



HAL
open science

Estimation de l'exposition au bruit de six groupes de travailleurs.

L. Thiery

► **To cite this version:**

L. Thiery. Estimation de l'exposition au bruit de six groupes de travailleurs.. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 259, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 2006, 102 p., ill. hal-01420157

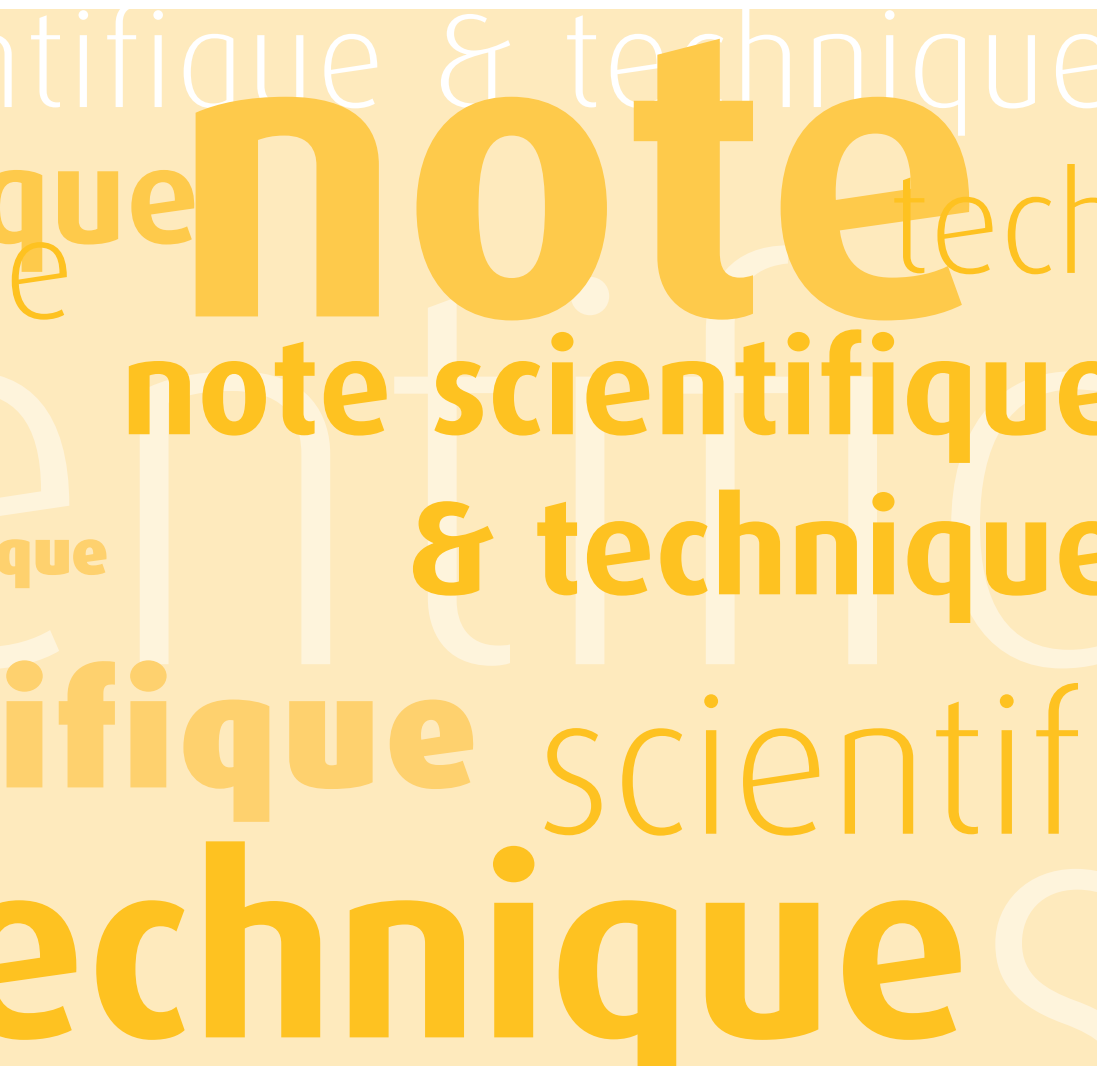
HAL Id: hal-01420157

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01420157>

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.



Estimation de l'exposition au bruit de six groupes de travailleurs

Estimation de l'exposition au bruit de six groupes de travailleurs

Léon Thiéry

NS 259
juin 2006

Sommaire

page

Résumé

Partie A

Problématique de l'estimation de l'exposition au bruit professionnel

1.	Présentation générale	5
2.	Obligation de pratiquer un échantillonnage du bruit	6
3.	Choix de périodes de références	7
4.	Regrouper les travailleurs en groupes d'exposition homogène (GEH)	7
5.	Moyens disponibles pour caractériser les variations temporelles du bruit	8
6.	Hypothèses	9
7.	Sur les estimateurs du bruit moyen	10
8.	Incertitude d'échantillonnage et incertitude de mesure	12
9.	Niveau de bruit élargi	17
10.	Bilan	17

Partie A

Annexes

18 à 26

Partie B

Constitution d'une base de données d'exposition au bruit professionnel – Méthodes

1.	Rappel de la problématique	27
2.	Population étudiée	28
3.	Mesurages d'exposition au bruit	33

Partie C

Estimation de l'exposition au bruit de 6 groupes de travailleurs

1.	Caractéristiques des données du GEH "Fraiseurs"	36
2.	Caractéristiques des données du GEH "Monteurs"	48
3.	Caractéristiques des données du GEH "Menuisiers"	61
4.	Caractéristiques des données du GEH "Extrudeurs"	75
5.	Caractéristiques des données du GEH "Conducteurs"	82
6.	Caractéristiques du GEH "Régleurs"	89
7.	Comparaison entre estimateurs du bruit moyen	96
8.	Niveau de bruit élargi final, par GEH	100
9.	Conclusion	102

Résumé

Cette note présente les résultats d'une étude concernant l'estimation de l'exposition au bruit en milieu professionnel. Elle comprend trois parties.

La première rappelle la problématique de l'estimation des niveaux de bruit auxquels les travailleurs sont exposés. Cette estimation est effectuée dans le cadre réglementaire de la préservation de l'audition des travailleurs contre les effets nocifs du bruit. Il s'agit donc d'évaluer un risque auquel les travailleurs sont exposés durant des années à partir de mesures dont la durée est limitée à quelques heures, voire quelques jours. Dans ce contexte, des mesures effectuées conformément aux pratiques métrologiques et à la norme NF S 31-084 laissent sans réponses différentes questions, relatives au dimensionnement des échantillons et à leur représentativité, à la validité des hypothèses et des méthodes d'estimation couramment appliquées pour analyser les résultats de mesure. Pour répondre à ces questions, il faut disposer de mesures effectuées sur des durées notablement plus longues que celles de la pratique métrologique habituelle, ce qui fut l'objectif de ce travail.

La seconde partie de cette note présente donc la méthode qui a été appliquée pour constituer un ensemble de données d'exposition au bruit professionnel sur une durée de 80 h, qualifiée ici de moyen terme. La population étudiée comprend 6 groupes de travailleurs, exposés au bruit dans des circonstances très différentes et dont les métiers sont : fraiseurs, monteurs, menuisiers, extrudeurs, conducteurs, réglers. Les mesures d'exposition au bruit ont été effectuées en continu, et accompagnées d'une analyse du travail des opérateurs. Les techniques d'analyse qui ont été appliquées à ces données sont décrites.

La troisième partie de cette note présente les résultats des mesures effectuées dans chaque groupe durant 80 h environ. Les résultats sont analysés selon les différentes méthodes disponibles, puis discutés en vue de fournir, pour chaque groupe, la meilleure estimation du niveau de bruit à moyen terme avec son incertitude d'estimation, qui sera qualifiée de valeur de référence.

En prolongement de l'étude présentée ici, ses résultats seront utilisés comme valeurs de référence dans une autre étude. Son objet sera d'appliquer à la base de données de référence des schémas d'échantillonnage semblables à ceux des pratiques métrologiques habituelles en vue de les comparer, d'étudier leur précision et d'en déduire des recommandations quant à l'échantillonnage du bruit en milieu professionnel.

ESTIMATION DE L'EXPOSITION AU BRUIT DE 6 GROUPES DE TRAVAILLEURS

L'estimation de l'exposition au bruit professionnel est effectuée à partir d'échantillons nécessairement limités, ce qui induit une incertitude liée à l'échantillonnage. Pour évaluer cette incertitude d'échantillonnage, une étude ayant pour objet de collecter des données d'exposition au bruit professionnel sur une durée nettement supérieure à la pratique métrologique habituelle a été réalisée. Ces données sont utilisées comme référence pour étudier les méthodes d'estimation de l'exposition au bruit et comparer les incertitudes liées aux différentes méthodes applicables en pratique.

Les résultats de cette étude sont présentés en plusieurs parties :

- **partie A** : rappel de la problématique de l'estimation de l'exposition au bruit en milieu professionnel (contraintes pratiques, questions méthodologiques)
- **partie B** : méthodes appliquées pour étudier l'exposition au bruit (population étudiée, méthodes de mesures)
- **partie C** : caractéristiques statistiques des données d'exposition collectées (analyse de 6 groupes de travailleurs ; synthèse).

PARTIE A :
PROBLEMATIQUE DE
L'ESTIMATION DE
L'EXPOSITION AU BRUIT PROFESSIONNEL

1. PRESENTATION GENERALE

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 durée nécessairement limitée 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 référence », de durée suffisante pour englober toutes les variations d'exposition au bruit susceptibles d'intervenir ;
- la présence, dans l'organisation du travail, de facteurs qui entraînent des modifications d'exposition au bruit de types déterministes (changements de production, de machines) et de type aléatoires (effet opérateur, bruit subi résultant de l'activité d'autrui) ;
- les limitations en nombre et en répartition des échantillons ;
- les hypothèses appliquées lors de l'analyse des résultats de mesures,
- les estimateurs utilisés pour fournir un niveau de bruit moyen et une incertitude.

Dans la pratique métrologique, des choix sont opérés, en se fondant notamment sur la normalisation. Toutefois, les normes évoluent et ne peuvent pas répondre à toutes les questions évoquées. En France, le mesurage se fonde sur la norme NF S 31-084, qui fut révisée en 2002 pour intégrer notamment la constitution de Groupes d'Exposition Homogènes (GEH) parmi la population des travailleurs exposés, moyen de contrôle des différences d'exposition liées à l'organisation du travail. Sur cet aspect, un large consensus semble acquis, y compris au plan de la normalisation internationale : le projet de norme ISO/CD 9612 dans sa version de 2005 s'y réfère largement. Par contre, sur le dimensionnement des échantillons et les estimateurs, diverses propositions existent mais aucun consensus n'est apparu au plan international.

Pour chacune des questions évoquées ci-dessus, établissons un bref état du sujet et des moyens disponibles pour l'étudier.

2. OBLIGATION DE PRATIQUER UN ECHANTILLONNAGE DU BRUIT

Compte tenu du nombre de travailleurs exposés au bruit et de la durée de l'exposition, tout mesurage d'exposition au bruit s'appuie sur un échantillonnage, qui s'applique aux travailleurs et au temps de travail. Dès lors, différentes questions se posent :

- comment définir le nombre et la durée des échantillons, comment les répartir ?
- comment gérer le compromis entre l'accroissement du nombre d'échantillon dont dépend la précision des mesures et les contraintes de réalisation et de coût des mesures ?

La figure 1 illustre la répartition d'un échantillon, parmi un espace de cas possibles qui englobe 10 journées de travail et 10 opérateurs supposés exposés au bruit dans des conditions semblables. Dans cet espace, la position des mesures a été représentée par des rectangles et la durée de chaque mesure est de une journée. L'ensemble des mesures s'élève à 10 journées. La figure 1 montre la répartition des 10 journées de mesure parmi tous les cas possibles.

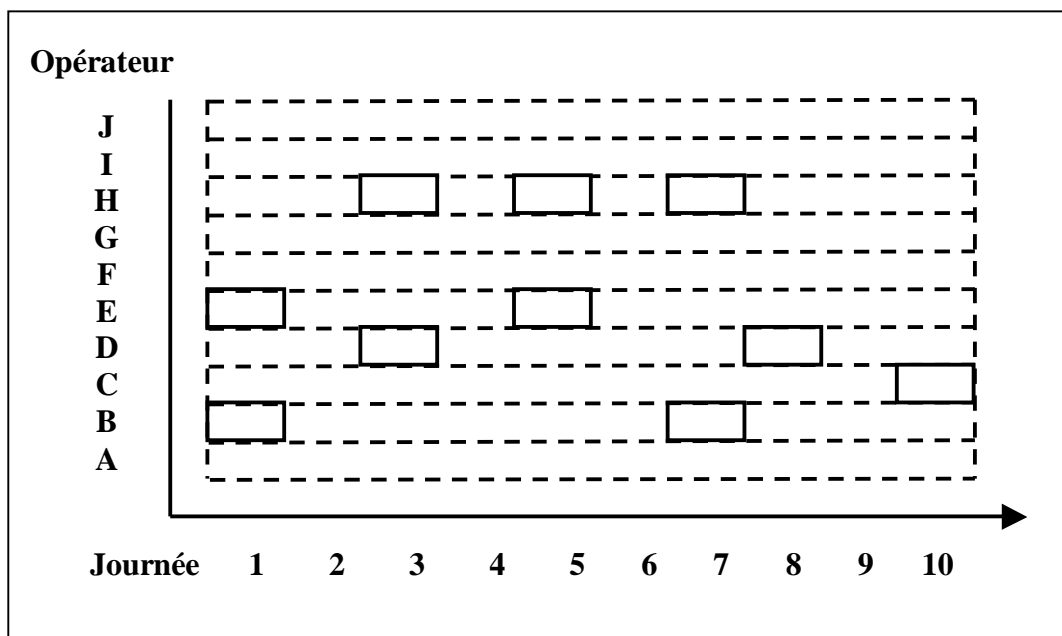


Figure 1 : Illustration de la répartition d'un échantillon qui comprend 10 journées de mesures (représentées par les rectangles), parmi 10 journées de travail d'un groupe de 10 travailleurs exposés au bruit dans des circonstances semblables.

Plusieurs questions surgissent de cet exemple :

- pourquoi avoir choisi un intervalle de temps de travail de 10 jours ?
- comment garantir la validité de l'échantillonnage opéré parmi les opérateurs ?

Les réponses se trouvent dans la définition d'une période de référence et la constitution de groupes d'exposition homogène, qui sont présentées ci-après.

3. CHOIX DE PERIODES DE REFERENCES

Pour contrôler la représentativité dans le temps d'un échantillon, il faut définir en premier lieu une « période de référence ». Cette période de référence est une période de travail de durée suffisante pour englober toutes les variations d'exposition au bruit susceptibles d'intervenir. Que signifie une durée « suffisante » ? On ne peut pas le savoir par la norme NF S 31-084, car cette norme ne fournit qu'une limite inférieure impérative : « la durée d'une période de référence ne peut en aucun cas être inférieure à une journée de travail ».

Le choix d'une période de référence, de durée comprise entre une journée de travail et une fraction d'une carrière professionnelle, sera donc effectué de façon arbitraire dans l'étude présentée ici. On distinguera trois périodes de référence, en appliquant la terminologie suivante aux estimations qui en découlent :

- *Estimation de l'exposition quotidienne* : l'estimation est limitée à une journée, considérée comme période de référence. Quand le contenu et les circonstances du travail se reproduisent à l'identique d'un jour à l'autre, on peut valider comme période de référence une journée.
- *Estimation de l'exposition au bruit à moyen terme* : l'estimation s'applique à une période de référence qui cumule environ 80 heures. Quand le contenu et les circonstances du travail sont extrêmement variables d'un jour à l'autre, on a choisi une période de référence de 80 h en se fondant sur une donnée bibliographique (Shackleton) : l'exposition au bruit d'un agent de maintenance dans une fonderie a été évalué par 23 mesures de 4 h (soit plus de 80 h de mesure) ; bien que les 23 résultats soient très dispersés (ils varient de 80 à 99 dB(A)), une distribution conforme à celle d'une loi normale a été observée, ce qui permet de qualifier de « référence » la période de mesure utilisée.
- *Estimation de l'exposition à long terme* : quand le résultat de l'exposition à moyen terme pourra être extrapolé, au-delà de 80 h, il sera qualifié d'estimation « à long terme ». Cette durée, volontairement non définie, qualifie un intervalle de temps durant lequel les circonstances de l'exposition au bruit restent comparables à celles des périodes étudiées. « Long terme » sera donc compris ici comme plusieurs mois, une ou plusieurs années, ou une fraction d'une carrière professionnelle.

4. REGROUPER LES TRAVAILLEURS EN GROUPES D'EXPOSITION HOMOGENE (GEH)

En milieu de travail, la première variable à contrôler pour réduire les variations de bruit entre travailleurs est fréquemment leur métier. La norme de mesure préconise une méthode : le regroupement, au sein de Groupes d'Exposition Homogène (GEH), de travailleurs de même métier et exposés au bruit dans des circonstances supposées semblables. La définition de GEH s'appuie sur l'analyse du travail et des circonstances de l'exposition au bruit.

Toutefois, compte tenu des fluctuations dans le temps de l'organisation et du contenu du travail, il faut lier la définition de GEH à un intervalle de temps de travail spécifié. En d'autres termes, on considérera qu'un GEH reste valide tant que l'organisation du travail, la production ou les moyens de production employés ne subiront pas de modification notable dans le temps. La durée de validité d'un GEH peut s'étendre, par exemple, à quelques

semaines ou à quelques mois, éventuellement une ou quelques années, selon l'organisation et le contenu du travail du groupe.

Dans un GEH donné, l'exposition au bruit sera évaluée par un mesurage d'environ 80 heures, réparties sur la population du GEH. Il s'agit donc d'une estimation de l'exposition au bruit à moyen terme. Pour savoir si le résultat de cette estimation pourra être extrapolé à long terme, on s'appuiera sur un outil qui fut déjà utilisé dans des travaux antérieurs, le variogramme. Rappelons en quoi consiste cet outil.

5. MOYENS DISPONIBLES POUR CARACTERISER LES VARIATIONS TEMPORELLES DU BRUIT

Les travaux effectués antérieurement sur des séries chronologiques de bruit auquel des travailleurs sont exposés (Wackernagel et al, 1998) ont fournis plusieurs méthodes, qui portent sur les aspects suivants :

- la caractérisation des variations en temps des séries de niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$, via le variogramme ;
- l'influence de la durée d'intégration dT dans la variabilité de séries de niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$.

Ces travaux font l'objet d'un bref rappel méthodologique.

5.1. Variogramme

Ce mode de représentation permet de caractériser les variations en temps de séries chronologiques. On l'appliquera pour analyser les séries de bruit de moyen terme (mesurées durant environ 80 h).

On s'intéressera en premier lieu au comportement du variogramme à *longue distance* :

A *longue distance* de son origine, le variogramme converge vers la variance expérimentale S_L^2 des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ mesurés. Si le comportement du variogramme est stable, on en déduit les conclusions suivantes :

- la durée de mesurage est suffisante pour bien quantifier la structure de variabilité en temps des données,
- les données sont homogènes,
- le résultat de l'estimation à moyen terme peut être extrapolé au-delà de la fenêtre d'observation : on valide donc l'extrapolation à long terme du résultat.

Si le variogramme n'est pas convergent dans la fenêtre temporelle étudiée, les conclusions précédentes sont invalidées (cf Wackernagel et al, 1998, p 7-10). Soit l'exposition a été quantifiée sur une fenêtre temporelle trop courte, soit un facteur crée une hétérogénéité marquée (ou une non stationnarité) dans les données collectées. Dans tous les cas on interdit l'extrapolation, au-delà de la fenêtre d'observation, d'un résultat jugé trop incertain.

Examinons en second lieu le comportement du variogramme *près de son origine* :

A court terme, près de son origine, le variogramme permet de quantifier la distance en temps au-delà de laquelle les données ne sont plus auto corrélées. Il permet de valider l'hypothèse d'indépendance d'échantillons successifs, dont on verra ci-après l'intérêt.

5.2 Influence de la durée d'intégration du bruit

Depuis que se sont généralisés les exposimètres, l'exposition au bruit durant T est fréquemment évaluée à l'aide d'une série chronologique de N niveaux de bruit acoustiques continus équivalents mesurés durant des intervalles courts dT, avec $T = N \cdot dT$. Or l'allongement de l'intervalle dT réduit la variabilité du bruit mesuré durant T et diminue le nombre N des valeurs mesurées. Dans la pratique métrologique, ceci entraîne plusieurs questions :

- comment choisir la durée d'intégration élémentaire dT appliquée pour mesurer et analyser des séries chronologiques de bruit ?
- en quoi les choix de dT et de N influencent-ils la précision du résultat des mesures durant T ?
- peut-on recomposer une série chronologique en modifiant le choix initial de dT ?

Pour éclairer ces questions, l'étude présentée ici a été effectuée en fixant le paramètre dT selon ce qui suit :

- pour l'acquisition des données et la validation préalable des mesures effectuées : dT a été fixé à une seconde.
- pour analyser les données et comparer les résultats selon dT : plusieurs analyses seront effectuées, après recombinaison des séries chronologiques de niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$, à l'aide de 5 durées d'intégration dT fixées à 1 min, 5 min, 10 min, 30 min et 1 h.

6. HYPOTHESES

L'interprétation d'un résultat de mesure d'exposition au bruit se fonde généralement sur plusieurs hypothèses. Après un rappel de la nature des hypothèses et de leur impact dans la métrologie, on présente les moyens qui seront pris pour étudier leur validité respective dans les données expérimentales.

6.1 Homogénéité de l'exposition du GEH

Tout mesurage effectué dans un Groupe d'Exposition Homogène (GEH) suppose que l'exposition y est homogène, dans la période de référence à laquelle le mesurage s'applique. Quand l'hypothèse est validée, l'extrapolation du résultat à tous les membres du groupe est fiable ; sinon, le résultat peut être erroné pour certains membres du groupe.

Pour valider cette hypothèse d'homogénéité, on examinera les variogrammes, à longue distance de leur origine, selon ce qui a été rappelé ci-dessus.

6.2 Indépendance des échantillons

Dans des séries chronologiques de niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$, les valeurs mesurées présentent une auto corrélation qui s'explique par l'alternance des cycles de production, la répétitivité des tâches. Quand on veut caractériser la variabilité du processus d'exposition à partir d'échantillons, il est nécessaire que les échantillons soient indépendants, non corrélés. En effet, quand cette hypothèse n'est pas vérifiée, les échantillons ne portent qu'une partie de la variabilité totale du processus étudié. En d'autres termes, de tels échantillons sont biaisés et fournissent une sous estimation de la variabilité du niveau de bruit.

Pour discuter l'hypothèse d'indépendance des échantillons, on quantifiera la distance d'auto corrélation des données, compte tenu du paramètre dT utilisé pour l'analyse, en examinant les variogrammes près de leur origine.

6.3 Normalité de la distribution des niveaux de bruit

L'étude des caractéristiques statistiques de la distribution des niveaux de bruit sera effectuée en appliquant l'hypothèse la plus couramment admise pour l'exposition professionnelle au bruit : celle de la normalité des distributions des niveaux de bruit exprimés en décibels. Cette hypothèse est utilisée pour construire différents estimateurs statistiques, portant sur le niveau de bruit moyen et sur son intervalle de confiance, selon ce qui est rappelé ci-après. Quand les données mesurées s'éloignent de l'hypothèse de normalité, des biais d'estimation sont introduits ; dans ce cas, on s'attachera à comparer les différents estimateurs pour choisir celui qui paraîtra le moins biaisé.

Pour savoir si l'hypothèse de normalité des distributions est acceptable, on appliquera un test statistique (test de Lilliefors, disponible sous Matlab®) au seuil de confiance de 5 %. De plus, on superposera à la distribution des données expérimentales celle d'une loi normale de même moyenne et de même écart type, pour permettre d'apprécier graphiquement leurs écarts.

7. SUR LES ESTIMATEURS DU BRUIT MOYEN

En acoustique, quand on dispose d'un échantillon composé de N valeurs de niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$, il est habituel d'exprimer le niveau moyen du bruit de cet échantillon par le niveau $L_{Aeq,T}$ global, donné par la *moyenne en énergie* des N valeurs mesurées, selon la relation (1) indiquée ci-après.

Quand les niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ sont distribués normalement, il a été montré (Grzebyk, 2003 ; voir aussi annexe 1 de cette partie) qu'on dispose d'un autre estimateur du niveau moyen du bruit.

Désigné par estimateur de la *moyenne sous hypothèse de normalité*, et noté Lhn, il est calculé à l'aide de la moyenne arithmétique des niveaux de bruit mesurés en dB(A) et de leur variance S_L^2 , selon la relation (2) indiquée ci-après. De plus, cet estimateur a de très bonnes propriétés statistiques (sa variance est minimum et il est non biaisé) et a permis de construire un intervalle de confiance non biaisé du bruit moyen, $U_1(Lhn)$; ceci fut pris en compte dans la norme NF S 31-084 (2002) mais est resté objet de discussion lors de la révision de la norme ISO 9612.

Dans la pratique métrologique, les avantages et inconvénients des deux estimateurs peuvent être résumés ainsi :

- la moyenne en énergie n'impose aucune hypothèse mais ne s'applique qu'à l'échantillon à partir duquel elle est calculée ;
- la moyenne sous hypothèse de normalité peut être extrapolée au-delà de l'échantillon, mais au prix de l'hypothèse de normalité.

Pour valider le choix d'un estimateur du niveau de bruit moyen, on voit donc qu'on ne peut pas se limiter à un échantillon. Par contre cette difficulté peut être contournée si on dispose de mesures effectuées durant la totalité d'une période de référence. C'est précisément ce type de mesurage (dit systématique) qui sera mis en œuvre dans l'étude présentée ici, durant une période de référence de moyen terme dans laquelle les 2 estimateurs du bruit moyen seront appliqués et comparés.

Pour faciliter l'interprétation des écarts entre moyenne en énergie et moyenne sous hypothèse de normalité, dans les données expérimentales, une simulation numérique a été réalisée quand l'hypothèse de normalité de la distribution est rejetée. Cette simulation porte sur des distributions qui présentent la même dissymétrie, orientée soit vers les forts niveaux de bruit, soit vers les faibles ; présentée en annexe 2 de cette partie, cette simulation incite à conclure que l'estimateur du bruit moyen basé sur la moyenne en énergie serait préférable. Ce résultat sera confronté à celui de l'analyse des données expérimentales.

Rappel des notations et des définitions relatives aux estimations du bruit moyen

a) Séries mesurées initiales

$L_{Aeq,dT}(i)$:	$i^{\text{ème}}$ valeur du niveau de bruit élémentaire, en dB(A), mesuré durant dT
dT	:	Durée d'intégration (ou support) du bruit mesuré
N	:	Nombre de valeurs mesurées
S_L	:	Ecart type des N valeurs $L_{Aeq,dT}$ en dB(A) [calculé par (4)]

b) Moyenne en énergie $L_{Aeq,T}$: niveau de bruit donné par (1),

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \text{Log} \sum_{i=1}^{i=N} (dT / T) \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,dT}(i)} \quad (1)$$

où : $T = N \cdot dT$

c) Moyenne sous hypothèse normale, L_{hn} : niveau de bruit donné par (2),

$$L_{hn} = L_{ar} + 0,115 \cdot S_L^2 \quad (2)$$

où : L_{ar} et S_L sont respectivement la moyenne arithmétique et l'écart type des valeurs $L_{Aeq,dT}(i)$, exprimés en dB(A), donnés par :

$$L_{ar} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{i=N} L_{Aeq,dT}(i) \quad (3)$$

$$S_L^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{i=N} (L_{Aeq,dT}(i) - L_{ar})^2 \quad (4)$$

d) Niveau de bruit global, $L_{Aeq,T}$ recomposé à partir des niveaux et durées par tâches

Moyenne en énergie, pondérée par la durée relative, donnée par (5) :

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \text{Log} \sum_{i=1}^{i=p} (T_i / T) \cdot 10^{0,1 \cdot L_{m,T_i}} \quad (5)$$

où : L_{m,T_i} = niveau de bruit moyen de la tâche i [la moyenne de la tâche i sera calculée en énergie et sous hypothèse normale, selon les relations (1) puis (2)]

T_i = durée de la tâche i

$$T = \sum_{i=1}^{i=p} T_i = \text{durée totale des } p \text{ tâches}$$

8. INCERTITUDE D'ECHANTILLONNAGE ET INCERTITUDE DE MESURE

Le résultat des mesures d'exposition au bruit est lié à une incertitude globale, qui comprend deux termes : l'incertitude d'échantillonnage et l'incertitude de mesure. Les questions méthodologiques liées à l'estimation de ces termes d'incertitude sont présentées.

