié à la machine ayant le niveau de puissance acoustique le plus élevé (machine 3), le terme en T lié à la durée de présence de l'opérateur dans la zone 3 près de la machine 3. Pour la machine 1, les termes d'incertitudes liés à L_w et T sont présents également mais avec un poids plus faible que pour la machine 3, ce qui s'explique par la différence de 2 dB sur leurs niveaux de puissance acoustique.

Le résultat de la simulation 4 montre que le terme d'incertitude lié à T est du même poids que celui qui est lié à L_w . On notera que dans les données initiales la variation relative en temps a été fixée à $dT/T = 20/35$, soit 60 % environ. Il faut donc que la variation relative en temps soit très élevée pour que l'incertitude finale ait un poids comparable à celui d'une variation de 2 dB sur le niveau de puissance acoustique.

Le tableau 2 fournit une synthèse de ces résultats.

Dans les simulations de postes de conduite 1 à 4, le local a été modélisé par la valeur de la pente de décroissance $DL = 4$ dB(A), avec une incertitude $dDL = \pm 1$ dB(A). Malgré l'ampleur relative de la variation sur DL , aucun effet lié à l'incertitude sur DL n'apparaît dans les résultats, ce qui s'explique par la proximité des sources de bruit et du poste de travail étudié. Pour mettre en évidence ce facteur, des postes de travail éloignés des machines les plus bruyantes seront simulés spécifiquement (voir simulations 9 à 12).

4.2 Postes de conduite de machine et présence d'un événement acoustique rare

Quand on analyse le travail d'un opérateur, il est assez fréquent d'identifier une tâche spécifiquement bruyante mais de durée réduite pendant une journée de travail, qualifiée d'événement acoustique rare. C'est le cas, par exemple, de l'emploi d'une soufflette de nettoyage, ou de l'usage intermittent d'une machine plus bruyante que les autres, telle qu'un broyeur de déchets à alimentation manuelle.

Dans la métrologie de l'exposition, la présence de ces événements est problématique : leur niveau de bruit reste difficile à quantifier, leur durée cumulée quotidienne est souvent mal connue ; par contre, leur impact peut être élevé dans le niveau d'exposition quotidienne au bruit. De plus il faut évaluer cet impact en fonction de la distance source-opérateurs, en

distinguant l'opérateur qui provoque l'événement et qui est donc proche de la source, et les opérateurs qui subissent, à une certaine distance, le bruit généré par l'événement. Les simulations 5 à 8 ont été conçues pour éclairer ces questions.

Dans la simulation 5 (voir annexe 1), l'opérateur utilise une soufflette à jet d'air comprimé 5 minutes par jour, alors que sa tâche principale est la conduite d'une machine très bruyante (dans des conditions déjà utilisées pour la simulation 2). Les résultats ont montré que l'usage de la soufflette accroît de 1,5 dB(A) le niveau $L_{EX,8h}$. L'incertitude globale s'élève à 2,4 dB(A) et résulte de trois termes d'incertitudes ayant presque le même poids : les termes en L_w et en R liés à la machine que conduit l'opérateur, le terme en L_w lié à l'usage de la soufflette. Ce résultat dépend des paramètres d'entrées appliqués pour simuler la conduite d'une machine très bruyante ($L_w = 104 \pm 2$ dB ; $R = 2 \pm 1$ m) et l'usage d'une soufflette ($L_w = 108 \pm 4$ dB ; $R = 0,5 \pm 0,2$ m ; $T = 1 \% \pm 0,5 \%$), dans lesquels le niveau L_w de la soufflette excède de 4 dB celui de la machine bruyante.

Dans la simulation 6, l'opérateur utilise une soufflette comme précédemment, mais il conduit une machine moins bruyante ($L_w = 100$ dB au lieu de 104 dB). Dans ces conditions, les résultats montrent que l'usage de la soufflette entraîne une exposition sonore partielle supérieure à celle de tâche de conduite. Parmi les termes d'incertitudes, un seul prend un poids prépondérant : celui qui est lié au niveau de bruit L_w de la soufflette. Dans cette configuration, l'incertitude sur $L_{EX,8h}$ ne dépend donc quasiment plus des termes liés à la tâche principale de l'opérateur (la conduite de sa machine) mais est déterminée par le bruit généré lors des 5 minutes quotidiennes d'usage de la soufflette.

Avec les simulations 7 et 8 examinons l'impact d'un autre type d'événement rare : celui de l'usage d'un broyeur ($L_w = 105 \pm 3$ dB), pendant une demi heure environ par jour ($T = 6 \pm 4 \%$). Alors que la tâche principale de l'opérateur reste toujours la conduite d'une machine très bruyante ($L_w = 104 \pm 2$ dB ; $R = 2 \pm 1$ m), l'impact du bruit émis par le broyeur a été quantifié quand la tâche annexe est l'alimentation du broyeur (présence pendant 30 min à $R = 1 \pm 0,5$ m de distance) dans le cas de la simulation 7, puis quand la tâche annexe se déroule à une distance de 3 m environ du broyeur ($R = 3 \pm 1$ m), dans le cas de la simulation 8.

Les résultats de la simulation 7 montrent que l'incertitude sur le niveau $L_{EX,8h}$ s'élève à 3 dB(A) et résulte de trois termes d'incertitudes ayant presque le même poids : les termes en L_w et en R liés à la tâche de conduite de la machine bruyante, le terme en L_w lié à la tâche d'alimentation du broyeur quand l'opérateur doit être présent en champ proche de cette source ($R=1 \pm 0,5$ m). Dans la simulation 8, la contrainte de présence en champ proche a été supprimée : quand le broyeur fonctionne, la distance source-opérateur est comprise entre 2 et 4 m. Dans ce cas, les résultats ont montré que les termes d'incertitudes liés au broyeur n'ont plus aucun poids, comparativement à ceux de la tâche de conduite.

Le tableau 3 fournit une synthèse de ces résultats.

4.3 Postes de travail exposés aux bruits des postes voisins : influence du local

Tous les postes de travail envisagés jusqu'à présent ont été du type conduite d'une machine bruyante, l'opérateur étant toujours situé à une distance d'une source dominante de bruit inférieure à 5 m. Ils ont été simulés en appliquant aux caractéristiques acoustiques du local une pente par doublement de distance $DL = 4 \pm 1$ dB. Dans ces conditions, les simulations 1 à 8 ont confirmé que le poids des termes d'incertitudes liés à l'acoustique du local ne pouvait être que négligeable devant celui des autres termes envisagés ici.

Pour mettre en évidence l'effet du local, les simulations 9 à 12 ont été construites en éloignant les postes de travail des sources de bruit prépondérantes à des distances de 5 et 10 m, et en faisant varier la valeur de DL et son incertitude.

La simulation 9 (voir annexe 1) concerne un atelier comprenant 8 machines bruyantes, de niveau L_w compris entre 96 et 104 dB(A). Le travail de l'opérateur est situé en poste fixe, à 2 m de la machine la moins bruyante ($L_w = 96$ dB) et à 5 m environ d'une machine plus bruyante ($L_w = 102 \pm 2$ dB). Le local a été caractérisé par $DL = 4 \pm 1$ dB(A). Dans ces conditions, les résultats confirment que l'exposition sonore résulte des contributions partielles liées aux 8 machines. Ils montrent que les termes d'incertitudes liés à DL ne sont plus négligeables, même si leur poids reste inférieur à celui des termes en L_w .

La simulation 9 montre que pour donner plus de poids au terme lié à DL, il faut accroître au-delà de 5 m la distance entre le poste de travail et les sources de bruit. C'est ce qui a été fait dans les simulations 10, 11 et 12 : l'exposition au bruit a été évaluée à une distance de 10 m environ de la source de bruit la plus proche. La même configuration d'atelier a été conservée dans ces trois simulations, mais la valeur de DL a été spécifiée ainsi : $DL = 4 \pm 1$ dB (simulation 10), $DL = 4 \pm 0,5$ dB (simulation 11), $DL = 3,5 \pm 1$ dB (simulation 12).

La simulation 10, correspondant à $DL = 4 \pm 1$ dB, montre une incertitude totale sur $L_{EX,8h}$ de 3,3 dB(A). Parmi les termes d'incertitudes, celui qui a le plus de poids reste le terme en L_w (lié à la machine bruyante située à 10 m du poste de travail) ; toutefois, le terme en DL prend un poids presque équivalent.

La simulation 11 montre l'effet d'une réduction à 0,5 dB de l'incertitude sur DL. La valeur de $L_{EX,8h}$ est identique à celle de la simulation 10, mais l'incertitude globale est réduite à 1,3 dB (au lieu de 3,3 dB précédemment). Le poids du terme d'incertitude lié à DL est devenu petit devant celui du terme en L_w .

Dans la simulation 12, la valeur DL a été réduite à 3,5 dB avec une incertitude de 1 dB. Dans ce cas, les résultats de la simulation sont quasiment identiques à ceux de la simulation 10, autant pour l'incertitude totale sur $L_{EX,8h}$ que pour le poids respectif des termes d'incertitudes. La seule différence notable concerne le niveau de bruit $L_{EX,8h}$ au poste de travail : il s'élève à 84,7 dB(A) dans la simulation 12 contre 83,4 dB(A) dans la simulation 10. Mais on retrouve ici une différence prévisible : quand rien d'autre ne change dans les conditions d'exposition, le niveau du bruit mesuré à 10 m d'une source de bruit est accru (cas de la simulation 12) quand l'absorption acoustique du local se détériore ($DL = 3,5$ dB au lieu de 4 dB dans la simulation 10).

Le tableau 4 fournit une synthèse de ces résultats.

5 Discussion et conclusions

Examinons tout d'abord les avantages et les limites du modèle mis au point. Il s'est avéré efficace et simple à utiliser pour simuler diverses situations d'exposition au bruit professionnel, pour quantifier l'incertitude totale sur le niveau d'exposition quotidienne au bruit et pour identifier les facteurs d'incertitudes ayant un poids prépondérant.

Une représentation simplifiée de la propagation acoustique dans le local a été utilisée, celle de la pente de décroissance du bruit par doublement de distance à la source, DL. Elle offre l'avantage de prendre en compte une grandeur aisément accessible lors de mesures en atelier qui caractérise globalement l'atelier sur le plan acoustique. Elle suppose que le local

soit homogène, hypothèse largement acceptable dans le cadre de l'étude présente. De plus, la pente de décroissance du bruit DL a été généralisée par une fonction dépendant de R et de DL afin de fournir une solution de continuité valide en champ proche à moins de 3 m de distance d'une source. Cette adaptation s'est avérée très utile pour étudier l'exposition partielle résultant de tâches contraignant l'opérateur à s'approcher à 1 m environ d'une machine bruyante ainsi que pour simuler des tâches manuelles bruyantes.

