

ntifique & technique
que
e
note
note scientifique
que & technique
ifique scientif
echnique



Relations entre les plans d'échantillonnage du bruit et les incertitudes de mesure de l'exposition au bruit professionnel

Léon THIERRY
INRS, Département Ingénierie
des équipements de travail

NS 280
mars 2009

Résumé

Cette publication présente les résultats d'une étude relative à l'incertitude liée à l'échantillonnage de l'exposition au bruit professionnel. Elle a été réalisée par simulation numérique de différents plans d'échantillonnage appliqués à une base de données d'exposition au bruit professionnel utilisée ici comme référence. Présentée antérieurement (NST 259), cette base de données de référence a englobé six groupes de travailleurs exposés au bruit dans des situations professionnelles très différentes, en termes de localisation du travail, de nature des tâches et de variabilité du travail réalisé d'un jour à l'autre. L'exposition au bruit de chaque groupe a été mesurée en continu durant environ 80 heures pour disposer d'une référence fiable. Différents plans d'échantillonnage ont été appliqués à cette base de données, caractérisés par le nombre des mesures, la durée de mesure et la répartition des mesures durant le temps de travail et parmi les membres d'un même groupe de travailleur. La précision de chaque plan d'échantillonnage a été estimée par des simulations de Monte-Carlo : en répétant 10000 fois le tirage d'un échantillon, on a obtenu la distribution des valeurs possibles du niveau d'exposition moyen et on en a déduit son intervalle de confiance à 95 %, grandeur utilisée ensuite pour estimer l'incertitude liée à l'échantillonnage du bruit. Cette étude a fourni des informations sur le nombre d'échantillons requis pour obtenir une précision fixée qui sont comparées aux spécifications du projet de norme ISO 9612 (2008).

Sommaire

	Page
1 INTRODUCTION	1
2 MATERIEL ET METHODES	2
2.1 Caractéristiques du travail des groupes étudiés	2
2.2 Exposition au bruit : valeurs de référence	4
2.3 Méthodes d'échantillonnage appliquées aux données	7
2.4 Quantification de la précision d'un plan d'échantillonnage	9
2.5 Dimensionnement des plans d'échantillonnage	10
2.6 Définition des plans d'échantillonnage sélectionnés	11
3 RESULTATS	13
3.1 Précision des plans d'échantillonnage par tâches	13
3.1.1 Obtention d'un plan optimisé	14
3.1.2 Effet d'une incertitude sur la durée des tâches	15
3.2 Précision des plans d'échantillonnage par métier	16
3.2.1 Plans d'échantillonnage avec des durées de mesure de 2 h ou 1 h	16
3.2.2 Plan d'échantillonnage « fictif » (30 mesures de durée 5 min)	18
3.2.3 Effet de la concentration des mesures durant le temps	18
3.3 Précision des plans d'échantillonnage par journées	19
3.4 Bilan par GEH : plans de précision équivalente	21
4 DISCUSSION ET CONCLUSION	22
REFERENCES	25
Annexe 1 : Résultats détaillés des plans d'échantillonnage par tâches	26
Annexe 2 : Résultats détaillés des plans d'échantillonnage par métier	28
Annexe 3 : Résultats détaillés des plans d'échantillonnage par journées	32

1 Introduction

La problématique du mesurage de l'exposition au bruit s'inscrit dans le contexte de l'application de la réglementation relative à la protection de l'audition des travailleurs exposés. Il s'agit donc de fournir une estimation d'un risque à long terme, à partir de mesures effectuées dans des périodes de durées nécessairement limitées et constituant un échantillon. La réglementation impose deux contraintes :

- que l'échantillonnage du bruit soit représentatif,
- que le résultat fasse apparaître l'incertitude d'estimation.

Ces deux contraintes se heurtent à des difficultés méthodologiques, qui découlent de la méconnaissance de la variation dans le temps du bruit auquel les travailleurs sont exposés. Ces difficultés sont de plusieurs ordres :

- le choix d'une période de travail de durée suffisante pour englober toutes les variations d'exposition au bruit susceptibles d'intervenir, variations provoquées par des changements dans la production et l'emploi des machines bruyantes ou résultant de l'activité des autres opérateurs présents dans un atelier ;
- les limitations des mesures, à la fois en nombre, en durée et en répartition dans le temps de travail, dont dépend l'incertitude d'estimation du niveau de bruit moyen.

Dans la pratique métrologique, des choix sont opérés en se fondant sur la normalisation. En France, la norme NF S 31-084 s'applique depuis 2002, suite à une révision ayant eu pour objet de contrôler la représentativité des mesures par analyse du travail et de définir des Groupes d'Exposition Homogènes (GEH) parmi la population des travailleurs exposés, moyens de vérifier la qualité de l'échantillonnage. Au plan international, une évolution semblable de la normalisation est intervenue, qui a conduit à finaliser en 2008 le projet¹ de norme ISO 9612 [1].

Les progrès de la normalisation sont importants. Toutefois, ils résultent de consensus dans lesquels interviennent les pratiques habituelles de mesurages et les contraintes de coûts, ce qui laisse plusieurs questions en suspens, concernant notamment le dimensionnement des échantillons et leur précision.

Pour répondre à ces questions et aux besoins de clarifier les pratiques métrologiques de terrain, une étude en deux parties a été réalisée.

Partie 1 : Constituer une base de données de référence en matière d'exposition professionnelle au bruit

Pour être qualifiée de « référence », cette base de données a été constituée par des mesures réitérées durant plusieurs jours et réparties sur plusieurs travailleurs appartenant au même groupe de travail. La représentativité de ces mesures a été contrôlée par une analyse du travail englobant plusieurs semaines et un suivi du travail réel lors des périodes mesurées.

Cette base comprend six groupes de travailleurs, sélectionnés afin de présenter des situations d'exposition au bruit industriel très différentes. Sa description a déjà été réalisée et

¹ En décembre 2008, le projet final de norme ISO/FDIS 9612 a été soumis à la procédure de vote. Sa publication comme norme internationale doit intervenir en 2009.

a fait l'objet de la NST 259 [2] : on y présente les caractéristiques du travail des six groupes étudiés et les résultats des mesures de bruit, qui indiquent notamment les niveaux de bruit moyens pour chaque GEH, valeurs qui seront utilisées comme références dans la seconde partie de cette étude portant sur les plans d'échantillonnage.

Partie 2 : Appliquer aux données de références différents plans d'échantillonnage pour caractériser leur précision respective

Cette seconde partie fait l'objet du document présent.

Des plans d'échantillonnage simulant des mesurages proches des pratiques métrologiques courantes (en nombre et en durée de mesure) ont été appliqués aux données de références. La précision de chaque plan d'échantillonnage a été quantifiée par la méthode des simulations numériques de Monte-Carlo, bien adaptée au caractère non linéaire des relations définissant le niveau de bruit moyen à partir de plusieurs mesures de bruit. En comparant différents plans d'échantillonnage, sous l'angle de l'effort de mesure requis et de la précision qui en résulte, on en déduit des indications pratiques relatives au dimensionnement des échantillons.

2 Matériel et méthodes

Les caractéristiques des six groupes de travailleurs étudiés, la nature des mesurages d'exposition réalisés pour constituer les données de référence, les caractéristiques principales des données de référence ont fait l'objet de la publication de la NST 259 [2], relative à la première partie de cette étude. Seul un résumé de ces données est effectué ici. Ensuite sont présentés les aspects méthodologiques spécifiques à la seconde partie de l'étude : l'échantillonnage de la base de données de référence.

2.1 Caractéristiques du travail des groupes étudiés

Six groupes de travailleurs exposés au bruit dans des circonstances très différentes ont été sélectionnés pour constituer une base de données d'exposition au bruit professionnel. Chacun d'eux est composé de travailleurs de même métier et constitue un groupe d'exposition homogène (GEH). Le travail de chaque GEH a été analysé et suivi durant plusieurs journées afin d'être en mesure d'identifier tous les facteurs déterminants l'exposition au bruit lors d'une semaine de travail. Le mesurage du bruit a été effectué à l'aide d'appareils de mesure autonomes, portés par les travailleurs durant toute leur journée de travail. Les mesures ont été répétées durant plusieurs journées de travail, afin d'obtenir pour chaque GEH dix séries de mesures de durée voisine de 8 h chacune. Le protocole de recueil de données a été appliqué dans cinq entreprises : quatre sont des entreprises de taille supérieure à 300 salariés, une entreprise comprend 10 personnes.

L'appellation et le contenu du travail des groupes d'exposition homogène (GEH) étudiés sont résumées ci-après.

Fraiseurs : Dans un grand atelier de fraisage, le GEH a été constitué par les opérateurs qui pilotent 3 fraiseuses à commande numérique. Ce groupe comprend 15 personnes, qui fraisent des pièces de grandes dimensions selon des cycles d'usinage dont la durée peut atteindre 30 h. Il est exposé à un niveau de bruit moyen de 85,8 dB(A). Le tableau 1 indique les caractéristiques des trois tâches qui ont été distinguées.

Désignation des tâches	Niveau de bruit moyen en dB(A)	Durée cumulée, en h	Durée relative %
fraisage de finition	84,5	20,4	32 %
fraisage d'ébauche	86,1	20,9	33 %
réglages	87,1	21,7	35 %

Tableau 1 : Caractéristiques des tâches des fraiseurs

Ces tâches ont quasiment la même durée relative et présentent des écarts de niveau de bruit global qui n'excèdent pas 3 dB(A).

Monteurs : L'assemblage d'ensembles mécaniques très complexes est effectué sur des bancs de montage, selon un cycle qui dure 50 h. Le GEH des monteurs regroupe 24 personnes, totalement polyvalentes, affectées à 3 bancs de montage. Ce GEH est exposé à un niveau de bruit moyen de 90,2 dB(A). Le tableau 2 indique les caractéristiques des trois tâches distinguées. Elles sont très différentes en durée et en niveau de bruit. D'un jour à l'autre, le travail des monteurs change et entraîne de fortes variations du bruit entre journées (la tâche la plus bruyante, le rivetage, n'est réalisée que certains jours dans le cycle de fabrication de 50 h).

Désignation des tâches	Niveau de bruit moyen en dB(A)	Durée cumulée, en h	Durée relative %
montage manuel	82,9	74,7	93 %
emploi d'outils pneumatiques d'assemblage	99,1	3,0	4 %
rivetage	103,2	2,2	3 %

Tableau 2 : Caractéristiques des tâches des monteurs

Menuisiers : Un groupe de 4 menuisiers-ébénistes polyvalents fabrique du mobilier, à l'unité ou en très petite série. Ils disposent de 9 machines outils. Chaque menuisier réalise en totalité un meuble, depuis le débit du bois jusqu'à l'assemblage final, ce qui demande environ 40 h de travail. Ce GEH est exposé à un niveau de bruit moyen de 88,4 dB(A). Le tableau 3 indique les caractéristiques des trois tâches distinguées. Elles sont très différentes en durée et en niveau de bruit. D'un jour à l'autre, le travail des menuisiers change et entraîne de fortes variations du bruit entre journées (la tâche la plus bruyante, le corroyage, n'est pas nécessaire tous les jours).