8.1. Les évaluations de l'incertitude d'échantillonnage U_1

Quand un niveau de bruit moyen est estimé à partir d'un échantillon comprenant N valeurs mesurées $L_{Aeq,dT}(i)$, ayant un écart type S_L , plusieurs expressions analytiques de l'incertitude d'échantillonnage U_1 sont disponibles. Les différentes expressions de U_1 ont toutes des avantages et des inconvénients, liés à leur complexité et à l'étendue du domaine dans lequel on peut accepter de les considérer comme non biaisées statistiquement, ce qui explique l'absence actuelle de consensus international en la matière.

On présente ci-après 3 méthodes d'évaluation de U_1 , avec leurs avantages et inconvénients. Elles se distinguent par l'estimateur du bruit moyen auquel l'expression analytique de l'incertitude s'applique. Les 3 estimateurs du bruit moyen ont été définis précédemment (voir les définitions de L_{ar} , L_{hn} , $L_{Aeq,T}$: paragraphe 7, équations (3), (2) et (1)).

A) Intervalle de confiance de L_{ar}

La première méthode d'évaluation de U_1 s'applique au niveau de bruit moyen estimé par la moyenne arithmétique L_{ar} (équation (3)) des niveaux de bruit. Son expression analytique $U_1(L_{ar})$ est la suivante :

$$U_1(L_{ar}) = t \cdot S_L / \sqrt{N} \quad (6)$$

où t la valeur d'une variable de Student d'ordre $N-1$ (au niveau de confiance 95 % dès que $N > 50$, on a $t = 1,96 \cong 2$).

Cette expression est fournie ici pour rappel de l'estimation classique de l'intervalle de confiance IC(Student) de la moyenne arithmétique d'une distribution conforme à une loi normale.

Dans le problème d'estimation du niveau moyen d'exposition au bruit, ce n'est pas la moyenne arithmétique qui nous intéresse, mais la moyenne en énergie.

Or la moyenne en énergie (indiquée par la relation (1)) est toujours supérieure à la moyenne arithmétique. Les deux moyennes tendent à se confondre dans un seul cas : quand les niveaux de bruit sont très peu dispersés. Ceci peut s'expliquer par la relation (2) rappelée ci-après, dont on a montré (annexe 1 de cette partie) qu'elle fournit une estimation exacte du niveau moyen de bruit en énergie quand la distribution des niveaux de bruit est conforme à une loi normale :

$$L_{hn} = L_{ar} + 0,115 \cdot S_L^2 \quad (2)$$

B) Intervalle de confiance de L_{hn}

La seconde méthode d'évaluation de U_1 s'applique au niveau de bruit moyen estimé par L_{hn} . L'intervalle de confiance $U_1(L_{hn})$ dépend de la moyenne de la distribution (L_{ar}) et de sa dispersion (indiquée par sa variance S_L^2). Il n'y a donc pas d'expression analytique simple de $U_1(L_{hn})$.

Une méthode de calcul a été proposée récemment (Grzebyk, 2003). Elle résulte de la transposition à l'acoustique de travaux statistiques fournissant un intervalle de confiance $U_1(L_{hn})$ (statistiquement non biaisé et de variance minimum) à toute variable qui est une combinaison linéaire de sa moyenne arithmétique et de sa variance (Grzebyk, 2003), ce qui est le cas avec l'équation (2). Cette méthode a été normalisée (NF S 31-084, 2002).

L'estimateur $U_1(L_{hn})$ offre l'intérêt d'être statistiquement non biaisé quand l'hypothèse de normalité des niveaux de bruit (exprimés en dB) est validée. Ainsi, on a pu comparer cette estimation avec la précédente, afin de quantifier le biais statistique qui découlerait de l'utilisation de l'intervalle de confiance de Student ($U_1(L_{ar})$ défini par (6)). Il a été montré (Grzebyk, 2003) qu'une sous estimation excédant 8 dB(A) était possible quand le nombre de mesures N est inférieur à 10 et que l'écart type S_L des valeurs $L_{Aeq,dT}$ excède 5 dB(A), conditions qui peuvent être réunies dans la pratique métrologique sur site.

En pratique, le calcul de $U_1(L_{hn})$ sera effectué en utilisant une formule d'interpolation, dont la précision est meilleure que 0,1 dB(A) sur tout le domaine qui sera étudié ci-après. Cette formule d'interpolation (disponible dans la norme NF S 31-084) a été rappelée en annexe 3 de cette partie. En outre cette annexe présente une comparaison graphique des valeurs de $U_1(L_{hn})$ et de $U_1(L_{ar})$, quand S_L vaut 3 ou 5 dB(A) et que N varie de 5 à 50 valeurs.

L'inconvénient de cet estimateur est lié à l'hypothèse de normalité de la distribution des niveaux de bruit. Quand cette hypothèse n'est pas validée, on peut toujours calculer $U_1(L_{hn})$ car l'estimation ne demande que deux valeurs : le nombre N d'échantillon, leur écart type S_L . Par contre, la relation (2) qui est à la base du calcul, n'est plus exactement égale au niveau du

bruit moyen en énergie, $L_{Aeq,T}$, ce qui peut donc entraîner l'apparition d'un biais. De plus, un autre inconvénient existe : l'équation (2) n'est pas connue actuellement dans le domaine de l'acoustique, alors qu'elle l'est dans le domaine de la métrologie de l'exposition aux substances chimiques qui se réfère aux distributions log-normales.

C) Intervalle de confiance de $L_{Aeq,T}$

La troisième méthode d'évaluation de U_1 s'applique au niveau de bruit moyen estimé par $L_{Aeq,T}$ et la relation (1). Un intervalle de confiance $U_1(L_{Aeq,T})$ peut être calculé en appliquant à cette relation les recommandations du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM). Actuellement un groupe de travail ISO élabore une proposition. Elle n'est pas finalisée quand ce texte est rédigé, car cette approche est récente et reste objet de discussion au sein du groupe ISO.

L'intérêt de cette approche est de fournir une expression analytique de l'incertitude $U_1(L_{Aeq,T})$ à partir des dérivées partielles de l'équation (1), relativement simple quand on se limite aux dérivées du premier ordre.

Les difficultés surgissent quand on prend en compte la non linéarité de l'équation (1), car dans ce cas le GUM préconise d'utiliser les dérivées partielles d'ordre supérieur. Mais le groupe ISO a proposé une expression de $U_1(L_{Aeq,T})$ limitée aux termes d'ordre 1, en prenant soin d'ajouter que cette simplification était acceptable si $S_L < 2$ dB(A), ce qui réduit fortement le domaine d'utilisation d'un tel intervalle de confiance.

D) Bilan

Dans l'étude présente, l'estimation de l'intervalle de confiance lié l'incertitude d'échantillonnage du bruit sera effectuée exclusivement avec l'expression $U_1(L_{hn})$. Les raisons expliquant ce choix sont les suivantes :

- Le domaine de validité de cet estimateur n'est pas limité par l'écart type S_L des distributions de valeurs mesurées, contrairement aux deux autres estimateurs indiqués ici.
- Cet estimateur est sans biais quand la distribution est conforme à la loi normale et l'hypothèse de normalité des distributions des niveaux de bruit est celle qui est la plus couramment admise par les métrologistes.
- Quand l'hypothèse de normalité n'est pas vérifiée, on peut supposer que cet estimateur de l'intervalle de confiance garde de bonnes propriétés, mais ceci reste à confirmer¹.

¹ Cet état de la problématique de l'estimation de l'incertitude d'échantillonnage du bruit montre le besoin d'études spécifiques, ayant pour objet de comparer l'estimateur $U_1(L_{hn})$ avec celui qui sera proposé *in fine* par le groupe de travail ISO. Alors que les estimations de l'intervalle de confiance U_1 citées ici s'appuient sur des formulations analytiques, plus ou moins complexes et plus ou moins valides selon le type de distribution et la variance S_L^2 , on peut signaler l'intérêt d'une autre approche, qui évite toute formulation analytique : par des simulations numériques répétées de tirages d'échantillons dans une distribution prédéfinie (« simulations de Monte Carlo »), on peut obtenir l'intervalle de confiance souhaité et utiliser cette valeur comme référence pour valider l'usage d'expressions analytiques plus ou moins complexes, faciles à utiliser en pratique, d'autant plus que leur domaine de validité peut être défini simultanément.

Lors de l'analyse des séries de bruit, on appliquera systématiquement un test de normalité des distributions. En cas de rejet de l'hypothèse de normalité, le calcul de $U_1(L_{hn})$ sera effectué (il ne demande que 2 paramètres : N et S_L), mais ce rejet signalera une estimation moins fiable que lorsque l'hypothèse est validée.

On notera *in fine* que les difficultés liées au choix de l'estimateur de U_1 doivent être relativisées : un autre terme U_2 intervient dans l'incertitude globale, ce qui relativise l'impact d'une estimation de U_1 qui serait imprécise ou discutable. Cette remarque sera précisée en 8.4.

8.2. Effet de la durée d'intégration du bruit

Il a déjà été signalé (cf. 5.2) que l'acquisition des données a été effectuée par mesurage en continu avec une durée d'intégration élémentaire de 1 s, et que l'analyse portera sur les séries recomposées avec 5 durées d'intégration dT , fixées à 1 min, 5 min, 10 min, 30 min et 1 h. Avant d'évoquer cet effet dans l'estimation de U_1 , signalons déjà ce qu'il en est dans les distributions des niveaux de bruit.

Quand la durée d'intégration du bruit est accrue, il est clair que ceci entraîne une réduction de la variabilité des données qui modifie l'allure des distributions, ce qui sera confirmé dans la suite de cette étude. Les résultats de cette étude n'étant pas présentés avec la durée d'intégration élémentaire initiale $dT = 1$ s, mais seulement pour $dT = 1$ min ou plus, ceci entraîne une question : qu'en est-il du test de normalité des distributions quand $dT = 1$ s et quand $dT = 1$ min ? La réponse est la suivante : pour tous les groupes dont l'étude sera présentée ci-après, l'hypothèse de normalité a été rejetée quand les séries sont analysées avec la durée d'intégration élémentaire initiale $dT = 1$ s, et on verra que l'hypothèse est rejetée également lorsque $dT = 1$ min. Quand dT est accru au-delà de 1 min, les résultats montreront à partir de quelle valeur de dT l'hypothèse de normalité devient acceptable.

L'incertitude d'échantillonnage U_1 du bruit dans un GEH dépendant de la variabilité des données mesurées, la quantification de U_1 impose de préciser la durée d'intégration employée pour analyser les échantillons. Dans l'estimation de U_1 la durée d'intégration est un paramètre qui sera spécifié à l'aide de la terminologie suivante :

A) On s'intéressera en premier lieu au *résultat global* de chaque série, fourni par une mesure en continu durant environ 5 h. Dans ce cas, la durée d'intégration est d'environ 5 h et sera notée T . On verra que pour chaque GEH, on disposera d'environ 15 résultats de ce type. L'analyse statistique de ces 15 résultats permettra d'estimer l'incertitude U_1 résultant de l'échantillonnage réalisé au sein du GEH durant une période de référence spécifiée. Cet échantillon englobe la variabilité entre opérateurs et entre journées de travail (selon l'illustration de la figure 1). Ce terme d'incertitude constitue une référence pour le GEH et sera noté $U_1(\text{réf})$.

B) On s'intéressera ensuite aux *séries chronologiques recomposées* avec les durées d'intégration dT spécifiées. Dans ce cas, l'analyse statistique sera appliquée à chaque niveau de bruit élémentaire mesuré durant dT , après cumul des séries chronologiques mesurées par GEH. Ce cumul fournissant une durée globale de mesure qui est proche de $T = 80$ h, on disposera donc de 160 valeurs à analyser quand dT sera fixé à 30 min. Pour une durée totale de mesure T fixée, l'analyse portera donc sur un nombre N de valeurs $L_{Aeq,dT}$ tel que $T = N \cdot dT$. Une incertitude d'échantillonnage sera évaluée à partir de ces données. Mais pour traduire que les données dépendent de dT , cette incertitude d'échantillonnage sera notée $U_1(dT)$.

On notera que $U_1(dT)$ a un sens différent de celui de $U_1(\text{réf})$: il traduit la variabilité présente dans chaque période de mesure quand les données de bruit sont recomposées au support dT en plus de celle qui existe entre opérateurs et entre journées de travail.

Dans la discussion des résultats de chaque GEH, on examinera en quoi le paramètre dT modifie l'estimation de l'incertitude d'échantillonnage.

8.3. Evaluation de l'incertitude de mesure U_2

L'incertitude de mesure comprend généralement deux termes :

- l'incertitude liée aux conditions dans lesquelles les mesures sont effectuées, qui dépend notamment de la position du microphone par rapport au travailleur contrôlé ;
- l'incertitude liée à l'appareillage de mesure.

Dans l'étude présente, les mesures ont été effectuées à l'aide d'exposimètres, dans des conditions bien contrôlées et validées in fine pour exclure les artefacts de mesure éventuels. Dans ces conditions, l'incertitude liée aux conditions d'emplois de l'appareillage de mesure peut être considérée comme négligeable.

Les appareils de mesure sont des exposimètres, dont la précision est de classe 2. La norme NF S 31-084 associe cette classe de précision à une incertitude d'appareillage égale à $U_2 = 1,5$ dB(A). C'est cette valeur normalisée U_2 qui sera prise en compte dans l'étude présente.

Toutefois, la valeur normalisée en France du terme d'incertitude lié à l'appareillage de mesure U_2 reste discutée au plan international, dans sa valeur et dans sa nature. Pour illustrer ce type de débat, explicitons la nature des erreurs de mesures liées aux limitations de la bande passante de l'appareil de mesure. Si le bruit comprend des composantes spectrales suffisamment basses (ou élevées) pour être hors bande passante, il n'est pas capté par l'appareil, ce qui provoque une erreur de mesure. Toutefois cette erreur n'est pas systématique, comme le seraient des erreurs dues au calibrage ou à l'éloignement du microphone de mesure de la source de bruit. En effet, l'apparition de bruits à composantes spectrales hors bande passante peut être considérée comme aléatoire, au vu de la diversité des situations d'exposition d'une personne. On en conclut que cette erreur ne peut être ni symétrique, ni nulle en valeur moyenne : il s'agit donc d'un biais (d'une erreur de type B, selon la terminologie du GUM). Et pour quantifier sans discussion possible ce biais, il faudrait connaître la composition spectrale du bruit... ce qui reste illusoire dans beaucoup de situations pratiques.

8.4 Evaluation de l'incertitude globale U

L'incertitude globale est estimée par la somme quadratique des termes d'incertitude, soit par la relation (7) indiquée par la norme NF S 31-084 :

$$U = (U_1^2 + U_2^2)^{0,5} \quad (7)$$

La relation précédente montre que réduire l'incertitude d'échantillonnage U_1 pour réduire l'incertitude globale U a une limite : même si U_1 est nulle (ce qui est le cas en cas de

mesurage systématique durant la totalité de la période de référence), U ne peut jamais être inférieure à U_2 .

Concrètement, quand U_2 s'élève à 1,5 dB(A), il découle de la relation (7) que U_1 a un impact négligeable sur U – c'est-à-dire inférieur à 0,1 dB(A) - tant que U_1 n'excède pas 0,7 dB.

Dans l'étude présente, les 3 valeurs U_1 , U_2 et U seront mentionnées afin d'évaluer l'impact de chaque terme d'incertitude sur U.

9. NIVEAU DE BRUIT ELARGI L^*

Pour éviter toute confusion entre un niveau de bruit moyen qui ne comprend pas d'incertitude, et le résultat qui intègre l'incertitude globale de mesure, on a défini par « niveau de bruit élargi » le résultat qui intègre l'incertitude globale.

Le niveau de bruit élargi est donné par les relations (8) ou (9), utilisées respectivement quand le niveau moyen a été calculé en énergie ($L_{Aeq,T}$) ou sous hypothèse de normalité (L_{hn}), et que l'incertitude globale est U :

$$L^*_E = L_{Aeq,T} + U \quad (8)$$

$$L^*_{hn} = L_{hn} + U \quad (9)$$

10. BILAN

La problématique de l'estimation de l'exposition au bruit professionnel est résumée ici. Le mesurage s'appuie sur un échantillon qui doit être défini parmi les travailleurs exposés et parmi le temps de travail. Pour limiter l'espace des cas possibles, il est nécessaire de constituer des groupes d'exposition homogène parmi la population exposée et de choisir une période de référence de durée suffisante pour englober les variations d'exposition que subit chaque groupe. Pour quantifier l'exposition au bruit et ses variations sur des échelles de temps qui vont de la minute à la journée, on dispose du variogramme. Trois hypothèses sont effectuées couramment pour interpréter les résultats : homogénéité de l'exposition, indépendance des mesures, normalité de la distribution des niveaux de bruit. Deux estimateurs du niveau de bruit moyen peuvent être utilisés : la moyenne en énergie ou la moyenne sous hypothèse de normalité de distribution des niveaux de bruit. L'incertitude globale sur l'estimation du niveau d'exposition au bruit comprend deux termes (l'incertitude liée à l'appareillage de mesure, l'incertitude liée à l'échantillonnage) et leurs estimations restent discutées.

L'objet de l'étude présentée ici est donc de tester les différentes hypothèses, de comparer les estimateurs. Pour atteindre cet objectif, il faut disposer d'une référence en matière d'exposition au bruit professionnel. Dans l'étude présente, la référence a été définie par une durée de mesures de 80 h par groupe de travailleurs. Dans la base de données constituée ainsi, on s'attachera en premier lieu à caractériser sur le plan statistique les données d'exposition au bruit dans la période de référence. Dans une autre note à paraître, on appliquera sur ces données des plans d'échantillonnage calqués sur la pratique métrologique habituelle afin d'étudier leur précision, comparativement à la valeur de référence.

Partie A : ANNEXES

Annexe 1 : Démonstration de la relation $L_{Aeq,T} = L_0 + 0,115 S_L^2$ en cas de normalité de la distribution des échantillons de bruit $L_{Aeq,dT}$

Annexe 2 : Simulations numériques comparant les deux estimateurs du bruit moyen, $L_{Aeq,T}$ et $(L_0 + 0,115 S_L^2)$, en cas de distributions non normales

Annexe 3 : Comparaisons de deux estimateurs de l'incertitude d'échantillonnage

ANNEXE 1

**Démonstration de la relation $L_{Aeq,T} = L_0 + 0,115 S_L^2$
en cas de normalité de la distribution des échantillons de bruit $L_{Aeq,dT}$**

Pour estimer un niveau de bruit moyen à partir d'un échantillon comprenant N niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ mesurés, deux estimateurs du niveau de bruit moyen sont disponibles :

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \text{Log} \sum_{i=1}^{i=N} (dT / T) \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,dT}(i)} \quad (1)$$

$$L_{hn} = L_0 + 0,115 \cdot S_L^2 \quad (2)$$

où : $T = N \cdot dT$

L_0 est la moyenne arithmétique des N valeurs $L_{Aeq,dT}$

S_L est l'écart type des N valeurs $L_{Aeq,dT}$

On montre ici que les deux estimateurs, $L_{Aeq,T}$ et L_{hn} , sont égaux quand les N valeurs $L_{Aeq,dT}$ mesurées sont distribuées selon la loi normale. Cette démonstration a été tirée de l'ouvrage : « Acoustique industrielle et aéroacoustique », S. Lévy. Edition : Hermès Sciences (Paris), 2001. Une autre démonstration a été donnée dans une publication récente (Grzebyk, 2003).

Rappels sur les probabilités et notations

Soit L une variable aléatoire continue.

Notons $P(L)$ la densité de probabilité : $P(L) dL$ est donc la probabilité de trouver L à dL près.

La fonction de répartition $F(X)$, probabilité de réaliser $L \leq X$ est donc :

$$F(X) = \int_{-\infty}^X P(L) dL$$

Soit μ_m les moments d'ordre m de la variable L .

Moment d'ordre 0 :

$$\mu_0 = E[1] = \int_{-\infty}^{+\infty} P(L) dL$$

Moment d'ordre 1 :

Notons $E[L]$ l'espérance mathématique (ou valeur moyenne) de L :

$$\mu_1 = E[L] = \int_{-\infty}^{+\infty} L P(L) dL$$

Moment d'ordre 2 :

$$\mu_2 = E[L^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} L^2 P(L) dL$$

Le moment d'ordre 2 centré sur la moyenne de L est la variance :

$$\mu'_2 = E[(L - \mu_1)^2] = \sigma^2$$

où σ est l'écart type de L .

Ces notions s'étendent aux fonctions aléatoires. Dans ce cas, chaque tirage de la variable aléatoire L est une fonction du temps. Mais il faut distinguer :

- la moyenne statistique, $E[L]$: moyenne de tous les tirages de L à un instant t ;
- la moyenne temporelle d'un tirage : $\bar{L} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} L(t) dt$

Quand L est stationnaire (les moyennes statistiques ne dépendent pas de t) et ergodique (les moyennes temporelles ne dépendent pas du tirage de L), alors les moyennes statistiques et temporelles sont égales : $E[L] = \bar{L}$

Loi normale :

La densité de probabilité $P(L)$ d'une variable L distribuée selon la loi normale est :

$$P(L) = \frac{1}{S_L \sqrt{2\pi}} \exp \left[- (L - L_0)^2 / 2 S_L^2 \right]$$

où L_0 est la moyenne arithmétique de L et S_L son écart type.

Niveau acoustique continu équivalent calculé durant T :

Considérons un niveau de pression acoustique continu équivalent, $Leq(T)$ calculé par la moyenne en énergie de niveaux de bruit $L(dt)$ mesurés pendant un temps $T = N \cdot dt$. Alors :

$$10^{Leq(T)/10} = 1/T \cdot \int_0^T 10^{L(dt)/10} dt$$

Cette définition peut aussi s'exprimer par : $10^{Leq(T)/10}$ est la moyenne temporelle de $10^{L(dt)/10}$.

En supposant que la fonction $L(dt)$ est stationnaire et ergodique, et que sa densité de probabilité suit une loi gaussienne, alors on en déduit :

$$10^{Leq(T)/10} = E[10^{L(dt)/10}] = \int_{-\infty}^{+\infty} 10^{L(dt)/10} P(L) dL$$

$$\text{avec } P(L) = \frac{1}{S_L \sqrt{2\pi}} \exp \left[- (L - L_0)^2 / 2 S_L^2 \right]$$

Après développement, puis le changement de variable u ,

$$u = [L - L_0 - S_L^2 \cdot \ln(10)/10] / (S_L \sqrt{2}),$$

$$\text{et sachant que } \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-u^2) du = \sqrt{\pi}$$

on obtient :

$$Leq(T) = L_0 + \ln(10)/20 \cdot S_L^2$$

$$\text{or } \ln(10)/20 = 0,11513 \cong 0,115$$

Echantillonnage

Quand l'estimation d'un niveau de bruit $L_{Aeq,T}$ est effectuée à partir de N valeurs $L_{Aeq,ti}$ constituant un échantillon, la même logique d'estimation est applicable. Si les données initiales $L_{Aeq,ti}$ sont distribuées selon une loi normale, on a donc :

$$L_{Aeq,T} = L_0 + 0,115 \cdot S_L^2$$

où L_0 est la moyenne arithmétique et S_L^2 est la variance des N valeurs $L_{Aeq,ti}$ de l'échantillon :

$$L_0 = 1/N \cdot \sum_{i=1}^{i=N} L_{Aeq,ti}$$

$$S_L^2 = 1/(N-1) \sum_{i=1}^{i=N} (L_{Aeq,ti} - L_0)^2$$

Conclusion

Quand est validée l'hypothèse de normalité de la distribution des N valeurs $L_{Aeq,ti}$ mesurées, on a démontré que les deux estimateurs du bruit moyen, $L_{Aeq,T}$ et $(L_0 + 0,115 \cdot S_L^2)$ sont identiques.

ANNEXE 2

**Simulations numériques comparant les deux estimateurs du bruit moyen,
 $L_{Aeq,T}$ et $(L_0 + 0,115 S_L^2)$, en cas de distributions non normales**

Pour illustrer la démonstration de l'annexe 1 et faciliter l'interprétation des écarts entre les deux estimateurs du bruit moyen, $L_{Aeq,T}$ et $(L_0 + 0,115 \cdot S_L^2)$ quand l'hypothèse de normalité des distribution est rejetée, une simulation numérique a été réalisée.

Choix des 3 distributions simulées

Trois échantillons de bruit ont été construits par simulation, pour que leur distribution réponde aux critères suivants :

- a) avoir toutes 3 le même niveau équivalent global, $L_{Aeq,T} = 90,6 \text{ dB(A)}$;
- b) ne pas respecter l'hypothèse de normalité de la distribution ;
- c) présenter 3 types différents de dissymétrie :
 - distribution A : dissymétrie forte, orientée vers les faibles niveaux de bruit ;
 - distribution B : dissymétrie forte, mais orientée vers les forts niveaux de bruit ;
 - distribution C : dissymétrie limitée, orientée vers les forts niveaux de bruit.

Les 3 distributions de ces échantillons sont présentées sur la figure 1 ; on a superposé le tracé d'une distribution normale de même moyenne et écart type. Les distributions A et B ont été choisies pour être quasiment symétriques et avoir le même écart type.

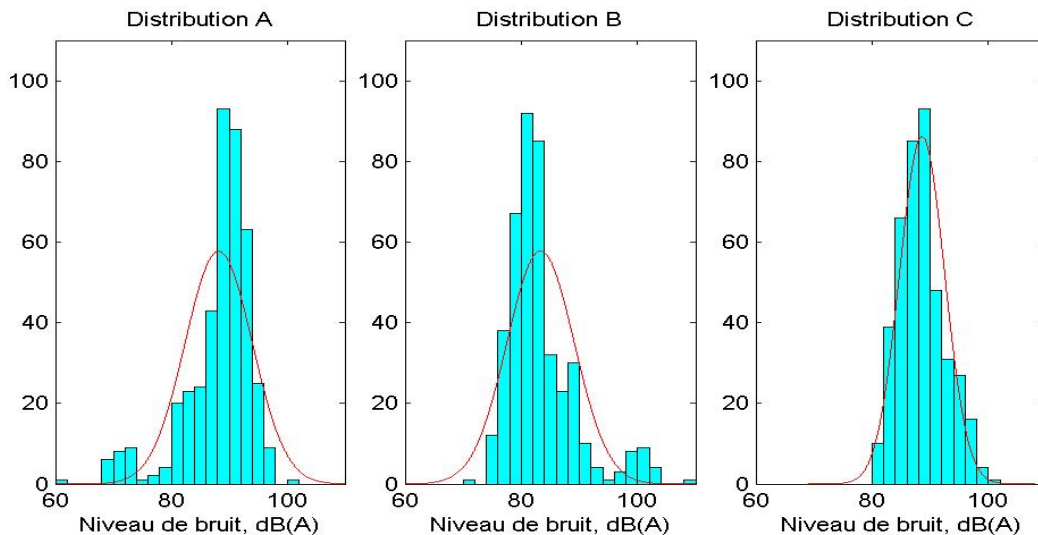


Figure 1 : Données simulées – Distribution de 3 échantillons de valeurs $L_{Aeq,dT}$, et comparaison avec une distribution normale (trait continu).

Note : La distribution A (qui est une série réelle, au support de 1 min) correspond à un poste bruyant, qui expose à des niveaux de bruit compris entre 90 et 95 dB(A) mais comprend des périodes où le bruit reçu par le travailleur est voisin de 80 dB(A).

Résultats numériques

Echantillon	A	B	C
N, Nombre de valeurs $L_{Aeq,dT}$	420	420	420
$L_{Aeq,T}$ Estimateur du bruit moyen, en énergie,	90,6	90,6	90,6
Lar, Moyenne arithmétique, en dB(A)	88,2	83,3	88,6
Ecart type S_L des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	5,8	5,8	3,9
Lhn, Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale, en dB(A)	92,1	87,2	90,3
Normalité acceptable ?	non	non	non
Incertitude d'échantillonnage U_1^*	0,7	0,7	0,4
Intervalle IC(Student)**	0,6	0,6	0,4
Incertitude d'appareillage U_2	1,5	1,5	1,5
Incertitude globale U	1,7	1,7	1,6
Niveau de bruit élargi (E) en dB(A) $L^*_E = L_{Aeq,T} + U$	92,2	92,2	91,9
Niveau de bruit élargi (hn) en dB(A) $L^*_{hn} = Lhn + U$	93,7	88,8	92,1
Ecart entre moyenne en énergie et sous hypothèse normale : ($L_{Aeq,T} - Lhn$)	- 1,5	+ 3,4	+ 0,2

* S'effectuant exclusivement avec N et S_L , le calcul de U_1 est toujours possible, comme celui de IC(Student) même quand l'hypothèse de normalité est rejetée.