Les machines et sources de bruit ont été supposées ponctuelles. Mais cette hypothèse n'est pas apparue restrictive ici, le modèle pouvant aisément être utilisé avec plusieurs sources de bruit proches. De plus, la durée d'émission quotidienne des sources de bruit a été prise en compte, ce qui a permis de simuler des émissions de bruit intenses mais relativement brèves, qualifiées d'événements acoustiques rares dans le mesurage de l'exposition au bruit professionnel. Par contre, une machine est associée à un seul niveau de puissance acoustique. Malgré l'incertitude sur le niveau Lw, le modèle prend mal en compte les machines dont le niveau de puissance acoustique varie notablement quand changent la matière travaillée ou les réglages.

Si des machines sont utilisées de façon non permanente durant une journée de travail, cette caractéristique a été prise en compte dans la modélisation. Dans ce cas, une distinction a été réalisée dans le modèle entre l'opérateur conduisant une machine manuelle, qui est donc contraint de demeurer près de cette machine tant qu'elle fonctionne, et les autres opérateurs de l'atelier qui n'ont pas cette contrainte. Ceci a permis de simuler la réalisation d'opérations manuelles très bruyantes et généralement brèves, telles que l'usage d'une soufflette ou l'alimentation d'un broyeur situé dans l'atelier.

Le modèle développé offre la possibilité de simuler des configurations très larges d'exposition professionnelle au bruit. Il comprend toutefois au moins une restriction : il ne prend pas en compte les sources mobiles, ce qui interdit la simulation du bruit aux postes de conduite des engins de chantier, des chariots automoteurs, etc, ainsi que la prise en compte du bruit généré par ces sources mobiles sur des opérateurs en poste fixe.

La contrainte du découpage du travail en tâches bien localisées et ayant des durées spécifiées est indispensable avec ce modèle. On peut alors s'interroger : jusqu'où faut-il affiner ce découpage pour refléter correctement l'exposition quotidienne au bruit ? En fait aucune limitation dans le nombre des tâches n'existe dans le modèle. Par contre, dans la visualisation des résultats, dès lors que quelques termes prépondérants d'exposition sonore existent, il est apparu inutile de visualiser les contributions négligeables. Ce n'est donc que pour faciliter la visualisation des résultats qu'une limitation du nombre des sources de bruit et de celui des tâches a été introduite.

En fait une difficulté non négligeable de cette étude a consisté à choisir les paramètres d'entrée des simulations. Il a été signalé que des données réelles, provenant d'interventions en entreprises menées dans des secteurs professionnels très différents avaient été employées pour concevoir les simulations puis pour optimiser leurs paramètres en vue de faire apparaître à partir de quand telle variation d'un paramètre devient importante. Ces données réelles ont permis de fixer dans l'espace d'un atelier la position des machines et de leur attribuer un niveau de puissance acoustique. Sur ces données de base, plusieurs schémas d'organisation du travail ont été appliqués. Il est certain que d'autres types d'implantation des machines et modes d'organisation du travail existent. Le choix final des paramètres des 12 simulations analysées ici pourrait être largement discuté et d'autres simulations pourraient s'avérer nécessaires. Si des données d'entrées nouvelles étaient fournies, le modèle permettrait d'obtenir immédiatement le résultat d'autres simulations.

Examinons ensuite les résultats selon les effets des quatre variables du modèle : le niveau de puissance acoustique des machines, la distance séparant l'opérateur exposé au bruit et

la source de bruit, la durée pendant laquelle un opérateur est exposé au bruit lors d'une tâche spécifique, les caractéristiques acoustiques du local.

Concernant le niveau de puissance acoustique des machines, cette étude a montré que l'incertitude sur ce terme était généralement prépondérante dans l'incertitude sur le niveau d'exposition quotidienne au bruit. Ce résultat a été mis en évidence dans la plupart des postes de travail étudiés. Toutefois cet effet dépend simultanément du niveau de puissance acoustique L_w et de la variation dL_w appliquée à ce niveau. Ceci a une conséquence pratique importante. On savait déjà que la contribution des machines peu bruyantes était négligeable dans l'exposition sonore des opérateurs. Cette étude a montré en outre, qu'aucun accroissement de l'incertitude globale sur $L_{EX,8h}$ ne pouvait provenir de sources de bruits secondaires, ce qui s'explique par le fait que l'incertitude est fonction simultanément de L_w et de dL_w . Le choix d'une incertitude de 2 dB(A) sur le niveau de puissance acoustique des sources peut être discuté. Selon les types de machines, leur production ou leur conditions d'emploi, ce terme pourrait être diminué (cas de machines à cycle très stable) ou accru (sources directives, de grandes dimensions, etc). Ceci restreindrait (ou accroîtrait) le poids relatif de ce terme, mais ne modifierait pas les tendances décrites ici. Il est donc nécessaire de connaître aussi précisément que possible la puissance acoustique des machines bruyantes.

Quand on examine l'effet de la distance de l'opérateur à la source de bruit, cette étude a confirmé l'importance du champ proche, quand l'opérateur doit être présent à environ 1 m de la source de bruit. Quand la zone de travail s'étend sur des distances comprises entre 1 et 3 m de la machine bruyante, il a été montré que l'incertitude liée à cette variation de distance avait un poids du même ordre que l'incertitude liée à une variation de 2 dB du niveau de puissance acoustique de la machine bruyante. Quand la distance source-opérateur s'accroît au-delà de 5 m, le poids des incertitudes liées à la distance devient négligeable dans l'incertitude totale sur $L_{EX,8h}$. Ces résultats confirment l'intérêt de deux recommandations relatives au mesurage de l'exposition professionnelle au bruit :

- bien prendre en compte les opérations qui amènent les opérateurs à s'approcher très près de machines bruyantes, liées généralement à des tâches comme le réglage sur machine en fonctionnement ou une intervention pour récupération d'incident de production.
- Veiller à bien identifier les opérations manuelles bruyantes et susceptibles de créer des « événements acoustiques rares et intenses » (tel que l'usage d'une soufflette non insonorisée), afin de les prendre en compte prioritairement dans le mesurage.

Sur les incertitudes relatives aux durées des différentes tâches de l'opérateur, leur poids est apparu négligeable devant celui des incertitudes liées au niveau de puissance acoustique, dans la plupart des simulations étudiées. Un cas fait exception : celui de la conduite de ligne de production comprenant plusieurs machines bruyantes et autant de zones de travail. Dans ce cas, l'évaluation de la durée de présence de l'opérateur à chaque endroit de la ligne est très imprécise. Quand cette imprécision s'élève en valeur relative à 60 %, il a été montré qu'elle générerait un terme d'incertitude de même poids qu'une incertitude de 2 dB(A) sur L_w .

Cette étude a montré que les caractéristiques acoustiques du local n'interviennent de façon sensible que pour des postes de travail peu bruyants par eux-mêmes et éloignés d'au moins 5 m des machines bruyantes. Quand la machine bruyante la plus proche est à une distance d'environ 10 m d'un poste de travail peu bruyant, une variation de DL de 0,5 dB(A) a un effet sur le niveau d'exposition quotidienne au bruit à ce poste qui n'excède pas 1 dB(A). Pour tous les postes de travail dont la tâche principale contraint l'opérateur à être présent à moins

de 3 m d'une machine bruyante, le traitement acoustique du local n'a pratiquement pas d'influence car les autres facteurs sont largement prépondérants.

Au total, cette étude a montré que les incertitudes sur le niveau d'exposition quotidienne au bruit étaient liées prioritairement aux niveaux de puissance acoustique des sources de bruit prépondérantes et aux tâches contraignant l'opérateur à être en champ proche d'une source de bruit. La durée des tâches est apparue comme ayant généralement très peu d'impact sur l'incertitude sur $L_{EX,8h}$ comparativement aux deux précédents termes. Quant aux caractéristiques acoustiques du local, cette étude a confirmé qu'elles n'influencent pas le bruit reçu par les opérateurs sur machines. Leur effet est perceptible sur des postes de travail non bruyants en eux-mêmes et éloignés de 10 m ou plus des machines bruyantes.

Examinons l'amplitude de l'incertitude totale sur $L_{EX,8h}$ exprimée par son intervalle de confiance à 95 % : elle varie de 1,5 à 3 dB(A) environ parmi les douze simulations réalisées. Comparée à l'incertitude de 2 dB qui fut appliquée au niveau de puissance acoustique des machines les plus bruyantes dans les paramètres d'entrée du modèle, on en déduit que leurs amplitudes sont voisines. Ce résultat est cohérent avec le fait que le niveau de puissance acoustique est prépondérant pour expliquer l'incertitude sur $L_{EX,8h}$. Il peut être rapproché de celui d'une étude ayant eu pour objet de constituer une base de données d'exposition professionnelle au bruit [1], où furent réalisées des mesures parmi six groupes de travailleurs exposés dans des circonstances très différentes. Dans cette étude l'intervalle de confiance sur $L_{EX,8h}$ est compris entre 3 et 4,5 dB(A), valeur supérieure à celle de l'étude présente qui pourrait s'expliquer par le choix des six groupes de travailleurs. Parmi eux, plusieurs groupes sont exposés au bruit dans des conditions nettement différentes d'un jour à l'autre.

Ce modèle reste disponible pour analyser d'autres configurations d'exposition au bruit professionnel, ce qui pourrait s'avérer utile pour préciser ou compléter les résultats présentés.

6 Références

- [1] THIERY L., Estimation de l'exposition au bruit de six groupes de travailleurs. Notes scientifiques et techniques, INRS (Paris), NS 259, 2006.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] LOYAU T., Determination of the sound power levels using sound pressure : uncertainties attached to the measurement surface and to the number of microphones. *In : Managing Uncertainty in Noise Measurement and Prediction, INCE Symposium (Le Mans), 27-29 June 2005.*
- [5] CHATILLON J., Requirements of accuracy for the description of the input parameters of a room acoustical programme. *In : Managing Uncertainty in Noise Measurement and Prediction, INCE Symposium (Le Mans), 27-29 June 2005.*

- [6] ONDET A.M., BARBRY J.L., Prédiction des niveaux sonores dans les locaux industriels encombrés à l'aide du logiciel d'acoustique prévisionnelle RAYSCAT. Cahiers de notes documentaires, 142, 41-53, 1991.
- [7] ONDET A.M., BARBRY J.L., Sound propagation in fitted rooms – Comparison of different models. J. of Sound and Vibration, 125, 1, 137-149, 1988.
- [8] HODGSON M., On the accuracy of models for predicting sound propagation in fitted rooms. J. Acoust. Soc. Am, 88, 2, 871-878, 1990.
- [9] HODGSON M., Experimental evaluation of simplified models for predicting noise levels in industrial workrooms. J. Acoust. Soc. Am., 103, 4, 1933-1939, 1998.
- [10] 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 prédiction du bruit dans les locaux de travail. ISO (Genève), 1999.
- [11] ISO. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) – Supplement 1 : Numerical methods for the propagation of distributions. En cours de publication. 2007
- [12] NF ENV 13005. Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM, 1995).