Désignation des tâches	Niveau de bruit moyen en dB(A)	Durée cumulée, en h	Durée relative %
assemblage et finitions	83,6	41,7	49 %
usage de 8 machines à bois	88,5	29,5	35 %
usage de la corroyeuse	93,2	13,6	16 %

Tableau 3 : Caractéristiques des tâches des menuisiers

Extrudeurs : Ce GEH regroupe 15 personnes affectées à la conduite de 2 lignes d'extrusion en continu de bandes entrant dans la composition de pneus. Ces lignes ont été sélectionnées parmi un ensemble de 10 lignes de fabrication semblables ; elles comprennent un poste d'alimentation du mélangeur et un poste de conduite et contrôle de l'extrusion. Les opérateurs alternent à ces deux postes et assurent les changements de fabrication, le réglage de la ligne, sa surveillance. Les changements de fabrication sont généralement quotidiens. Ce GEH est exposé à un niveau de bruit moyen de 90,4~dB(A).

Conducteurs : Ce GEH regroupe 27 opérateurs, affectés à la conduite de 3 lignes de production de capsules d'aluminium, en grande série. Ces lignes présentent des différences techniques mineures, mais se distinguent des autres machines de l'atelier. Chaque opérateur est affecté à une ligne. Son travail comprend la conduite et la surveillance de la ligne de production, des interventions en cas de bourrage ou d'incident sur un des équipements de la ligne. Ce GEH est exposé à un niveau de bruit moyen de 89,6 dB(A).

Régleurs : Ce GEH comprend 9 personnes chargées du réglage des machines composant les lignes de production automatisées d'un grand atelier. Les régleurs interviennent sur toutes les machines, sur demande des opérateurs ou lors des changements de production, ainsi que pour réaliser des opérations de maintenance périodique. Ce GEH est exposé à un niveau de bruit moyen de 90,3 dB(A).

Pour les fraiseurs, les monteurs et les menuisiers, leur travail réel a été scindé en trois tâches, qui déterminent de fortes variations des circonstances de leur exposition au bruit. Plusieurs sources d'informations ont été utilisées pour distinguer ces tâches : interviews des travailleurs et de la maîtrise, spécifications relatives au travail prescrit, procédures de fabrication , observations directes du travail.

Pour les extrudeurs, les conducteurs et les régleurs, leur travail n'a pas été scindé en tâches différentes pour une raison majeure : leur travail est défini essentiellement par un objectif à atteindre. Dans leur cas, il n'y a pas de tâches prescrites, aisément identifiables, répétitives et de durée spécifiée. Malgré les observations du travail réel, aucune distinction entre tâches n'a été retenue in fine pour contrôler les circonstances de leur exposition au bruit.

2.2 Exposition au bruit : valeurs de référence

Afin d'obtenir des données d'exposition au bruit utilisables comme références, une durée de mesure cumulée d'environ 80 h par GEH avait été fixée comme objectif dans le protocole de la première partie de cette étude. Les mesures de bruit ont été effectuées en continu, à l'aide d'exposimètres portés par les travailleurs. Chaque mesurage a porté, autant que possible, sur une journée entière de travail. Les mesures ont été répétées durant plusieurs journées et réparties sur plusieurs travailleurs de chaque GEH, jusqu'à atteindre une durée cumulée d'environ 80 h de mesurage par GEH. Les exposimètres utilisés étaient conformes à la norme CEI 61252 et à la classe 2 de précision de la norme CEI 61672-1.

Les caractéristiques principales des séries de mesures réalisées dans les six GEH ont été regroupées dans le tableau 4. Il montre notamment que le nombre de séries mesurées varie

de 9 à 24 selon le GEH. Dans la suite du texte, on désignera par « données de référence » l'ensemble des séries de mesures d'exposition au bruit réalisées pour chaque GEH.

La durée cumulée des données de référence, désignée par durée de référence T_{REF} , a été indiquée au tableau 4. La valeur de T_{REF} est la durée cumulée des mesures après exclusion des temps de pauses. L'exclusion des pauses était indispensable pour rendre comparables les échantillons tirés dans la base de données, objet de la seconde partie de l'étude.

Les données de référence ont été analysées afin d'en déduire un niveau de bruit moyen de référence. Conformément aux pratiques métrologiques habituelles, ce niveau de bruit moyen a été évalué par le niveau de pression acoustique continu équivalent calculé sur la durée de référence T_{REF} . Il a été noté $L_{Aeq,REF}$ dans le tableau 4.

Le niveau de bruit moyen de référence est doté d'une incertitude d'estimation U , dont il convient de rappeler, en premier lieu, la signification. Le niveau de bruit moyen de référence caractérise l'exposition au bruit d'un groupe de travailleurs de même métier, évaluée durant une période de travail s'étendant à plusieurs semaines, tant que les circonstances de l'exposition au bruit ne sont pas modifiées par des changements de production ou d'organisation du travail. Cette moyenne a été estimée par le contrôle de quelques travailleurs et de quelques journées de travail, et comprend donc une incertitude de mesure.

Cette incertitude provient de deux sources majeures :

- l'échantillonnage du bruit : cette incertitude notée U_1 découle de la variabilité du bruit reçu d'un jour à l'autre et de la variabilité entre membres du groupe ;
- l'appareillage de mesure et sa mise en œuvre : cette incertitude est notée U_2 ; les mesures ayant été effectuées à l'aide d'exposimètres, sa valeur a été estimée égale à 1,5 dB(A).

L'incertitude totale U et ses composantes ont été estimées pour les données de référence selon les valeurs indiquées au tableau 5. U est un intervalle de confiance à 95 % (ou incertitude élargie). Des précisions sur les estimateurs utilisés ici sont fournis dans la NST 259 (cf. partie A : problématique).

Nom du GEH	Caractéristiques du poste de travail	Effectif total du GEH	Nombre de séries mesurées	Durée de mesure de référence, T_{REF} en h	Niveau de bruit moyen de référence, $L_{Aeq,REF}$ dB(A)
Fraiseurs	Poste légèrement mobile	15	10	63 h	86,0
Monteurs	Poste fixe ; une tâche rare et très bruyante	24	13	80 h	90,2
Menuisiers	Poste mobile ; tâches multiples	4	24	85 h	88,4
Extrudeurs	Poste légèrement mobile	15	11	69 h	90,4
Conducteurs	Poste légèrement mobile	27	17	81 h	89,6
Régleurs	Poste non localisé, très mobile	9	9	39 h	90,3

Tableau 4 : Caractéristiques principales des GEH étudiés et de leur exposition au bruit.

Dans la seconde partie de cette étude on s'attachera à étudier la précision des plans d'échantillonnage. En conséquence, parmi les résultats du tableau 5, on se référera essentiellement au niveau du bruit moyen de référence de chaque GEH et au terme d'incertitude U_1 lié aux fluctuations de l'exposition au bruit constatées dans ce groupe, dont la valeur est proche de 1 dB(A).

Nom du GEH	Niveau de bruit moyen de référence $L_{Aeq,REF}$ en dB(A)	Incertitude			Dispose-t-on d'une estimation à long terme ?
		liée aux fluctuations du bruit reçu par le GEH, U_1	liée à l'appareillage U_2	totale U	
Fraiseurs	86,0	0,6	1,5	1,6	Oui
Monteurs	90,2	1,8	1,5	2,3	Oui
Menuisiers	88,4	1,3	1,5	2,0	Oui
Extrudeurs	90,4	1,5	1,5	2,1	Non
Conducteurs	89,6	0,9	1,5	1,7	Oui
Régleurs	90,3	0,9	1,5	1,7	Oui

Tableau 5 : Niveaux de bruit de référence et estimation des incertitudes associées, en dB(A).

La dernière phase d'analyse des données de référence visait à répondre à la question suivante : que penser de la qualité des données de référence pour représenter l'exposition sonore à long terme, c'est-à-dire au-delà des périodes mesurées de chaque GEH ? Plusieurs tests statistiques ont été menés à ce sujet : test de l'hypothèse de normalité de la distribution des niveaux de bruit $L_{Aeq,T}$ des séries initiales, analyse de variance pour mettre en évidence la présence éventuelle d'un facteur susceptible d'expliquer une partie de la variabilité des résultats, auto-corrélation des données. Ces analyses, détaillées dans la NST 259, ont fourni les résultats des tableaux 5 et 6. Ils montrent qu'on dispose d'une estimation de l'exposition à long terme pour 5 GEH parmi les 6 étudiés. Dans le cas du GEH des extrudeurs, la possibilité d'extrapolation à long terme a été rejetée parce qu'aucun facteur lié aux circonstances du travail réalisé n'a été identifié pour expliquer la forte variabilité du bruit constatée entre journées.

Le tableau 6 montre que l'hypothèse de normalité de la distribution des valeurs du niveau de bruit $L_{Aeq,T}$ global des séries mesurées a été validée pour les 6 GEH étudiés. L'hypothèse d'homogénéité appliquée à l'ensemble des données a été validée pour 2 GEH : les fraiseurs et les régleurs, alors que les conditions de l'exposition au bruit sont très différentes entre ces deux groupes. Par contre, pour les autres groupes, l'hypothèse d'homogénéité n'est acceptable que si un facteur est contrôlé durant le mesurage : les tâches principales pour les monteurs et menuisiers (dont on sait qu'elles induisent de fortes variations dans les circonstances de l'exposition), le facteur ligne pour les conducteurs. Dans le cas des extrudeurs, les données ne sont pas homogènes d'un jour à l'autre et il est possible de considérer que le contrôle du facteur ligne de production soit susceptible d'expliquer la singularité déjà signalée de ce groupe.

Les informations sur l'homogénéité des données de référence résumées au tableau 6 apporteront un éclairage aux résultats de l'étude présentée ici, portant sur l'aspect suivant : quand des échantillons sont tirés dans des données homogènes, ils sont comparables et

leurs résultats doivent être peu dispersés ; à l'inverse, quand les données ne sont pas homogènes, une dispersion accrue doit apparaître. L'écart sera quantifié et analysé pour en déduire des conséquences dans la pratique métrologique.

GEH	Validité de l'hypothèse de normalité ?	Hypothèse d'homogénéité	
		acceptable ?	Facteur à contrôler pour la rendre acceptable
Fraiseurs	Oui	Oui	Néant
Monteurs	Oui	Non	Tâches principales
Menuisiers	Oui	Non	Tâches principales
Extrudeurs	Oui	Non	Journée de travail et ligne de production
Conducteurs	Oui	Non	Ligne de production
Régleurs	Oui	Oui	Néant

Tableau 6 : Validité des hypothèses de normalité et d'homogénéité des données d'exposition au bruit pour les 6 groupes étudiés (séries initiales)

2.3 Méthodes d'échantillonnage appliquées aux données

Les stratégies d'échantillonnage qui ont été appliquées à ces données étaient destinées à étudier l'influence du nombre, de la durée et de la répartition temporelle des échantillons sur la précision de l'estimation du niveau d'exposition au bruit. Des plans d'échantillonnage ont été dimensionnés pour chaque GEH, tenant compte des différentes approches envisageables du mesurage (approches par tâches, par métier, par journées). Le dimensionnement des plans a été basé en premier lieu sur les spécifications du projet de norme ISO 9612. Ensuite, selon la précision obtenue, d'autres plans ont été définis imposant un effort de mesure accru (ou parfois réduit). Par ailleurs, l'effet d'un échantillonnage pratiqué sur une seule journée a été étudié.