** On vérifie ici que quand $N > 100$, l'incertitude U_1 tend à se confondre avec l'incertitude classique de Student, ce que précisera l'annexe 3 de cette partie.

Tableau 1 : Données simulées - Résultats de l'analyse statistique des 3 échantillons de bruit

Discussion

Examinons en premier lieu l'échantillon C. Le tableau montre que c'est pour cet échantillon que l'écart entre les deux estimations du bruit moyen est le plus réduit : ($L_{Aeq,T} - Lhn$) = + 0,2 dB(A). Un tel écart est pratiquement négligeable et s'explique par la distribution de l'échantillon C. La figure 1 montre en effet que la distribution C est très proche d'une distribution normale, et

dans ce cas, malgré le rejet de l'hypothèse de normalité par le test statistique, on s'attend à ce que les deux estimations du bruit moyen, $L_{Aeq,T}$ et L_{hn} , soient proches.

Comparons ensuite les échantillons A et B et leurs écarts ($L_{Aeq,T} - L_{hn}$) respectifs. Les échantillons A et B ont été construits pour que leurs distributions présentent le même écart type ($S_L = 5,8$ dB) et une dissymétrie identique mais de sens opposée, ce que montre la figure 1.

Dans ces conditions, les résultats sont les suivants :

- pour l'échantillon A, l'écart est modéré et négatif : [($L_{Aeq,T} - L_{hn}$) = - 1,5 dB(A)].
- pour l'échantillon B, l'écart est important et positif : [($L_{Aeq,T} - L_{hn}$) = + 3,4 dB(A)].

Ces résultats peuvent s'énoncer ainsi :

- échantillon A : Quand la dissymétrie est orientée vers les faibles niveaux de bruit, appliquer l'hypothèse de normalité à une distribution qui ne l'est pas conduit à sur estimer d'une valeur modérée le niveau moyen calculé en énergie.
- échantillon B : Quand la dissymétrie est orientée vers les forts niveaux de bruit, appliquer l'hypothèse de normalité à une distribution qui ne l'est pas conduit à sous estimer de façon importante le niveau moyen calculé en énergie.

La non symétrie des écarts observés entraîne à préférer l'estimateur du bruit moyen qui sera associé au risque de sous estimation d'ampleur minimum, quelque soit le type des séries mesurées. Cet estimateur du bruit moyen est fourni par la moyenne en énergie.

Conclusion

Le résultat de ces simulations incite donc à conclure que l'estimateur du bruit moyen basé sur la moyenne en énergie serait préférable à l'estimateur du bruit moyen sous hypothèse de normalité. Cependant, l'hypothèse de normalité de la distribution des niveaux de bruit semble utile pour faciliter l'extrapolation du résultat de l'estimation de l'exposition au bruit, au-delà de la période de référence définie initialement.

La conclusion définitive de cette discussion sera tirée après analyse des données expérimentales. Dans cette analyse, on s'attachera à quantifier le niveau du bruit moyen en employant les deux estimateurs, à quantifier leurs écarts, à valider ou invalider l'hypothèse de normalité puis à discuter des avantages et inconvénients des deux estimateurs du bruit moyen.

ANNEXE 3

Comparaisons de deux estimateurs de l'incertitude d'échantillonnage

L'incertitude d'échantillonnage peut être estimée par deux intervalles de confiance notés IC(Student) et U_1 . Ces deux estimateurs sont statistiquement non biaisés si on applique IC(Student) à la moyenne arithmétique des N valeurs $L_{Aeq,dT}$ mesurées et U_1 à leur moyenne en énergie. On examine ici le biais d'estimation qui est introduit quand on utilise IC(Student) comme estimateur de l'intervalle de confiance de la moyenne en énergie des N valeurs mesurées, puis on présente la procédure à appliquer, en pratique, pour calculer U_1 en fonction de N et de S_L , l'écart type des valeurs $L_{Aeq,dT}$ mesurées.

Comparaison de U_1 et de IC(Student)

Ces intervalles de confiance dépendent de N , le nombre de valeurs $L_{Aeq,dT}$ et de S_L , leur écart type. Quand les intervalles de confiance sont calculés avec plusieurs dizaines de valeurs et que S_L n'excède pas 5 dB(A), la figure 1 montre que U_1 converge d'autant plus vers IC(Student) que N croît et que S_L décroît. On peut montrer qu'avec $N = 100$ et $S_L = 3$ dB(A), les valeurs de U_1 et de IC(Student) sont égales à 1% près (les valeurs sont égales respectivement à 0,592 et à 0,588).

On retrouve ce fait dans les valeurs indiquées au tableau 4.1, où les estimations ont été effectuées avec $N = 420$ valeurs :

- aucun écart supérieur à 0,1 dB(A) si $S_L = 3,9$ (distribution C) ;
- écart de 0,1 dB(A) quand $S_L = 5,8$ (distribution A ou B).

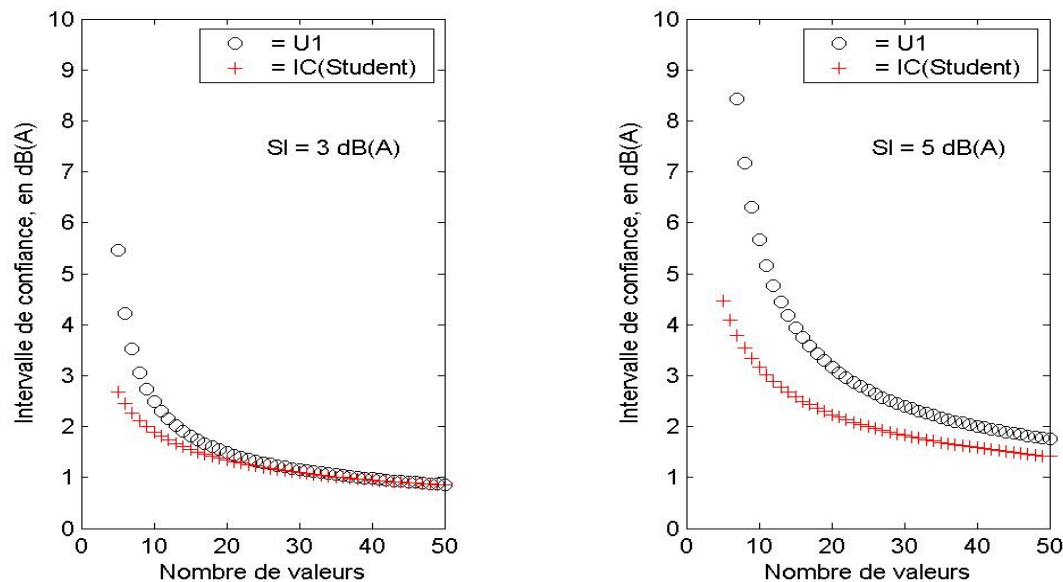


Figure 1 : Comparaisons des valeurs des intervalles de confiance U_1 et IC(Student), quand le nombre N de valeurs $L_{Aeq,dT}$ varie de 5 à 50 et que leur écart type S_L vaut respectivement 3 ou 5 dB(A).

Quand le nombre de valeurs est plus faible, la figure 4.2 montre que IC(Student) est toujours sous-estimé par rapport à U_1 . La sous-estimation devient supérieure à 1 dB(A) quand $N < 20$ et que $S_L = 5$ dB(A). Si $S_L = 3$ dB(A), il faut que le nombre de valeurs de l'échantillon soit inférieur à 10 pour que la sous-estimation soit de l'ordre de 1 dB(A).

Dans les conditions des pratiques métrologiques habituelles, N pouvant être réduit, on préférera donc utiliser l'intervalle de confiance U_1 .

Rappel de la formule d'interpolation de U_1

Il a été signalé que $U_1(N, S_L)$ n'a pas d'expression analytique simple (Grzebyk, 2003), mais que son calcul pratique pouvait s'appuyer sur une procédure d'interpolation (Hewett, 1997). Indiquée dans la norme NF S 31-084, cette procédure est la suivante :

1) Calculer $S_y = 0.23 \cdot S_L$

2) Considérer les coefficients a à i suivants :

$$\begin{aligned} a &= 0.76766658 ; \\ b &= 3.8716869 ; \\ c &= 0.80598919 ; \\ d &= 6.0321019 ; \\ e &= 0.89998154 ; \\ f &= 2.012669 ; \\ g &= 0.21978875 ; \\ h &= 0.41575588 ; \\ i &= 0.29258276 ; \end{aligned}$$

et utiliser les équations intermédiaires suivantes :

$$\begin{aligned} F1 &= S_y \cdot [i + 1 / (N - 2)^c] ; \\ F2 &= b + d / (N - 2)^c ; \\ F3 &= F1 \cdot [1 - e \cdot \exp(- f \cdot F1)] ; \\ F4 &= [1 + g \cdot \exp(- h \cdot F1)] ; \\ F5 &= F2 \cdot F3 / F4. \end{aligned}$$

3) Calculer :

$$Cu1 = 1,645 + a / (N - 2) + F5$$

4) En déduire le résultat :

$$U_1(N, S_L) = Cu1 \cdot S_L \cdot \frac{1}{\sqrt{N-1}}$$

Partie B :
CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNEES
D'EXPOSITION AU BRUIT PROFESSIONNEL - METHODES

1. RAPPEL DE LA PROBLEMATIQUE

L'estimation de l'exposition au bruit en milieu professionnel se heurte à différentes questions et limitations, qui furent examinées en détail dans la partie A de ce document.

On peut résumer la problématique de cette estimation par quelques questions :

- comment dimensionner les échantillons de bruit mesurés et assurer qu'ils soient représentatifs, compte tenu des contraintes pratiques limitant tout mesurage, du grand nombre des travailleurs exposés, de la durée de l'exposition au bruit qui se prolonge fréquemment durant des années ?
- comment choisir des périodes de référence, de durée suffisante pour englober les variations d'exposition au bruit, quand ces variations surviennent sur des échelles de temps très différentes, liées à l'alternance des tâches et à celles des phases de travail, aux modifications de production et d'organisation du travail ?
- comment caractériser les variations d'exposition et valider différentes hypothèses sur lesquelles on s'appuie pour fournir un résultat ?
- comment estimer le niveau de bruit moyen et l'incertitude qui lui est associée ?

De nombreux moyens existent pour répondre à ces questions, qui présentent des avantages et des limitations. Disponibles dans les spécifications de la norme de mesure de l'exposition au bruit (NF S 31-084, 2002) ou dans des méthodes d'analyses statistiques spécialisées, ces moyens ont été examinés antérieurement. On a vu que des discussions subsistent au plan international, notamment sur le dimensionnement des échantillons, le choix des estimateurs et l'évaluation de l'incertitude. Ces discussions sont liées aux différences des pratiques métrologiques nationales et ont une limite : on ne dispose généralement pas des données d'exposition à long terme qui permettraient de valider ou d'invalider les hypothèses et les pratiques de mesure.

L'objectif de l'étude présente est de répondre au besoin de disposer de données d'exposition sur une durée suffisamment longue pour constituer une référence. L'hypothèse de base de cette étude est que cette durée « de référence » peut être de l'ordre de 80 h, quand le mesurage est envisagé au sein d'un Groupe d'Exposition Homogène (GEH), composé de travailleurs de même métier et exposés au bruit dans des conditions semblables. Ces données de référence feront l'objet d'une analyse statistique détaillée afin de vérifier la validité des références constituées. En disposant de ces références, on pourra ensuite simuler différents plans d'échantillonnage, basés sur ce qui est réalisable en pratique courante, et en déduire des recommandations.

On présente ici les caractéristiques de la population des travailleurs qui furent étudiés pour constituer la base de données, ainsi que les méthodes de mesurages qui furent appliquées.

2. POPULATION ETUDIÉE

L'exposition au bruit de 6 groupes de travailleurs a été étudiée puis quantifiée. Chaque groupe est composé de travailleurs de même métier, dont l'exposition peut être supposée homogène *a priori*. Ces Groupes d'Exposition Homogène, notés « GEH », furent sélectionnés pour englober des situations d'exposition au bruit très différentes, d'un GEH à l'autre. Le travail de chaque GEH a été suivi durant plusieurs journées afin d'être en mesure de caractériser les tâches effectuées. 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 furent répétées durant plusieurs journées de travail, afin d'obtenir pour chaque GEH 10 séries de mesures de durée voisine de 8 h chacune. Ce protocole de recueil de données a été appliqué dans 5 entreprises : 4 sont des entreprises de taille supérieure à 300 salariés, 1 entreprise comprend 10 personnes.

2.1. Présentation de la population étudiée

L'appellation et le contenu du travail des groupes d'exposition homogène (GEH) étudiés sont résumés ci-après. Des informations complémentaires, notamment sur les différentes tâches et leurs caractéristiques (nature, durée relative, niveau de bruit), sont données dans les chapitres détaillant les caractéristiques des GEH.

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

- réglages (niveau de bruit = 87,1 dB(A), durée relative = 35 %) ;
- fraisage d'ébauche, (niveau de bruit = 86,1 dB(A), durée relative = 33 %) ;
- fraisage de finition (niveau de bruit = 84,5 dB(A), durée relative = 32 %).

Ces tâches ont quasiment la même durée relative et présentent des écarts de niveau de bruit global qui n'excèdent pas 2,1 dB (A).

2. 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). Trois tâches, très différentes en durée et en niveau de bruit, ont été distinguées :

- montage manuel (niveau de bruit = 82,9 dB(A), durée relative = 93 %) ;
- emploi d'outils pneumatiques (niveau de bruit = 99,1 dB(A), durée relative = 4 %) ;
- rivetage (niveau de bruit = 103,2 dB(A), durée relative = 3 %).

3. 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). Trois tâches, très différentes en durée et en niveau de bruit, ont été distinguées :

- assemblages et finitions (niveau de bruit = 83,6 dB(A), durée relative = 49 %) ;
- usage de 8 machines à bois (niveau de bruit = 88,5 dB(A), durée relative = 35 %) ;
- usage de la machine la plus bruyante (niveau de bruit = 93,2 dB(A), durée relative = 16 %).

4. 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 n'a pas fait l'objet d'une distinction entre tâches ; il est exposé à un niveau de bruit moyen de 90,4 dB(A).

5. Conducteurs : Ce GEH regroupe 27 opérateurs, affectés à la conduite de 3 lignes de production, en grande série, de capsules d'aluminium. Ces lignes présentent des différences techniques mineures, mais se distinguent des autres machines de l'atelier. Chaque opérateur est affecté à une ligne, et l'ensemble de son activité a été considéré comme une tâche unique, qui inclut la conduite, la surveillance de la ligne de production et les interventions en cas de bourrage sur un des équipements de la ligne. Ce GEH est exposé à un niveau de bruit moyen de 89,6 dB(A).

6. Régleurs : Ce GEH comprend 9 personnes, chargées d'intervenir sur toutes les lignes de production automatisées d'un grand atelier. Leurs interventions sont effectuées sur demande des opérateurs, lors des changements de production, ou pour réaliser des opérations de maintenance périodique. L'ensemble de leur travail a été considéré comme une tâche unique. Ce GEH est exposé à un niveau de bruit moyen de 90,3 dB(A).

2.2. Méthode de segmentation du travail en tâches principales

La segmentation du travail des opérateurs en plusieurs tâches principales a été effectuée en utilisant simultanément plusieurs sources d'information :

- interview des opérateurs et de la maîtrise d'atelier : collecte d'informations sur la production, l'organisation et le processus de travail, en mode normal de production et en cas d'incident ;
- recueil des spécifications relatives au travail prescrit ;
- recueil des traces écrites par les opérateurs au cours de leur travail (cahiers d'atelier, où sont notés chronologiquement et systématiquement la nature de la production, ses changements, les réglages machines, les incidents, etc.) ;
- observations du travail.

Parmi les 6 GEH étudiés, il s'est avéré que pour 3 d'entre eux, il fut possible de collecter les informations nécessaires pour réaliser, durant la totalité des périodes mesurées, une segmentation du travail entre tâches et estimer leur durée respective. Par contre, pour les 3 autres GEH, diverses difficultés sont apparues, rendant pratiquement impossible la segmentation entre tâches sur une durée voisine de 80 h. On détaille ci-après les faits qui ont rendus possible ou impossible une segmentation par tâche. Ils sont liés à l'organisation et au contenu du travail des opérateurs.

GEH se prêtant à une approche du mesurage par tâche :

Pour 3 GEH, les fraiseurs, les monteurs et les menuisiers, le travail effectué durant environ 80 h a été segmenté en trois tâches principales, à l'aide des informations suivantes :

- fraiseurs : le travail prescrit (les gammes d'usinage spécifient les tâches à effectuer et leurs durées, incluent les opérations de fraisage mais aussi les tâches annexes, d'outillage et de réglage), complété d'interviews et d'observations ayant montré que le travail réel s'éloignait peu du travail prescrit ;
- monteurs : a) le travail prescrit (qui définit complètement le mode opératoire), b) des interviews (pour évaluer la nature et la durée relative des tâches), c) des observations, incluant éventuellement, lors des phases d'usage d'outils pneumatiques et de rivetage, des mesures sonométriques brèves ;
- menuisiers : observation continue systématique du travail effectué (identifier la nature et la durée des tâches effectuées), complétée d'interviews.

En s'appuyant sur les spécifications du travail prescrit, la distinction des tâches durant le temps et l'estimation de leurs durées ont pu être réalisées sans difficulté majeure dans le cas des fraiseurs et des monteurs. Par contre, dans le cas des menuisiers, aucune tâche ni durée n'étant définies *a priori*, c'est par une observation continue de leur travail que la segmentation entre tâches de ce GEH a été effectuée. Elle fut facilitée par une organisation du travail spécifique : les menuisiers sont polyvalents ; chacun dispose des plans d'exécution d'un meuble spécifique, qu'il fabrique du début à la fin en utilisant successivement et selon ses besoins chacune des machines de l'atelier. La distinction des tâches des 4 menuisiers a été effectuée selon les phases de travail sur chaque machine, en incluant le temps d'usinage machine et les temps annexes (manutention des pièces avant et après usinage machine, outillage et réglage, contrôle, nettoyage de la machine en fin de fabrication).

Pour ces 3 GEH, toutes les séries mesurées ont donc fait l'objet d'un codage spécifique, identifiant la nature, la position et la durée des tâches, qui fut mentionné dans le rapport de mesure remis aux entreprises concernées.

Ce codage initial des tâches fut retouché dans un cas très spécifique : en présence d'une tâche globalement très bruyante, mais qui inclut une opération particulière, peu bruyante et de durée supérieure à une minute, l'opération peu bruyante a été distinguée de la phase bruyante par modification de son codage. Cette modification est conforme à une pratique du mesurage de terrain, qui consiste, lorsqu'on souhaite mesurer une phase de travail réputée particulièrement bruyante, à attendre que l'opérateur l'exécute pour mesurer le bruit.

Dans la totalité des périodes mesurées, les durées élémentaires par tâche ont été cumulées pour en déduire leur durée relative.

GEH ne se prêtant pas à une approche du mesurage par tâche :

Pour 3 GEH, les extrudeurs, les conducteurs et les régleurs, l'identification de la nature de leur tâche s'est heurtée à des difficultés liées à l'organisation et au contenu de leur travail :

- extrudeurs : en mode de production normal, leur travail alterne diverses tâches, brèves et localisées en tous points de la ligne ; en cas de changement de production, des observations limitées ont montré que le bruit reçu baissait peu (quelques dB(A)), à cause du bruit généré par les autres lignes de production, situées à proximité immédiate. Dans ces conditions, il n'a pas été jugé utile de réaliser une observation continue, seul moyen envisageable pour distinguer les tâches de ces opérateurs.
- conducteurs : alternance de multiples interventions de durée inférieure à la minute en différents points de la ligne qu'ils conduisent, sans aucun repère en durée ;
- régleurs : pas de travail prescrit (hormis des interventions de type maintenance lourde), absence de traces écrites sur le travail effectué, pas de localisation prédéfinie des interventions (elles se déroulent, à la demande des opérateurs sur machines, en tous points d'un vaste atelier), rendant l'observation continue pratiquement impossible.

Dans ces conditions, la segmentation du travail effectué entre tâches nettement identifiables n'a pas été possible durant la totalité des périodes mesurées pour ces 3 GEH. L'étude de l'échantillonnage du bruit qui leur sera appliquée portera donc uniquement sur des échantillons par métier, sans distinction de tâches.

2.3 Résumé des caractéristiques principales des 6 groupes étudiés

Les caractéristiques principales des 6 groupes d'exposition homogène (GEH) étudiés ont été regroupées dans le tableau 1.

Pour les 3 GEH dont le travail a été scindé en plusieurs tâches, le tableau 2 résume les caractéristiques des tâches.

La valeur moyenne du niveau d'exposition au bruit a été indiquée par le niveau acoustique continu équivalent $L_{Aeq}(T)$, calculé sur la durée totale T de mesurages après exclusion des temps de pauses éventuels.

Remarques :

- a) Les niveaux de bruit moyens indiqués ne comprennent pas de terme d'incertitude. En effet, l'évaluation de cette incertitude est un des objectifs de l'étude.
- b) Ces tableaux ne fournissent pas d'estimation du niveau de bruit quotidien, $L_{Ex,8h}$. Le niveau de bruit quotidien se calcule à partir d'un niveau acoustique continu équivalent, en ajoutant un terme correctif dépendant de la durée totale effective de la journée de travail. Ce correctif est donc susceptible de varier d'une entreprise à l'autre.

Nom du GEH	Caractéristiques du poste de travail	Effectif total du GEH	Nombre de séries mesurées	Durée cumulée de mesure, T en h	Niveau de bruit moyen global, $L_{Aeq}(T)$, en 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 1 : Caractéristiques principales des 6 GEH étudiés

GEH	Caractéristiques des tâches			
	Désignation	Niveau de bruit moyen en dB(A)	Durée cumulée, en h	Durée relative %
Fraiseurs	réglages	87,1	21,7	35 %
	fraisage d'ébauche	86,1	20,9	33 %
	fraisage de finition	84,5	20,4	32 %
Monteurs	montage manuel	82,9	74,7	93 %
	emploi d'outils pneumatiques d'assemblage	99,1	3,0	4 %
	rivetage	103,2	2,2	3 %
Menuisiers	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 2 : Caractéristiques des tâches qui ont été distinguées dans 3 GEH

3. MESURAGES D'EXPOSITION AU BRUIT

3.1 Appareillage et réalisation des mesurages

Les mesurages d'exposition au bruit ont été effectués par exposimétrie continue, à l'aide d'exposimètres acoustiques de classe 2 (Exposimètres SIE-95, de marque 01dB), mis en œuvre conformément aux prescriptions de la norme NF S 31-084, relative au mesurage de l'exposition des travailleurs au bruit. Les séries mesurées se composent de $L_{Aeq,dt}$ courts et de L_{pc} , collectés avec un temps d'intégration élémentaire dt fixé à 1s.

Cinq exposimètres de même marque ont été mis en œuvre pour ces mesurages. Leur calibrage a été vérifié avant chaque série quotidienne de mesure, puis au terme de chaque série, à l'aide d'un calibreur acoustique B&K, type 4231. Entre les deux vérifications quotidiennes de calibrage, aucun écart supérieur à 0,5 dB(A) n'a été constaté.

Les opérateurs qui furent équipés d'exposimètres ont été informés avant le début des mesurages sur le protocole de l'étude. Des consignes leur ont été données sur la nécessité de travailler comme d'habitude, de veiller au bon maintien en place du dispositif d'accrochage du microphone de mesure (placé sur le col de leur vêtement), d'éviter de perturber les mesures. Au terme de chaque série de mesure, la série chronologique du bruit a été éditée et une interview de l'opérateur a été réalisée pour compléter, si nécessaire, les informations susceptibles d'expliquer les variations du bruit.

La durée de chaque mesurage était proche, dans la mesure du possible, d'un poste ou d'un demi-poste complet de travail. Les mesurages ont été réitérés dans chaque GEH de façon à obtenir une durée totale de mesure qui atteigne, autant que possible, 80 h. Durant les mesures d'exposition, le travail des opérateurs a été suivi, par observation et par recueil des traces de l'activité réalisée, afin de valider les résultats des mesures.

3.2. Validation des mesurages

Une analyse détaillée de chaque série de valeurs $L_{Aeq}(1s)$ mesurée a été réalisée. Elle a eu pour objet de valider la fiabilité des mesurages, de vérifier que résultats étaient cohérents avec la nature du travail effectué. La nature des contrôles appliqués aux données est détaillée ci-après.

Artefact de mesure

Dans quelques séries, des artefacts de mesure ont été constatés pour plusieurs raisons : cris intempestifs délibérés (malgré des explications préalables visant à les éviter), chocs sur le microphone lors de la pose de l'appareillage, appareil de mesure momentanément posé et non plus porté par l'opérateur. Les phases de mesurage comprenant des artefacts ont été systématiquement annulées des séries mesurées.

Saturations de l'appareil de mesure

Les appareils utilisés sont dotés de 2 détecteurs : un qui fonctionne en mode crête (dont la valeur maximale s'élève à 143 dB crête), un autre qui fonctionne en mode intégration, sur la durée de 1 s (dont la dynamique s'élève à 134 dB(A)). La plupart des saturations constatées concernent

uniquement le détecteur de crête. Leur effet sur le niveau de bruit moyen reçu pendant 8 h est apparu négligeable ($< 0,2$ dB). Les valeurs $L_{Aeq}(1s)$ correspondantes n'ont donc pas été retirées des séries mesurées.

Par contre, dans quelques cas, la saturation constatée concerne les 2 détecteurs et fournit une indication du niveau $L_{Aeq}(1s)$ voisine de 135 dB(A). Ces saturations ont été systématiquement retirées des mesures, car une seule de ces valeurs accroît de 3,5 dB(A) le niveau de bruit moyen mesuré durant 7 h. La présence de ce type de saturation et son retrait des séries mesurées fut signalée dans les comptes rendus de mesure remis aux entreprises, comme le stipule la norme NF S 31-084.

Elles pourraient suggérer de doter les exposimètres d'un atténuateur de bruit de 10 dB, susceptible d'être utilisé quand l'exposition doit être mesurée dans des situations de travail très bruyantes en niveau moyen ($L_{Aeq,T} > 100$ dB(A) sur des durées T de l'ordre de 15 min et plus) et comprenant des chocs métalliques.

Cohérence des mesures avec les informations décrivant le travail

Dans la plupart des séries mesurées, les niveaux de bruit et leurs fluctuations étaient cohérentes avec les informations collectées sur le travail réel des opérateurs et ses circonstances. Dans quelques cas, y compris après interview de l'opérateur, un doute subsistait dans l'interprétation de la série mesurée, et dans ce cas, toute la série a été annulée.

3.3 Mise en forme des données avant analyse

Deux transformations ont été appliquées aux séries mesurées avant leur analyse.

Exclusion des temps de pause

Les temps de pause ont été systématiquement exclus avant l'analyse finale des données. Ce choix a été effectué pour rendre comparables entre eux les échantillons de bruit durant les phases de travail. De plus, si ce choix accroît le niveau de bruit $L_{Aeq,TE}$ calculé durant une durée totale effective de travail hors pause T_E , cet accroissement est intégralement compensé quand ce niveau de bruit est appliqué à l'estimation du niveau de bruit quotidien, $L_{EX,8h}$, seule valeur comparable aux seuils réglementaires.

Transformation des données : passage d'une durée d'intégration de 1 s à 1 min

Pour faciliter la manipulation des données et leur analyse, les données initiales, collectées avec la durée d'intégration élémentaire de 1 s, ont été transformées en leur appliquant une durée d'intégration de 1 min. En pratique métrologique, la durée de 1 min correspond à une unité de base du mesurage, généralement assez proche des cycles élémentaires de fabrication. Pour un mesurage global d'une durée de 80 h, avec la durée d'intégration de 1 min, la taille des séries à analyser atteint 4800 valeurs.

PARTIE C :
ESTIMATION
DE L'EXPOSITION AU BRUIT
DE 6 GROUPES DE TRAVAILLEURS

L'analyse des caractéristiques de l'exposition au bruit des 6 groupes de travailleurs étudiés fait l'objet de la partie C de ce document. Ce texte fut précédé de deux autres parties :

- partie A : rappel de la problématique de l'estimation de l'exposition au bruit professionnel,
- partie B : méthodes appliquées pour constituer une base de données d'exposition au bruit.