7 Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des types de sources de bruit utilisées dans les simulations.(cf. page 8)

Tableau 2 : Synthèse des résultats principaux pour les postes de type conduite d'une ou plusieurs machines bruyantes

Tableau 3 : Synthèse des résultats principaux pour les postes de type conduite de machine bruyante avec présence d'événement rare

Tableau 4 : Synthèse pour les postes peu ou pas bruyants, exposés aux bruits des postes voisins

Référence de la simulation	Conditions d'exposition au bruit				Résultats			
	Type de poste de travail	Source dominante / Zone de travail	Source secondaire / Zone de travail	Champ proche (R < 1 m) possible?	IC 95 % $L_{EX,8h}$ dB(A)	Poids des facteurs d'incertitude ^(a)		Commentaire
						majeur [0,5 et 0,4]	moyen [0,3 et 0,2]	
1	Poste de conduite fixe d'une machine isolée	$L_w = 104 \pm 2$ dB $R = 2 \pm 0,4$ m	$R^{(s)} > 10$ m	Non	1,4	dLw	dR	Cas élémentaire (référence initiale)
2	Poste de conduite peu mobile d'une machine isolée	$L_w = 104 \pm 2$ dB $R = 2 \pm 1$ m	$R^{(s)} > 10$ m	Oui	3,1	dLw, dR	/	Le travail en champ proche accroît le poids du terme en dR et double l'incertitude
3	Poste de conduite peu mobile d'une machine entourée d'autres machines	$L_w = 100 \pm 2$ dB $R = 2 \pm 1$ m	$L_w = 100 \pm 2$ dB $R^{(s)} = 4 \pm 1$ m	Oui	2,7	/	dLw, dR	Les machines proches diminuent le poids des 2 termes liés à la machine conduite
4	Surveillance d'une ligne de plusieurs machines	$L_w = 102 \pm 2$ dB $R = 2,3 \pm 1$ m $T = 35\% \pm 20\%$	$R^{(s)} = 2,3 \pm 1$ m	Non	4,1	/	dLw, dT	Le travail étant réparti dans plusieurs zones, l'incertitude relative initiale sur T est très élevée = 20/35 soit 60 %

^(a) Paramètres du local : DL = 4 ± 1 dB(A)

^(s) Paramètre concernant une source de bruit secondaire

Tableau 2 : Synthèse des résultats principaux pour les postes de type conduite d'une ou de plusieurs machines bruyantes

Référence de la simulation	Conditions d'exposition au bruit				Résultats			
	Type de poste	Caractéristiques de la source dominante	Caractéristiques de la source secondaire	Champ proche (R<1 m) possible ?	IC 95 % L _{EX,8h} dB(A)	Poids des facteurs d'incertitude ^(a)		Commentaire
						majeur [0,5 et 0,4]	moyen [0,3 et 0,2]	
5	Conduite de machine très bruyante, poste peu mobile + usage soufflette	Lw = 104 ± 2 dB R = 2 ± 1 m	Soufflette (5 min/8h) Lw = 108 ± 4 dB	Oui	2,4	/	dLw, dR ; dLw ^(s)	L'incertitude totale est déterminée par dLw de la machine et de la soufflette
6	Conduite de machine bruyante, poste peu mobile + usage soufflette	Lw = 100 ± 2 dB R = 2 ± 1 m	Soufflette (5 min/8h) Lw = 108 ± 4 dB	Oui	2,4	dLw ^(s)	/	La machine étant moins bruyante, l'incertitude ne résulte que du dLw lié à la soufflette
7	Conduite de machine très bruyante, poste peu mobile + alimentation broyeur	Lw = 104 ± 2 dB R = 2 ± 1 m	Commande d'un broyeur ^(c) (30 min/8h) Lw = 105 ± 4 dB R = 1 ± 0,5 m	Oui	3,0	/	dLw, dR ; dLw ^(s)	L'incertitude totale est déterminée par dLw de la machine et du broyeur
8	Conduite de machine très bruyante, poste peu mobile. Subit le bruit du broyeur à 3 m	Lw = 104 ± 2 dB R = 2 ± 1 m	Bruit du broyeur ^(c) subi (30 min/8h) Lw = 105 ± 4 dB R = 3 ± 1 m	Oui	2,8	dLw, dR	/	En restant à 3 m du broyeur, l'incertitude liée au broyeur devient négligeable

^(a) Paramètres du local : DL = 4 ± 1 dB(A)

^(b) Paramètres relatifs à l'usage de la soufflette : Lw = 108 ± 4 dB ; R = 0,5 ± 0,2 m ; T = 1 ± 0,5 %

^(c) Paramètres relatifs à l'émission sonore du broyeur : Lw = 105 ± 4 dB ; T = 6 ± 4 %

^(s) Paramètre concernant la source de bruit secondaire

Tableau 3 : Synthèse des résultats principaux pour les postes de type conduite de machine bruyante avec présence d'événement rare

Référence de la simulation	Caractéristiques du local	Conditions d'exposition		Résultats			
	DL ± dDL dB(A)	Type de poste de travail	R ± dR Distance Poste / Source de bruit dominante la plus proche	IC 95 % L _{EX,8h} dB(A)	Poids des facteurs d'incertitude		Commentaire
					moyen [0,3 et 0,2]	faible [= 0,1]	
9	DL = 4 ± 1	Conduite d'une machine peu bruyante	5 ± 1 m	1,4	/	dLw ^(s)	A 5 m des sources, l'incertitude liée à DL a un poids moindre que celle de Lw
10	DL = 4 ± 1	Poste non bruyant, isolé	10 ± 2 m	3,3	dLw ^(s) dDL	dR ^(s)	A 10 m des sources, le poids de l'incertitude liée à DL devient net
11	DL = 4 ± 0,5	Poste non bruyant, isolé	10 ± 2 m	1,3	dLw ^(s)	dDL dR ^(s)	Le poids de dDL est réduit, si la mesure de DL est plus précise
12	DL = 3,5 ± 1	Poste non bruyant, isolé	10 ± 2 m	3,0	dLw ^(s) dDL	dR ^(s)	Poids des termes d'incertitudes identiques à la simulation 10. Différence d'effet notée sur L _{EX,8h}

^(s) Paramètre concernant des sources de bruit indépendantes du poste de travail étudié (qualifiées de secondaires pour cette raison)

Tableau 4 : Synthèse pour les postes peu ou pas bruyants et exposés aux bruits des postes voisins

Annexe 1 : Résultats des 12 simulations

Mode de lecture des résultats des simulations 1 à 12

Pour faciliter leur analyse, les résultats des simulations sont présentés accompagnés de deux graphiques rappelant les données initiales et leur domaine de variation. Le premier graphique concerne les sources de bruit : repérées par un numéro, le niveau de puissance acoustique $L_w(m)$ de chaque source et son incertitude $+ dL_w(m)$ sont indiqués. Le second graphique est un schéma d'atelier indiquant l'emplacement des sources et celui des zones de travail. Chaque source a été repérée par son numéro, afin de la relier aisément à son niveau de puissance acoustique. Les emplacements de travail sont représentés par des zones rectangulaires vertes, et spécifient la durée de présence de l'opérateur dans la zone (cette durée a été indiquée en % par rapport à la durée d'une journée de 8 h).

Les résultats des simulations sont indiqués par les valeurs numériques principales : le niveau du bruit $L_{EX,8h}$ et son intervalle de confiance IC, en dB(A). Les termes d'exposition sonore partielle en $Pa^2.h$, sont indiqués sur un troisième graphique. Ils indiquent l'effet du bruit émis par une machine dans une zone de travail spécifiée.

Le quatrième graphique présente les termes d'incertitudes sur E. Il indique, en pourcentage du total, la contribution respective des termes d'incertitudes des 4 variables du modèle, L_w , R, T, DL, sur l'exposition sonore totale en $Pa^2.h$. Ainsi représentées, les contributions sont comparables entre elles, ce qui rend très aisée l'identification des termes prépondérants.

Toutefois, on évitera une lecture erronée de ce graphique, qui consisterait à « additionner les pourcentages indiqués » pour expliquer l'incertitude sur $L_{EX,8h}$. Cette démarche serait erronée pour deux raisons. Tout d'abord, le poids des termes indiqués sur ce graphique résulte des valeurs elles-mêmes, alors qu'il faudrait prendre les valeurs quadratiques si l'objectif était d'estimer la variance totale. Ensuite, la présentation du graphique s'applique aux valeurs d'exposition sonore en $Pa^2.h$ et non aux niveaux de bruit en décibel afin de faciliter les comparaisons. Pour mémoire, on rappellera que l'incertitude totale sur $L_{EX,8h}$ a été estimée non pas par un calcul analytique qui reste très complexe, mais par simulation numérique, selon la méthode exposée en 2.5.

Nature des résultats de chaque simulation

Les informations suivantes sont fournies :

- Exposition sonore totale en $Pa^2.h$ avec son intervalle de confiance à 95 %, indiqué par les bornes inférieure et supérieure (déduites des simulations numériques indiquées en 2.5).
- Niveau d'exposition quotidienne au bruit, $L_{EX,8h}$ en dB(A) avec son intervalle de confiance à 95 %. La fonction définissant $L_{EX,8h}$ n'étant pas linéaire, ceci entraîne que l'intervalle de confiance soit généralement non symétrique ; son étendue et ses bornes inférieure et supérieure ont donc été spécifiées.
- Figure a : rappel du niveau de puissance acoustique L_w de chaque machine (ou source de bruit) avec son incertitude $+ dL_w$ en dB(A).
- Figure b : schéma d'atelier indiquant la position des machines, celle des zones de travail (rectangles verts) avec la durée relative de présence de l'opérateur.
- Figure c : exposition sonore partielle en $Pa^2.h$ par machine et zone de travail.

- Figure d : poids des termes d'incertitudes en %.

Un commentaire soulignant les conclusions essentielles accompagne les résultats de chaque simulation.