Un plan d'échantillonnage par métier a été défini par deux paramètres : le nombre de mesures N , la durée t de chaque mesure. Un échantillon est composé de N mesures réparties de façon aléatoire dans tout l'intervalle de temps des données de référence. A titre d'exemple, la figure 1 indique la position d'un échantillon de 5 mesures de bruit réparties aléatoirement dans les données de référence (de durée égale ici à 63 h). Un échantillon fournit donc N valeurs $L_{Aeq,t}$ dont on déduit un niveau de bruit moyen $L_{Aeq,T}$ par la relation (1), valide pour les plans d'échantillonnage par métier et par journées entières.

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,t(i)}} \quad (1)$$

En cas d'approche du mesurage par tâches, la procédure précédente est appliquée à chaque tâche. Le plan d'échantillonnage est défini pour chaque tâche j par un nombre de mesures N_j de durée t_j réparties de façon aléatoire dans les données de référence de la tâche j . On déduit de l'équation (2) le niveau de bruit moyen de la tâche j , $L_{Aeq,T}(j)$.

$$L_{Aeq,T(j)} = 10 \cdot \log \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,t(j,i)}} \quad (2)$$

En notant $DR(j)$ la durée relative de la tâche j et M le nombre total de tâches,

$$\sum_{j=1}^M DR(j) = 1 \quad (3)$$

le niveau moyen de bruit calculé sur toutes les tâches est fourni par l'équation (4) :

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \sum_{j=1}^M DR(j) 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T(j)}} \quad (4)$$

Note : pour rendre comparables les doses de bruit reçues lors de chaque tâche j , il est souhaitable d'utiliser l'exposition sonore partielle par tâche $E_{A,T(j)}$, exprimée en $\text{Pa}^2 \cdot \text{h}$ et définie par l'équation (5) :

$$E_{A,T(j)} = (0,32 \cdot 10^{-8}) DR(j) 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T(j)}} \quad (5)$$

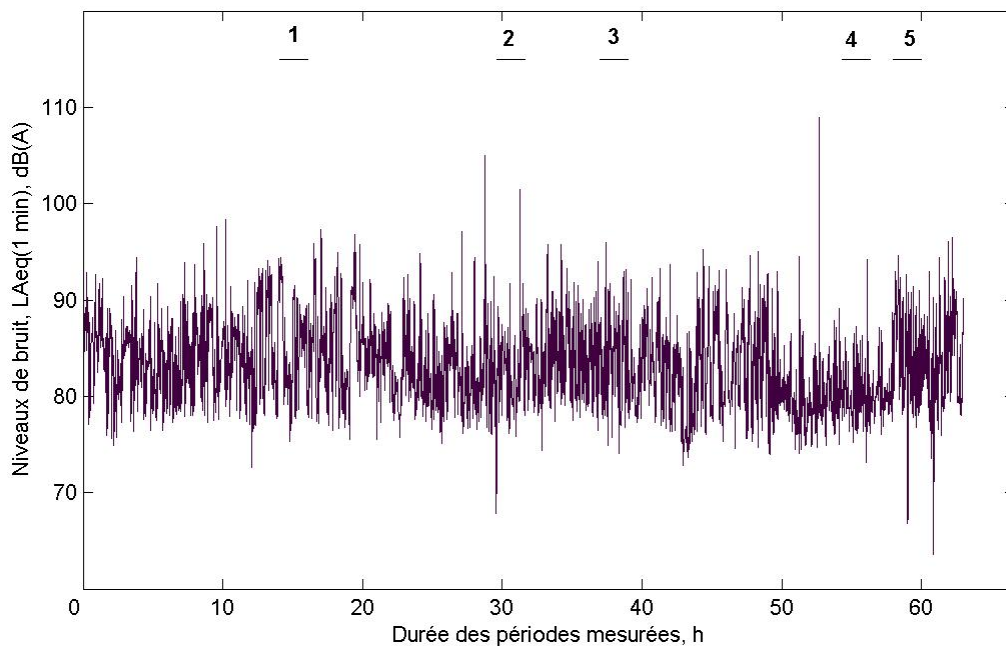


Figure 1 : Exemple illustrant le tirage d'un échantillon aléatoire de 5 mesures de 2 h, réparties sur 63 h.

Le résultat du tirage d'un échantillon aléatoire est donc un niveau de bruit moyen $L_{Aeq,T}$ dont la valeur est comparable au niveau de bruit moyen de référence $L_{Aeq,REF}$. La figure 1 illustre le tirage d'un échantillon par métier composé de 5 mesures d'une durée de 2 h (dont les valeurs $L_{Aeq,t(i)}$ sont respectivement de 87,3 ; 85,9 ; 86,5 ; 81,5 et 86,9 dB(A)). Pour cet échantillon, le niveau de bruit moyen $L_{Aeq,T}$ est égal à 86,0 dB(A).

Dans le cas des plans d'échantillonnage par métier, un paramètre complémentaire au nombre et à la durée des mesures a été spécifié dans le cas où la répartition des mesures

ne serait plus aléatoire à l'intérieur du domaine de référence de durée T_{REF} (de l'ordre de 80 h) mais au contraire concentrée dans un intervalle de temps réduit. Ce paramètre est la largeur imposée à l'intervalle de temps dans lequel toutes les mesures sont concentrées (de l'ordre de 20 h).

2.4 Quantification de la précision d'un plan d'échantillonnage

La précision d'un plan d'échantillonnage a été quantifiée par des simulations de Monte Carlo. L'intérêt de cette méthode est de fournir une estimation de l'incertitude du résultat qui évite tout recours à une formulation analytique de l'incertitude. Elle généralise l'approche normalisée d'estimation de l'incertitude spécifiée par le Guide d'estimation des incertitudes de mesures (cf. GUM [3]) dans les cas où les conditions d'application de la loi de propagation des incertitudes ne sont pas remplies ou qu'un doute existe sur leur validité [4]. C'est le cas avec la non linéarité des équations (1) et (3) et les caractéristiques des distributions des niveaux de bruit mesurés.

Cette méthode des simulations de Monte Carlo consiste à répéter 10000 fois le tirage d'échantillons aléatoires pour obtenir la distribution de toutes les valeurs probables $L_{Aeq,T}$ issues d'un plan d'échantillonnage spécifié et d'en déduire une quantification de sa précision.

L'évaluation de la précision d'un plan d'échantillonnage s'effectue en observant deux valeurs :

- la valeur moyenne (en énergie) de la distribution : son estimation doit être très proche de la valeur de référence $L_{Aeq,REF}$ indiquée au tableau 5. Si un écart notable existait, il traduirait un biais d'échantillonnage et il serait souhaitable d'identifier le facteur générant le biais constaté.
- La dispersion de la distribution : plus elle est réduite, meilleur est le plan d'échantillonnage. Pour quantifier cette dispersion, on considère les deux percentiles 2,5 % et 97,5 % de la distribution. L'écart entre ces deux percentiles définit exactement la largeur de l'intervalle dans lequel la probabilité de trouver la vraie valeur du niveau de bruit moyen atteint 95 %. La largeur de cet intervalle de confiance à 95 % a été notée IC95.

La figure 2 présente un exemple d'une telle distribution. Dans cet exemple, les valeurs numériques sont les suivantes : percentile 2,5 % = 84,3 dB(A), moyenne de la distribution = 85,9 dB(A), percentile 97,5 % = 87,3 dB(A). La valeur moyenne de référence étant égale à 86,0 dB(A), l'écart sur la moyenne s'élève à 0,1 dB(A) et paraît acceptable. L'intervalle de confiance à 95 % de la moyenne s'élève à $IC95 = 87,3 - 84,3 = 3,0$ dB(A).

Comment définir un critère d'acceptabilité de la largeur de l'intervalle de confiance à 95 % du niveau de bruit moyen, IC95 ? Dans le cadre de cette étude, un critère d'acceptabilité a été défini a priori, en prenant une valeur intermédiaire entre le minimum possible (qui est la précision des données de référence indiquée par U_1 au tableau 5) soit 1 dB(A) et la valeur de 5 dB(A), largeur séparant les deux seuils d'actions réglementaires de 80 et 85 dB(A).

Ce critère a été défini a priori ainsi :

un plan d'échantillonnage est jugé acceptable si $IC95 \leq 2,5$ dB(A).

Dans le cas des plans d'échantillonnage par tâches, un autre facteur intervenant dans la précision de l'estimation a été étudié : celui de l'incertitude sur la durée des tâches bruyantes. La méthode appliquée ici a consisté à définir a priori des taux de variation aux durées de toutes les tâches (sauf la moins bruyante), puis à tirer aléatoirement la durée effective d'une tâche dans une loi uniforme de largeur spécifiée par ce taux.

Cette durée effective a été appliquée dans le calcul de l'équation (4). Pour la tâche la moins bruyante, sa durée effective a été calculée afin de conserver inchangée la durée quotidienne totale des tâches.

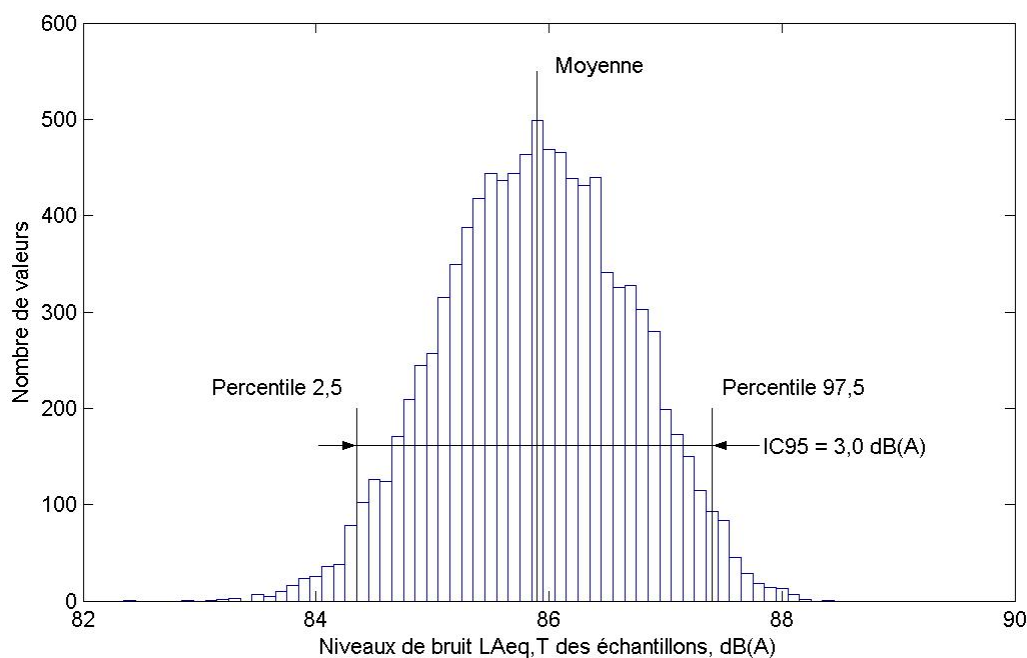


Figure 2 : Exemple illustrant la distribution des niveaux $L_{Aeq,T}$, issue de 10000 tirages aléatoires d'échantillons analogues à celui de la figure 1. La distribution fournit les percentiles 97,5 et 2,5 dont on déduit, par différence, la largeur de IC95 intervalle de confiance à 95 % de la moyenne.