Le plan de la partie C est le suivant :

1. Fraiseurs
2. Monteurs
3. Menuisiers
4. Extrudeurs
5. Conducteurs
6. Régleurs
7. Comparaisons entre estimateurs du bruit moyen
8. Synthèse des résultats des 6 groupes étudié
9. Conclusion

Les chapitres 1 à 6 présentent en premier le contenu du travail et les circonstances de l'exposition au bruit du groupe étudié. Ensuite sont spécifiées les caractéristiques des séries mesurées. L'analyse des variations du bruit auquel les travailleurs sont exposés est réalisée globalement, puis après distinction éventuelle du travail en différentes tâches. Enfin, un paragraphe discute les différents résultats avant de dégager les conclusions essentielles.

Le chapitre 7 regroupe quelques résultats des 6 groupes étudiés, utiles pour comparer deux estimateurs du niveau de bruit moyen et évaluer l'impact du choix d'un estimateur dans le résultat final.

Le chapitre 8 résume les principaux résultats des différents GEH : estimation du niveau de bruit moyen et de son incertitude.

Le chapitre 9 donne une brève conclusion d'ensemble.

1. CARACTERISTIQUES DES DONNEES DU GEH "FRAISEURS"

1.1. Travail effectué par le GEH

Dans un grand atelier de fraisage, le GEH des fraiseurs a été constitué par les opérateurs qui pilotent 3 fraiseuses à commande numérique. Il comprend 15 personnes, qui fraisent des pièces de grandes dimensions, selon des cycles d'usinage dont la durée peut atteindre 30 h.

Trois tâches principales ont été distinguées, en se basant sur les spécifications des gammes d'usinage. Ces spécifications sont très détaillées, englobent la nature des opérations à effectuer et leur durée élémentaire ; elles ont permis de distinguer durant tous les mesurages les tâches et d'estimer leur durée relative. Ces 3 tâches sont les suivantes :

- réglages (en y incluant les phases d'outillage et de nettoyage) ; durée relative = 35 % ;
- fraisage d'ébauche ; durée relative = 33 % ;
- fraisage de finition ; durée relative = 32 %.

La localisation du travail de chaque opérateur est stable, dans une zone qui comprend la machine qu'il pilote et un établi où l'outillage est disponible. S'agissant de fraiseuses numériques, il peut s'éloigner du poste de commande lors des phases d'usinage mais sans jamais être très éloigné.

1.2. Séries mesurées

Ce GEH de 15 personnes a fait l'objet de 10 séries de mesurage, dont les caractéristiques sont indiquées au tableau 1.1. Les mesurages ont été effectués sur les 3 lignes de fraisage et répartis sur 4 journées de travail.

Les données du tableau 1.1 ont été soumises à une première analyse, portant sur 2 aspects :

- les caractéristiques statistiques élémentaires des séries mesurées ont été regroupées dans le tableau 1.2.
- une analyse de variance a été appliquée pour mettre en évidence l'influence éventuelle, entre les différentes séries mesurées, des facteurs « ligne de fraisage » ou « période de mesure » sur les niveaux de bruit $L_{Aeq,T}$ globaux.
- un test statistique a été appliqué pour savoir si l'hypothèse de normalité devait être rejetée (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %).

Entre les séries mesurées, l'analyse de variance, appliquée aux facteurs « ligne de fraisage » ou « période de mesure », a montré qu'aucun de ces deux facteurs n'a d'effet statistiquement significatif sur le niveau de bruit global, au seuil de confiance de 95 %.

L'hypothèse de normalité de la distribution des niveaux de bruit globaux des séries mesurées initiales est acceptable.

Après transformation de la durée d'intégration élémentaire à 1 min, la figure 1.1 présente l'ensemble des séries mesurées.

Ligne - série mesurée	Période de mesurage		Résultat du mesurage	
	Date	Poste	Durée de mesurage T, en min	Niveau de bruit $L_{Aeq,T}(série)$ en dB(A)
Fsm -1	11/06/2002	Après midi	324	85,6
Fsm - 2	12/06/2002	Après midi	419	85,8
Fsm -3	13/06/2002	Matin	429	88,3
F4t -1	11/06/2002	Après midi	346	85,2
F4t -2	12/06/2002	Après midi	432	85,7
F4t -3	13/06/2002	Matin	401	86,2
Fdr -1	11/06/2002	Après midi	318	84,7
Fdr -2	12/06/2002	Après midi	417	85,0
Fdr -3	13/06/2002	Matin	381	85,7
Fdr -4	13/06/2002	Après midi	312	86,3

Tableau 1.1 : GEH des Fraiseurs: Caractéristiques des périodes de mesurage de l'exposition au bruit

Désignation	Notation	Valeur
Nombre de séries mesurées	NS	10
Durée cumulée des mesures (hors pauses)	T	63,0 h (3779 min)
$L_{Aeq,T}$ Estimation du niveau moyen, en énergie, en dB(A)	$L_{Aeq,T}$	86,0
Moyenne arithmétique des NS valeurs $L_{Aeq,T}$, en dB(A)	L_{ar}	85,8
Ecart type des NS valeurs $L_{Aeq,T}(série)$, en dB(A)	S_L	1,0
Lhn = Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale, $L_{hn} = L_{ar} + 0,115 * S_L^2$	Lhn	86,0
Normalité acceptable ?	-	Oui
Incertitude d'échantillonnage du GEH, en dB(A)	$U_1(réf)$	0,6
Incertitude d'appareillage	U_2	1,5
Incertitude globale, $U = (U_1(réf)^2 + U_2^2)^{0,5}$	U	1,6
Niveau de bruit élargi, dB(A), $L^*(E) = L_{Aeq,T} + U$	$L^*(E)$	87,6

Tableau 1.2 : GEH des Fraiseurs : statistiques élémentaires des séries mesurées

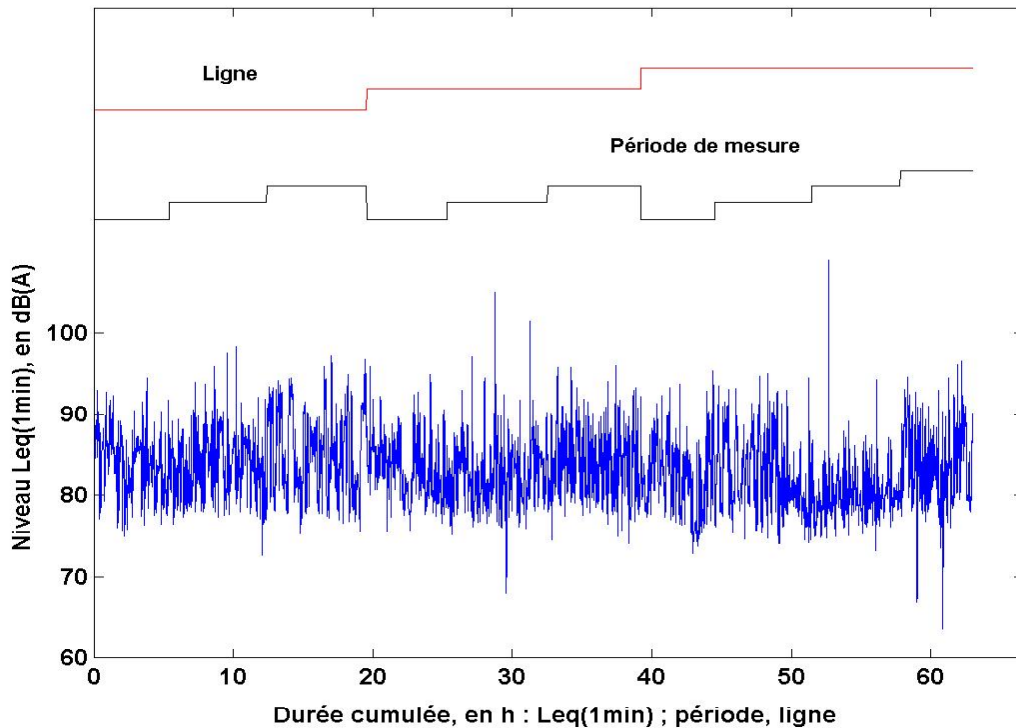


Figure 1.1 : GEH des Fraiseurs - Ensemble des mesures : niveaux de bruit $L_{Aeq}(1 \text{ min})$ et repérage des mesures par ligne et période de mesure.

1.3 Variations de l'exposition au bruit durant le temps

L'ensemble des données mesurées, $L_{Aeq,dT}$, a été analysé à quatre durées d'intégration dT (ou support en temps) de 1 min, 10 min, 30 min et 60 min. Les résultats suivants sont fournis :

- ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$: figure 1.2 ;
- histogrammes des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$: figure 1.3 ;
- variogrammes (qui renseignent sur l'auto corrélation des données) : figure 1.4 ;
- caractéristiques statistiques : tableau 1.3.

La validité de l'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ a été testée :

- graphiquement : la distribution normale, de même moyenne et écart type que celle des niveaux $L_{Aeq,dT}$ mesurés, a été tracée sur l'histogramme de la figure 1.3 (trait continu).
- numériquement : un test statistique a été appliqué pour savoir si l'hypothèse de normalité devait être rejetée (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %). Le résultat est indiqué dans le tableau 1.3 fournissant les caractéristiques statistiques.

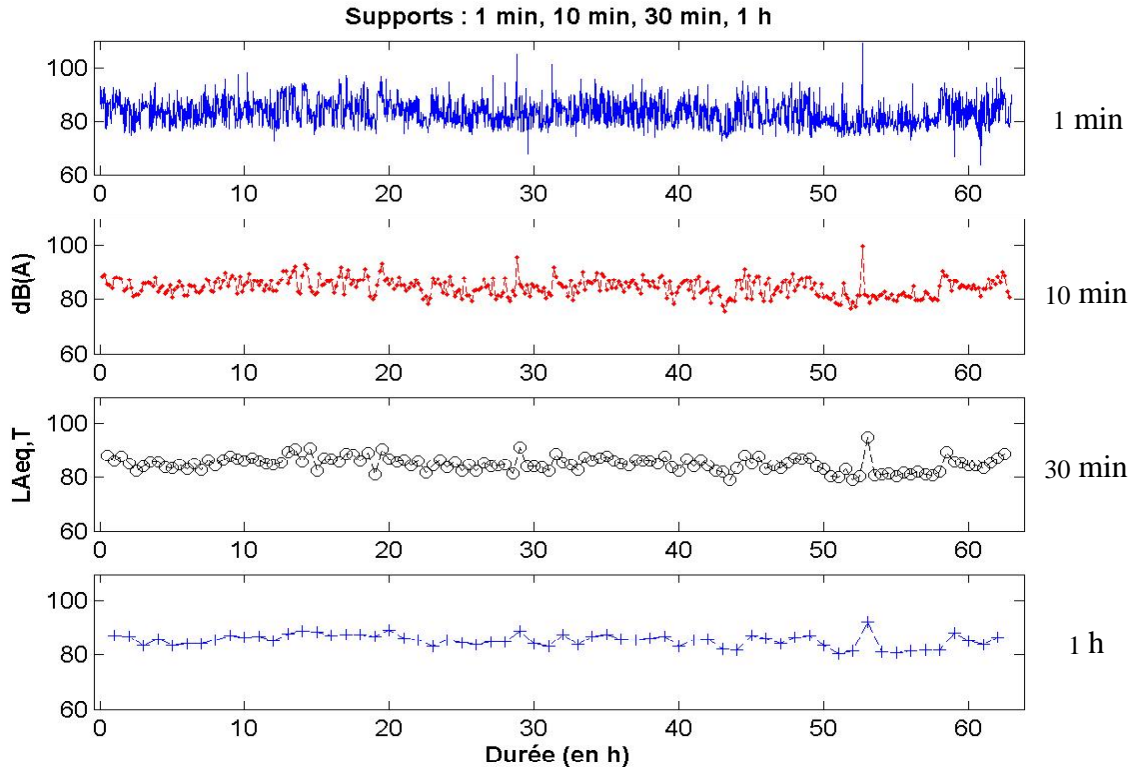


Figure 1.2 : GEH des Fraiseurs – Niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$, aux quatre durées d'intégration considérées (support $dT = 1$ min, 10 min, 30 min, 60 min).

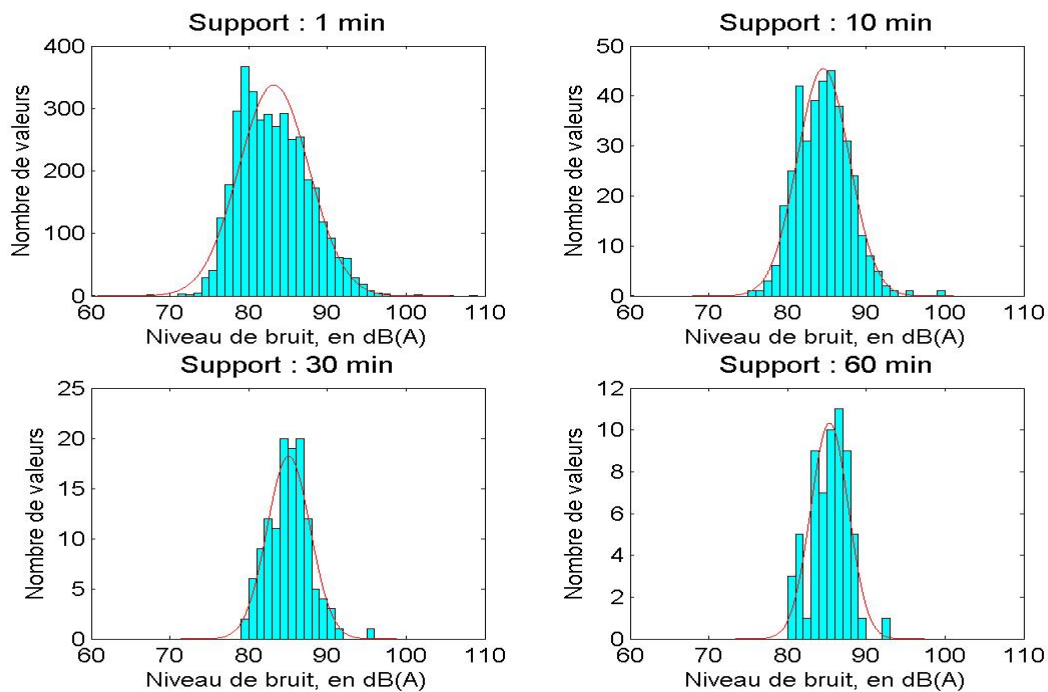


Figure 1.3 : GEH des Fraiseurs – Histogrammes des niveaux $L_{Aeq,dT}$ aux quatre durées d'intégration considérées (support $dT = 1$ min, 10 min, 30 min, 1h), dans l'ensemble des périodes mesurées, en dB(A)

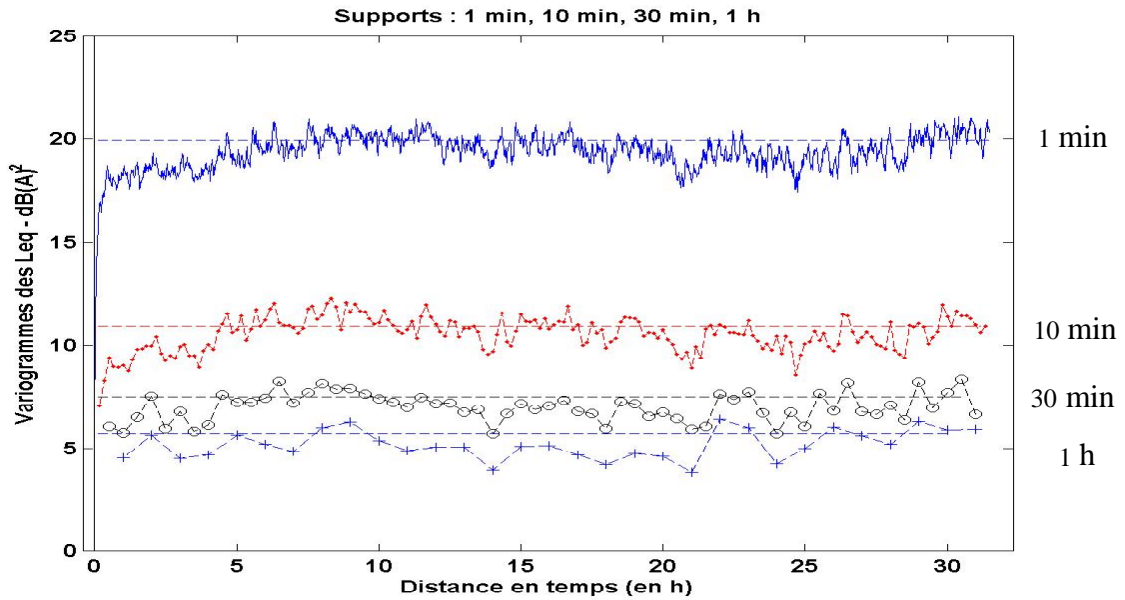


Figure 1.4 : GEH des Fraiseurs : Variogrammes, aux supports de 1 min, 10 min, 30 min, 1 h. En tiret : variance expérimentale des données (S_L^2) aux 4 supports considérés.

Durée d'intégration, dT en min	1	10	30	60
N, Nombre de valeurs $L_{Aeq,dT}$	3779	377	125	62
$L_{Aeq,T}$ Estimateur du bruit moyen, en énergie, en dB(A)	86,0	86,0	86,0	86,0
Moyenne arithmétique des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	83,2	84,5	85,1	85,3
Ecart type S_L des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	4,5	3,3	2,7	2,4
Lhn, Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale, en dB(A)	85,5	85,8	85,9	86,0
Normalité acceptable ?	Non	Oui	Oui	Oui
Incertitude d'échantillonnage $U_1(dT)$	0,2	0,3	0,5	0,6
Incertitude d'appareillage U_2	1,5	1,5	1,5	1,5
Incertitude globale U, dB(A)	1,5	1,5	1,6	1,6
Niveau de bruit élargi, en dB(A)				
$L^*_E(dT) = L_{Aeq,T} + U$	87,5	87,5	87,6	87,6
$L^*_{hn}(dT) = Lhn + U$	87,0	87,3	87,5	87,6

Tableau 1.3 : GEH des Fraiseurs - Caractéristiques statistiques de l'ensemble des données mesurées

1.4 Caractéristiques des tâches

Trois tâches ont été distinguées :

- Tâche 1 : réglages et opérations diverses,
- Tâche 2 : fraisage d'ébauche,
- Tâche 3 : fraisage de finition.

Parmi l'ensemble des données, la répartition du travail des opérateurs entre ces 3 tâches a été indiquée sur la figure 1.5.

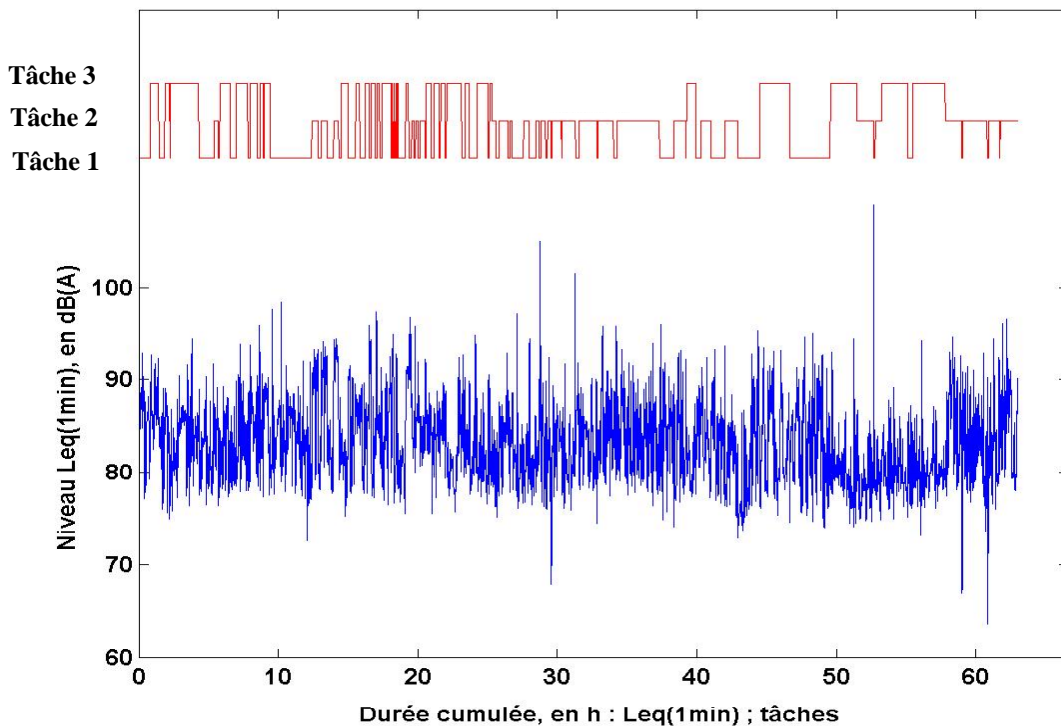


Figure 1.5 : GEH des fraiseurs - Séries mesurées avec repérage des 3 tâches principales (tâche 1 : réglages et divers ; tâche 2 : fraisage d'ébauche ; tâche 3 : fraisage de finition)

La figure 1.5 montre que l'alternance entre les 3 tâches est fréquente, car la durée élémentaire de chaque tâche est souvent voisine de 10 min. Toutefois, certaines opérations de réglage sont plus brèves, de durée voisine de 5 min. La durée maximum d'une tâche spécifique atteint parfois environ 2 h.

Chaque tâche a été analysée avec les descripteurs appliqués antérieurement à l'ensemble des données. Trois durées d'intégration des niveaux de bruit élémentaires ont été utilisées : 1 min, 5 min, 10 min. Les figures 1.6 à 1.8 présentent respectivement pour chaque tâche, les niveaux de bruit mesurés, les histogrammes et les variogrammes. Le tableau 1.4 regroupe les indications statistiques par tâche.

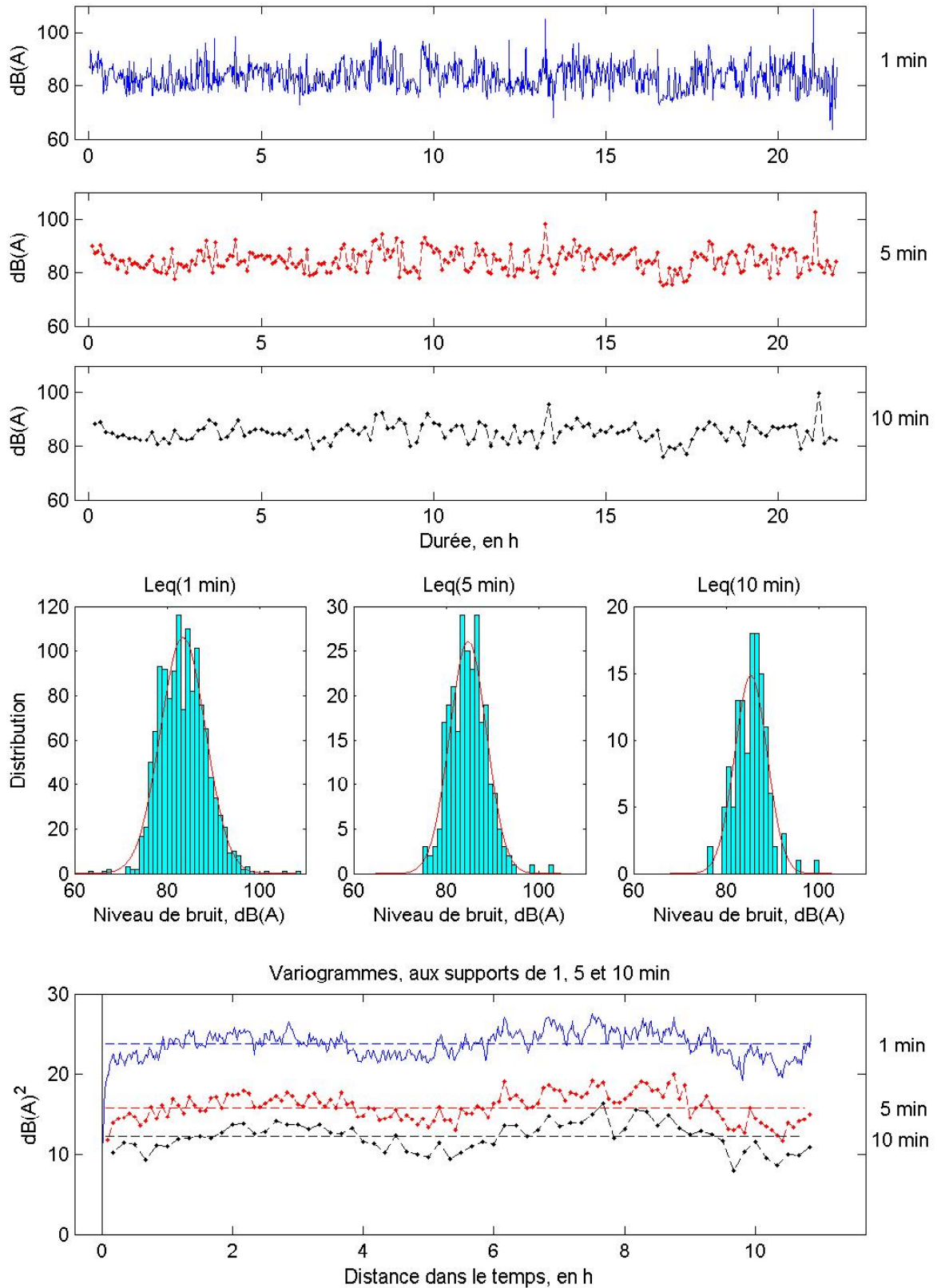


Figure 1.6 : GEH des Fraiseurs - Caractéristiques de la tâche 1 : Réglages et opérations diverses. Niveaux de bruit mesurés, histogrammes et variogrammes, à trois supports (1 min, 5 min, 10 min)..

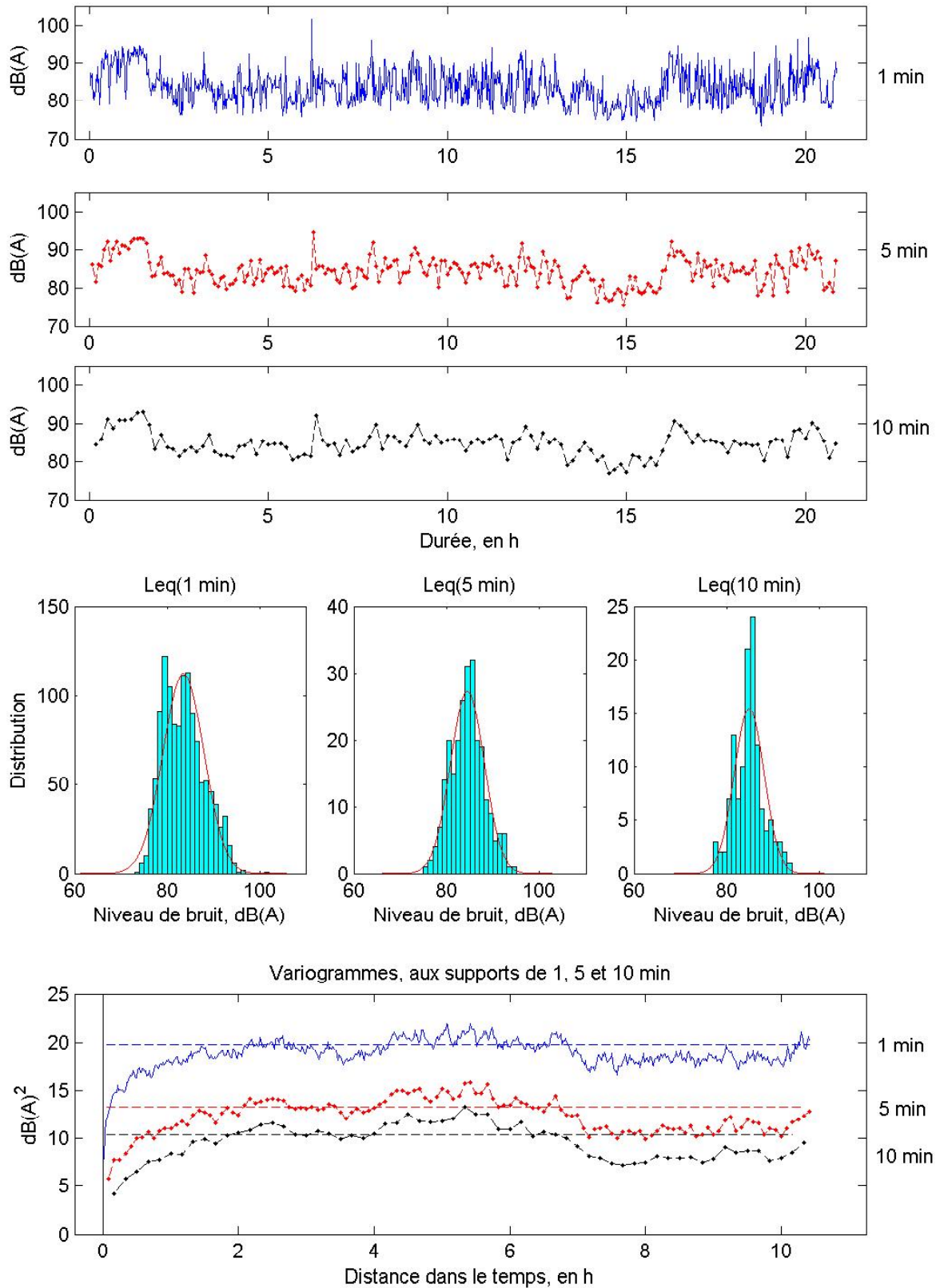


Figure 1.7 : GEH des Fraiseurs - Caractéristiques de la tâche 2 : Fraisage d'ébauche. Niveaux de bruit mesurés, histogrammes et variogrammes, à trois supports (1 min, 5 min, 10 min).