Liste des 12 simulations

A. Postes de travail du type conduite d'une ou plusieurs machines

Simulation 1 : Poste fixe, de conduite d'une machine bruyante isolée dans l'atelier

Simulation 2 : Poste peu mobile, de conduite d'une machine bruyante isolée

Simulation 3 : Poste peu mobile, de conduite d'une machine bruyante proche d'autres machines bruyantes

Simulation 4 : Poste de conduite d'une ligne de production composée de machines plus ou moins bruyantes

B. Postes de travail du type conduite d'une machine avec présence d'un événement acoustique rare

Simulation 5 : Poste peu mobile, de conduite d'une machine très bruyante isolée, comprenant 5 min d'utilisation d'une soufflette de nettoyage par jour

Simulation 6 : Poste peu mobile, de conduite d'une machine bruyante isolée, comprenant 5 min d'utilisation d'une soufflette de nettoyage par jour

Simulation 7 : Poste peu mobile, de conduite d'une machine très bruyante isolée, comprenant 30 min par jour d'alimentation d'un broyeur

Simulation 8 : Poste peu mobile, de conduite d'une machine très bruyante isolée, qui est exposé au bruit d'un broyeur situé à 3 m durant 30 min par jour

C. Postes de travail peu ou pas bruyants, exposés aux bruits générés à des postes voisins

Simulation 9 : Poste de conduite d'une machine peu bruyante, situé à plus de 5 m de machines plus bruyantes

Simulation 10 : Poste de travail non bruyant, éloigné de 10 m de machines bruyantes : effet d'une variation $dDL = \pm 1$ dB(A) dans un local où $DL = 4$ dB(A)

Simulation 11 : Poste de travail non bruyant, éloigné de 10 m de machines bruyantes : effet d'une variation $dDL = \pm 0,5$ dB(A) dans un local où $DL = 4$ dB(A)

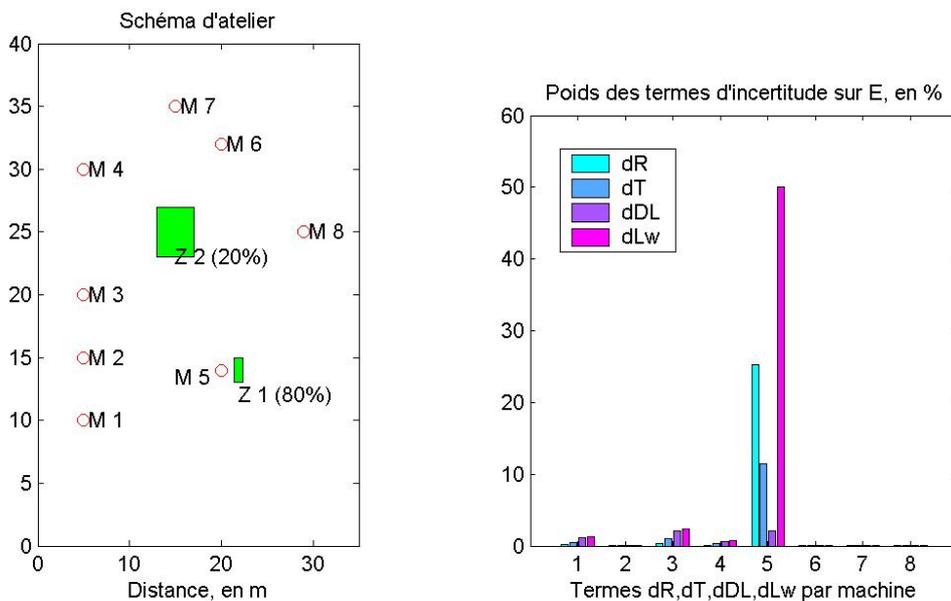
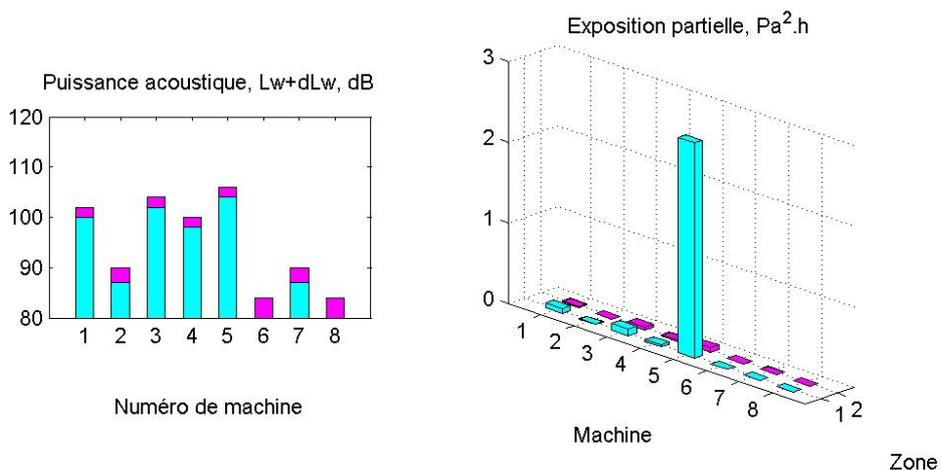
Simulation 12 : Poste de travail non bruyant, éloigné de 10 m de machines bruyantes : effet d'une variation $dDL = \pm 1$ dB(A) dans un local où $DL = 3,5$ dB(A)

Conduite de machine, en poste fixe (simul. 1)

Exposition sonore totale = 3.0 [2.6; 3.6] Pa².h

LEx,8h en dB(A) = 89.7 [89.1; 90.6] ; IC= 1.4

(Distances R+dR = 2.0+ 0.4 m)



Commentaire : En cas de conduite d'une machine isolée (M5) en poste fixe situé à R = 2 m, l'incertitude sur l'exposition est très faible (ici IC = 1,4 dB(A)). Terme d'incertitude prépondérant : Lw (quand dLw = 2 dB) ; terme secondaire : R (quand dR = 0,5 m)

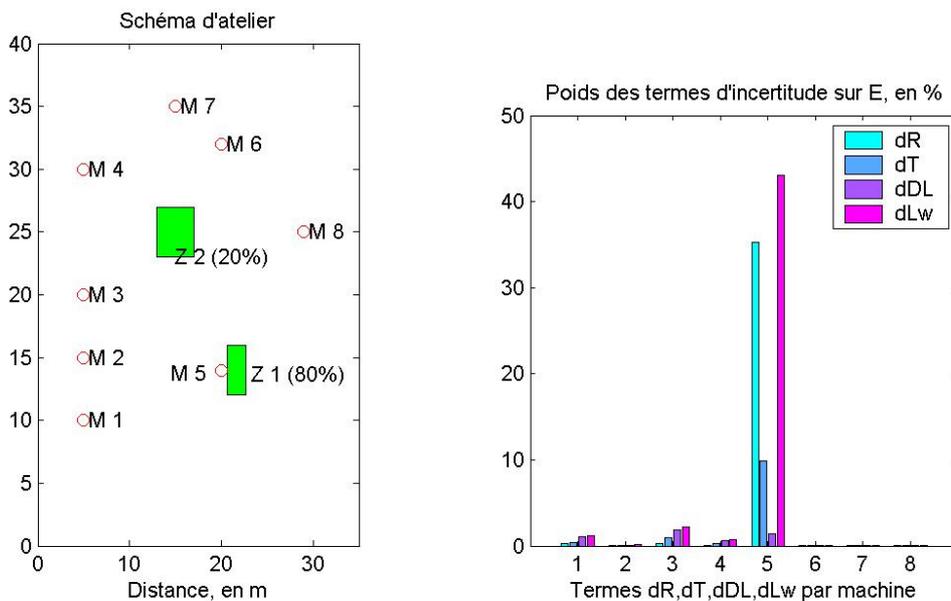
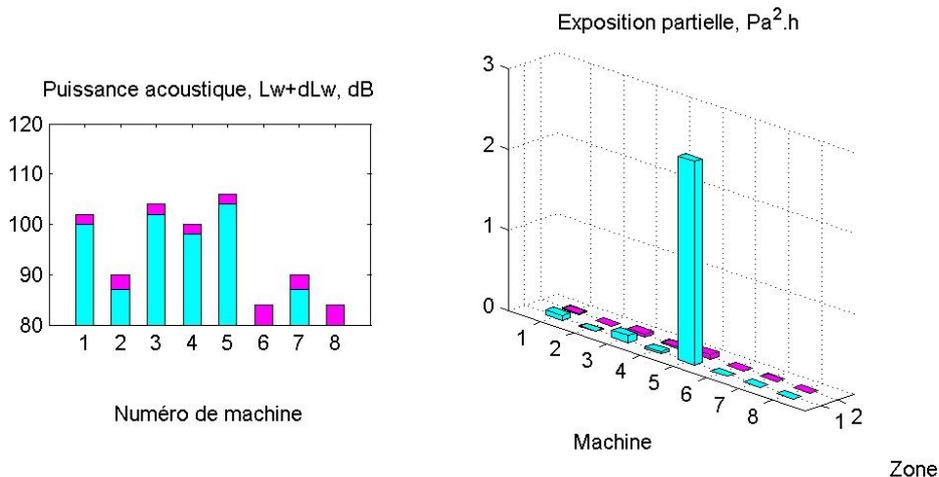
Simulation 1 : Poste fixe, de conduite d'une machine bruyante isolée dans l'atelier

Conduite de machine ; poste peu mobile (simul. 2)

Exposition sonore totale = 2.8 [2.0; 4.0] Pa².h

LEx,8h en dB(A) = 89.5 [87.9; 91.0] ; IC= 3.1

(Distances R+dR = 2.0+ 0.9 m)



Commentaire : Dans la même configuration que celle de la simulation 1, on examine l'effet de l'agrandissement de la zone de travail (dR passe de 0,5 à 1 m, quand R = 2 m). L'incertitude sur l'exposition est deux fois plus élevée que dans la simulation 1 (IC = 3,1 dB(A)). Dans ce cas, le facteur d'incertitude lié à R a le même poids que celui lié à Lw (quand dLw = 2 dB(A))

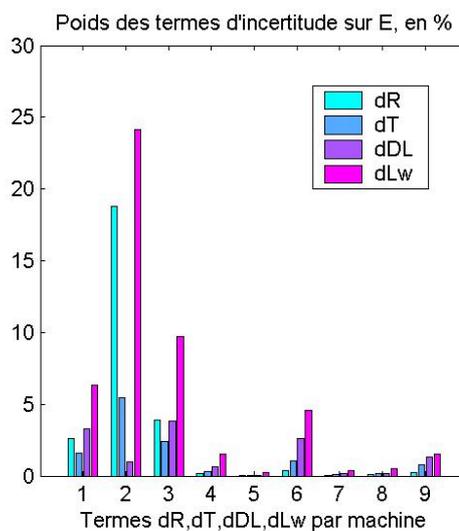
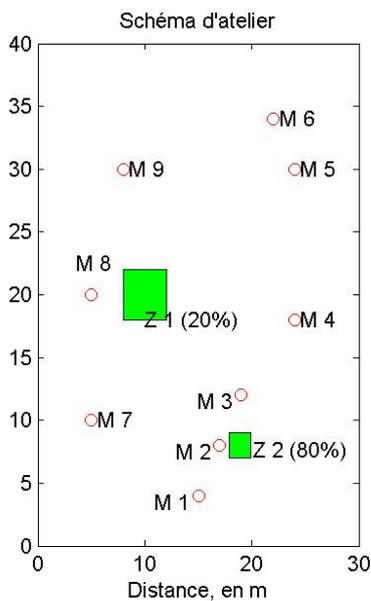
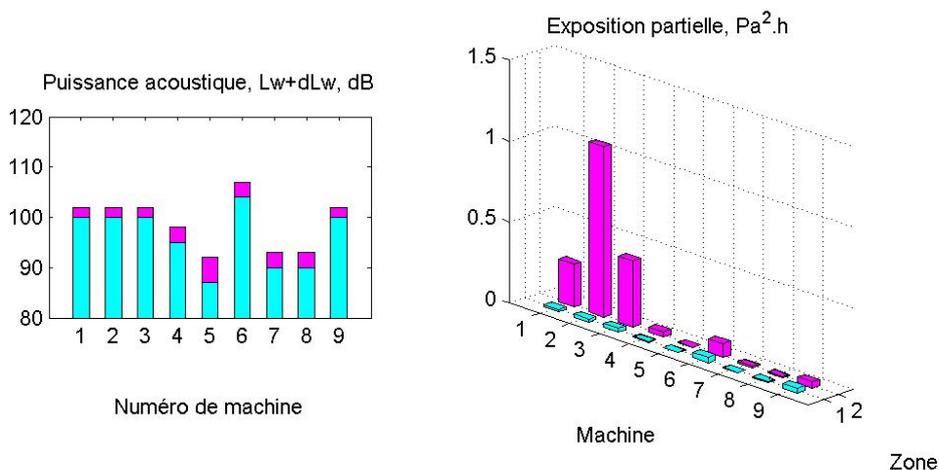
Simulation 2 : Poste peu mobile, de conduite d'une machine bruyante isolée

Conduite d'une machine proche de 2 autres (simul. 3)

Exposition sonore totale = 2.0 [1.5; 2.9] Pa².h

LEx,8h en dB(A) = 88.0 [86.8; 89.5]; IC= 2.7

(Distances R+dR = 2+0.8 et 4.0+1.0 m)



Commentaire : L'opérateur conduit une machine (M2). Cette machine est située à 4 m environ de 2 autres machines identiques (M1, M3). Quel est l'effet de ces deux autres machines ? Dans l'exposition sonore partielle, leur contribution apparaît nettement. Par contre, les autres machines ne génèrent que des termes d'incertitudes de poids négligeable, comparativement à celui des deux termes prépondérants en Lw et en R liés à la machine qu'il conduit. L'incertitude sur la caractérisation du local par sa pente de décroissance DL n'a aucun effet ici, alors que les paramètres sont DL = 4 dB et dDL = 1 dB.