2.5 Dimensionnement des plans d'échantillonnage

Les simulations de Monte Carlo ont été appliquées successivement à différents plans d'échantillonnage. Les premiers plans impliquaient un nombre limité de mesures, entraînant généralement une précision médiocre ; ensuite le nombre de mesures a été accru progressivement, jusqu'à obtenir un plan fournissant le degré de précision acceptable, conforme au critère $IC95 \leq 2,5$ dB(A).

Le dimensionnement initial des échantillons a été défini en s'appuyant sur les spécifications du projet de norme ISO 9612, fixant les contraintes minimales applicables au mesurage de l'exposition au bruit professionnel. Ces spécifications, portant sur le nombre de mesures et leur durée, sont résumées ci-après :

- Approche du mesurage par tâches : effectuer pour chaque tâche 3 mesures d'une durée de 5 minutes ; si les résultats diffèrent de plus 3 dB, effectuer au moins 3 mesures supplémentaires ou accroître la durée des mesures. Dans ce cas, on suppose que le mesurage est effectué à l'aide d'un sonomètre intégrateur. Les durées de mesure des plans par tâches étaient généralement égales à 5 min ; elles ont été fixées à 10 min pour quelques tâches spécifiques.
- Approche du mesurage par métier (ou fonction) : effectuer au minimum 5 mesures de durée suffisante pour que l'effort de mesure (= nombre de mesures x durée de mesure) atteigne la durée totale spécifiée par la norme. Cette durée totale varie de 5 h à 17 h, selon le nombre de travailleurs du GEH (par exemple, avec un GEH de 15 personnes l'effort minimal doit être de 10 h).

Compte tenu des durées totales de mesures imposées, les durées de mesures des plans par métier ont été fixées à 2 h ou à 1 h, ce qui est réalisable en pratique à l'aide d'exposimètres.

- Approche du mesurage par journées entières : effectuer 3 mesures ; si les résultats diffèrent de plus 3 dB, effectuer 2 mesures supplémentaires. Avec cette approche du mesurage, la durée de mesure doit être la plus proche possible de la durée totale quotidienne de travail. Dans les plans étudiées, elle était proche de 8 h.
- Position des mesures : répartir autant que possible les mesures dans une période nominale de travail (représentant toutes les phases d'activités) et parmi les travailleurs composant un groupe d'exposition homogène.

Dans le cas du mesurage par tâche, le dimensionnement initial des plans d'échantillonnage n'a pas pris en compte les différences du bruit entre tâches. Chaque tâche ayant fait l'objet du même nombre de mesures, ces plans qualifiés de réguliers ont donné des résultats médiocres. Pour améliorer la précision des plans suivants, il s'est avéré nécessaire non seulement d'accroître le nombre des mesures mais aussi de les répartir de façon différente entre les tâches, en appliquant une procédure d'optimisation spécifique. Il a été montré que l'optimisation entre tâches ne pouvait pas s'appuyer que sur leur niveau de bruit moyen mais devait associer une variabilité maximale et un niveau de bruit moyen élevé. Le critère d'optimisation est le suivant : en considérant l'exposition sonore partielle des tâches (définie par l'équation 5), quand le produit de sa moyenne par sa variance est maximum pour une tâche, c'est sur cette tâche (prioritairement aux autres) qu'il faut accroître l'effort de mesure pour obtenir une précision accrue. Ce moyen d'optimisation a été appliqué pour élaborer les plans d'échantillonnage par tâches ayant fourni la précision la plus élevée.

Après avoir vu l'effet du nombre des mesures et de leur durée quand les mesures sont réparties aléatoirement à l'intérieur du domaine de référence, qu'en est-il si cette répartition n'est plus aléatoire, mais au contraire concentrée dans un intervalle de temps réduit ? L'effet de la concentration en temps des échantillons a été étudié pour des plans d'échantillonnage par métier, en sélectionnant des plans (N x D) ayant permis d'atteindre le critère de précision acceptable lorsque la répartition des mesures a été aléatoire sur tout le domaine de référence (soit environ 80 h). Ces mêmes plans (N x D) ont été simulés en ajoutant la contrainte que toutes les mesures composant un échantillon soient situées dans un intervalle de temps de largeur spécifiée (environ 20 h). La précision du plan concentré a été comparée à celle du plan initial.

En suivant cette démarche, environ 250 plans d'échantillonnage différents ont été appliqués aux 6 GEH, afin d'étudier l'effet de modifications apportées au nombre de mesures, à leur durée, à leur répartition dans le temps de travail. Ci-après seuls ceux qui apportent une progression notable dans les résultats ont été mentionnés.

2.6 Définition des plans d'échantillonnage sélectionnés

Compte tenu des spécifications fournies précédemment, une soixantaine de plans d'échantillonnage ont été sélectionnés pour élaborer les résultats présentés ici.

Plans d'échantillonnage par tâches

En définissant les plans par le nombre de mesures dans chaque tâche (n1, n2, n3) puis par la durée de mesurage appliquée à chaque mesure (d1, d2, d3), quatre plans ont été

appliqués aux GEH se prêtant à une approche du mesurage par tâche (les fraiseurs, les monteurs, les menuisiers) :

1. plan (3, 3, 3) x (5, 5, 5) min : plan régulier (où le nombre de mesures est identique d'une tâche à l'autre) avec un effort de mesure correspondant au minimum imposé par la norme ;
2. plan (6, 6, 6) x (5, 5, 5) min : plan régulier avec un effort de mesure correspondant aux spécifications de la norme quand les 3 premiers résultats diffèrent de 3 dB(A) ou plus ;
3. plan résultant d'une première optimisation : le nombre de mesures par tâche n'est plus régulier mais accru à au moins 10 pour la tâche la plus bruyante et avec une durée de mesure accrue éventuellement de 5 à 10 minutes ;
4. plan optimisé permettant d'atteindre le critère de précision $IC_{95} \leq 2,5$ dB(A) : le nombre de mesures par tâche est accru suffisamment puis combiné avec des durées de mesure par tâches de 5 ou 10 minutes, afin d'obtenir une précision proche du critère de précision fixé a priori.

Plans d'échantillonnage par métier

Les plans suivants ont été appliqués :

- plan 5 x 2 h : plan où l'effort de mesure correspond au minimum imposé par la norme lorsqu'un GEH comprend 10 personnes (ce qui est le cas pour les fraiseurs, extrudeurs et régleurs) ;
- plan dans lequel la durée de mesure est toujours de 2 h mais où le nombre de mesures est accru (par rapport à 5) jusqu'à obtenir le critère de précision fixé a priori par $IC_{95} \leq 2,5$ dB(A) ;
- plan dans lequel la durée de mesure est réduite à 1 h, avec un nombre de mesures ajusté pour obtenir le critère de précision fixé par $IC_{95} \leq 2,5$ dB(A).

En outre, des plans d'échantillonnage par métier ont été définis spécifiquement pour répondre à deux questions.

La première question concerne la simulation de mesures de durée limitée à 5 min. En accroissant fortement le nombre des mesures, peut-on, par un plan de mesure par métier, retrouver une précision équivalente à celles des plans de mesures par tâches ? Ce point a été étudié en appliquant aux 6 GEH un plan comprenant 30 mesures de 5 minutes.

La seconde question est relative au regroupement des mesures dans un intervalle de temps proche d'une journée. La quantification de cet effet a été réalisée en prenant comme référence un plan (N x D) ayant permis d'atteindre le critère de précision $IC_{95} \leq 2,5$ dB (A) quand les N mesures sont réparties sur tout le domaine de référence, puis quand ces mesures sont concentrées durant un intervalle spécifié, généralement proche de 20 h.

Plans d'échantillonnage par journées entières

Deux plans ont été appliqués, le premier comprenant 3 journées de mesures par GEH, le second 5 journées.

3 Résultats

Les résultats sont présentés successivement selon les trois approches possibles du mesurage : par tâches, par métier puis par journées. Ils englobent 41 plans d'échantillonnage.

Pour chaque GEH, la désignation des plans d'échantillonnage appliqués a été spécifiée par le nombre de mesure et la durée de chaque mesure. En cas de plans par tâches, ces valeurs ont été spécifiées pour chaque tâche.

Le résultat principal de chaque plan est sa précision, estimée par l'amplitude de l'intervalle de confiance à 95 % du niveau de bruit moyen, IC95 en dB(A). La précision d'un plan a été indiquée via un code couleur porté sur la désignation du plan lui-même. L'interprétation et la valeur de la précision correspondant à chaque couleur sont indiquées dans le tableau 7.

Code couleur	Interprétation	Valeur de IC95
Rouge	précision mauvaise	IC95 > 3,5 dB(A)
Orange	précision médiocre	2,8 dB(A) < IC95 ≤ 3,5 dB(A)
Vert	précision satisfaisante	IC95 ≤ 2,8 dB (A)

Tableau 7 : Convention spécifiant le code couleur adopté pour présenter les résultats des divers plans d'échantillonnage

Il s'est avéré que de nombreux résultats ne permettaient d'atteindre qu'à 0,3 dB près le critère de précision acceptable fixé a priori et spécifié par $IC95 \leq 2,5$ dB (A). Pour ne pas rendre la lecture des résultats inutilement compliquée, c'est la valeur de $IC95 \leq 2,8$ dB (A) qui a été considérée pour définir le code vert et pour qualifier de « satisfaisante » la précision des plans d'échantillonnage.

Trois annexes fournissent les résultats numériques complets. L'annexe 1 concerne les plans d'échantillonnage par tâches, l'annexe 2 les plans par métier, l'annexe 3 les plans par journées. Pour chaque plan, les résultats numériques disponibles en annexe indiquent 3 valeurs, exprimées en dB(A):

- La valeur moyenne du niveau de bruit résultant d'un plan d'échantillonnage. Il s'agit de la valeur moyenne (en énergie) de la distribution du niveau de bruit moyen de chaque échantillon (distribution obtenue par réitération 10000 fois du tirage aléatoire des échantillons).
- L'écart entre la valeur moyenne du niveau de bruit résultant d'un plan d'échantillonnage et le niveau de bruit moyen de référence $L_{Aeq,REF}$.
- IC95 : l'intervalle de confiance à 95 % du niveau de bruit estimé par échantillonnage.