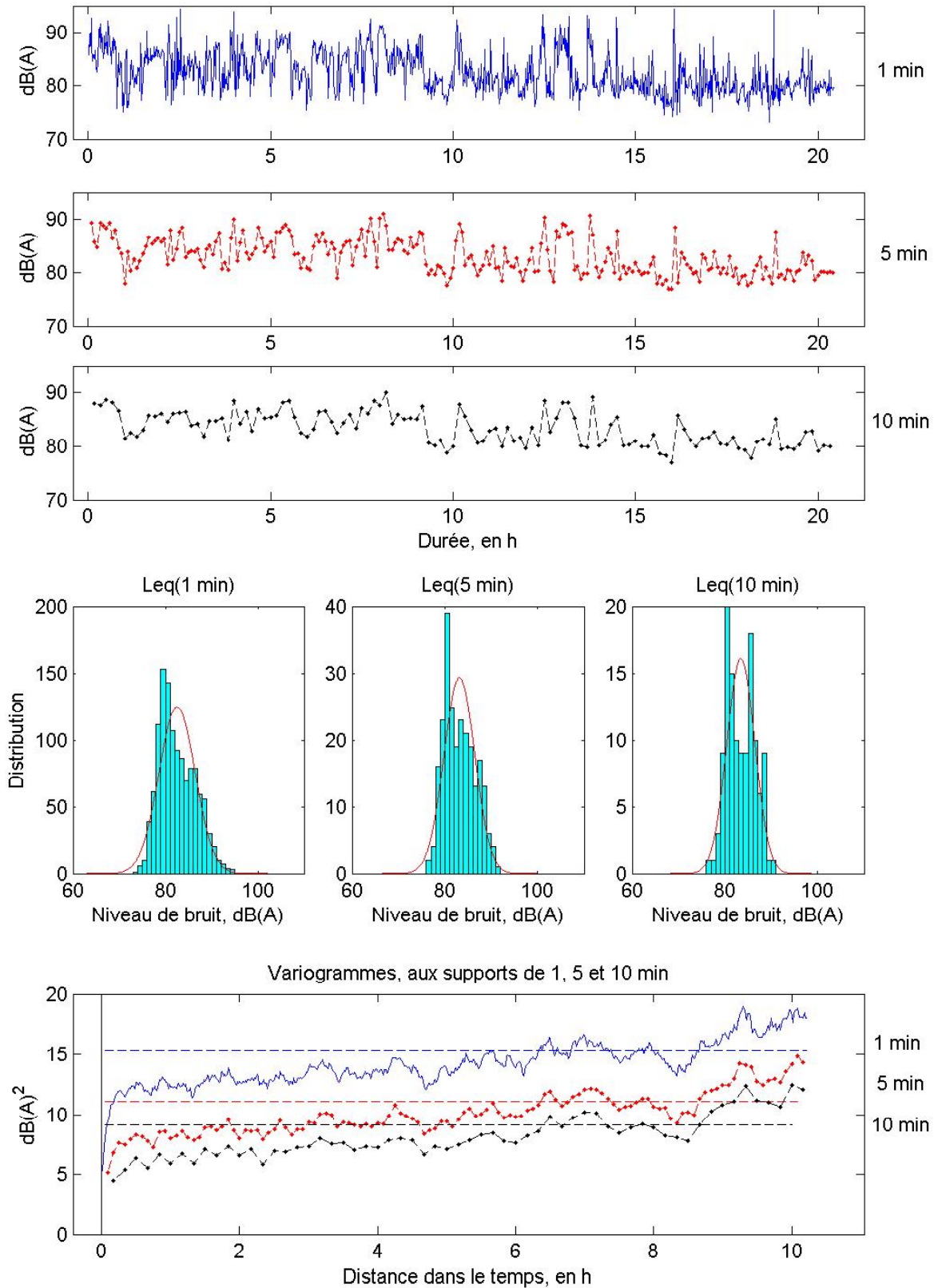


Figure 1.8 : GEH des Fraiseurs - Caractéristiques de la tâche 3 : Fraisage de finition. Niveaux de bruit mesurés, histogrammes et variogrammes, à trois supports (1 min, 5 min, 10 min).

Numéro de tâche	Tâche 1			Tâche 2			Tâche 3		
	1	5	10	1	5	10	1	5	10
dT, durée d'intégration, en min	1	5	10	1	5	10	1	5	10
N, Nombre de valeurs	1302	260	130	1251	250	125	1226	245	122
$L_{Aeq,T}$ Estimateur du bruit moyen, en énergie, en dB(A)	87,1	87,1	87,1	86,1	86,1	86,1	84,5	84,5	84,5
L_{ar} Moyenne arithmétique, en dB(A)	83,5	84,7	85,3	83,6	84,5	84,8	82,5	83,1	83,4
S_L Ecart type des N valeurs, en dB(A)	4,9	4,0	3,5	4,4	3,6	3,2	3,9	3,3	3,0
L_{hn} Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale, dB(A)	86,2	86,5	86,7	85,8	86,0	86,0	84,3	84,4	84,5
Normalité acceptable ?	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
$U_1(dT)$ Incertitude d'échantillonnage	0,3	0,5	0,6	0,3	0,5	0,6	0,2	0,4	0,5
U_2 Incertitude d'appareillage	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
U Incertitude globale, dB(A)	1,5	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6
Niveau de bruit élargi (tâche) = $L^*_E(dT) = L_{Aeq,T} + U$ $L^*_{hn}(dT) = L_{hn} + U$	88,6 87,8	88,6 88,1	88,7 88,3	87,6 87,4	87,6 87,6	87,7 87,6	86,0 85,8	86,0 86,0	86,1 86,1

Tableau 1.4 : GEH des Fraiseurs – Caractéristiques statistiques par tâche. (T1 = Réglages ; T2 = Fraisage d'ébauche ; T3 = Fraisage de finition)

L'exposition globale des fraiseurs a été recomposée, à l'aide des niveaux de bruit élargi (indiqués au tableau 1.4) et des durées relatives des tâches. Le tableau 1.5 fournit les résultats, aux supports de 1 min, 5 min et 10 min.

Durée d'intégration, en min	1	5	10
Niveau de bruit élargi global (en énergie), dB(A)	87,5	87,6	87,6
Niveau de bruit élargi global (sous hypothèse de normalité), dB(A)	87,1	87,3	87,5

Tableau 1.5 : GEH des fraiseurs - Estimations du niveau de bruit élargi, après recomposition des tâches

1.5. Discussion - conclusion

Examinons en premier lieu la validité de l'hypothèse initiale : l'homogénéité de l'exposition au bruit du groupe des fraiseurs. Trois résultats sont à prendre en compte :

- Ecart type des 10 niveaux $L_{Aeq,T}$ globaux par séries mesurées initiales : $S_L = 1$ dB(A) (cf tableau 1.2).
- Analyse de variance : aucun facteur susceptible d'expliquer des écarts significatifs entre série n'a été mis en évidence.
- Structure de variabilité en temps des données : aucune dérive dans le temps n'apparaît, au-delà de la distance en temps de 5 h sur les variogrammes (figure 1.4).

Dans ces conditions, on peut valider l'hypothèse initiale d'homogénéité de ce groupe de travailleurs.

Dispose-t-on, pour ce GEH, d'une estimation de l'exposition au bruit à long terme ? La structure de variabilité en temps des données étant très stable dans le domaine étudié (63 h), une extrapolation du résultat au-delà des limites de ce domaine est possible sans risquer de biaiser le résultat. On peut donc considérer qu'on dispose, pour ce GEH, d'une estimation à long terme, valide tant que les conditions d'exposition au bruit de ce groupe de fraiseurs restent comparables à celles de la période étudiée.

Examinons l'hypothèse d'indépendance des mesures. Elle est acceptable à partir de la distance temporelle au-delà de laquelle les données ne sont plus auto-corrélées, ce qui se traduit par un palier sur les variogrammes de la figure 1.4. Pour le GEH des fraiseurs, la convergence des variogrammes vers la variance expérimentale s'effectue à un palier situé à la distance de 5 h. Toutefois, un examen détaillé des variogrammes aux supports de 1 et 10 min montre la présence d'un premier palier, situé à la distance de 30 min. On en conclut que l'hypothèse de non corrélation sera acceptable dès que les mesures seront séparées au minimum de 30 min.

L'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit des séries mesurées initiales a été acceptée. Cette hypothèse a été appliquée aussi à l'ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ mesurés, aux 4 durées d'intégration considérées (1, 10, 30 et 60 min : tableau 1.3). L'hypothèse de normalité est acceptable dans tous les cas, sauf au support de 1 min.

L'effet de la durée d'intégration dT sur la variabilité du bruit a été étudié en recomposant les séries $L_{Aeq,dT}$ de bruit mesuré avec des durées dT comprises entre 1 min et 60 min. L'accroissement de dT se traduit par le resserrement des histogrammes de la figure 1.3. Dans les résultats numériques (tableau 1.3), l'effet de la durée d'intégration est contrasté, selon l'indicateur considéré : élevé quand on considère l'écart type en dB(A) des valeurs (S_L passe de

4,5 à 2,4 dB(A)), cet effet n'excède pas 0,4 dB(A) sur les différentes valeurs de $U_1(dT)$, l'incertitude d'échantillonnage du GEH au support dT.

Les résultats de l'analyse par tâche (tableau 1.4) montrent de grandes similitudes entre tâches, sur plusieurs aspects :

- la durée relative (chaque tâche occupe environ 33 % du temps),
- le niveau de bruit moyen ($L_{Aeq,T}$ compris entre 84,5 et 87,1 dB(A)),
- l'amplitude de variation du bruit moyen (S_L compris entre 3,9 et 4,9 dB(A) quand dT vaut 1 min).

Le niveau de bruit élargi estimé à l'aide des séries initiales (tableau 1.2) s'élève à 87,6 dB(A). Quand le niveau de bruit élargi est estimé à l'aide des données analysées globalement aux supports de 1 à 60 min (tableau 1.3) ou après recombinaison des tâches (tableau 1.5), le résultat est identique à la valeur précédente, à 0,1 dB(A) près, sous réserve de prendre les estimations basées sur la moyenne en énergie. Quand la moyenne est effectuée sous hypothèse de normalité, les diverses estimations des niveaux de bruit élargis diffèrent de 0,6 dB(A). La meilleure estimation du bruit élargi pour ce GEH s'élève donc à 87,6 dB(A).

Pour ce GEH, quelle que soit la méthode d'estimation appliquée, les niveaux de bruit élargis ne s'écartent pas de plus de 0,6 dB(A). Ce résultat a été obtenu dans un GEH où les similitudes entre tâches sont importantes et où l'hypothèse de normalité a toujours été validée.

Conclusions :

- Les données mesurées (durant 63 h), suffisent pour bien quantifier la structure de variation en temps du bruit reçu par le GEH des fraiseurs ;
- L'hypothèse d'homogénéité de l'exposition dans ce groupe peut être validée.
- L'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit est acceptable pour les résultats globaux des séries mesurées initialement. Dans les séries recomposées avec différentes durées d'intégration dT, l'hypothèse de normalité a été rejetée quand dT vaut 1 min, et acceptée quand dT vaut 10 min, 30 min ou 60 min.
- Le niveau moyen du bruit reçu par ce GEH, (hors incertitude), est estimé à 86,0 dB(A).
- L'incertitude globale sur ce niveau moyen est de 1,6 dB(A). Elle se décompose ainsi :
 - o incertitude d'échantillonnage du bruit pour ce GEH, estimée à 0,6 dB(A),
 - o incertitude d'appareillage de 1,5 dB(A).
- L'estimation finale du niveau de bruit élargi s'élève à 87,6 dB(A). Elle est basée sur les séries mesurées initiales.
- La structure temporelle de variabilité du bruit de ce GEH permet de considérer que le niveau de bruit élargi peut être extrapolé au-delà du domaine temporel observé, tant que les circonstances d'exposition au bruit de ce GEH restent semblables.
- Dans ce GEH, 3 tâches furent distinguées : réglages, fraisage d'ébauche, fraisage de finition. Ces tâches ont pratiquement la même durée relative quotidienne ; les niveaux de bruit moyen présentent des écarts, entre tâches, inférieurs à 3 dB(A).

2. CARACTERISTIQUES DES DONNEES DU GEH « MONTEURS »

2.1. Travail effectué

L'assemblage d'ensembles mécaniques très complexes est effectué sur des bancs de montage. Le groupe des monteurs étudié englobe 24 personnes, totalement polyvalentes, affectées à 3 bancs de montage d'ensembles identiques. Simultanément, deux monteurs travaillent sur un même banc. Quatre autres bancs de montage sont situés à proximité ; leurs opérateurs y montent des ensembles différents et n'ont pas été inclus dans le groupe de monteurs étudiés.

Trois tâches, très différentes en durée et en niveau de bruit, ont été distinguées :

- Montage manuel : cette tâche, non bruyante en elle-même, occupe la majorité du temps de travail ; sa durée relative a été évaluée à 93 % du temps.
- Emploi d'outils pneumatiques (pour du vissage et des usinages de retouche) : cette opération est bruyante, mais brève ; sa durée relative a été évaluée à 4 %.
- Rivetage : cette opération très bruyante est effectuée lors de phases très spécifiques d'assemblage ; sa durée relative a été évaluée à 3 %.

L'évaluation de la nature et de la durée relative des tâches a été effectuée par des interviews (description du travail prescrit, évaluation de la durée cumulée des tâches), et par observation du travail des monteurs.

Le travail des monteurs ne s'inscrit pas dans un cycle quotidien (ou de 8 h), mais dans un cycle qui dure environ 50 h, défini par la durée d'assemblage complète d'un produit.

2.2. Séries mesurées

Les mesurages ont été effectués sur les 3 bancs de montage, en sélectionnant un volontaire parmi les deux monteurs affectés à chaque banc, et en répartissant les mesures parmi 5 périodes différentes de travail.

Les caractéristiques des 13 séries mesurées ont été indiquées au tableau 2.1.

Les séries mesurées ont fait l'objet d'une première analyse statistique, portant sur le niveau de bruit $L_{Aeq,T}$ global de chaque série. Une analyse de variance a été appliquée aux données du tableau 2.1, pour mettre en évidence l'influence éventuelle des facteurs « période de mesure » ou « banc de montage » sur les niveaux de bruit ; elle a montré qu'aucun de ces deux facteurs n'a d'effet statistiquement significatif sur le niveau de bruit, au seuil de confiance de 95 %. L'hypothèse de normalité de la distribution des niveaux de bruit globaux des séries mesurées initiales a été acceptée, après application d'un test statistique (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %).

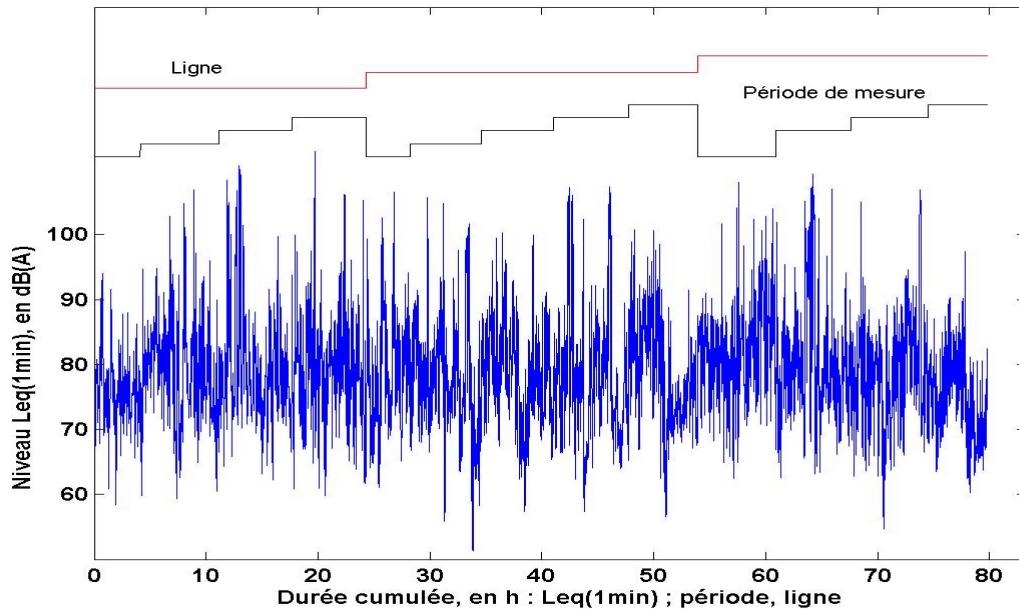
Les statistiques élémentaires sur les séries initiales ont été regroupées dans le tableau 2.2.

Après transformation de la durée d'intégration élémentaire à 1 min, la figure 2.1 présente l'ensemble des séries mesurées.

Repère	Période de mesurage		Résultat du mesurage	
	Date	Poste	Durée de mesurage T, en min	Niveau de bruit $L_{Aeq,T}$ en dB(A)
B3C-1	11/06/2002	Matin	247	80,2
B3C-2	11/06/2002	Après midi	423	88,0
B3C-3	12/06/2002	Matin	392	94,6
B3C-4	12/06/2002	Après midi	396	91,8
B4D-1	11/06/2002	Matin	234	88,7
B4D-2	11/06/2002	Après midi	382	88,7
B4D-3	12/06/2002	Matin	387	85,0
B4D-4	12/06/2002	Après midi	402	91,8
B4D-5	13/06/2002	Matin	371	86,1
B4E-1	11/06/2002	Matin	422	89,5
B4E-2	12/06/2002	Matin	403	93,5
B4E-3	12/06/2002	Après midi	412	89,3
B4E-4	13/06/2002	Matin	317	80,3

Tableau 2.1 : GEH des Monteurs: Caractéristiques des périodes de mesurage de l'exposition au bruit

Nombre de séries mesurées	NS	13
Durée cumulée des mesures (hors pauses)	T	79,8 h (4788 min)
$L_{Aeq,T}$: Estimation du niveau de bruit moyen, en énergie, en dB(A)	$L_{Aeq,T}$	90,2
Moyenne arithmétique des NS valeurs $L_{Aeq,T}$, en dB(A)	L_{ar}	88,3
Ecart type des NS valeurs $L_{Aeq,T}$ (série), en dB(A)	S_L	4,5
L_{hn} : Estimateur du niveau de bruit moyen, sous hypothèse normale, $L_{hn} = L_{ar} + 0,115 * S_L^2$	L_{hn}	90,6
Normalité acceptable ?	-	Oui
Incertitude d'échantillonnage du GEH, en dB(A)	$U_1(\text{réf})$	3,7
Incertitude d'appareillage	U_2	1,5
Incertitude globale, $U = (U_1(\text{réf})^2 + U_2^2)^{0,5}$	U	4,0
Niveau de bruit élargi, dB(A), $L^*(E) = L_{Aeq,T} + U$	L^*	94,2

Tableau 2.2 : GEH des Monteurs : statistiques élémentaires des séries mesurées**Figure 2.1** : GEH des Monteurs - Ensemble des mesures : niveaux de bruit $L_{Aeq}(1 \text{ min})$ et repérage des mesures par ligne et période de mesure.

2.3 Variations de l'exposition au bruit durant le temps

L'ensemble des données mesurées, $L_{Aeq,dT}$, a été analysé à quatre durées d'intégration dT (ou support en temps) de 1 min, 10 min, 30 min et 60 min. Les résultats suivants sont fournis :

- ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$: figure 2.2 ;
- histogrammes des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$: figure 2.3 ;
- variogrammes (qui renseignent sur l'auto corrélation des données) : figure 2.4 ;
- caractéristiques statistiques : tableau 2.3.

La validité de l'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ a été testée :

- graphiquement : la distribution normale, de même moyenne et écart type que celle des niveaux $L_{Aeq,dT}$ mesurés, a été tracée sur l'histogramme de la figure 2.3 (trait continu).
- numériquement : un test statistique a été appliqué pour savoir si l'hypothèse de normalité devait être rejetée (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %). Le résultat est indiqué dans le tableau 2.3 fournissant les caractéristiques statistiques.

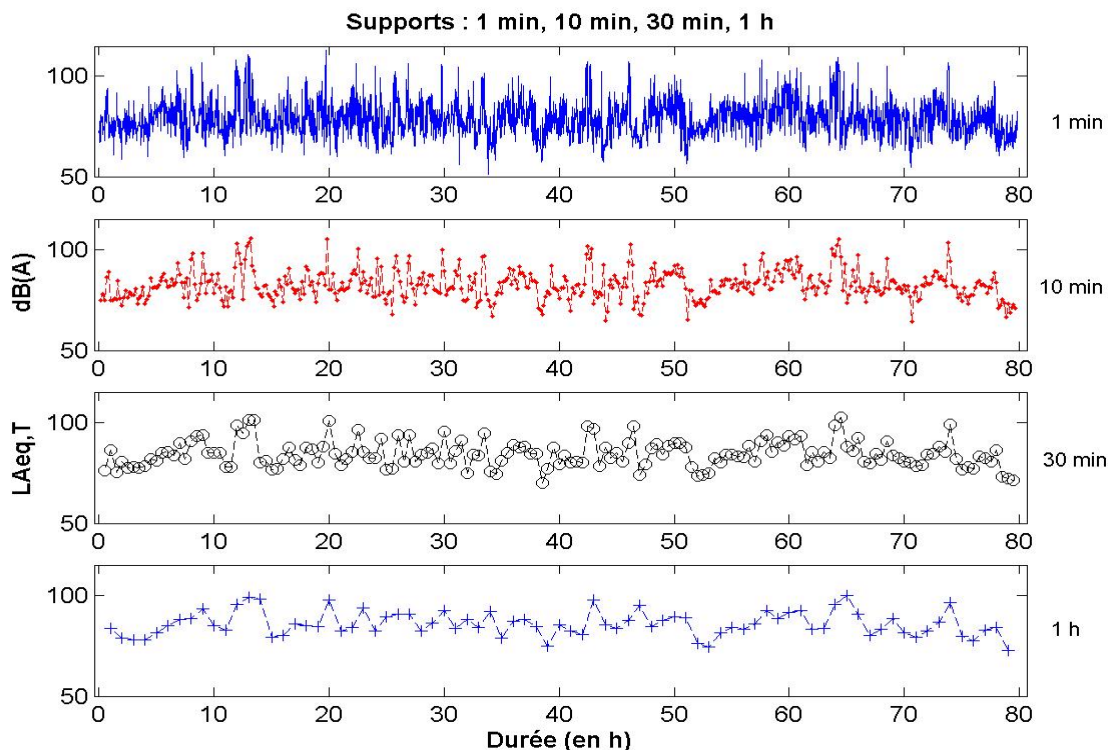


Figure 2.2 : GEH des Monteurs – Niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ mesurées, à quatre durées d'intégration, $dT = 1 \text{ min}, 10 \text{ min}, 30 \text{ min}, 60 \text{ min}$.

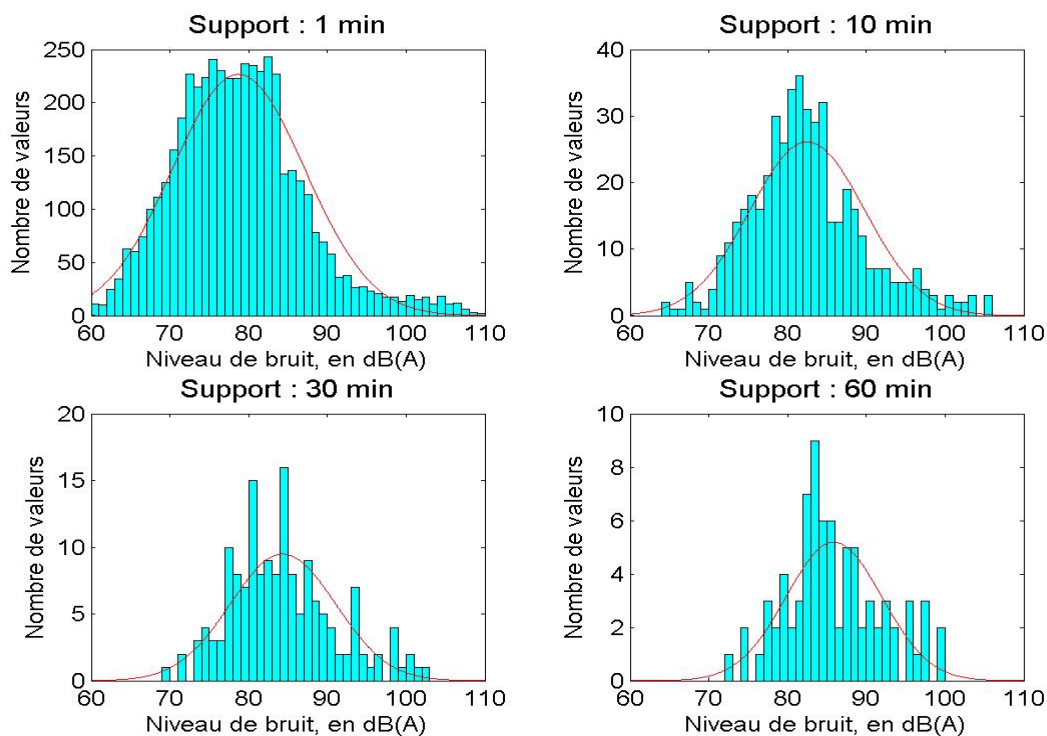


Figure 2.3 : GEH des Monteurs – Histogrammes des niveaux $L_{Aeq,T}$ calculés à quatre supports d'intégration (1 min, 10 min, 30 min, 1h), dans l'ensemble des périodes mesurées, en dB(A)

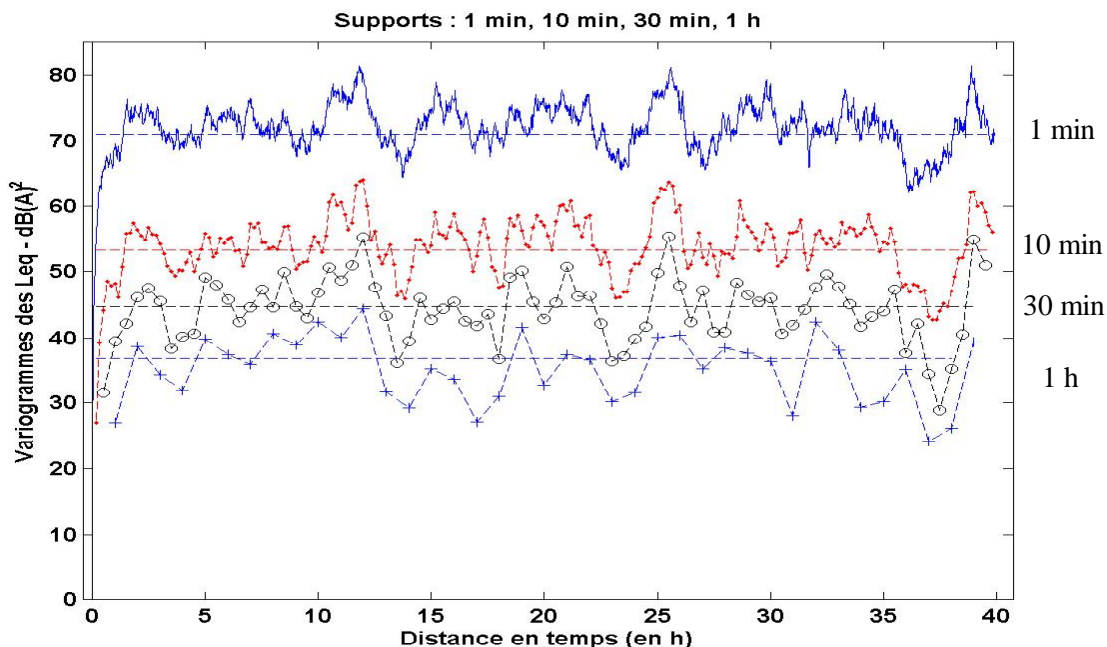


Figure 2.4 : Variogrammes, aux supports de 1 min, 10 min, 30 min, 1 h. En tiret : variance expérimentale des données (S_L^2) aux 4 supports considérés.