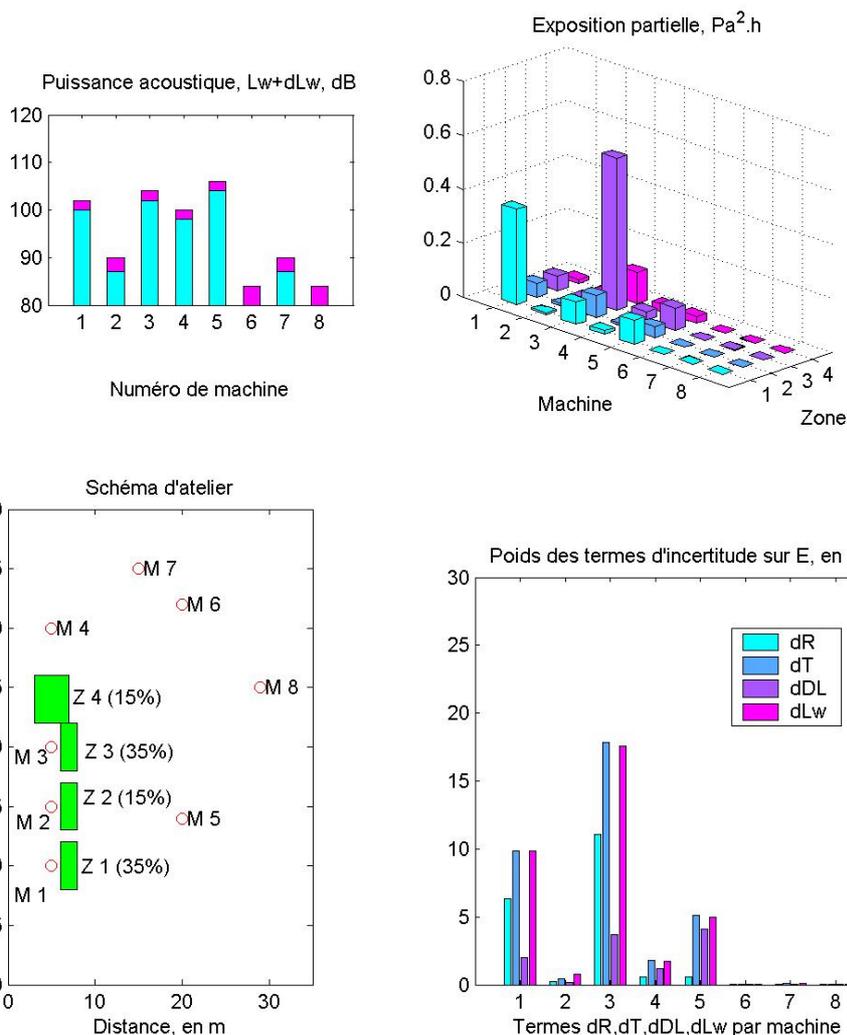
Simulation 3 : Poste peu mobile, de conduite d'une machine bruyante proche d'autres machines bruyantes

Surveillance d'une ligne de production (simul. 4)

Exposition sonore totale = 1.7 [1.0; 2.6] Pa².h

L_{Ex,8h} en dB(A) = 87.2 [84.9; 89.1] ; IC= 4.2

(Distances R+dR = 2.3+0.9 et 2.3+0.9 m)



Commentaire : Cette ligne de production comprend deux machines bruyantes (M1 et M3) et un système de transfert peu bruyant (M2). La simulation montre une incertitude sur L_{EX,8h} de 4,2 dB(A), relativement élevée, liée à deux termes d'incertitudes de même poids : les termes en T et en Lw. Or la durée relative de présence de l'opérateur près de la machine 3 a été définie par T = 35 ± 20 % du temps de travail quotidien, ce qui équivaut à une valeur relative de l'incertitude en durée dT/T de 60%. C'est à cette condition que le poids de l'incertitude en temps équivaut à celui de l'incertitude liée à Lw (quand dLw = 2 dB(A)). On observe par ailleurs que la contribution de la machine M2 (peu bruyante) est négligeable dans ce bilan.

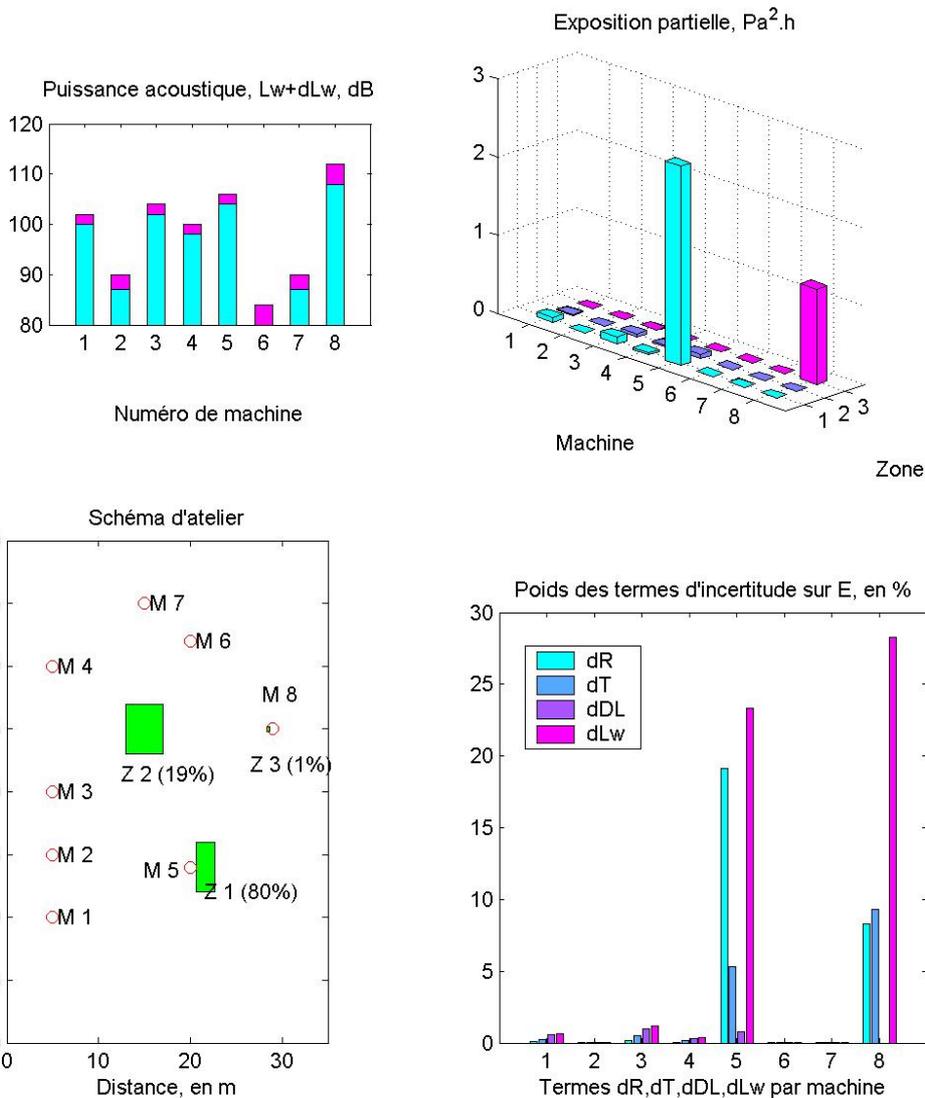
Simulation 4 : Poste de conduite d'une ligne de production composée de machines plus ou moins bruyantes

Conduite d'une machine et 5 min de soufflette (simul. 5)

Exposition sonore totale = 4.1 [3.2; 5.5] Pa².h

L_{Ex,8h} en dB(A) = 91.1 [90.0; 92.4] ; IC= 2.4

(Distances R+dR = 2.0+0.9 et 0.5+0.2 m)



Commentaire : L'opérateur conduit la machine M5 [L_w = 104 ± 2 dB(A); R = 2 ± 1 m] comme dans la simulation 2, mais utilise, en outre une soufflette très bruyante durant 5 min par jour (représentée par M8 et la zone 3) [L_w = 108 ± 4 dB(A), R = 0,5 ± 0,2 m, T = 1 ± 0,5 %]. L'usage de la soufflette augmente le niveau L_{EX,8h} de 1,5 dB(A). Trois termes d'incertitudes ont le même poids : le terme en L_w de la soufflette, les termes en L_w et en R de la machine M5. Ce résultat dépend des valeurs respectives L_w et dL_w de la soufflette et de la machine 5 : ainsi, avec une soufflette moins bruyante [L_w = 102 au lieu de 108 dB(A)], on montre que le poids du terme d'incertitude lié à la soufflette deviendrait négligeable dans ce bilan.