3.1 Précision des plans d'échantillonnage par tâches

Les résultats des plans d'échantillonnage par tâches sont présentés pour plusieurs plans, basés sur un effort de mesure croissant et fournissant une précision croissante. On arrive ainsi aux plans optimisés, permettant d'atteindre le critère de précision satisfaisante. Ensuite un facteur spécifique est étudié, celui d'une incertitude portant sur l'estimation de la durée

des tâches. Les résultats principaux sont indiqués ci-après. Des résultats numériques complémentaires sont fournis en annexe 1.

3.1.1 Obtention d'un plan optimisé

Quatre plans d'échantillonnage ont été appliqués aux 3 GEH se prêtant à une approche du mesurage par tâche :

- plan régulier où chaque tâche fait l'objet de 3 mesures d'une durée de 5 min,
- plan régulier où chaque tâche fait l'objet de 6 mesures d'une durée de 5 min,
- plan irrégulier, résultant d'une première optimisation (effort de mesurage accru, notamment pour la tâche la plus bruyante),
- plan optimisé, permettant d'atteindre le critère de précision satisfaisante.

En utilisant le code couleur indiqué (cf. tableau 7), les résultats sont donnés dans le tableau 8.

GEH	Plan (nombre de mesures par tâche x durée de mesure)
Fraiseurs	(3, 3, 3) x (5, 5, 5) min
	(6, 6, 6) x (5, 5, 5) min
	(10, 10, 20) x (5, 5, 10) min
	(10, 10, 30) x (5, 5, 10) min
Menuisiers	(3, 3, 3) x (5, 5, 5) min
	(6, 6, 6) x (5, 5, 5) min
	(10, 10, 20) x (5, 5, 10) min
	(10, 15, 30) x (5, 10, 10) min
Monteurs	(3, 3, 3) x (5, 5, 5) min
	(6, 6, 6) x (5, 5, 5) min
	(10, 6, 10) x (5, 5, 5) min
	(10, 10, 15) x (5, 5, 5) min

Tableau 8 : Résultats synthétisant la précision des plans d'échantillonnage par tâches (rouge : précision mauvaise ; orange : précision médiocre ; vert : précision satisfaisante)

La précision des plans d'échantillonnage par tâches est mauvaise quand les plans comprennent 3 ou 6 mesures de 5 min par tâche pour les 3 GEH étudiés. Les résultats complémentaires (cf. annexe 1) montrent que ces plans conduisent à des valeurs IC95 voisines de 4 à 7 dB(A) et induisent un écart avec le niveau de bruit moyen de référence $L_{Aeq,REF}$ de l'ordre de 0,3 dB(A).

Il a donc été nécessaire d'optimiser les plans pour améliorer leur précision. Les plans indiqués en troisième position pour chaque GEH dans le tableau 8 résultent d'une première

optimisation. Dans ce but, deux actions ont été appliquées : accroître l'effort de mesurage, privilégier les tâches les plus bruyantes dans la répartition du nombre des mesures. Les résultats montrent que la précision des plans a été améliorée (elle est passée de mauvaise à médiocre) et les écarts avec $L_{Aeq,REF}$ (cf. annexe 1) sont devenus négligeables.

Pour atteindre le critère de précision satisfaisante, un effort de mesure supplémentaire et portant sur les tâches les plus bruyantes a été nécessaire, ainsi que l'indiquent les plans situés en quatrième position dans le tableau 8. Avec ces plans optimisés les résultats numériques détaillés (cf. annexe 1) montrent que IC95 est compris entre 2,4 et 2,7 dB(A) et que le niveau du bruit moyen ne s'écarte que de façon négligeable (moins de 0,1 dB) du niveau de référence $L_{Aeq,REF}$.

Pour obtenir les 3 plans d'échantillonnage optimisés mentionnés en vert dans le tableau 8, l'effort de mesure appliqué par tâche s'avère très différent d'une tâche à l'autre. Pour mettre ceci en évidence, l'effort de mesure a été calculé pour chaque tâche en proportion de la durée de la tâche dans les données de référence (cf. tableaux 1 à 3). Ce calcul donne les taux de sondages indiqués dans le tableau 9 : ils sont très différents d'une tâche à l'autre, mais la tâche 3 (qui est toujours la plus bruyante) a bénéficié du taux de sondage le plus élevé.

Dans le cas des monteurs, le plan optimisé correspond à un taux de sondage très important à la fois pour la tâche 2 et pour la tâche 3. Les caractéristiques de ce GEH (cf. tableau 2) ont montré qu'il s'agit de deux tâches très bruyantes (leur niveau de bruit moyen est voisin de 100 dB(A) et excède de 17 dB(A) celui de la tâche 1), de durée brève (inférieure à 5 % du temps de travail, soit moins de 30 minutes en durée quotidienne moyenne). Dans ces conditions, ces tâches s'apparentent à des « événements acoustiques rares ». Les résultats montrent qu'en présence de tels événements, il est nécessaire de leur appliquer un taux de sondage très élevé pour obtenir une précision optimale.

GEH	Plan	Effort total de mesure	Taux de sondage		
			Tâche 1*	Tâche 2	Tâche 3*
Fraiseurs	(10, 10, 30) x (5, 5, 10) min	400 min (soit 6 h 40)	4 %	4 %	23 %
Monteurs	(10, 10, 15) x (5, 5, 5) min	175 min (soit 2 h 55)	1 %	28 %	58 %
Menuisiers	(10, 15, 30) x (5, 10, 10) min	500 min (soit 8 h 20)	2 %	8 %	37 %

* Dans les 3 GEH, la tâche 3 est toujours la plus bruyante, la tâche 1 est toujours la moins bruyante.

Tableau 9 : Effort de mesurage et taux de sondage par tâche pour les plans d'échantillonnage optimisés du tableau 8.

3.1.2 Effet d'une incertitude sur la durée des tâches

L'effet d'une incertitude sur la durée des tâches a été le dernier paramètre étudié. On a considéré les plans d'échantillonnage optimisés (mentionnés en vert dans le tableau 8) et les durées relatives des tâches des GEH (cf. tableaux 1, 2 et 3). L'incertitude sur la durée des tâches a été simulée en appliquant une variation (selon une loi uniforme) de ± 25 % aux durées relatives des deux tâches les plus bruyantes. La durée de la tâche la moins bruyante a été déduite ensuite de la durée quotidienne de travail.

Le résultat est le suivant : des variations de $\pm 25 \%$ sur la durée des tâches les plus bruyantes ont un effet négligeable ou très modéré pour ces 3 GEH. Un accroissement de la valeur IC95 a été constaté, mais il est limité à 0,2 dB(A) (dans le cas des fraiseurs et des menuisiers) ou à 0,4 dB(A) (dans le cas des monteuses).

3.2 Précision des plans d'échantillonnage par métier

Trois types de plans d'échantillonnage par métier ont été étudiés : plans basés sur des mesures de durée de 2 h ou de 1 h, plans « fictifs » basés sur un grand nombre de mesures de durée très brève (5 min), plans dans lesquels les mesures ne sont plus réparties aléatoirement sur tout le domaine de référence mais au contraire regroupées dans un intervalle de temps plus réduit. Les résultats principaux sont indiqués ci-après. Les résultats numériques détaillés correspondant sont fournis dans l'annexe 2.

3.2.1 Plans d'échantillonnage avec des durées de mesure de 2 h ou 1 h

Des plans d'échantillonnage par métier ont été appliqués aux 6 GEH. Des mesures d'une durée de 2 h ont été considérées en premier lieu. Le nombre des mesures a été défini initialement pour être en conformité avec les spécifications du projet de norme ISO 9612 (cf. paragraphe 2.5), puis accru ensuite éventuellement, pour atteindre le critère de précision satisfaisante.

Ensuite, quand ce critère de précision a été atteint, un plan de même précision mais basé sur des mesures de durée limitée à 1 h a été recherché. Le tableau 10 indique les résultats.

Examinons tout d'abord exclusivement les 4 premiers GEH mentionnés au tableau 10. Le critère de précision souhaitable n'est atteint avec 5 mesures de durée égale à 2 h que dans le cas des régleurs (cf. première ligne des 4 GEH du tableau 10). Pour y arriver avec les 3 autres GEH, il faut accroître à 7 ou 8 le nombre des mesures (cf. ligne 2 du tableau 10). Les résultats complémentaires (cf. annexe 2) montrent alors que IC95 est compris entre 1,8 et 2,5 dB(A), que le niveau du bruit moyen ne s'écarte que de façon négligeable (moins de 0,1 dB) du niveau de référence $L_{Aeq,REF}$ et que l'effort de mesure réalisé est égal ou un peu supérieur à celui que prescrit le projet de norme ISO 9612.

Ces résultats ont suscité une question : si la durée des mesures était limitée à 1 h au lieu de 2 h, à combien faudrait-il accroître le nombre de mesures pour atteindre à nouveau le critère de précision satisfaisante ? La troisième ligne de résultat du tableau 10 indique la réponse : pour les trois premiers GEH le nombre de mesures doit être compris entre 9 et 12 pour atteindre le critère de précision souhaitable quand la durée de mesure est de 1 h, alors qu'il était de 7 ou 8 avec des mesures de durée égale à 2 h. Pour ces GEH, on a donc obtenu une précision équivalente mais avec un effort de mesure total légèrement réduit, quand les plans sont basés sur des mesures de durée 1 h au lieu de 2 h. Pour le quatrième GEH, les régleurs, le critère de précision est atteint avec 5 mesures de 1 h.

GEH	Plan (nombre de mesures x durée)
Fraiseurs	5 x 2 h
	7 x 2 h
	12 x 1 h
Extrudeurs	5 x 2 h
	8 x 2 h
	12 x 1 h
Conducteurs	5 x 2 h
	7 x 2 h
	9 x 1 h
Régleurs	5 x 2 h
	5 x 2 h
	5 x 1 h
Monteurs	7 x 2 h
	15 x 2 h
Menuisiers	7 x 2 h
	15 x 2 h

Tableau 10 : Résultats synthétisant la précision des plans d'échantillonnage par métier (rouge : précision mauvaise ; orange : précision médiocre ; vert : précision satisfaisante)

Examinons enfin les résultats du tableau 10 pour les deux derniers GEH, les monteurs et les menuisiers. Dans ces GEH, l'analyse du travail a montré que les tâches déterminaient très fortement l'exposition au bruit (cf. tableaux 2 et 3), ce qui entraîne la question suivante : que se passe-t-il si on applique à ces GEH un plan de mesurage par métier, qui ignore donc les tâches ? Le tableau 10 fournit la réponse : avec des plans comprenant 7 ou 15 mesures d'une durée de 2 h, la précision reste mauvaise malgré un effort cumulé de mesure qui s'élève à 14 h ou à 30 h. Les résultats détaillés (cf. annexe 2) indiquent que IC95 est voisin de 4 à 8 dB(A) et que des écarts non négligeables apparaissent entre le niveau de bruit moyen et la valeur de référence $L_{Aeq,REF}$. De plus, pour ces deux GEH, on peut comparer l'efficacité des approches du mesurage par tâches et par métier, en considérant la précision des plans en fonction de l'effort de mesure requis. Pour les monteurs, le plan d'échantillonnage optimisé par tâches (cf. tableau 8) a montré qu'avec un effort total de mesure limité à 3 h, le critère de précision satisfaisante était atteint. Or ce critère n'est pas atteint avec un plan d'échantillonnage par métier quand l'effort de mesure est dix fois plus élevé. Dans le cas des menuisiers, la tendance observée est identique à celle des monteurs. Les résultats de ces 2 GEH confirment que l'approche du mesurage par métier doit être exclue quand l'analyse du travail montre que les tâches déterminent fortement l'exposition au bruit.