Durée d'intégration, dT en min	1	10	30	60
N, Nombre de valeurs $L_{Aeq,dT}$	4788	478	159	79
$L_{Aeq,T}$ Estimateur du bruit moyen, en énergie, en dB(A)	90,2	90,2	90,2	90,2
Moyenne arithmétique des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	78,7	82,5	84,3	85,9
Ecart type S_L des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	8,4	7,3	6,7	6,1
Lhn Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale, en dB(A)	86,9	88,6	89,5	90,1
Normalité acceptable ?	Non	Non	Non	Non
Incertitude d'échantillonnage $U_1(dT)$	0,4	0,9	1,4	1,8
Incertitude d'appareillage U_2	1,5	1,5	1,5	1,5
Incertitude globale U	1,5	1,8	2,1	2,4
Niveau de bruit élargi, en dB(A)				
$L^*_E(dT) = L_{Aeq,T} + U$	91,7	92,0	92,3	92,6
$L^*_{ln}(dT) = Lhn + U$	88,4	90,4	91,6	92,5

Tableau 2.3 : GEH des Monteurs - Caractéristiques statistiques de l'ensemble des données mesurées

2.4 Caractéristiques des tâches

Trois tâches ont été distinguées :

- tâche 1 : montage ;
- tâche 2 : usage d'outils pneumatiques d'assemblage ;
- tâche 3 : rivetage.

Dans l'ensemble des données mesurées, ces tâches sont réparties dans le temps selon le schéma de la figure 2.5.

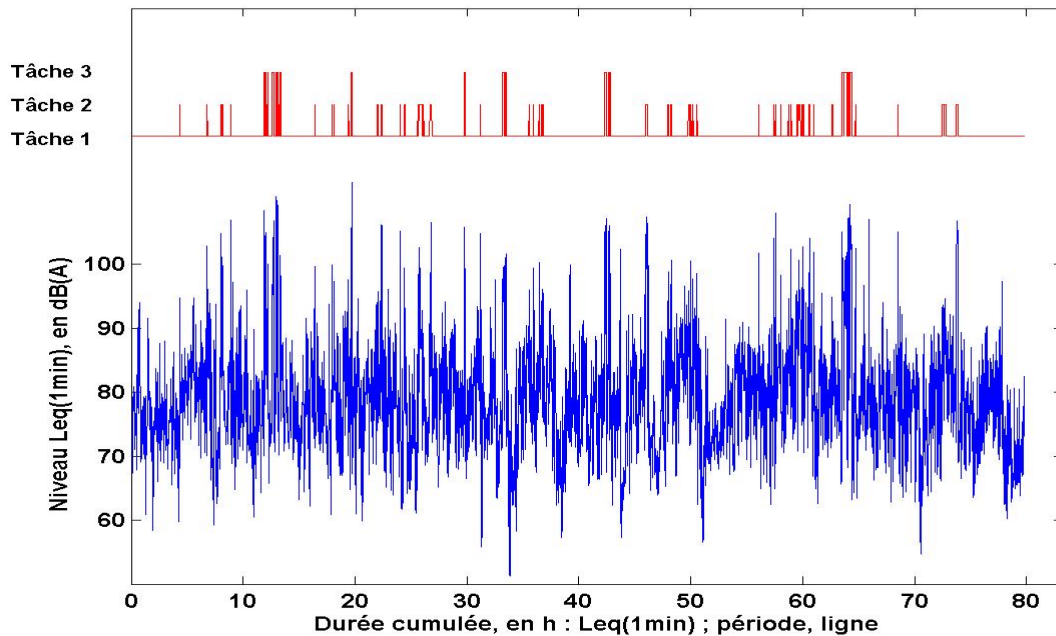


Figure 2.5 : GEH des monteurs – Séries mesurées avec repérage des 3 tâches principales (tâche 1 : montage ; tâche 2 : usage d'outils pneumatiques ; tâche 3 : rivetage).

La figure 2.5 montre que le montage manuel (tâche 1) occupe la majorité du temps de travail des monteurs. L'usage d'outils pneumatiques d'assemblage (tâche 2) est épisodique et de durée généralement limitée, de l'ordre de la minute. Le rivetage (tâche 3) est effectué durant quelques périodes spécifiques d'assemblage, sur des durées voisines de 10 à 30 min.

Chaque tâche a été analysée avec les descripteurs appliqués antérieurement à l'ensemble des données. Trois durées d'intégration des niveaux de bruit élémentaires ont été utilisées : 1 min, 5 min, 10 min. Les figures 2.6 à 2.8 présentent respectivement pour chaque tâche, les niveaux de bruit mesurés, les histogrammes et les variogrammes. Le tableau 2.4 regroupe les indications statistiques par tâche.

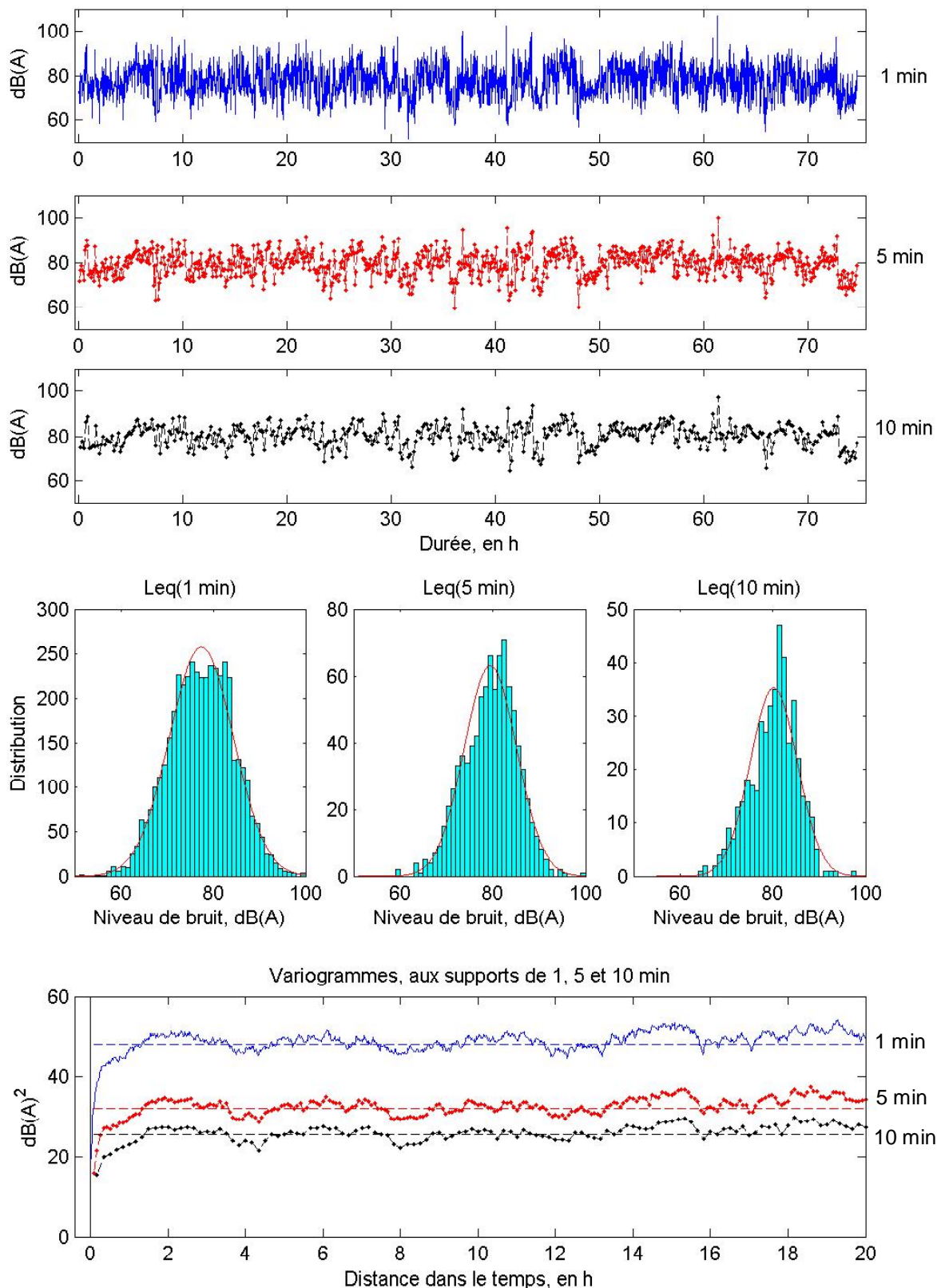


Figure 2.6 : GEH des Monteurs - Caractéristiques de la tâche 1 : Montage. Niveaux de bruit mesurés, histogrammes et variogrammes, à trois supports (1 min, 5 min, 10 min).

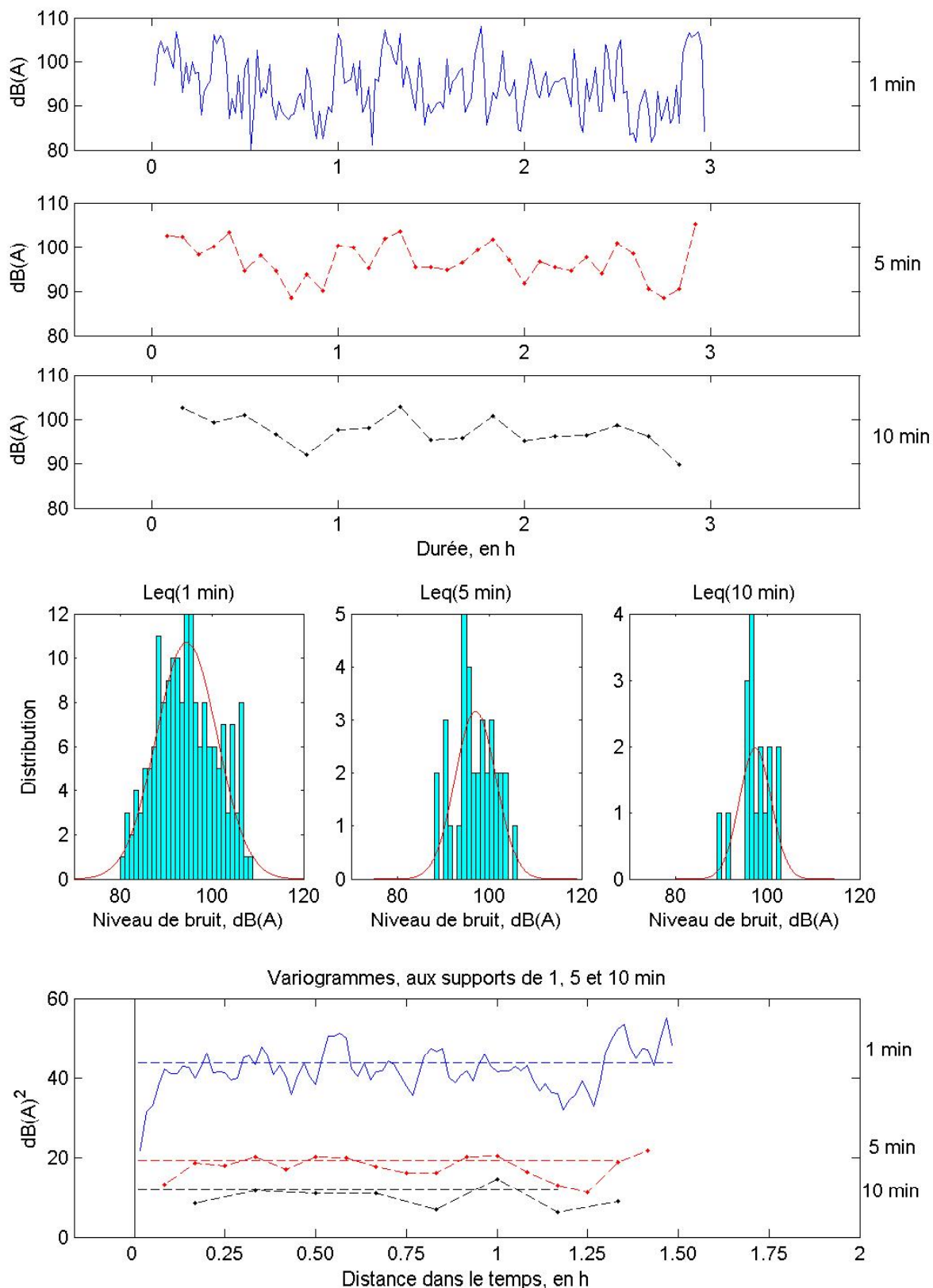


Figure 2.7 : GEH des Monteurs - Caractéristiques de la tâche 2 : Usage d’outils pneumatiques. Niveaux de bruit mesurés, histogrammes et variogrammes, à trois supports (1 min, 5 min, 10 min). N.B. : les distributions relatives à $dT = 5$ et 10 min ont été tracées ici au pas de 1 dB, trop fin pour le nombre de données. La comparaison « visuelle » avec la distribution normale est dans ce cas peu valide, il faut lui préférer le test numérique.

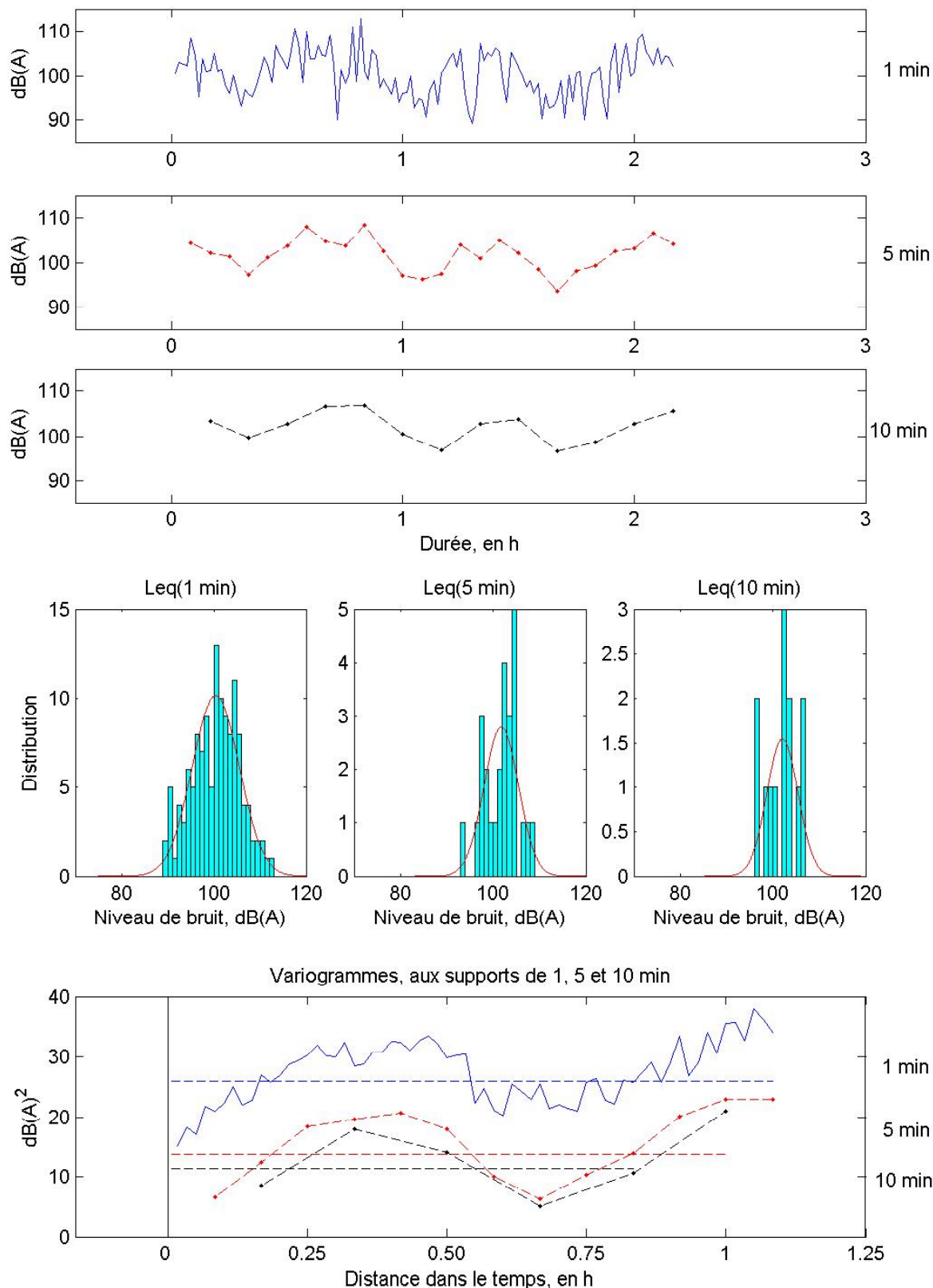


Figure 2.8 : GEH des Monteurs - Caractéristiques de la tâche 3 : Rivetage. Niveaux de bruit mesurés, histogrammes et variogrammes, à trois supports (1 min, 5 min, 10 min). N.B. : les distributions relatives à $dT = 5$ et 10 min ont été tracées ici au pas de 1 dB, trop fin pour le nombre de données. La comparaison « visuelle » avec la distribution normale est dans ce cas peu valide, il faut lui préférer le test numérique.

Numéro de tâche	Tâche 1			Tâche 2			Tâche 3		
	1	5	10	1	5	10	1	5	10
dT Durée d'intégration, en min	1	5	10	1	5	10	1	5	10
N, Nombre de valeurs $L_{Aeq,dT}$	4480	896	448	178	35	17	130	26	13
$L_{Aeq,T}$ Estimation du bruit moyen, en énergie, en dB(A)	82,9	82,9	82,9	99,1	99,0	98,5	103,2	103,2	103,2
Lar, Moyenne arithmétique, en dB(A)	77,5	79,5	80,2	94,6	97,0	97,4	100,4	101,8	102,1
S_L Ecart type des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	6,9	5,7	5,1	6,6	4,4	3,4	5,1	3,7	3,4
Lhn, Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale, en dB(A)	83,0	83,2	83,2	99,6	99,2	98,7	103,4	103,4	103,4
Normalité acceptée ?	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
$U_1(dT)$ Incertitude d'échantillonnage	0,3	0,5	0,5	1,3	1,8	2,0	1,1	1,7	2,4
U_2 Incertitude d'appareillage	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
U Incertitude globale, dB(A)	1,5	1,6	1,6	2,0	2,3	2,5	1,8	2,3	2,8
Niveau de bruit élargi (tâche) = $L^*_E(dT) = L_{Aeq,T} + U$ $L^*_{ln}(dT) = Lhn + U$	84,4 84,5	84,5 84,7	84,5 84,8	101,1 101,6	101,3 101,6	101,0 101,2	105,0 105,3	105,4 105,6	106,0 106,2

Tableau 2.4 : GEH des Monteurs – Caractéristiques statistiques par tâche (1 = Montage ; 2 = Usage d'outils pneumatiques ; 3 = Rivetage)

L'exposition globale des fraiseurs a été recomposée, à l'aide des niveaux de bruit élargi (indiqués au tableau 2.4) et des durées relatives des tâches. Le tableau 2.5 fournit les résultats, aux supports de 1 min, 5 min et 10 min.

Durée d'intégration, en min	1	5	10
Niveau de bruit élargi global (en énergie), dB(A)	92,0	92,2	92,5
Niveau de bruit élargi global (sous hypothèse de normalité), dB(A)	92,4	92,5	92,8

Tableau 2.5 : GEH des Monteurs - Estimations du niveau de bruit élargi, après recombinaison des tâches

2.5. Discussion - conclusion

Examinons en premier lieu l'hypothèse initiale d'homogénéité de l'exposition au bruit du groupe des monteurs. Elle a été appliquée successivement aux 3 types de résultats disponibles :

- Les 13 séries mesurées initiales. Leur durée moyenne étant d'environ 6 h, ces séries reflètent la variabilité entre journées de travail de l'exposition des monteurs. Les niveaux de bruit globaux des séries mesurées (cf tableaux 2.1 et 2.2) sont très dispersés : écart entre niveau maxi et mini de 14,4 dB(A) ; écart type de 4,5 dB(A). Les mesures de bruit montrent une forte variabilité d'un jour à l'autre de travail. Appliquée aux séries mesurées durant environ 6 h, l'hypothèse d'homogénéité doit être rejetée.
- Les niveaux de bruit dans l'ensemble des périodes mesurées. Quand la durée d'intégration varie de 1 à 60 min, l'écart type S_L reste supérieur à 6,1 dB(A) (cf tableau 2.3), indiquant une variabilité élevée. Quand on examine les variogrammes (figure 2.4) à longue distance de l'origine, des fluctuations autour de la variance expérimentale apparaissent, mais leur tendance reste stable, ce qui peut faire accepter l'hypothèse d'homogénéité des données, après leur cumul durant 80 h.
- Les niveaux de bruit mesurés dans chaque tâche principale. Examinons tout d'abord les variogrammes des tâches 1 et 2 (figures 2.6 et 2.7) : ils sont stables, dans la fenêtre temporelle étudiée ici, et convergent nettement vers la variance expérimentale. L'hypothèse d'homogénéité est donc acceptable pour ces 2 tâches. Dans le cas de la 3^{ème} tâche, le rivetage (figure 2.8), le variogramme a, par contre, une structure périodique ; elle s'explique en partie par la répartition temporelle très spécifique des 2 h de rivetage parmi les 80 h de mesure, mais ne permet pas de valider l'hypothèse d'homogénéité de l'exposition dans le cas de la tâche de rivetage.

On peut en conclure que l'hypothèse d'homogénéité doit être rejetée dans le cas des séries mesurées initiales car la variabilité de l'exposition au bruit, entre journées de travail, est très élevée. Elle est acceptable sur l'ensemble du domaine étudié ici, soit 80 h. Elle est acceptable pour les tâches 1 et 2, mais paraît peu acceptable pour la tâche 3.

Dispose-t-on, pour ce GEH, d'une estimation de l'exposition au bruit à long terme ? La seule réserve à une extrapolation du résultat, au-delà des 80 h de mesures considérées ici, viendrait de la tâche de rivetage. Il est clair qu'il serait souhaitable de renouveler le mesurage durant la tâche de rivetage pour garantir la fiabilité d'une estimation à long terme. Toutefois, en considérant que le rivetage s'inscrit ici dans un processus de fabrication très strict et répétitif, on acceptera d'extrapoler le résultat de l'estimation au-delà du domaine étudié.

Examinons l'hypothèse d'indépendance des mesures. A proximité de leur origine, les variogrammes de la figure 2.4 montrent que la variance expérimentale est atteinte à une distance de 2 h. On en conclut donc que l'hypothèse d'indépendance sera acceptable quand les mesures seront séparées d'au moins 2 h.

L'hypothèse d'une distribution normale a été acceptée quand elle a été appliquée aux niveaux de bruit des séries mesurées initiales. Appliquée à l'ensemble des données mesurées $L_{Aeq,dT}$ recomposées par la durée d'intégration dT (tableau 2.3), l'hypothèse de normalité a été rejetée, quelque soit dT . Les histogrammes (figure 2.3) ont une étendue qui excède 50 dB(A) si dT est de 1 min ; elle reste voisine de 30 dB(A) si dT est compris entre 10 min et 1 h.

Par contre, quand les données sont analysées par tâche, l'hypothèse de normalité a été rejetée (tableau 2.4) pour la tâche 1, mais est acceptable pour les tâches 2 et 3. Ce résultat semble paradoxal quand on le rapproche des histogrammes, mais il peut s'expliquer par 2 commentaires :

- a) quand les effectifs sont très grands, ce qui est le cas de la tâche 1 (où $N > 450$) un faible écart avec la loi normale suffit pour que le test statistique rejette l'hypothèse ;
- b) quand les effectifs sont très réduits (cas des tâches 2 et 3), le pas de 1 dB utilisé pour tracer les histogrammes, qui convient pour la plupart des données, s'avère, ici, trop réduit, ce qui crée une impression visuelle de dispersion que ne confirme pas le test statistique.

L'effet de la durée d'intégration dT sur la variabilité du bruit se traduit par le resserrement des histogrammes, visible sur les données analysées globalement (figure 2.3) et analysées par tâche (figures 2.6 à 2.8).

L'exposition au bruit du groupe des monteurs durant leurs trois tâches principales a été évaluée ainsi (tableau 2.4) :

- montage manuel : niveau de bruit = 82,9 dB(A), durée relative = 93 % ;
- emploi d'outils pneumatiques : niveau de bruit = 99,1 dB(A), durée relative = 4 % ;
- rivetage : niveau de bruit = 103,2 dB(A), durée relative = 3 %.

Les trois tâches principales des monteurs sont donc très différentes en niveau de bruit et en durée relative. Avec ces valeurs, le niveau de bruit global de ce GEH s'élève à 90,2 dB(A).

Examinons enfin les différentes estimations du niveau du bruit élargi pour ce GEH :

- Dans le cas des séries initiales (tableau 2.2), l'estimation du niveau de bruit élargi s'élève à 94,2 dB(A). Elle est associée à une incertitude globale U de 4 dB(A), provenant principalement de l'incertitude d'échantillonnage du GEH [$U_1(\text{réf}) = 3,7$ dB(A)]. L'amplitude de cette incertitude d'échantillonnage du GEH s'explique par la tâche de rivetage : il a déjà été signalé que cette tâche très bruyante se renouvelait selon un cycle de production de 50 h, sans rapport avec les séries mesurées durant 8 h environ.
- Dans le cas de l'analyse globale des données (tableau 2.3), le niveau de bruit élargi varie de 91,7 et 92,6 dB(A), selon dT , quand on considère l'estimation basée sur la moyenne en énergie.
- Dans le cas de l'analyse par tâche (tableau 2.5) l'estimation du niveau de bruit élargi ne varie plus que de 92,0 à 92,5 dB(A).

Parmi ces 3 estimations du niveau de bruit élargi, la plus adaptée aux circonstances de l'exposition au bruit de ce GEH, paraît être celle qui s'appuie sur l'analyse par tâche. On

retiendra celle qui résulte du support le plus long ($dT = 10\text{min}$), fournissant le niveau de bruit élargi de 92,5 dB(A).

Conclusions :

- Le travail des monteurs comprend 3 tâches très différentes en durée relative et en niveau de bruit : le montage, l'usage d'outil pneumatique, le rivetage. La distinction de ces tâches est utile pour accroître la fiabilité de l'évaluation de l'exposition au bruit.
- Les données mesurées (durant 80 h ici), suffisent pour bien quantifier la structure de variation en temps du bruit reçu par le GEH des monteurs, même s'il serait souhaitable que le rivetage fasse l'objet de mesures complémentaires.
- L'hypothèse d'homogénéité de l'exposition dans ce groupe est rejetée d'une journée à l'autre de travail, mais peut être validée sur l'ensemble des 80 h étudiées ici, ainsi que pour 2 des 3 tâches principales de ce groupe de travailleurs.
- L'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit élémentaires $L_{Aeq,dT}$ en dB(A) est acceptable quand les tâches sont distinguées mais doit être rejetée quand les données sont analysées globalement.
- Le niveau moyen du bruit reçu par ce GEH, (hors incertitude), est estimé à 90,2 dB(A).
- L'incertitude globale sur ce niveau moyen est de 2,3 dB(A). Elle se décompose ainsi :
 - o incertitude d'échantillonnage du bruit pour ce GEH, estimée à 1,8 dB(A),
 - o incertitude d'appareillage de 1,5 dB(A).
- L'estimation finale du niveau de bruit élargi pour ce GEH est de 92,5 dB(A). Elle s'appuie sur les résultats de l'analyse par tâche.
- La structure temporelle de variabilité du bruit de ce GEH permet de considérer que le niveau de bruit élargi peut être extrapolé au-delà du domaine temporel observé, tant que les circonstances d'exposition au bruit de ce GEH restent semblables.