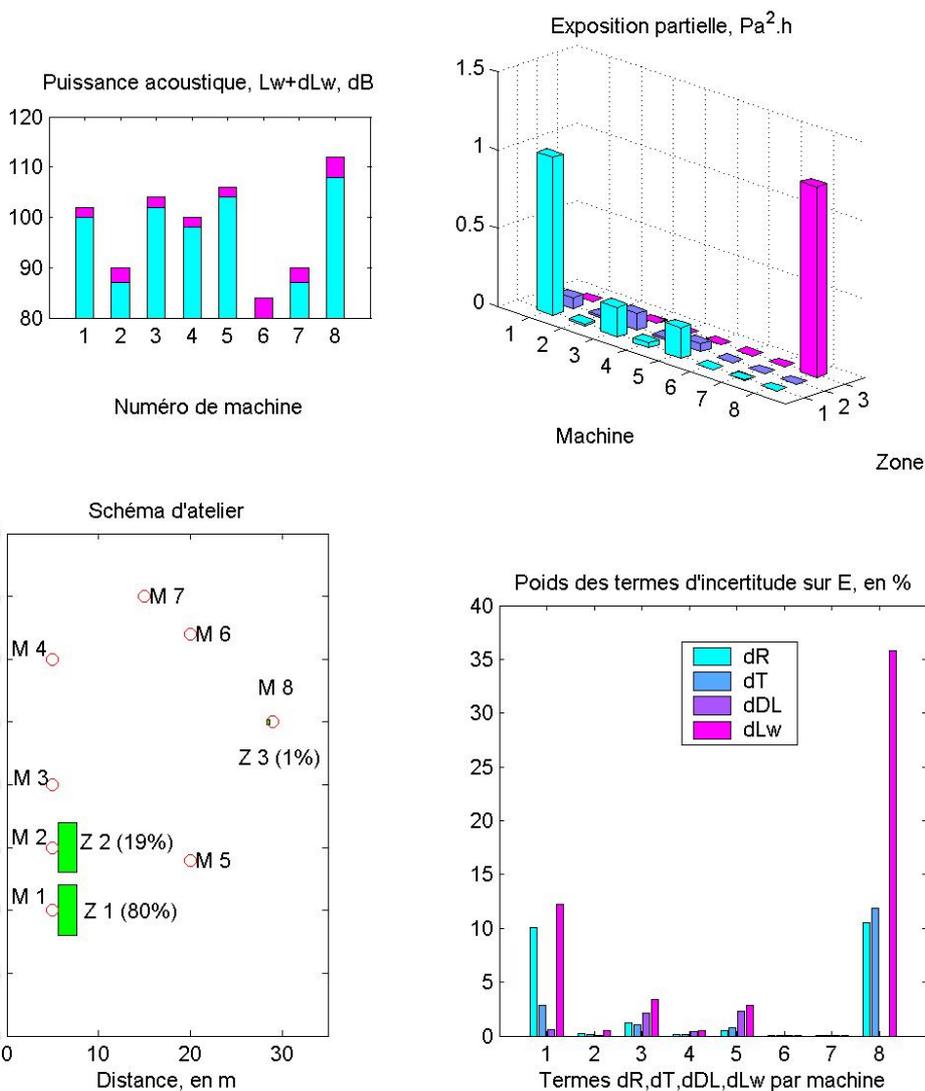
Simulation 5 : Poste peu mobile de conduite d'une machine très bruyante isolée, comprenant 5 minutes d'utilisation d'une soufflette de nettoyage par jour

Conduite d'une ligne machine et 5 min de soufflette (simul. 6)

Exposition sonore totale = 2.9 [2.2; 3.9] Pa².h

LEx,8h en dB(A) = 89.6 [88.4; 90.9] ; IC= 2.5

(Distances R+dR = 0.5+0.2 et 2.0+0.9 m)



Commentaire : L'opérateur conduit une machine (M1) et emploie une soufflette (M8) dans les mêmes conditions que pour la simulation 5 [Lw = 108 ± 4 dB(A)]. Mais la machine qu'il conduit est moins bruyante que précédemment [Lw = 100 dB(A) au lieu de 104 dB(A)]. Dans ce cas, l'exposition sonore partielle résultant des 5 minutes d'emploi de la soufflette égale celle qui résulte de sa tâche principale, la conduite de M1. L'incertitude dépend uniquement de l'effet du terme en Lw lié à la soufflette.

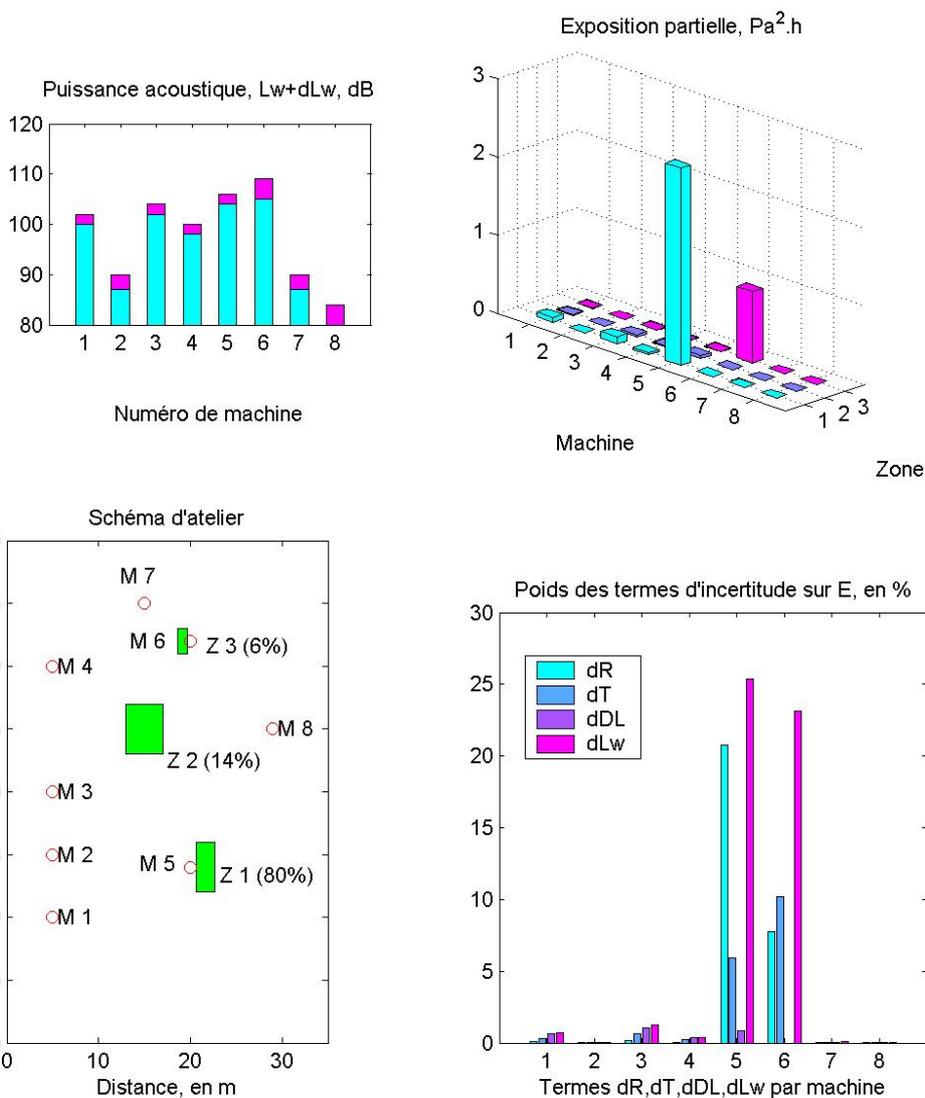
Simulation 6 : Poste peu mobile de conduite d'une machine bruyante isolée, comprenant 5 minutes d'utilisation d'une soufflette de nettoyage par jour

Conduite d'une machine et 30 min alim. broyeur (simul. 7)

Exposition sonore totale = 3.7 [2.7; 5.4] Pa².h

LEx,8h en dB(A) = 90.7 [89.2; 92.2] ; IC= 3.0

(Distances R+dR = 2.0+0.9 et 1.0+0.4 m)



Commentaire : La tâche principale de l'opérateur est la conduite d'une machine bruyante M5 [Lw = 104 ± 2dB(A) ; R = 2 ± 1 m], comme dans la simulation 5. Mais sa tâche secondaire est différente : il alimente un broyeur (M6), simulé par des paramètres spécifiques [Lw = 105 ± 3 dB(A) ; R = 1 ± 0,5 m ; T = 30 ± 20 min]. Dans ce cas, le poids du terme d'incertitude en Lw résultant du broyeur est semblable à celui des termes en Lw et en R liés à la machine bruyante (M5).

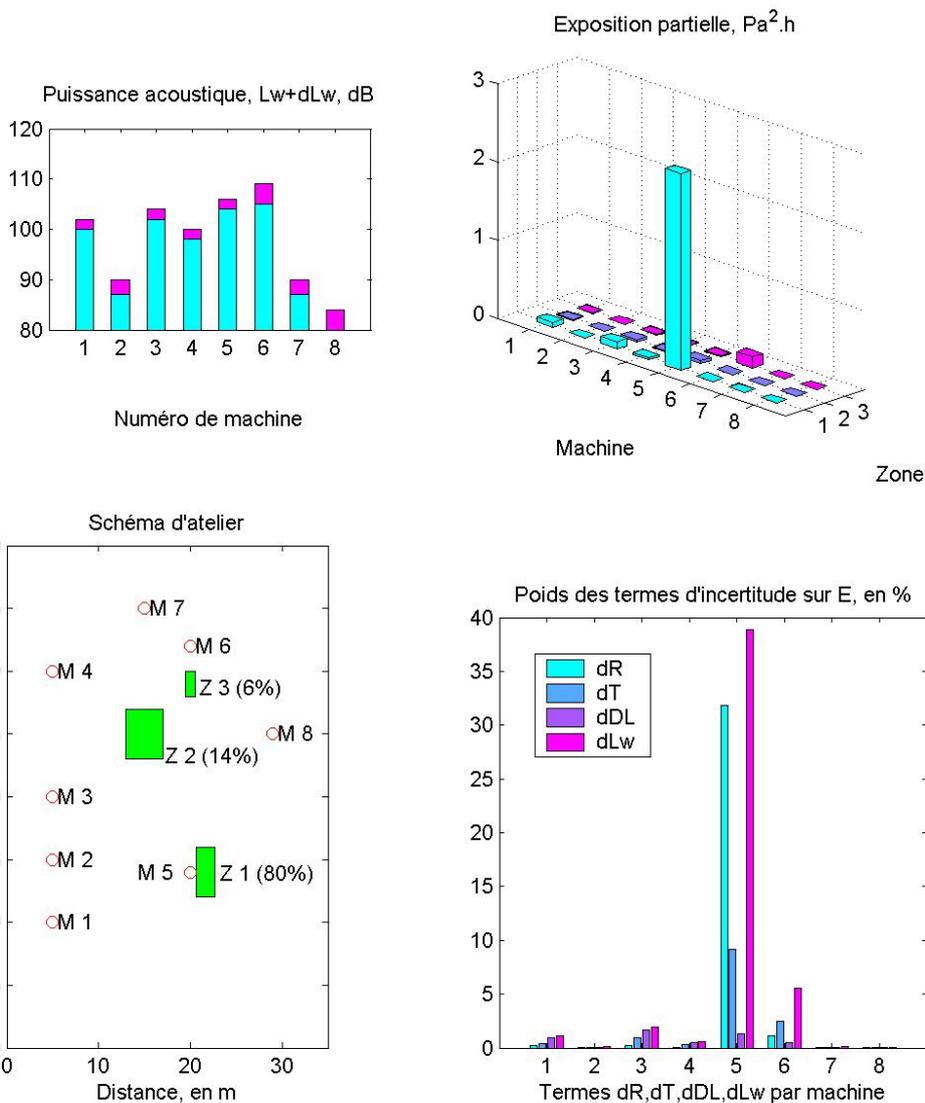
Simulation 7 : Poste peu mobile de conduite d'une machine très bruyante isolée, comprenant 30 min par jour d'alimentation d'un broyeur

Conduite de machine et 30 min à 3 m du broyeur (simul. 8)

Exposition sonore totale = 3.0 [2.1; 4.2] Pa².h

LE_{ex,8h} en dB(A) = 89.7 [88.2; 91.1] ; IC= 2.9

(Distances R+dR = 2.0+0.9 et 3.0+0.9 m)



Commentaire : La tâche principale de l'opérateur est la conduite d'une machine bruyante M5 [Lw = 104 ± 2dB(A) ; R = 2 ± 1 m], et il est exposé au bruit du broyeur à une distance R = 3 ± 1 m pendant 30 minutes par jour, lors d'une tâche annexe (en zone 3). Cette simulation a été calquée sur la simulation 7, après un accroissement de 1 à 3 m de la distance entre l'opérateur et le broyeur en mode fonctionnement. Dans ces conditions, le broyeur n'a plus d'influence dans les termes d'incertitudes et quasiment pas dans l'exposition sonore.