3.2.2 Plan d'échantillonnage « fictif » (30 mesures de durée 5 min)

Bien que les spécifications normalisées réservent exclusivement la possibilité d'effectuer des mesures de durées limitées à 5 min au cas du mesurage par tâche, la question suivante peut être posée : quelle est la précision de plans d'échantillonnage par métier comprenant 30 mesures d'une durée limitée à 5 min ? Apparaissant très éloignés des pratiques métrologiques courantes, de tels plans ont été qualifiés de fictifs. Le tableau 11 fournit les résultats.

GEH	Plan (nombre de mesures x durée)
Fraiseurs	30 x 5 min
Monteurs	30 x 5 min
Menuisiers	30 x 5 min
Extrudeurs	30 x 5 min
Conducteurs	30 x 5 min
Régleurs	30 x 5 min

Tableau 11 : Résultats synthétisant la précision des plans d'échantillonnage « fictifs » par métier (rouge : précision mauvaise ; orange : précision médiocre ; vert : précision acceptable)

Les résultats sont mauvais pour les 3 premiers GEH, ce qui peut s'expliquer par la non prise en compte des tâches. Pour les 3 autres GEH, il apparaît qu'un plan d'échantillonnage comprenant 30 mesures d'une durée de 5 min et réparties aléatoirement sur tout le domaine de référence permet d'atteindre le critère de précision acceptable.

3.2.3 Effet de la concentration des mesures durant le temps

Dans les plans d'échantillonnage par métier appliqués précédemment, les mesures ont été réparties aléatoirement sur toute la durée des périodes de référence (soit environ 80 h). Dans la pratique habituelle de mesurage, les mesures sont généralement concentrées dans un intervalle de temps de l'ordre d'une ou deux journées, nettement plus réduit. Quel est l'effet sur la précision des plans d'échantillonnage d'une concentration des mesures dans le temps de travail ?

La réponse à cette question est fournie pour les plans optimisés ayant permis d'atteindre le critère de précision satisfaisante. La largeur de l'intervalle de temps dans lequel les mesures sont concentrées a été définie pour chaque plan : elle est un peu supérieure à la durée minimum suffisante pour contenir toutes les mesures prévues. Le tableau 12 indique les résultats.

Avec les plans basés sur des mesures de 2 h ou de 1 h, les résultats sont contrastés selon les GEH. Comparés aux résultats du tableau 10, la concentration des mesures durant un intervalle de temps voisin de 20 h est quasiment sans effet sur les plans d'échantillonnage des fraiseurs et des extrudeurs, la précision est un peu dégradée dans le cas des régleurs.

Par contre pour les conducteurs, la précision des plans est devenue mauvaise quand les mesures sont concentrées dans le temps alors qu'elle était satisfaisante quand les mesures étaient réparties aléatoirement sur tout le domaine de référence.

GEH	Plan (nombre de mesures x durée)
Fraiseurs	7 x 2 h, concentrées sur 20 h
	12 x 1 h, concentrées sur 20 h
	30 x 5 min, concentrées sur 8 h
Extrudeurs	8 x 2 h, concentrées sur 24 h
	12 x 1 h, concentrées sur 20 h
	30 x 5 min, concentrées sur 8 h
Conducteurs	7 x 2 h, concentrées sur 20 h
	9 x 1 h, concentrées sur 15 h
	30 x 5 min, concentrées sur 8 h
Régleurs	5 x 2 h, concentrées sur 15 h
	5 x 1 h, concentrées sur 15 h
	30 x 5 min, concentrées sur 8 h

Tableau 12 : Résultats synthétisant la précision des plans d'échantillonnage par métier quand les mesures sont concentrées dans un intervalle de temps de durée réduite par rapport aux durées de référence (rouge : précision mauvaise ; orange : précision médiocre ; vert : précision satisfaisante)

Avec les plans d'échantillonnage « fictifs » par métier (comprenant 30 mesures d'une durée de 5 min), l'effet de la concentration des mesures dans un intervalle de temps de 8 h détériore nettement la précision du résultat pour 2 GEH (les extrudeurs et les conducteurs), a un effet limité pour le GEH des régleurs. Pour le quatrième GEH (les fraiseurs), le résultat du plan avec ou sans concentration est mauvais.

3.3 Précision des plans d'échantillonnage par journées

La précision des plans d'échantillonnage par journées entières a été étudiée avec un nombre de journées de mesure égal à 3, correspondant au minimum requis par la norme, ou égal à 5, qui doit être appliqué si l'écart du niveau de bruit entre journées atteint 3 dB(A).

Le tableau 13 indique les résultats des plans d'échantillonnage par journées entières. Les valeurs numériques détaillées correspondantes sont indiquées en annexe 3.

Le critère de précision satisfaisante est atteint à l'aide de plans basés sur 3 journées de mesure pour 2 GEH, les fraiseurs et les régleurs. Il faut 5 journées de mesure pour atteindre ce critère pour 2 autres GEH, les extrudeurs et les conducteurs.

GEH	Plan (nombre de mesures x durée)
Fraiseurs	3 x 8 h
	5 x 8 h
Extrudeurs	3 x 8 h
	5 x 8 h
Conducteurs	3 x 8 h
	5 x 8 h
Régleurs	3 x 8 h
	5 x 8 h
Monteurs	3 x 8 h
	5 x 8 h
Menuisiers	3 x 8 h
	5 x 8 h

Tableau 13 : Résultats synthétisant la précision des plans d'échantillonnage par journées (rouge : précision mauvaise ; orange : précision médiocre ; vert : précision satisfaisante)

Pour les 2 derniers GEH, les monteurs et les menuisiers, la précision du résultat reste mauvaise malgré 5 journées de mesures. Ceci s'explique par la présence de variations de grande ampleur du bruit entre journées de travail, liées au fait que le travail de ces 2 GEH n'est pas basé sur un cycle quotidien.

Les résultats complémentaires détaillés (cf. annexe 3) montrent qu'un écart existe sur le niveau du bruit moyen entre l'estimation par échantillonnage et la valeur de référence. Pour les 4 GEH où la précision des plans par journées atteint le niveau satisfaisant, cet écart est de l'ordre 0,2 dB(A). Cet écart est d'amplitude très limitée, mais il traduit cependant un biais d'échantillonnage qui n'a été observé avec aucun des autres plans d'échantillonnage par tâches ou par métier dès lors que le critère de précision satisfaisante était atteint.

3.4 Bilan par GEH : plans de précision équivalente

Pour clore la présentation des résultats, le tableau 14 regroupe pour chacun des 6 GEH étudiés tous les plans ayant permis d'atteindre le critère de précision satisfaisante, spécifié par $IC95 \leq 2,8 \text{ dB(A)}$, avec un effort de mesurage le plus réduit possible.

GEH	Plans par tâche	Plans par métier	Plans par métier « fictifs » (mesures de 5 min)	Plans par journées entières
Fraiseurs	(10, 10, 30) x (5, 5, 10) min	7 x 2 h ou 12 x 1 h	néant	3 x 8 h
Monteurs	(10, 10, 15) x (5, 5, 5) min	néant	néant	néant
Menuisiers	(10, 15, 30) x (5, 10, 10) min	néant	néant	néant
Extrudeurs	néant	8 x 2 h ou 12 x 1 h	30 x 5 min	5 x 8 h
Conducteurs	néant	7 x 2 h ou 9 x 1 h	30 x 5 min	5 x 8 h
Régleurs	néant	5 x 1 h	30 x 5 min	3 x 8 h

Tableau 14 : Récapitulatif des plans d'échantillonnage ayant permis d'atteindre le critère de précision satisfaisante défini par $IC95 \leq 2,8 \text{ dB (A)}$. Notation des plans : nombre de mesures x durée de mesure.

4 Discussion et conclusion

La base de données d'exposition au bruit professionnel, utilisée ici comme référence et constituée de séries chronologiques de bruit mesuré en continu durant environ 80 h auprès de six groupes de travailleurs, a permis de simuler sans difficultés majeures un grand nombre de plans d'échantillonnage du bruit, calqués sur ce qui est envisageable en pratique, en terme de nombre et de durée de mesurage. La méthode des simulations de Monte Carlo a permis ensuite de quantifier l'incertitude liée à l'échantillonnage du bruit et de comparer aisément les performances, en terme de précision, des divers plans d'échantillonnage. La précision des plans d'échantillonnage a été appréciée en fonction d'un critère d'acceptabilité défini a priori : la largeur de l'intervalle de confiance à 95 % du niveau de bruit moyen estimé par échantillonnage (notée IC95) ne devait pas excéder 2,5 dB(A). Alors qu'un autre critère aurait pu être utilisé, celui-ci est apparu bien adapté aux six groupes de travailleurs : plusieurs plans d'échantillonnage ont permis d'atteindre ce critère, au prix d'un effort de mesure notable mais restant encore réaliste par rapport aux possibilités et pratiques métrologiques de terrain. Cette étude conduit à différentes préconisations métrologiques.

Examinons en premier lieu le choix de la stratégie de mesurage. Les résultats ont montré que les approches du mesurage par métier et par journées entières doivent être évitées quand le travail comprend des tâches prévisibles et nettement différenciées en termes de niveau de bruit. Ceci a été montré avec 2 groupes d'exposition homogène (GEH), les monteurs et les menuisiers, qui ont une caractéristique commune : entre tâches les niveaux de bruit moyens sont différents d'au moins 10 dB(A). Dans ce cas, seule l'approche par tâche a permis d'obtenir une estimation du niveau de bruit global dont la précision atteint le critère d'acceptabilité avec un effort total de mesurage limité à quelques heures. Par contre, quand les différences entre niveaux de bruit par tâche ne dépassent pas 3 dB(A), ce qui est le cas du GEH des fraiseurs, les résultats ont montré que les trois approches du mesurage (par tâches, par métier et par journées entières) étaient applicables.