3. CARACTERISTIQUES DES DONNEES DU GEH « MENUISIERS »

3.1 Travail effectué

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.

Un suivi des tâches des menuisiers a été effectué, en se basant sur une observation continue du travail et sur des interviews. Les tâches ont été codées initialement selon l'utilisation de chaque machine, en incluant le temps d'usinage machine et les temps annexes (manutention des pièces avant et après usinage machine, outillage et réglage, contrôle, nettoyage de la machine en fin de fabrication). Ensuite, un regroupement du travail effectué sur 8 machines à bois (scies, ponceuses, toupie) a été réalisé, en isolant la machine la plus bruyante (la corroyeuse). Ceci a conduit aux trois tâches indiquées dans le tableau 3.1.

Les durées relatives par tâche, calculées sur l'ensemble des périodes mesurées, ont été indiquées dans le tableau 3.1. Ces valeurs ont été comparées aux durées relatives estimées sur une année, extraites de données statistiques récentes, disponibles dans l'entreprise. Le tableau 3.1 montre que les durées relatives par tâche durant les périodes mesurées sont très proches des valeurs annuelles, les écarts n'excèdent pas 2 %. On en conclut que les périodes mesurées sont bien représentatives du fonctionnement moyen de l'atelier durant un an, bien que la production de cette entreprise soit artisanale.

Nature de la tâche principale	Durée relative par tâche	
	dans l'ensemble des périodes mesurées	durant une année
Assemblages et finitions	49 %	51 %
Usage de huit machines à bois	35 %	34 %
Usage de la machine la plus bruyante (corroyeuse)	16 %	14 %

Tableau 3.1 : Durées relatives par tâches, dans les périodes mesurées et durant une année.

3.2 Séries mesurées initiales

Les caractéristiques des 24 séries mesurées dans ce GEH sont indiquées au tableau 3.2. Les 4 menuisiers ont été suivis durant 6 demi-journées différentes de travail.

Les données du tableau 3.2 ont été soumises à une première analyse, portant sur 2 aspects :

- les caractéristiques statistiques élémentaires des séries mesurées ont été regroupées dans le tableau 3.3 ;
- une analyse de variance a été appliquée pour mettre en évidence l'influence éventuelle, entre les différentes séries mesurées, des facteurs « opérateur » et « période de mesure » sur les niveaux de bruit $L_{Aeq,T}$ globaux ;
- un test statistique a été appliqué pour savoir si l'hypothèse de normalité devait être acceptée (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %).

L'analyse de variance, appliquée aux facteurs « opérateur » et « période de mesure », a montré qu'aucun de ces deux facteurs n'a d'effet statistiquement significatif sur le niveau de bruit global, au seuil de confiance de 95 %.

L'hypothèse de normalité de la distribution des niveaux de bruit globaux des séries mesurées initiales est acceptable.

Repère	Période de mesurage		Résultat du mesurage	
	Date	Poste	Durée de mesurage T, en min	Niveau de bruit $L_{Aeq,T}$ en dB(A)
fr1	10/02/04	matin	205	91,1
fr2	10/02/04	après-midi	220	82,3
fr3	11/02/04	matin	240	91,6
fr4	11/02/04	après-midi	200	92,8
fr5	12/02/04	matin	255	89,0
fr6	12/02/04	après-midi	140	87,6
mf1	10/02/04	matin	200	87,1
mf2	10/02/04	après-midi	220	83,6
mf3	11/02/04	matin	240	89,7
mf4	11/02/04	après-midi	55	92,1
mf5	12/02/04	matin	255	82,9
mf6	12/02/04	après-midi	200	87,1
mv1	10/02/04	matin	215	94,8
mv2	10/02/04	après-midi	220	82,1
mv3	11/02/04	matin	240	85,2
mv4	11/02/04	après-midi	200	83,1
mv5	12/02/04	matin	255	87,7
mv6	12/02/04	après-midi	200	88,5
rb1	10/02/04	matin	210	86,2
rb2	10/02/04	après-midi	220	88,6
rb3	11/02/04	matin	240	83,8
rb4	11/02/04	après-midi	200	83,6
rb5	12/02/04	matin	255	86,9
rb6	12/02/04	après-midi	200	82,6

Tableau 3.2 : GEH des Menuisiers: Caractéristiques des périodes de mesurage de l'exposition au bruit

Désignation	Notation	Valeur
Nombre de séries mesurées	NS	24
Durée cumulée des mesures (hors pauses)	T	84,8 h (5085 min)
$L_{Aeq,T}$ Estimation du niveau moyen, en énergie, en dB(A)	$L_{Aeq,T}$	88,4
Moyenne arithmétique des NS valeurs $L_{Aeq,T}$, en dB(A)	L_{ar}	87,1
Ecart type des NS valeurs $L_{Aeq,T}$ (série), en dB(A)	S_L	3,7
L_{hn} = Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale, $L_{hn} = L_{ar} + 0,115 * S_L^2$	L_{hn}	88,6
Normalité acceptable ?	-	Oui
Incertitude d'échantillonnage du GEH	U_1 (réf)	1,7
Incertitude d'appareillage	U_2	1,5
Incertitude globale, $U = (U_1(\text{réf})^2 + U_2^2)^{0,5}$	U	2,3
Niveau de bruit élargi, dB(A), $L^*(E) = L_{Aeq,T} + U$	$L^*(E)$	90,7

Tableau 3.3 : GEH des Menuisiers : statistiques élémentaires des séries mesurées

Après transformation de la durée d'intégration élémentaire à 1 min, la figure 3.1 présente l'ensemble des séries mesurées.

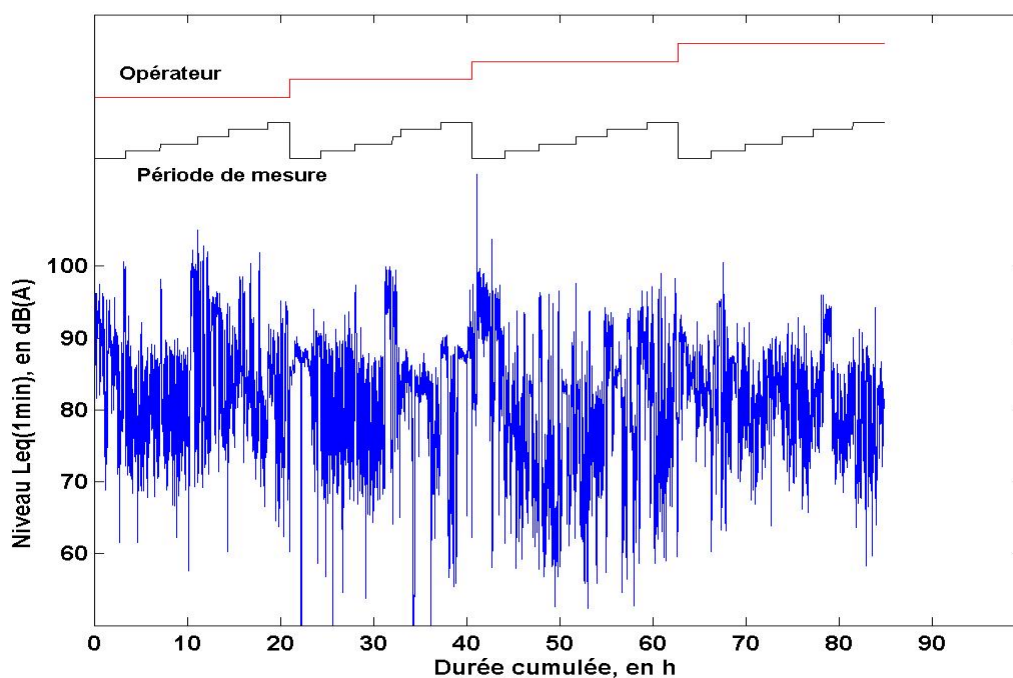


Figure 3.1 : GEH des Menuisiers - Ensemble des mesures : niveaux de bruit $L_{Aeq}(1min)$ et repérage des mesures par opérateur et période de mesure.

3.3 Variations de l'exposition au bruit durant le temps

L'ensemble des données mesurées, $L_{Aeq,dT}$, a été analysé à quatre durées d'intégration dT (ou support en temps) de 1 min, 10 min, 30 min et 60 min. Les résultats suivants sont fournis :

- ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$: figure 3.2 ;
- histogrammes des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$: figure 3.3 ;
- variogrammes (qui renseignent sur l'auto corrélation des données) : figure 3.4 ;
- caractéristiques statistiques : tableau 3.4.

La validité de l'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ a été testée :

- graphiquement : la distribution normale, de même moyenne et écart type que celle des niveaux $L_{Aeq,dT}$ mesurés, a été tracée sur l'histogramme de la figure 3.3 (trait continu).
- numériquement : un test statistique a été appliqué pour savoir si l'hypothèse de normalité devait être rejetée (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %). Le résultat est indiqué dans le tableau 3.4 fournissant les caractéristiques statistiques.

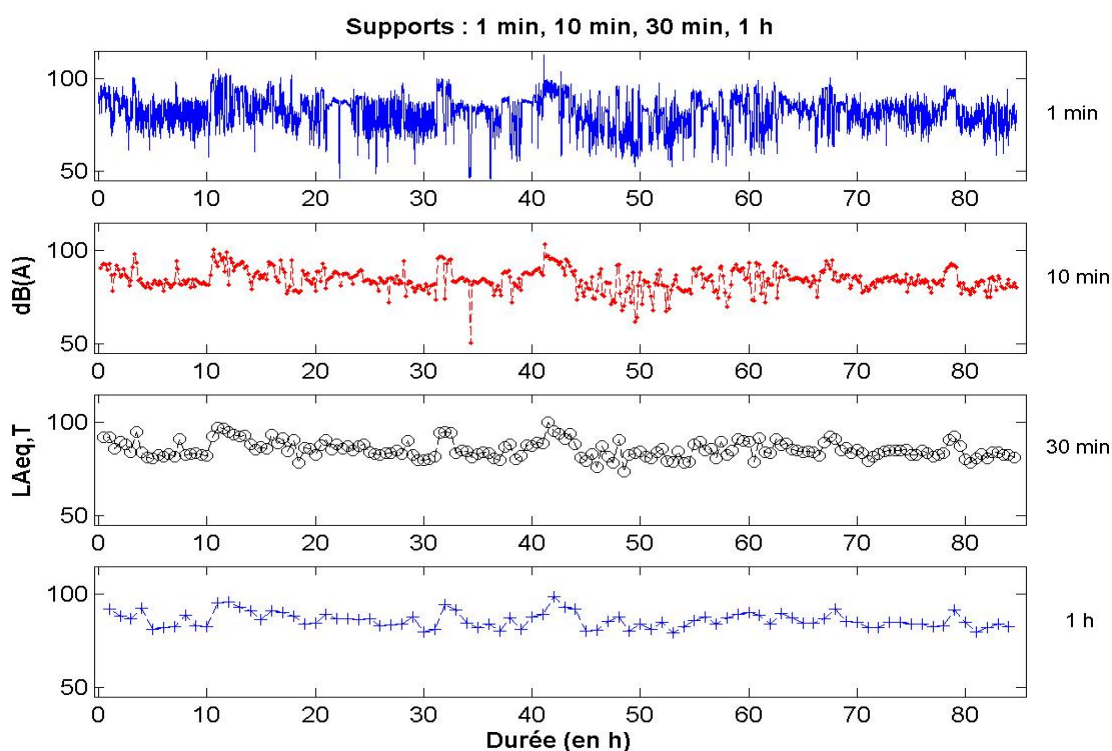


Figure 3.2 : GEH des Menuisiers – Niveaux de bruit mesurés $L_{Aeq,dT}$, exprimés avec quatre durées d'intégration, $dT = 1 \text{ min}, 10 \text{ min}, 30 \text{ min}, 60 \text{ min}$.

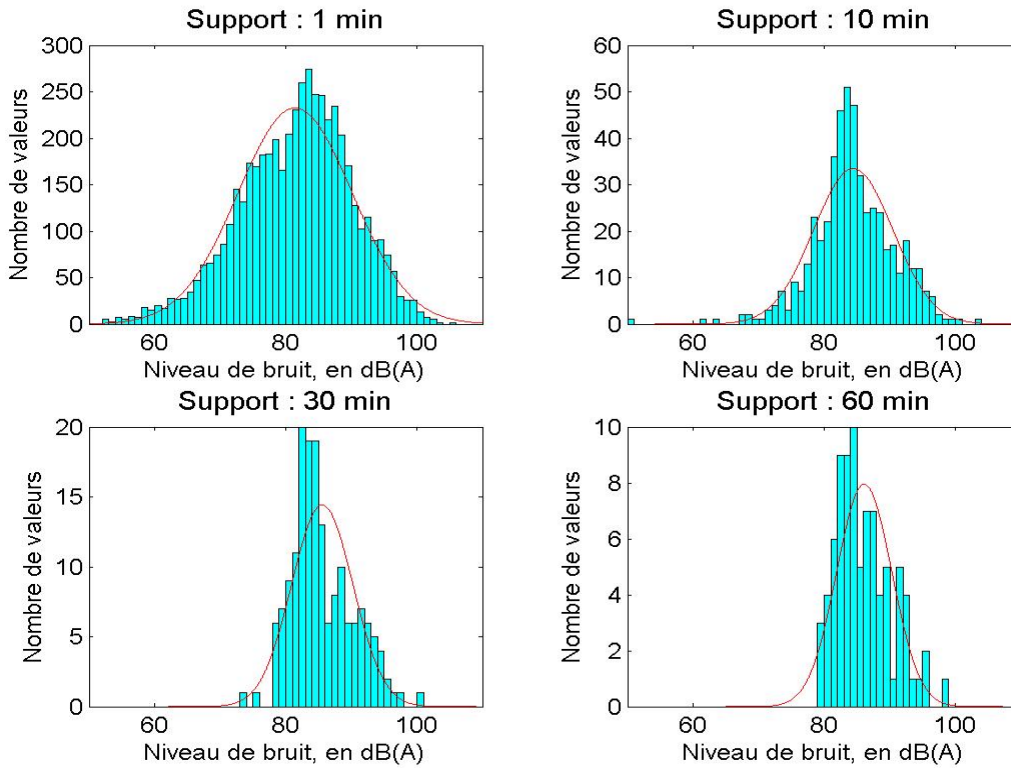


Figure 3.3 : GEH des Menuisiers – Histogrammes des niveaux $L_{Aeq,dT}$ calculés à quatre supports d'intégration dT (1 min, 10 min, 30 min, 1h), dans l'ensemble des périodes mesurées, en dB(A)

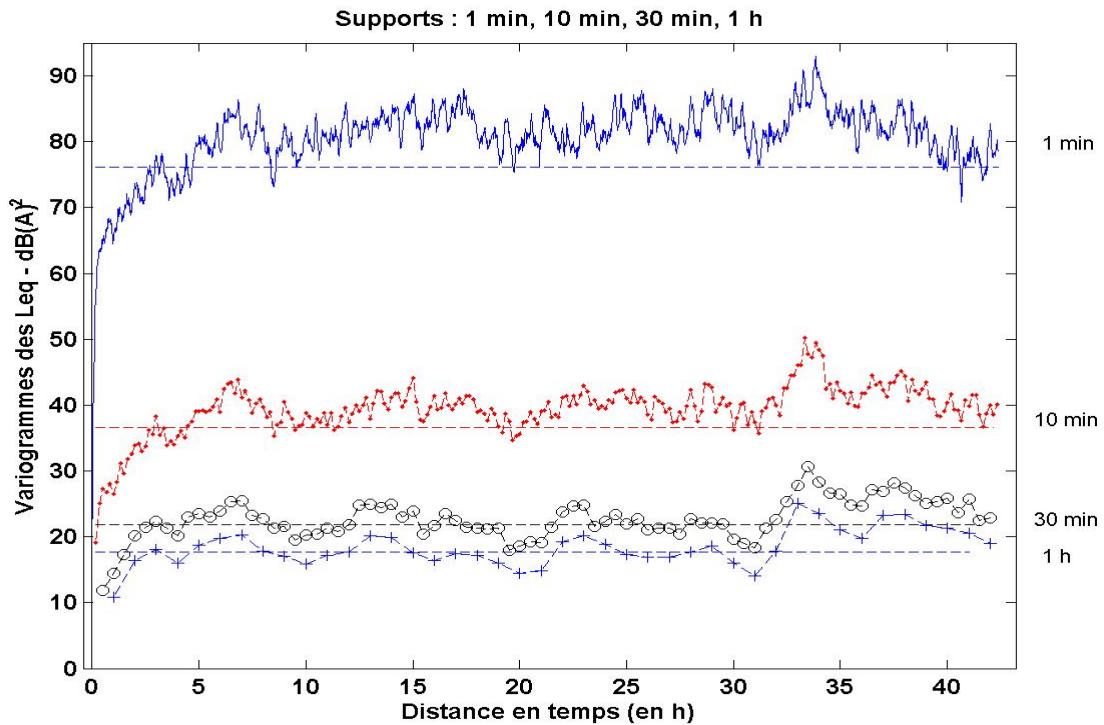


Figure 3.4 : Variogrammes des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$, aux 4 supports dT (1 min, 10 min, 30 min, 1 h).

Durée d'intégration, dT en min	1	10	30	60
N, Nombre de valeurs $L_{Aeq,dT}$	5085	508	169	84
$L_{Aeq,T}$ Estimateur du bruit moyen, en énergie, en dB(A)	88,4	88,4	88,4	88,5
Moyenne arithmétique des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	81,4	84,4	85,6	86,1
Ecart type S_L des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	8,7	6,1	4,7	4,2
Lhn, Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale	90,2	88,7	88,1	88,1
Normalité acceptable ?	Non	Non	Non	Non
Incertitude d'échantillonnage $U_1(dT)$	0,4	0,7	0,8	1,0
Incertitude d'appareillage U_2	1,5	1,5	1,5	1,5
Incertitude globale U	1,5	1,6	1,7	1,8
Niveau de bruit élargi, en dB(A) $L^*_E(dT) = L_{Aeq,T} + U$ $L^*_{lm}(dT) = Lhn + U$	89,9 91,7	90,0 90,3	90,1 89,8	90,3 90,0

Tableau 3.4 : GEH des Menuisiers - Caractéristiques statistiques de l'ensemble des données mesurées

3.4 Caractéristiques des tâches

Trois tâches ont été distinguées :

- Tâche 1 : assemblages et finitions,
- Tâche 2 : usage de huit machines à bois,
- Tâche 3 : usage de la machine la plus bruyante, la corroyeuse.

Parmi l'ensemble des séries mesurées, la répartition du travail des menuisiers entre ces 3 tâches a été indiquée sur la figure 3.5.

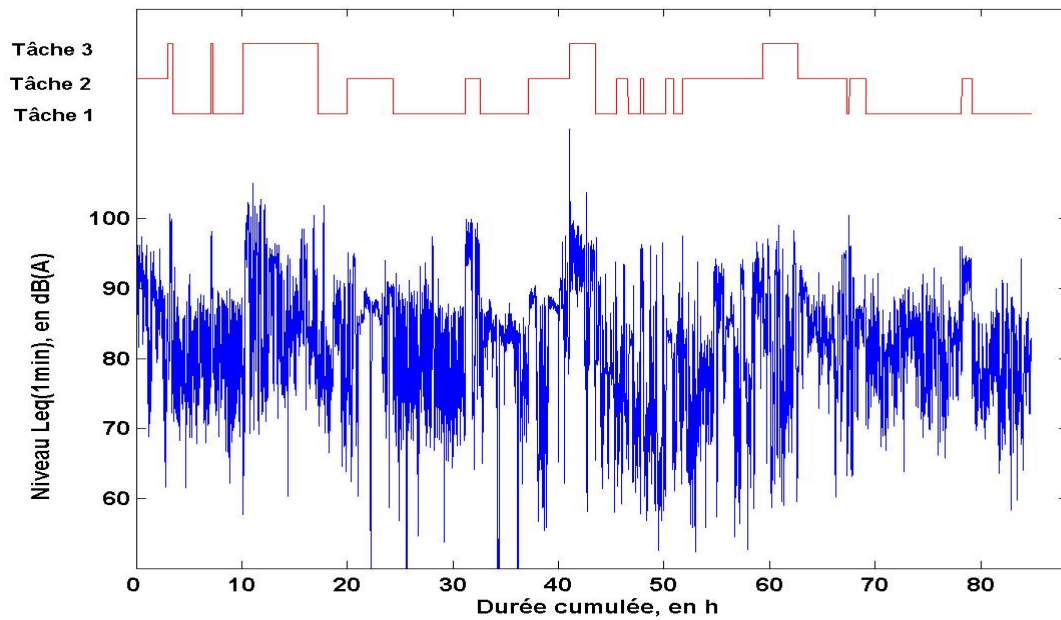


Figure 3.5 : GEH des Menuisiers - Séries mesurées avec repérage des 3 tâches principales (tâche 1 : assemblages et finitions ; tâche 2 : usage de huit machines à bois ; tâche 3 : usage de la corroyeuse)

La figure 3.5 montre que l'alternance des tâches est réduite, chaque tâche occupant généralement un menuisier durant plusieurs heures. Ceci est cohérent avec l'organisation du travail des menuisiers.

Chaque tâche a été analysée avec les descripteurs appliqués antérieurement à l'ensemble des données. Trois durées d'intégration des niveaux de bruit élémentaires ont été utilisées : 1 min, 5 min, 10 min. Les figures 3.6 à 3.8 présentent respectivement pour chaque tâche, les niveaux de bruit mesurés, les histogrammes et les variogrammes. Le tableau 3.5 regroupe les indications statistiques par tâche.

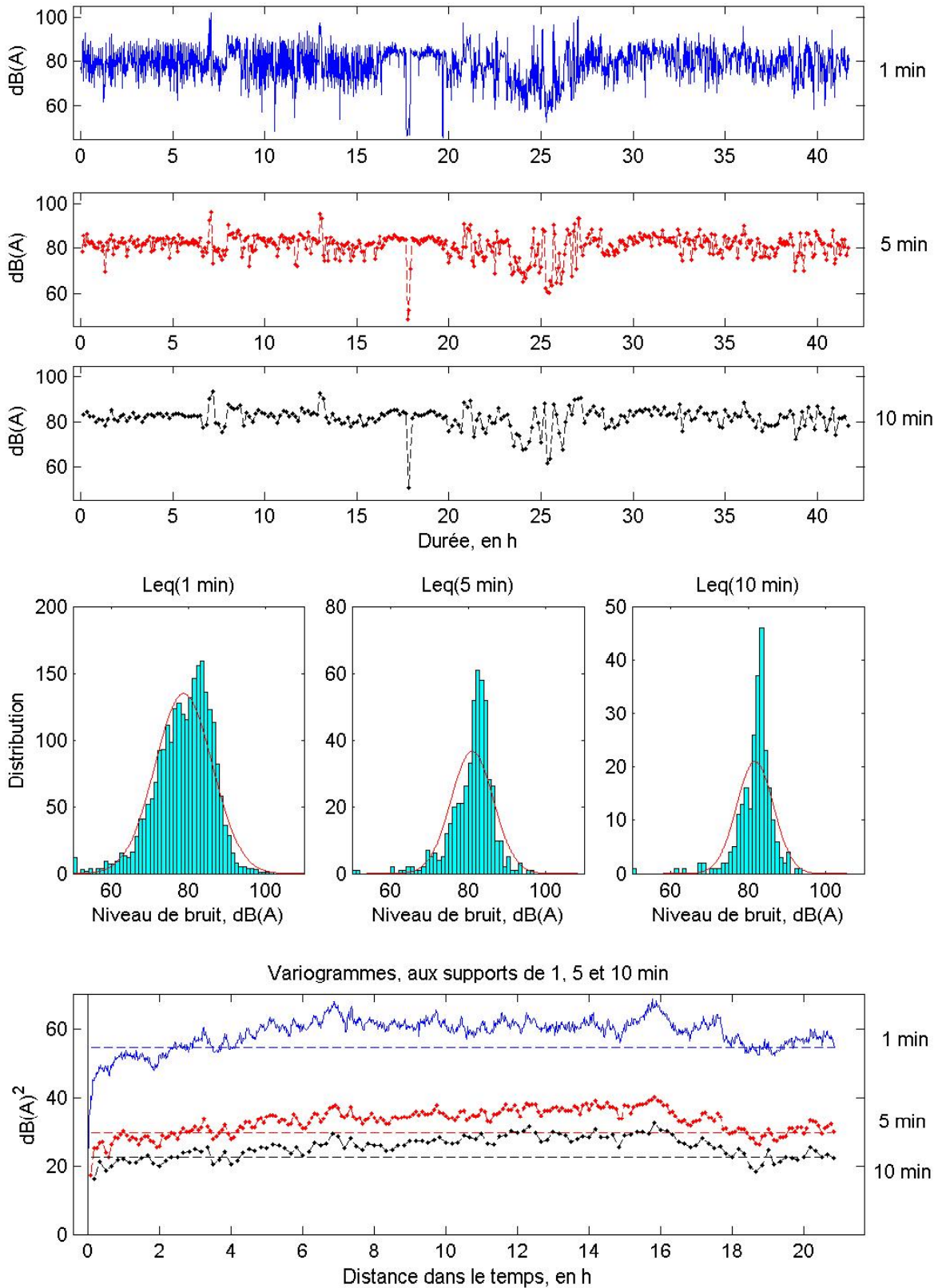


Figure 3.6 : GEH des Menuisiers - Caractéristiques de la tâche 1 : assemblages et finitions. Niveaux de bruit, histogrammes et variogrammes, à trois supports (1 min, 5 min, 10 min).

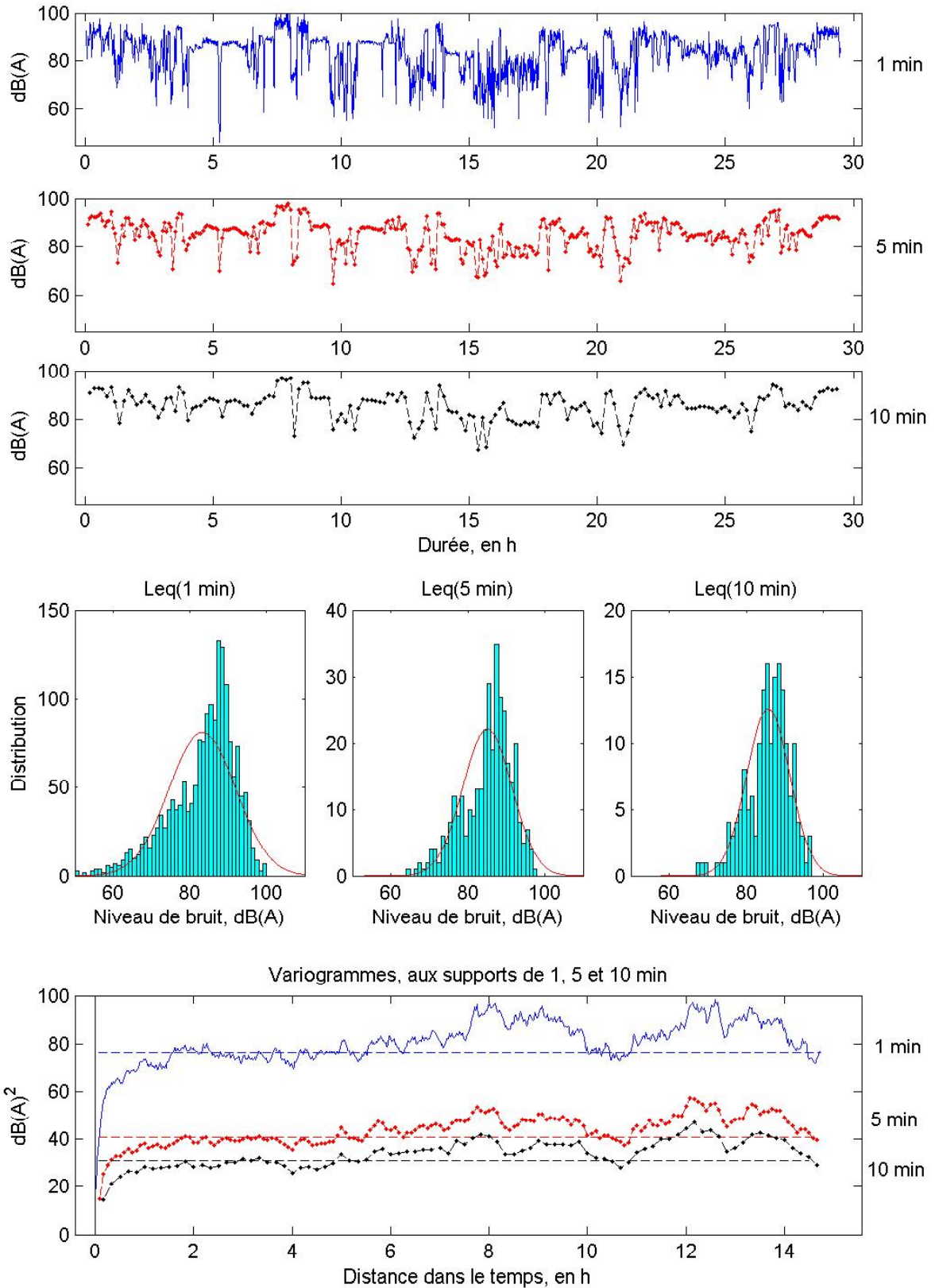


Figure 3.7 : GEH des Menuisiers - Caractéristiques de la tâche 2 : usage de huit machines à bois. Niveaux de bruit, histogrammes et variogrammes, à trois supports (1 min, 5 min, 10 min).