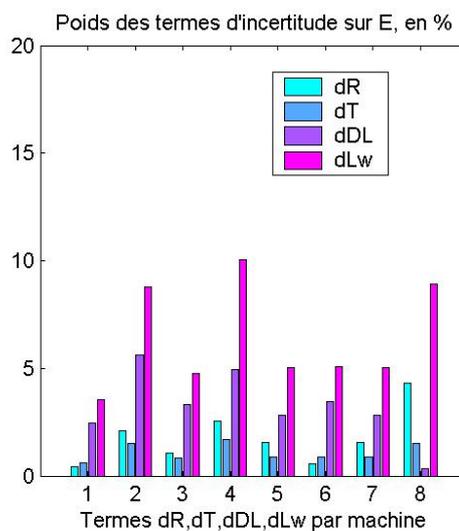
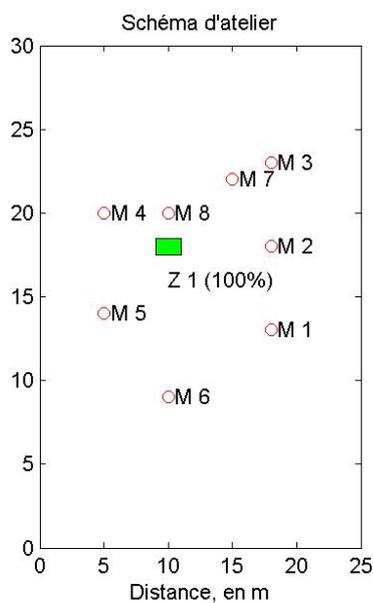
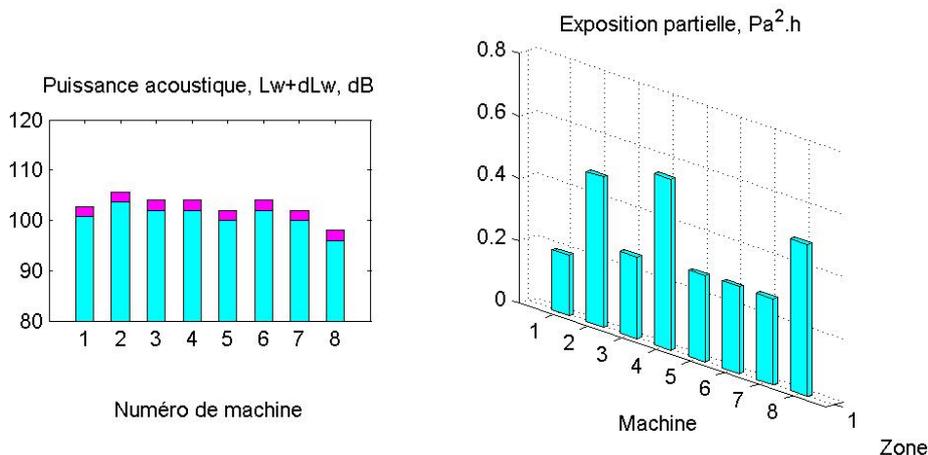
Simulation 8 : Poste peu mobile de conduite d'une machine très bruyante isolée, qui est exposé au bruit d'un broyeur situé à 3 m durant 30 min par jour

Poste peu bruyant ; mach. br. à R > 5 ; DL=4 +/- 1 dB (simul. 9)

Exposition sonore totale = 2.8 [2.4; 3.2] Pa².h

LEx,8h en dB(A) = 89.4 [88.7; 90.1] ; IC= 1.4

(Distances R+dR = 5.4+ 0.7 m)



Commentaire : Dans un local caractérisé par DL = 4 ± 1 dB(A), l'opérateur conduit en poste fixe la machine la moins bruyante de l'atelier [M8 : Lw = 96 ± 2 dB(A), R = 2 ± 0.5 m]. A ce poste, il est exposé aux bruits de machines plus bruyantes, la plus proche étant situé à plus de 5 m [M4 : Lw = 102 ± 2 dB(A), R = 5.4 ± 0,7 m]. L'incertitude sur l'exposition sonore à ce poste est très faible (IC = 1,4 dB(A)). L'effet du terme d'incertitude lié à dDL apparaît mais son poids reste inférieur à celui des termes liés à Lw. De plus, aucun terme d'incertitude n'a un poids excédant 10%.

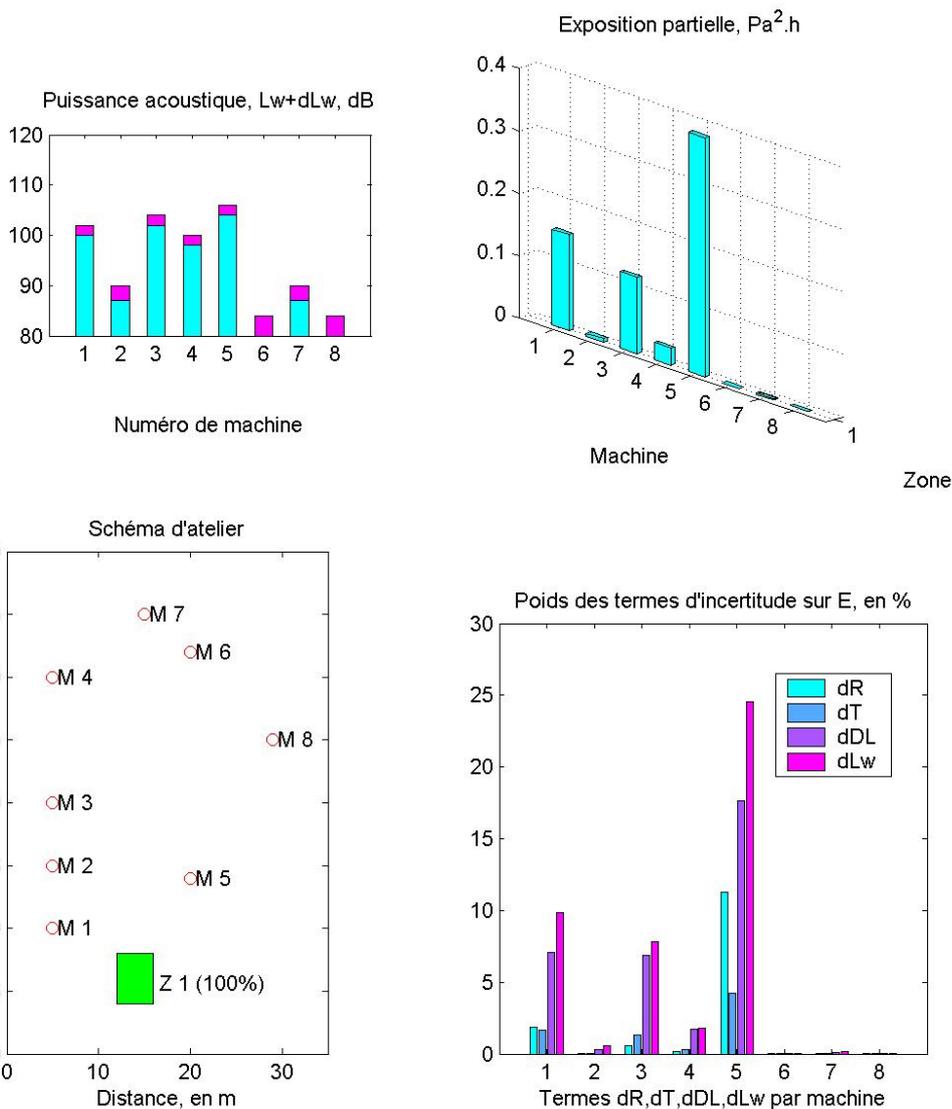
Simulation 9 : Poste de conduite d'une machine peu bruyante située à plus de 5 m de machines bruyantes

Poste non bruyant ; mach. br. à 10 m ; DL=4 +/- 1 dB (simul. 10)

Exposition sonore totale = 0.7 [0.5; 1.0] Pa².h

LEx,8h en dB(A) = 83.4 [81.6; 84.9] ; IC= 3.3

(Distances R+dR = 10.0+ 2.7 et 10.0+ 0.9 m)



Commentaire : Dans un local caractérisé par DL = 4 ± 1 dB(A), l'opérateur occupe un poste de travail non bruyant en lui-même, qui est exposé aux bruits de machines situées à 10 m de distance (M5 et M1). L'incertitude sur l'exposition sonore s'élève à 3,3 dB(A) et provient de deux termes de poids assez proche : Lw (quand dLw = ± 2 dB(A)) et dDL (± 1 dB(A)).