Concernant les résultats de l'approche par tâches, il a été montré que l'effort de mesure minimum imposé par le projet de norme ISO 9612 (3 ou 6 mesures par tâche) ne permettait pas d'approcher le critère de précision fixé initialement dans le cas des 3 GEH composant la base de données se prêtant à cette approche : la valeur IC95 était comprise entre 3,8 et 6,8 dB(A) avec 6 mesures par tâches. Pour atteindre le critère d'acceptabilité fixé a priori ($IC95 \leq 2,5$ dB (A)) avec ces 3 GEH, il a été montré que le nombre de mesures devait s'élever à 10 pour la tâche la moins bruyante et à 15 ou 30 pour la tâche la plus bruyante. Il est donc illusoire de croire qu'une estimation précise du niveau du bruit moyen peut résulter de « quelques » mesures dans chaque tâche.

Dans la pratique métrologique, il est assez fréquent qu'une tâche soit nettement plus bruyante que les autres et de durée quotidienne relativement limitée, au point de constituer parfois un « événement acoustique rare ». Dans la base de données de référence, c'est le cas avec les monteurs, dont le travail comprend 2 tâches très bruyantes mais brèves (environ 100 dB(A) pendant moins de 5 % du temps) et une tâche très peu bruyante (moins de 85 dB(A) pendant plus de 90 % du temps). Dans ce cas, les résultats ont montré que la tâche la plus bruyante devait faire l'objet d'un mesurage prolongé durant près de 60 % de sa durée quotidienne totale pour atteindre, par un plan d'échantillonnage optimisé, le critère de précision acceptable. En présence de telles tâches ou d'événements acoustiques rares, il faut donc prévoir de leur attribuer un effort de mesure très élevé et nettement supérieur à l'effort de mesure des tâches peu bruyantes : ils sont en effet très déterminants dans l'estimation du niveau moyen du bruit et celle de l'incertitude d'échantillonnage du bruit.

Lors du mesurage par tâche, une évaluation de la durée totale quotidienne doit être réalisée, ce qui se heurte souvent à des difficultés d'estimation. Dans les simulations réalisées ici, il a été possible de quantifier l'effet d'une incertitude appliquée à la durée des tâches. Ceci a été étudié avec une variation de $\pm 25\%$ sur les durées relatives des tâches les plus bruyantes, appliquée à des plans d'échantillonnage optimisés et dont la précision atteignait le critère fixé a priori, $IC_{95} \leq 2,5$ dB (A). Dans ces conditions, l'accroissement de la largeur de IC_{95} attribuable à la variation appliquée à la durée des tâches est restée limitée à 0,2 dB(A) pour 2 GEH, et a atteint 0,4 dB(A) pour le troisième GEH, les monteurs. On en conclut qu'une incertitude sur la durée des tâches a un effet mais son amplitude reste très limitée par rapport à celle des incertitudes sur le niveau du bruit.

Examinons ensuite les résultats de l'échantillonnage par métier. Les plans étudiés ont été définis en se référant aux spécifications du projet de norme ISO 9612, qui impose un nombre minimum de 5 mesures et une durée cumulée de mesure qui ne peut jamais être inférieure à 5 h (elle doit s'élever à 10 h si le GEH comprend 15 personnes, cas de 2 des GEH étudiés). Les plans étudiés comportaient donc au moins 5 mesures, d'une durée de 2 h ou bien de 1 h. Pour 3 des 4 GEH susceptibles d'être échantillonnés selon l'approche métier, le critère d'acceptabilité a été atteint avec 7 ou 8 mesures de durée de 2 h ainsi que par de 9 à 12 mesures d'une durée de 1 h. Pour le quatrième GEH, les régleurs, 5 mesures de 1 h ont permis d'atteindre ce critère.

Ces résultats sont en concordance avec les exigences de la norme pour le nombre minimum de mesure (5 mesures) et pour la durée cumulée minimale de mesure par GEH (5 h). Au-delà de ces minima, la norme impose un accroissement de l'effort total de mesure mais ne fournit pas d'indication permettant de savoir s'il faut privilégier l'accroissement du nombre de mesures ou celui de leur durée. Les résultats obtenus ici en comparant la précision des plans construits avec des durées de mesure de 2 h ou de 1 h ont montré qu'il fallait privilégier l'accroissement du nombre des mesures à celui de la durée de chaque mesure. Ceci a été confirmé par la précision des plans d'échantillonnage par métier « fictifs », ayant comporté 30 mesures d'une durée limitée à 5 minutes et réparties aléatoirement sur tout le domaine de référence : avec un effort global de mesure limité à 2 h 30, nettement inférieur au minimum imposé par la norme, le critère de précision fixé a priori a été atteint pour 3 des 4 GEH.

Avec les plans d'échantillonnage par métier, le projet de norme ISO 9612 impose une répartition aléatoire des mesures parmi les membres du groupe et dans la journée de travail. Quand cette répartition n'est plus aléatoire, mais biaisée par le regroupement des mesures dans un intervalle de temps de travail réduit, quelle dégradation de la précision peut-on attendre ? Cette question a été étudiée par comparaison d'une répartition aléatoire sur tout le domaine de référence (soit environ 80 h) à une répartition des mesures regroupées sur une durée totale de 15 ou de 20 h. Dans ces conditions, le fait que l'échantillonnage soit biaisé, non aléatoire, a entraîné un accroissement de la valeur de IC_{95} limité à 0,4 dB(A) pour 3 GEH. Pour le quatrième GEH (les conducteurs) la dégradation de la précision est nettement plus élevée (l'accroissement de IC_{95} atteint 2 dB(A)) mais s'explique par le facteur ligne de production, qui génère une non homogénéité des données signalée dans la présentation initiale des caractéristiques des GEH étudiés (cf. tableau 6). On en conclut qu'avec des plans basés sur des mesures de durées égales à 1 h ou à 2h, une répartition non aléatoire des échantillons ne dégrade que modérément la précision des mesures.

Toutefois, le regroupement dans le temps de travail de toutes les mesures n'a pas le même effet lorsque la durée des mesures se limite à 5 min. Ceci a été mis en évidence avec 3 GEH (extrudeurs, conducteurs et régleurs). Avec les plans d'échantillonnage « fictifs » de 30 mesures d'une durée de 5 minutes, la concentration des mesures dans un intervalle de temps limité 8 h a conduit à des résultats de précision mauvaise ou très médiocre (les valeurs IC_{95} ont été respectivement égales à 6,2 dB ; 5,4 dB et 3,3 dB) alors que le critère

de précision acceptable ($IC95 \leq 2,5$ dB (A)) avait été atteint ou approché lorsque les 30 mesures étaient réparties aléatoirement sur tout le domaine de référence (soit de 40 à 80 h selon le GEH). Ces résultats confirment donc l'importance de répartir les mesurages le plus possible sur les membres du groupe et sur des intervalles de temps suffisamment longs pour bien représenter les différentes journées de travail.

Avec les plans d'échantillonnage par journées entières, il a été montré que 3 ou 5 journées de mesures permettaient d'atteindre le critère de précision fixé a priori pour 4 GEH. Pour les 2 autres, les monteurs et menuisiers, le critère de précision n'a jamais été atteint avec l'approche du mesurage par journées. Ceci s'explique par la grande variabilité constatée entre journées, à la fois dans le travail effectué et dans les niveaux de bruit, liée aux tâches effectuées. Pour ces 2 GEH, ni l'approche du mesurage par métier ni celle par journée entière ne permettent d'atteindre le critère de précision avec un effort de mesure « raisonnable », alors que c'est le cas avec l'approche par tâche.

Tous ces résultats ont été établis à partir de 6 groupes de travailleurs, sélectionnés pour constituer la base de données d'exposition au bruit utilisée ici comme référence. Ces 6 groupes présentent des situations d'exposition au bruit professionnel très différentes, mais leur nombre reste limité. Dans le cas de l'approche du mesurage par tâche, on peut considérer qu'il serait souhaitable de disposer d'un autre GEH, présentant des caractéristiques d'exposition intermédiaires entre les 3 GEH étudiés ici, dont la variabilité serait plus forte que celle du GEH des fraiseurs, mais moindre que celle des monteurs ou des menuisiers. Toutefois, la constitution de la présente base de données n'a pas été simple. De plus, étant composée de mesures d'exposition effectuées en continu durant des intervalles de temps cumulés qui excèdent 40 h, cette base n'a pas d'équivalent, selon la connaissance de l'auteur, dans le domaine du bruit professionnel.

Dans la pratique du mesurage d'exposition, l'évaluation de la précision des mesurages s'effectue a posteriori, par analyse des mesures effectuées. En présence de résultats manquant de précision pour être interprétés en terme de conformité au non dépassement d'un seuil d'action réglementaire, le projet de norme ISO 9612 incite à poursuivre le mesurage ou à modifier le plan de mesurage mis en œuvre. En complément de l'approche de terrain, les résultats présentés ici fournissent des indications utilisables a priori sur le dimensionnement souhaitable des échantillons dès lors que le niveau d'exposition quotidienne au bruit approche un seuil réglementaire et qu'un mesurage précis est nécessaire.

Références

- [1] Projet ISO 9612. Acoustique – Détermination de l'exposition au bruit en milieu de travail – Méthode d'expertise, ISO/FDIS 9612, 2008. (NB : ce projet doit paraître comme norme ISO en 2009)
- [2] L. THIERY. Estimation de l'exposition au bruit de six groupes de travailleurs. Note scientifique et technique, INRS (Paris), NST 259, 102 p., 2006.
- [3] ISO/CEI Guide 98-3. Incertitude de mesure – Partie 3 : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM, 1995), 2008.
- [4] ISO/CEI Guide 98-3/supplément 1. Incertitude de mesure – Partie 3 : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM, 1995) – Propagation de distributions par une méthode de Monte Carlo, 2008.

Annexe 1 : Résultats détaillés des plans d'échantillonnage par tâches

Les résultats numériques détaillés des plans d'échantillonnage indiquent :

- La valeur moyenne du niveau de bruit résultant d'un plan d'échantillonnage. Il s'agit de la valeur moyenne (en énergie) de la distribution du niveau de bruit moyen de chaque échantillon (distribution obtenue par réitération 10000 fois du tirage aléatoire des échantillons) exprimée en dB(A).
- L'écart entre la valeur moyenne du niveau de bruit résultant d'un plan d'échantillonnage et le niveau de bruit moyen de référence $L_{Aeq,REF}$ exprimé en dB(A),
- IC95 : l'intervalle de confiance à 95 % du niveau de bruit estimé par échantillonnage exprimé en dB(A).

Notation des plans :

(nombre de mesures pour chaque tâche, de 1 à 3) x (durée de mesures pour chaque tâche, de 1 à 3)

Plan régulier (3, 3, 3) x (5, 5, 5) min :

GEH	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$	IC95
Fraiseurs	85,6	- 0,4	6,5
Monteurs	89,9	- 0,3	5,6
Menuisiers	87,9	- 0,5	8,3

Tableau A1-1 : Résultats du plan d'échantillonnage par tâches comprenant pour chaque tâche trois mesures de durée égale à 5 min. Effort de mesure = 3 x 5 min = 15 min par tâche, soit 45 min en tout.