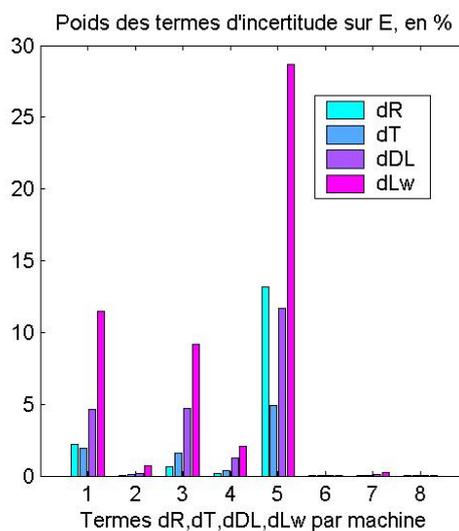
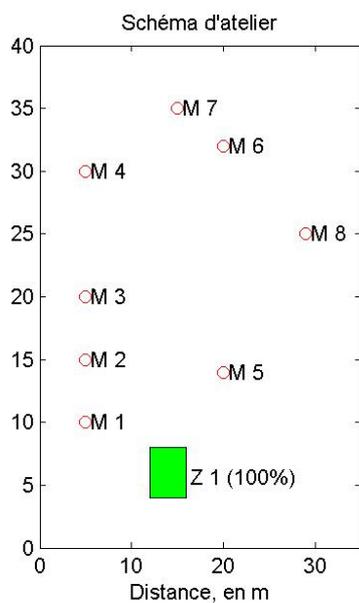
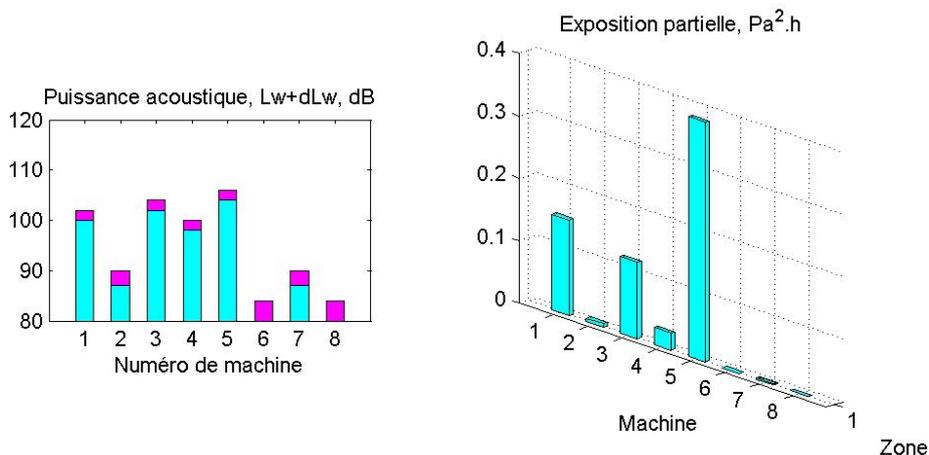
Simulation 10 : Poste de travail non bruyant éloigné de 10 m de machines bruyantes : effet d'une variation dDL = ± 1 dB(A) dans un local où DL = 4 dB(A)

Poste non bruyant; mach. br. à 10 m; DL=4 +/- 0,5 dB (simul. 11)

Exposition sonore totale = 0.7 [0.6; 0.8] Pa².h

L_{Ex,8h} en dB(A) = 83.4 [82.7; 84.0]; IC= 1.3

(Distances R+dR = 10+2.7 m)



Commentaire : Les paramètres de cette simulation sont identiques à ceux de la simulation 10, mais dDL a été réduit de 1 à 0,5 dB(A). Ceci réduit l'incertitude sur L_{EX,8h} de 3,3 à 1,3 dB(A). Le terme d'incertitude lié à Lw (quand dLw = ±2 dB(A)) est devenu nettement prépondérant.

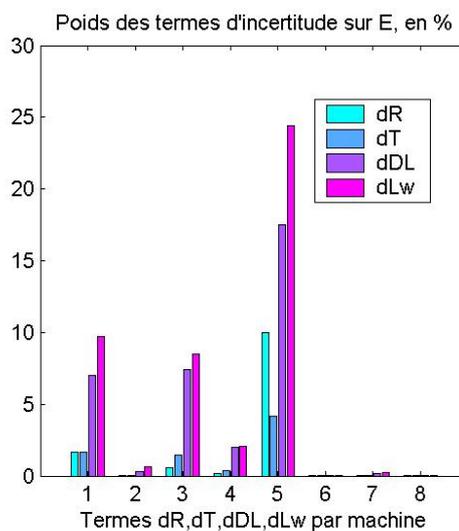
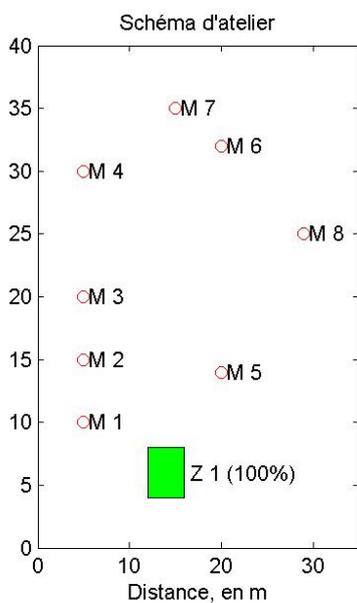
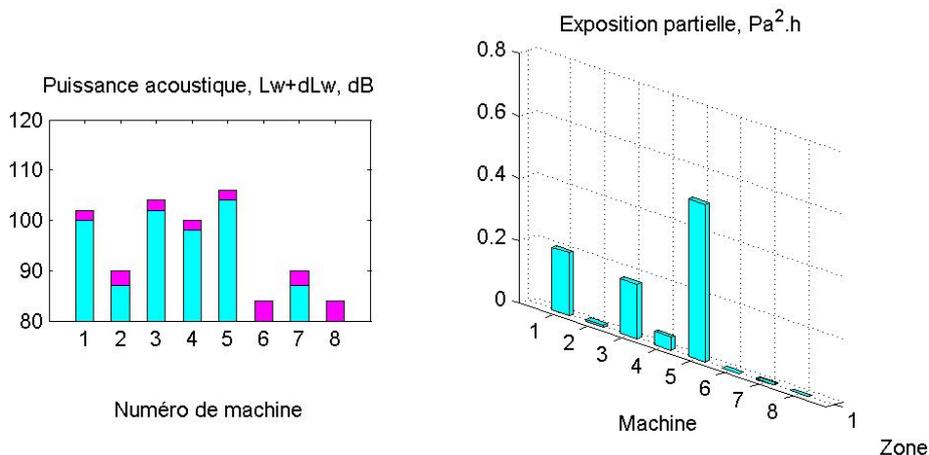
Simulation 11 : Poste de travail non bruyant éloigné des machines bruyantes de 10 m : effet d'une variation dDL = ± 0,5 dB(A) dans un local où DL = 4 dB(A)

Poste non bruyant ; mach. br. à 10 m ; DL=3.5 +/- 1 dB (simul. 12)

Exposition sonore totale = 0.9 [0.6; 1.3] Pa².h

LE_{Ex,8h} en dB(A) = 84.7 [83.0; 86.0] ; IC= 3.0

(Distances R+dR = 10.0+2.7 m)



Commentaire : Les conditions d'exposition au bruit sont identiques à celles de la simulation 10, mais le local est moins absorbant : DL = 3,5 ± 1 dB(A). A un poste de travail non bruyant et situé à 10 m de machines bruyantes, la réduction de DL de 4 à 3,5 dB(A) ne modifie pas la valeur de l'incertitude sur l'exposition sonore ni le poids des termes d'incertitudes. Par contre elle accroît le niveau d'exposition sonore quotidienne à ce poste de 1,3 dB(A).

Simulation 12 : Poste de travail non bruyant, éloigné de 10 m de machines bruyantes : effet d'une variation dDL = ± 1 dB(A) quand DL = 3,5 dB(A)

Annexe 2 : Expression de l'exposition sonore partielle $E_{m,z(r)}$ et des termes d'incertitudes

Expression finale de l'exposition sonore partielle $E_{m,z(r)}$

L'exposition sonore partielle $E_{m,z(r)}$ a été définie par l'équation [3], indiquée dans le texte en 2.2. On en déduit son expression finale en y exprimant le niveau de bruit $L_p(r,L_w,DL)$ par les équations [2] et le niveau de puissance acoustique $L_w(m)$ par la puissance acoustique $W(m)$. La valeur de $W(m)$ a été pondérée par une fonction qui dépend de la durée relative d'émission de m et d'un lien traduisant la contrainte éventuelle de présence de l'opérateur en z quand la machine fonctionne (cf. 3.4).

Relations définissant $E_{m,z(r)}$:

- si $r = 1$ m

$$E_{m,z(r)} = T(z) * 3200 Wz(m) * \frac{q}{4\pi \cdot r^2}$$

- si $r > 1$ m et $r = 3$ m

$$E_{m,z(r)} = T(z) * 3200 Wz(m) * \frac{q}{4\pi} * r^{-(0,1 DL \log_2(10))} * 10^{[0,1/24 \ln(2)] * (DL - k) * p(r)}$$

$$\text{où } p(r) = (2r^3 - 18r^2 + 54r - 38)$$

- si $r > 3$ m

$$E_{m,z(r)} = T(z) * 3200 Wz(m) * \frac{q}{4\pi} * r^{-(0,1 DL \log_2(10))} * 10^{0,2/(3 \ln(2)) * (DL - k)}$$

Dans ces relations :

$$k = 10 * \log_{10}(4) = 6,02$$

$$q = 2 \text{ si la source est au sol ; } q = 1 \text{ si elle est en hauteur}$$

L'exposition sonore totale résulte de la somme des termes d'exposition sonore partielle pour tous les couples (m, z) .

Calcul des termes d'incertitudes sur l'exposition sonore partielle $E_{m,z(r)}$

Les relations précédentes montrent que $E_{m,z(r)}$ est une fonction linéaire en T et en W . Pour ces deux variables, les termes d'incertitudes découlent immédiatement des dérivées partielles. Par contre, $E_{m,z(r)}$ est une fonction non linéaire en r et en DL . De plus, pour ces deux variables, on ne peut pas supposer que leur accroissement relatif, dr/r et $d(DL)/DL$, tend vers zéro, hypothèse courante dans les expressions des dérivées d'une fonction. Compte tenu de ces particularités, le calcul des termes d'incertitudes sur $E_{m,z(r)}$ a été effectué en exprimant les dérivées partielles au premier ordre, selon la définition classique suivante :

$$E_{m,z(r)}(x + dx) - E_{m,z(r)}(x) = dx \cdot E'_{m,z(r)}(x),$$

mais sans introduire dans l'expression de E' les simplifications qui découleraient de l'hypothèse que dx/x soit nécessairement petit. Cette méthode a conduit aux équations des termes d'incertitudes affectant E_{m, z(r)} suivantes :

a) Terme d'incertitude en T

$$E'(T)dT = \frac{E}{T} dT$$

b) Terme d'incertitude en W

$$E'(Lw)dLw = E(Lw) * (10^{0.1dLw} - 1)$$

c) Termes d'incertitudes en R

- si R ≤ 1

$$E'(R)dR = E(R) [(1 + (dR/R))^{-2} - 1]$$

- si R > 1 et R ≤ 3

$$E'(R)dR = E(R) [(1 + dR/R)^{-0.1 \log_2(10) * DL} * 10^{0.1/(24 \ln(2)) * (DL - 10 \log_{10}(4)) * FP(R)} - 1]$$

$$\text{où } FP(R) = dR [2 * (3 + 3dR/R + (dR/R)^2) * R^2 - 18 * (2 + dR/R) * R + 54]$$

- si R > 3

$$E'(R)dR = E(R) [(1 + dR/R)^{-0.1 \log_2(10) * DL} - 1]$$

d) Termes d'incertitudes en DL

- si R ≤ 1

$$E'(DL)dDL = 0$$

- si R > 1 et R ≤ 3

$$E'(DL)dDL = E(DL) * [R^{-0.1 \log_2(10) * pDL} * 10^{0.1/(24 \ln(2)) * (2R^3 - 18R^2 + 54R - 38) * pDL} - 1]$$

- si R > 3

$$E'(DL)dDL = E(DL) * [R^{-0.1 \log_2(10) * pDL} * 10^{0.2/(3 \ln(2)) * pDL} - 1]$$

Les expressions des termes d'incertitudes en R et en DL ont été validées expérimentalement, par comparaison à des mesures effectuées dans un local d'essai.