Plan régulier (6, 6, 6) x (5, 5, 5) min :

GEH	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$	IC95
Fraiseurs	85,7	- 0,3	5,9
Monteurs	90,1	- 0,1	3,8
Menuisiers	88,1	- 0,3	6,8

Tableau A1-2 : Résultats du plan d'échantillonnage par tâches comprenant pour chaque tâche six mesures de durée égale à 5 min. Effort de mesure = 6 x 5 min = 45 min par tâche, soit 1 h 30 min en tout.

Plans résultant d'une première optimisation

GEH	Plan	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$	IC95
Fraiseurs	(10, 10, 20) x (5, 5, 10) min	85,9	-0,1	3,2
Monteurs	(10, 6, 10) x (5, 5, 5) min	90,1	- 0,1	3,0
Menuisiers	(10, 10, 20) x (5, 5, 10) min	88,4	0	3,4

Tableau A1-3 : Résultats de plans d'échantillonnage par tâches modifiés par une première optimisation.

Ces plans correspondent aux efforts de mesure suivants :

- Fraiseurs : 300 min (ou 5 h) ;
- Monteurs : 130 min (2 h 10 min) ;
- Menuisiers : 400 min (6 h 40 min).

Plans optimisés permettant d'atteindre le critère de précision souhaitable

GEH	Plan	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$	IC95
Fraiseurs	(10, 10, 30) x (5, 5, 10) min	86,0	0	2,7
Monteurs	(10, 10, 15) x (5, 5, 5) min	90,1	- 0,1	2,4
Menuisiers	(10, 15, 30) x (5, 10, 10) min	88,4	0	2,6

Tableau A1-4 : Résultats des plans d'échantillonnage par tâches optimisés pour atteindre le critère de précision souhaitable, soit $IC95 \leq 2,8$ dB (A).

Ces plans correspondent aux efforts de mesure suivants :

- Fraiseurs : 400 min (ou 6 h 40 min) ;
- Monteurs : 175 min (2 h 55 min) ;
- Menuisiers : 500 min (8 h 20 min).

Plans optimisés : effet d'une incertitude sur la durée des tâches

Variation appliquée aux durées relatives des deux tâches les plus bruyantes = ± 25 %.

GEH	Plan	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$	IC95		
				Avec dt	Sans dt	Ecart
Fraiseurs	(10, 10, 30) x (5, 5, 10) min	85,9	- 0,1	2,9	2,7	+0,2
Monteurs	(10, 10, 15) x (5, 5, 5) min	90,1	- 0,1	2,8	2,4	+0,4
Menuisiers	(10, 15, 30) x (5, 10, 10) min	88,4	0	2,8	2,6	+0,2

Tableau A1-5 : Effet d'une variation sur la durée des tâches dans les résultats des plans d'échantillonnage optimisés par tâches (IC95 « avec dt » : quand la variation en durée a été appliquée ; IC95 « sans dt » : en l'absence de variation en durée, résultats du tableau A1-4)

Annexe 2 : Résultats détaillés des plans d'échantillonnage par métier

Les résultats numériques détaillés des plans d'échantillonnage indiquent :

- la désignation du plan : nombre des mesures x durée de chaque mesure ;
- IC95 : l'intervalle de confiance à 95 % du niveau de bruit estimé par échantillonnage, exprimé en dB(A) ;
- l'effort de mesure réalisé (produit du nombre de mesure par leur durée), comparé aux spécifications du projet de norme ISO ;
- la valeur moyenne du niveau de bruit résultant d'un plan d'échantillonnage. Il s'agit de la valeur moyenne (en énergie) de la distribution du niveau de bruit moyen de chaque échantillon (distribution obtenue par répétition 10000 fois du tirage aléatoire des échantillons) exprimée en dB(A) ;
- l'écart entre la valeur moyenne du niveau de bruit résultant d'un plan d'échantillonnage et le niveau de bruit moyen de référence $L_{Aeq,REF}$ exprimé en dB(A).

Plans d'échantillonnage comprenant 5 mesures de 2 h :

GEH	Plan	IC 95	Effort de mesure réalisé (spécifié ISO)	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$
Fraiseurs	5 x 2 h	3,0	10 h (10 h)	85,9	- 0,1
Extrudeurs	5 x 2 h	3,5	10 h (10 h)	90,4	0
Conducteurs	5 x 2 h	3,0	10 h (13 h)	89,5	- 0,1
Régleurs	5 x 2 h	1,8	10 h (7 h)	90,3	0

Tableau A2-1 : Résultats du plan d'échantillonnage par métier (5 x 2 h)

Plans (N x 2 h) permettant d'atteindre le critère de précision fixé a priori :

GEH	Plan	IC 95	Effort de mesure réalisé (spécifié ISO)	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$
Fraiseurs	7 x 2 h	2,5	14 h (10 h)	85,9	- 0,1
Extrudeurs	8 x 2 h	2,4	16 h (10 h)	90,4	0
Conducteurs	7 x 2 h	2,3	14 h (13 h)	89,5	- 0,1
Régleurs	5 x 2 h	1,8	10 h (7 h)	90,3	0

Tableau A2-2 : Plans d'échantillonnage par métier basés sur des mesures de 2 h et atteignant le critère de précision $IC95 \leq 2,5$ dB (A).

Plans d'échantillonnage basés sur des mesures de durée égale à 1 h

GEH	Plan	IC 95	Effort de mesure réalisé (spécifié ISO)	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$
Fraiseurs	12 x 1 h	2,6	12 h (10 h)	86,0	0
Extrudeurs	12 x 1 h	2,4	12 h (10 h)	90,3	- 0,1
Conducteurs	9 x 1 h	2,5	9 h (13 h)	89,5	- 0,1
Régleurs	5 x 1 h	2,6	5 h (7 h)	90,3	0

Tableau A2-3 : Résultats du plan d'échantillonnage par métier basés sur des mesures de 1 h de durée et atteignant le critère de précision $IC95 \leq 2,5$ dB (A).

Plans d'échantillonnage ne prenant pas en compte les tâches quand elles sont déterminantes

GEH	Plan	IC 95	Effort de mesure réalisé (spécifié ISO)	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$
Monteurs	7 x 2 h	8,1	14 h (13 h)	89,8	-0,4
Menuisiers	7 x 2 h	6,2	14 h (5 h)	88,1	-0,3
Monteurs	15 x 2 h	5,1	30 h (13 h)	90,1	- 0,1
Menuisiers	15 x 2 h	3,6	30 h (5 h)	88,4	0

Tableau A2-4 : Résultats de plans d'échantillonnage par métier appliqués à deux GEH dans lesquels les tâches déterminent fortement l'exposition au bruit

Plan d'échantillonnage « fictif » (30 mesures de durée 5 min)

GEH	Plan	IC 95	Effort de mesure, h	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$
Fraiseurs	30 x 5 min	5,6	2 h 30	90,3	- 0,2
Monteurs	30 x 5 min	12,2	2 h 30	89,0	-1,2
Menuisiers	30 x 5 min	7,4	2 h 30	88,1	-0,3
Extrudeurs	30 x 5 min	2,6	2 h 30	90,3	- 0,1
Conducteurs	30 x 5 min	2,4	2 h 30	89,5	- 0,1
Régleurs	30 x 5 min	2,8	2 h 30	90,2	- 0,1

Tableau A2-5 : Résultats de plans d'échantillonnage par métier de 30 mesures de 5 min.

Effet de la concentration des mesures durant le temps**Plans d'échantillonnage concentrés dans le temps (mesures de durée 2 h) :**

GEH	Plan	IC 95	Accroissement de IC95 dû à la concentration	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$
Fraiseurs	7 x 2 h, concentrées sur 20 h	2,6	+ 0,1	86,0	0
Extrudeurs	8 x 2 h, concentrées sur 24 h	2,7	+ 0,3	90,0	- 0,4
Conducteurs	7 x 2 h, concentrées sur 20 h	4,1	+ 1,8	89,8	0,2
Régleurs	5 x 2 h, concentrées sur 15 h	2,1	+ 0,3	90,1	- 0,2

Tableau A2-6 : Résultats de plans d'échantillonnage par métier (basés sur des mesures de durée 2 h) quand toutes les mesures sont concentrées dans un intervalle de temps limité à environ 20 h.

Plans d'échantillonnage concentrés dans le temps (mesures de durée 1 h) :

GEH	Plan	IC 95	Accroissement de IC95 dû à la concentration	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$
Fraiseurs	12 x 1 h, concentrées sur 20 h	2,9	+ 0, 3	86,0	0
Extrudeurs	12 x 1 h, concentrées sur 20 h	2,6	+ 0, 2	90,0	- 0,4
Conducteurs	9 x 1 h, concentrées sur 15 h	4,6	+ 2,1	89,6	0
Régleurs	5 x 1 h, concentrées sur 15 h	3,0	+ 0, 4	90,1	- 0,2

Tableau A2-7 : Résultats de plans d'échantillonnage par métier (basés sur des mesures de durée 1 h) quand toutes les mesures sont concentrées dans un intervalle de temps limité à environ 20 h.

Plans d'échantillonnage concentrés dans le temps (mesures de durée 5 min) :

GEH	Plan	IC 95	Accroissement de IC95 dû à la concentration	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$
Fraiseurs	30 x 5 min, concentrées sur 8 h	6,7	+ 1, 1	85,8	- 0,2
Extrudeurs	30 x 5 min, concentrées sur 8 h	6,2	+ 3,6	90,1	- 0,3
Conducteurs	30 x 5 min, concentrées sur 8 h	5,4	+ 3,0	89,4	- 0,2
Régleurs	30 x 5 min, concentrées sur 8 h	3,3	+ 0,5	90,1	- 0,2

Tableau A2-8 : Résultats de plans d'échantillonnage « fictifs » par métier (basés sur 30 mesures de 5 min) quand toutes les mesures sont concentrées dans un intervalle de temps limité à 8 h.

Annexe 3 : Résultats détaillés des plans d'échantillonnage par journées

Plans d'échantillonnage comprenant 3 journées de mesure

GEH	Plan	IC 95	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$
Fraiseurs	3 x 8 h	1,8	86,0	0
Monteurs	3 x 8 h	7,9	90,0	-0,2
Menuisiers	3 x 8 h	5,8	88,6	+0,2
Extrudeurs	3 x 8 h	4,3	90,6	+0,2
Conducteurs	3 x 8 h	3,8	89,8	+0,2
Régleurs	3 x 8 h	2,3	90,6	+0,3

Tableau A3-1 : Résultats des plans d'échantillonnage portant sur 3 journées.

Plans d'échantillonnage comprenant 5 journées de mesure

GEH	Plan	IC 95	Moyenne issue des échantillons	Ecart avec $L_{Aeq,REF}$
Fraiseurs	5 x 8 h	1,2	86,0	0
Monteurs	5 x 8 h	5,3	90,0	-0,2
Menuisiers	5 x 8 h	4,2	88,6	+0,2
Extrudeurs	5 x 8 h	2,8	90,6	+0,2
Conducteurs	5 x 8 h	2,8	89,8	+0,2
Régleurs	5 x 8 h	1,4	90,6	+0,3

Tableau A3-2 : Résultats des plans d'échantillonnage portant sur 5 journées.