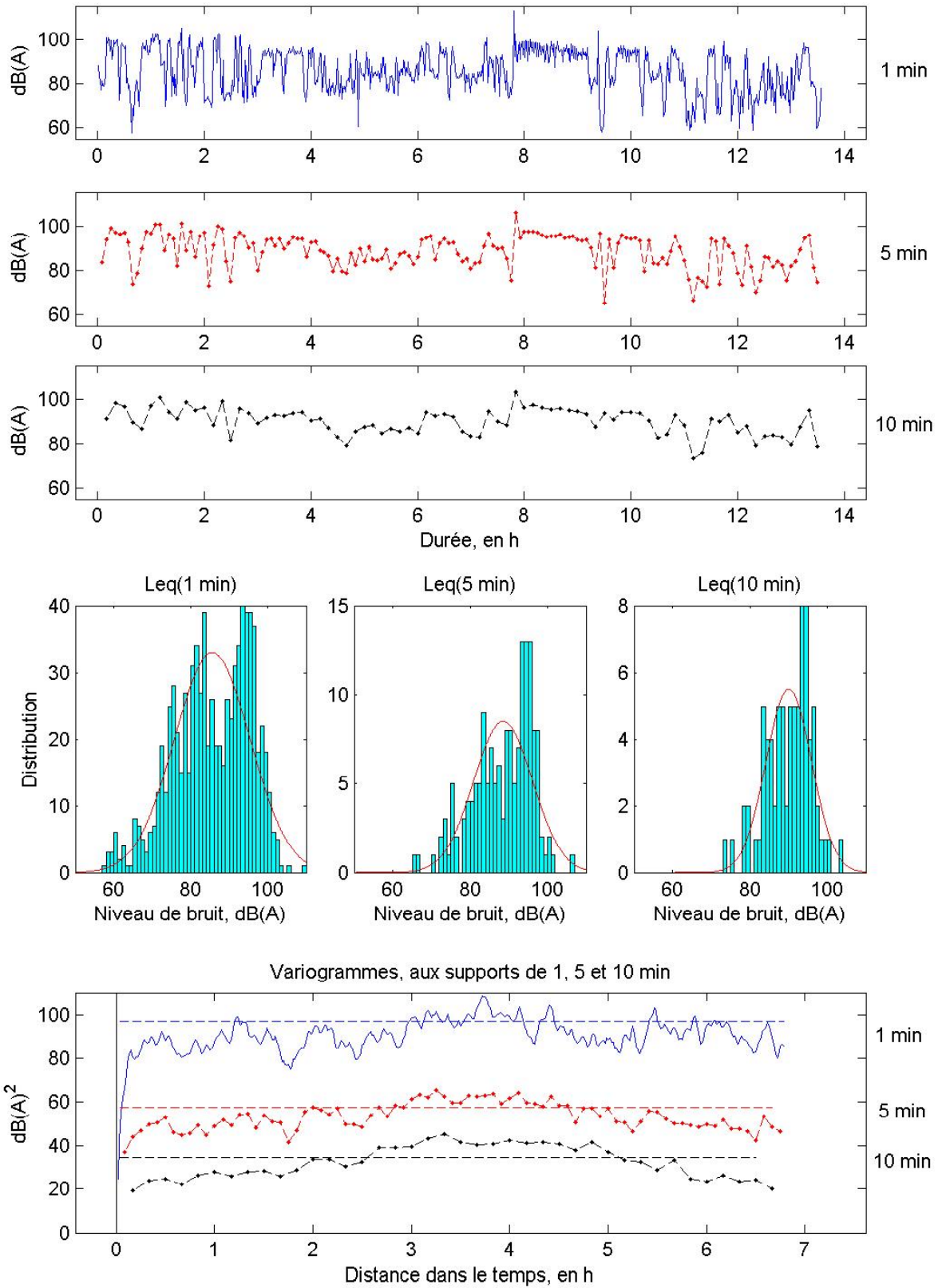


Figure 3.8 : GEH des Menuisiers - Caractéristiques de la tâche 3 : usage de la corroyeuse. Niveaux de bruit, histogrammes et variogrammes, à trois supports (1 min, 5 min, 10 min).

Numéro de tâche	Tâche 1			Tâche 2			Tâche 3		
	1	5	10	1	5	10	1	5	10
dT, durée d'intégration, en min	1	5	10	1	5	10	1	5	10
N, Nombre de valeurs	2502	500	250	1769	353	176	814	162	81
$L_{Aeq,T}$ Estimateur du bruit moyen, en énergie, en dB(A)	83,6	83,6	83,6	88,5	88,5	88,5	93,2	93,2	93,2
Lar Moyenne arithmétique, en dB(A)	78,8	81,1	81,8	83,3	85,1	85,7	85,6	88,6	90,1
S_L Ecart type des N valeurs, en dB(A)	7,4	5,4	4,7	8,7	6,4	5,6	9,9	7,6	5,9
Lhn Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale, dB(A)	85,0	84,5	84,4	92,0	89,8	89,3	96,8	95,2	94,0
Normalité acceptable ?	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
$U_1(dT)$ Incertitude sur Lhn	0,4	0,6	0,7	0,6	0,9	1,0	1,2	1,8	1,7
U_2 Incertitude d'appareillage	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
U Incertitude globale, dB(A)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,8	1,9	2,3	2,3
Niveau de bruit élargi (tâche) =	85,2	85,2	85,3	90,2	90,3	90,3	95,1	95,5	95,5
$L^*_E(dT) = L_{Aeq,T} + U$	86,6	86,1	86,0	93,7	91,5	91,1	98,7	97,5	96,3
$L^*_{hm}(dT) = Lhn + U$									

Tableau 3.5 : GEH des Menuisiers – Caractéristiques statistiques par tâche (tâche 1: assemblages et finitions ; tâche 2 : usage de huit machines à bois ; tâche 3 : usage de la corroyeuse)

L'exposition globale des fraiseurs a été recomposée, à l'aide des niveaux de bruit élargi (indiqués au tableau 3.5) et des durées relatives des tâches. Le tableau 3.6 fournit les résultats, aux supports de 1 min, 5 min et 10 min.

Durée d'intégration, en min	1	5	10
Niveau de bruit élargi global (en énergie), dB(A)	90,2	90,4	90,4
Niveau de bruit élargi global (sous hypothèse de normalité), dB(A)	93,4	92,0	91,2

Tableau 3.6 : GEH des Menuisiers - Estimations du niveau de bruit élargi, après recombinaison des tâches

3.5. Discussion - conclusion

Examinons en premier lieu l'hypothèse initiale d'homogénéité de l'exposition au bruit du groupe des menuisiers. Elle a été appliquée successivement aux 3 types de résultats disponibles :

- Les 24 séries mesurées initiales. Leur durée moyenne étant proche de 4 h, ces séries reflètent la variabilité entre demi-journées de travail de l'exposition des menuisiers. Les niveaux de bruit globaux des séries mesurées (cf tableaux 3.1 et 3.2) sont très dispersés : écart entre niveau maxi et mini de 12,7 dB(A) ; écart type de 3,7 dB(A). Les mesures de bruit montrent une forte variabilité entre demi-journées de travail. Appliquée aux séries mesurées durant environ 4 h, l'hypothèse d'homogénéité doit être rejetée.
- Les niveaux de bruit dans l'ensemble des périodes mesurées, recomposées à l'aide de la durée d'intégration dT. Leur écart type S_L est compris entre 4,2 et 8,7 dB(A) quand dT varie de 1 à 60 min, (cf tableau 3.4), ce qui indique une variabilité élevée. Par contre, les variogrammes (figure 3.4) montrent une bonne stabilité, à longue distance de l'origine, ce qui incite à accepter l'hypothèse d'homogénéité des données, appliquée à l'ensemble des 80 h mesurées.
- Les niveaux de bruit mesurés dans chaque tâche principale. Examinons tout d'abord les variogrammes des tâches 1 et 2 (figures 3.6 et 3.7) : à longue distance de l'origine, ils sont relativement stables et leur convergence vers la variance expérimentale paraît acceptable, suggérant d'accepter l'hypothèse d'homogénéité pour ces 2 tâches. Pour la tâche 3, le corroyage, le variogramme (figure 3.8) montre une périodicité ; toutefois, cette tendance a une amplitude limitée et peut s'expliquer par le caractère très intermittent de l'usage de cette machine. Dans ces conditions, et compte tenu d'une durée cumulée de mesure pour cette tâche relativement élevée (près de 14 h), on validera pour cette tâche l'hypothèse d'homogénéité de l'exposition.

On peut conclure que l'hypothèse d'homogénéité doit être rejetée dans le cas des séries mesurées initiales car la variabilité de l'exposition au bruit, entre demi-journées de travail, est très élevée. Elle est acceptable sur l'ensemble du domaine étudiée ici, soit 85 h, ainsi que pour les 3 tâches principales des menuisiers.

Dispose-t-on, pour ce GEH, d'une estimation de l'exposition au bruit à long terme ? Malgré la diversité de la production de cet atelier, les durées relatives d'emploi des machines à bois sont identiques, à 2 % près, entre les périodes mesurées et en moyenne annuelle. Dans ces conditions, on acceptera d'extrapoler le résultat de l'estimation au-delà du domaine étudié.

Examinons l'hypothèse d'indépendance des mesures. A proximité de leur origine, les variogrammes de la figure 3.4 montrent que la variance expérimentale est atteinte à une distance

de 3 h. On en conclut donc que l'hypothèse d'indépendance sera acceptable quand les mesures seront séparées d'au moins 3 h.

L'hypothèse d'une distribution normale a été acceptée quand elle a été appliquée aux niveaux de bruit globaux des séries mesurées initiales. Elle a été rejetée quand elle fut appliquée à l'ensemble des données recomposées aux supports dT, qu'elles soient analysées globalement (tableau 3.4) ou après distinction des 3 tâches du GEH (tableau 3.5). Ce rejet s'explique par les histogrammes : à tous les supports dT (compris entre 1 min et 1 h), ils montrent que les données mélangent des phases très bruyantes et des phases non bruyantes, ce qui résulte de l'organisation du travail de ce groupe. Dans les séries mesurées initiales, alors qu'on retrouve le mélange des phases bruyantes et non bruyantes (il explique l'étendue des valeurs de 12,7 dB(A)), le non rejet de l'hypothèse de normalité est lié à la combinaison du nombre de résultats ($N = 24$) avec une durée de mesure ($T = 3,5$ h) bien supérieure aux valeurs dT utilisées dans les séries recomposées.

L'effet de l'accroissement de la durée d'intégration dT sur la variabilité du bruit se traduit par un fort resserrement des histogrammes, visible sur les données analysées globalement (figure 2.3) et sur les analyses par tâche (figures 3.6 à 3.8).

L'exposition au bruit durant chacune des tâches de ce GEH a été évaluée ainsi (tableau 2.4) :

- Assemblages et finitions : niveau de bruit = 83,6 dB(A), durée relative = 49 % ;
- Usage de huit machines à bois : niveau de bruit = 88,5 dB(A), durée relative = 35 % ;
- Usage de la corroyeuse : niveau de bruit = 93,2 dB(A), durée relative = 16 %.

Ceci montre que les trois tâches principales sont très différentes, en niveau de bruit et en durée relative. Le niveau de bruit global correspondant à ces valeurs s'élève à 88,4 dB(A).

Examinons enfin les différentes estimations du niveau du bruit élargi pour ce GEH :

- Dans le cas des séries initiales (tableau 3.3), l'estimation du niveau de bruit élargi s'élève à 90,7 dB(A). Elle est associée à une incertitude globale U de 2,3 dB(A), provenant autant de l'incertitude d'échantillonnage du GEH [$U_1(\text{réf}) = 1,7$ dB(A)] que de l'incertitude d'appareillage. L'amplitude du terme $U_1(\text{réf})$ s'explique par les variations entre demi-journées de travail des conditions de fonctionnement de l'atelier.
- Dans le cas de l'analyse de l'ensemble des données aux différents supports dT (tableau 3.4), le niveau de bruit élargi varie de 89,9 à 90,3 dB(A), quand on considère l'estimation basée sur la moyenne en énergie.
- Après l'analyse par tâche (tableau 3.6) l'estimation du niveau de bruit élargi ne varie plus que de 90,2 à 90,4 dB(A).

Parmi ces 3 estimations du niveau de bruit élargi, la plus adaptée aux circonstances de l'exposition au bruit de ce GEH, paraît être celle qui s'appuie sur l'analyse par tâche. On retiendra celle qui résulte du support le plus long ($dT = 10$ min), fournissant le niveau de bruit élargi de 90,4 dB(A).

Conclusions :

- Le travail des menuisiers comprend 3 tâches très différentes en durée relative et en niveau de bruit : les assemblages et finitions, l'usage de huit machines à bois, l'usage de la corroyeuse. La distinction de ces tâches est utile pour accroître la fiabilité de l'évaluation de l'exposition au bruit .
- Les données mesurées (durant 85 h ici), suffisent pour bien quantifier la structure de variation en temps du bruit reçu par le GEH des menuisiers.
- L'hypothèse d'homogénéité de l'exposition dans ce groupe est rejeté d'une journée à l'autre de travail, mais peut être validée sur l'ensemble des 85 h étudiées ici, ainsi que pour les 3 tâches principales de ce groupe de travailleurs.
- L'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit a été acceptée quand elle est appliquée aux séries mesurées initiales. Appliquée à l'ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$, globalement et après distinction des tâches, cette hypothèse a été rejetée.
- Le niveau moyen du bruit reçu par ce GEH, (hors incertitude), est estimé à 88,4 dB(A).
- L'estimation finale du niveau de bruit élargi s'élève à 90,4 dB(A). Elle s'appuie sur les résultats de l'analyse des tâches.
- L'incertitude globale sur ce niveau moyen est de 2,0 dB(A). Elle se décompose ainsi :
 - o incertitude d'échantillonnage du bruit pour ce GEH, estimée à 1,3 dB(A),
 - o incertitude d'appareillage de 1,5 dB(A).
- La structure temporelle de variabilité du bruit de ce GEH permet de considérer que le niveau de bruit élargi peut être extrapolé au-delà du domaine temporel observé, tant que les circonstances d'exposition au bruit de ce GEH restent semblables.

4. CARACTERISTIQUES DES DONNEES DU GEH « EXTRUDEURS »

4.1 Travail effectué par le GEH

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. Chaque opérateur occupe les postes de conduite ou d'alimentation d'une ligne en alternance, d'un jour à l'autre. Le travail comprend les changements de fabrication, le réglage de la ligne, sa surveillance. En mode normal de production, l'opérateur peut contrôler la fabrication depuis différents emplacements, tout au long de la ligne.

Dans l'étude de ce GEH, aucune distinction entre tâches n'a pu être réalisée, pour des raisons liées au contenu et à l'organisation du travail. Les tâches des opérateurs, leur localisation et leur durée ne font pas l'objet de spécifications particulières. Les opérateurs tiennent à jour un cahier de production, où sont notés tous les changements de fabrication (qui peuvent intervenir plusieurs fois par jour) mais l'analyse de ces cahiers n'a pas permis d'estimer les durées quotidiennes des tâches, ni de retrouver dans les séries du bruit mesuré l'alternance des phases de production. Lors d'arrêt de ligne, des mesures préliminaires du bruit aux emplacements de travail ont montré que le bruit ambiant, généré par les lignes de production voisines, restait important.

4.2. Séries mesurées

Les caractéristiques des séries mesurées dans ce GEH sont indiquées au tableau 4.1. Les mesurages ont été effectués en sélectionnant les opérateurs qui conduisent et approvisionnent 2 lignes de fabrication. Ils ont été répartis parmi 10 journées différentes de travail.

Entre les séries mesurées, une analyse de variance n'a pas permis de mettre en évidence un effet significatif sur les niveaux de bruit indiqués au tableau 4.1 du facteur « ligne de fabrication ». Entre périodes de mesure, l'écart maximum les niveaux de bruit du tableau 4.1 est d'environ 8 dB(A), sans qu'il soit possible de savoir si cet écart est statistiquement significatif (par absence de répétition de séries mesurées durant chaque période).

L'hypothèse de normalité de la distribution des niveaux de bruit globaux des séries mesurées initiales est acceptable (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %).

Les statistiques élémentaires sur les 11 séries mesurées ont été regroupées dans le tableau 4.2.

Après transformation de la durée d'intégration élémentaire à 1 min, la figure 4.1 présente l'ensemble des séries mesurées.

Repère	Période de mesurage		Résultat du mesurage	
	Date	Poste	Durée de mesurage T, en min	Niveau de bruit $L_{Aeq,T}$ en dB(A)
N6A1	25/01/2002	Après midi	221	91,7
N6A3	29/01/2002	Après midi	419	88,9
N6A4	30/01/2002	Après midi	448	91,4
N6A5	31/01/2002	Après midi	341	88,9
N6C1	08/01/2002	Après midi	343	89,6
N6C2	08/01/2002	Après midi	375	91,6
N6C5	21/01/2002	Après midi	474	86,0
N8A1	10/01/2002	Après midi	440	90,9
N8A2	11/01/2002	Après midi	423	87,7
N8A4	17/01/2002	Après midi	342	94,2
N8A5	18/01/2002	Après midi	327	89,5

Tableau 4.1 : GEH des extrudeurs : Caractéristiques des périodes de mesurage de l'exposition au bruit (hors pauses)

Désignation	Notation	Valeur
Nombre de séries mesurées	NS	11
Durée de mesure cumulée (hors pauses)	T	69,2 h (4153 min)
$L_{Aeq,T}$ Estimation du niveau de bruit moyen, en énergie, en dB(A)	$L_{Aeq,T}$	90,4
Moyenne arithmétique des NS valeurs $L_{Aeq,T}$, en dB(A)	L_{ar}	90,0
Ecart type des 11 valeurs $L_{Aeq,T}$ (séries), en dB(A)	S_L	2,2
Lhn Estimation du bruit moyen, sous hypothèse normale, $L_{hn} = L_{ar} + 0,115 * S_L^2$	Lhn	90,6
Normalité acceptable ?	-	Oui
Incertitude d'échantillonnage du GEH, en dB(A)	$U_1(\text{réf})$	1,5
Incertitude d'appareillage U_2	U_2	1,5
Incertitude globale $U = (U_1(\text{réf})^2 + U_2^2)^{0,5}$	U	2,1
Niveau de bruit élargi, dB(A), $L^*(E) = L_{Aeq,T} + U$	$L^*(E)$	92,5

Tableau 4.2 : GEH des extrudeurs : statistiques élémentaires des séries mesurées

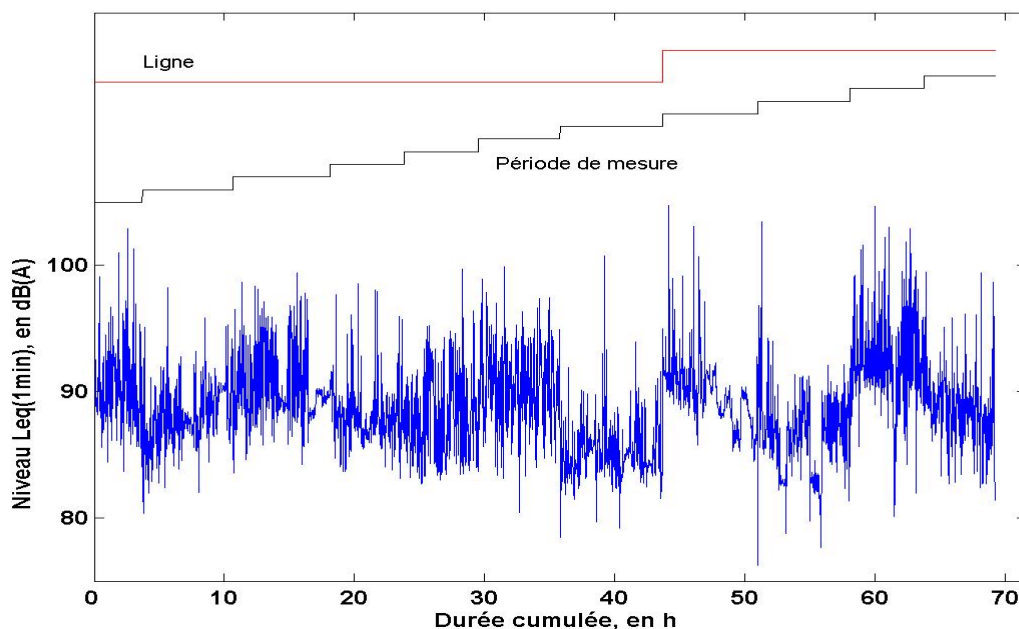


Figure 4.1 : GEH des extrudeurs - Ensemble des mesures : niveaux de bruit $L_{Aeq}(1 \text{ min})$, en dB(A), et repérage des mesures par ligne et période de mesure.

4.3 Variations de l'exposition au bruit durant le temps

L'ensemble des données mesurées, $L_{Aeq,T}$, a été analysé à quatre durées d'intégration T (ou support en temps) de 1 min, 10 min, 30 min et 60 min. Les résultats suivants sont fournis :

- Ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,T}$: figure 4.2 ;
- histogrammes des niveaux de bruit $L_{Aeq,T}$: figure 4.3 ;
- variogrammes (qui renseignent sur l'auto corrélation des données) : figure 4.4 ;
- caractéristiques statistiques : tableau 4.3.

La validité de l'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit $L_{Aeq,T}$ a été testée :

- graphiquement : la distribution normale, de même moyenne et écart type que celle des niveaux $L_{Aeq,T}$ mesurés, a été tracée sur l'histogramme de la figure 4.3 (trait continu).
- numériquement : un test statistique a été appliqué pour savoir si l'hypothèse de normalité devait être rejetée (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %). Le résultat est indiqué dans le tableau 4.3.

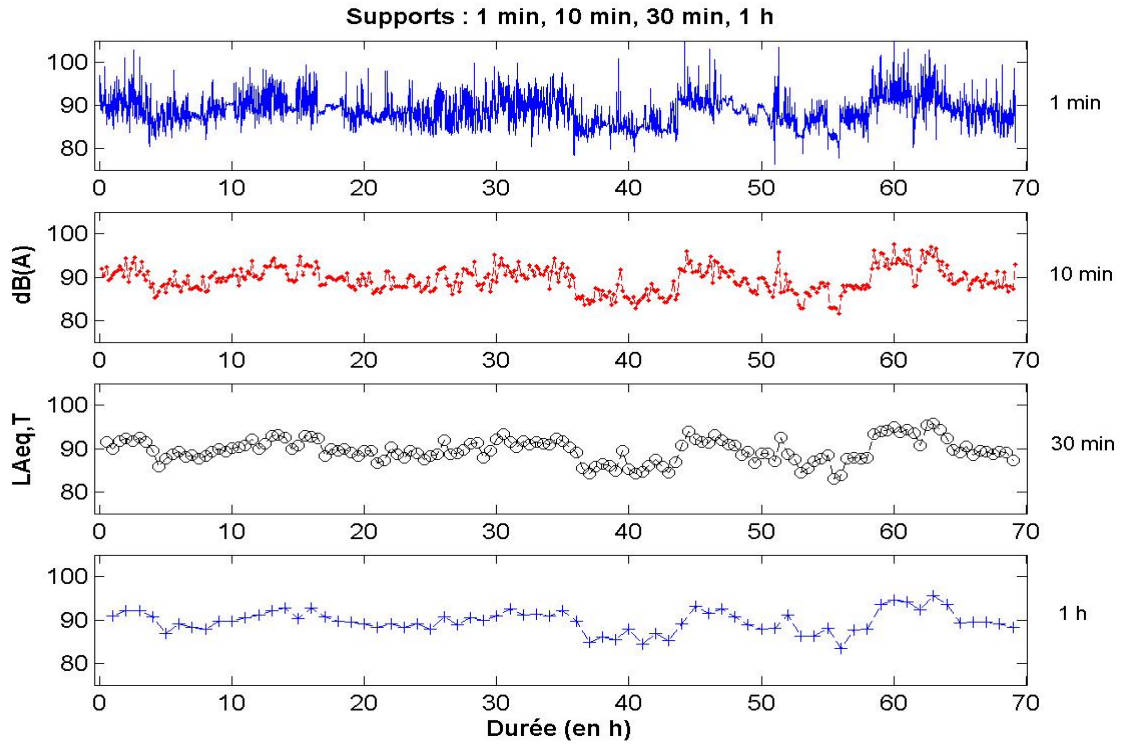


Figure 4.2 : GEH des extrudeurs - Niveaux de bruit mesurés $L_{Aeq,dT}$, à quatre durées d'intégration ($dT = 1 \text{ min}, 10 \text{ min}, 30 \text{ min}, 60 \text{ min}$)

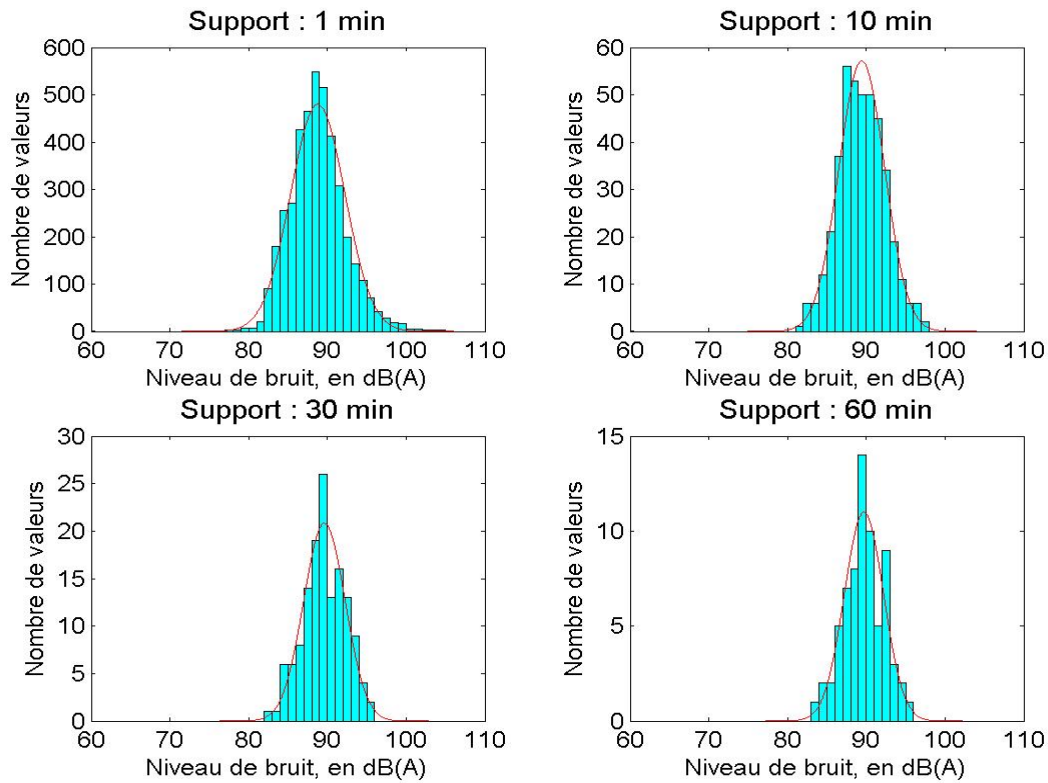


Figure 4.3 : GEH des extrudeurs - Histogrammes des niveaux $L_{Aeq,dT}$, à quatre durées d'intégration ($dT = 1 \text{ min}, 10 \text{ min}, 30 \text{ min}, 60 \text{ min}$) dans l'ensemble des périodes mesurées.

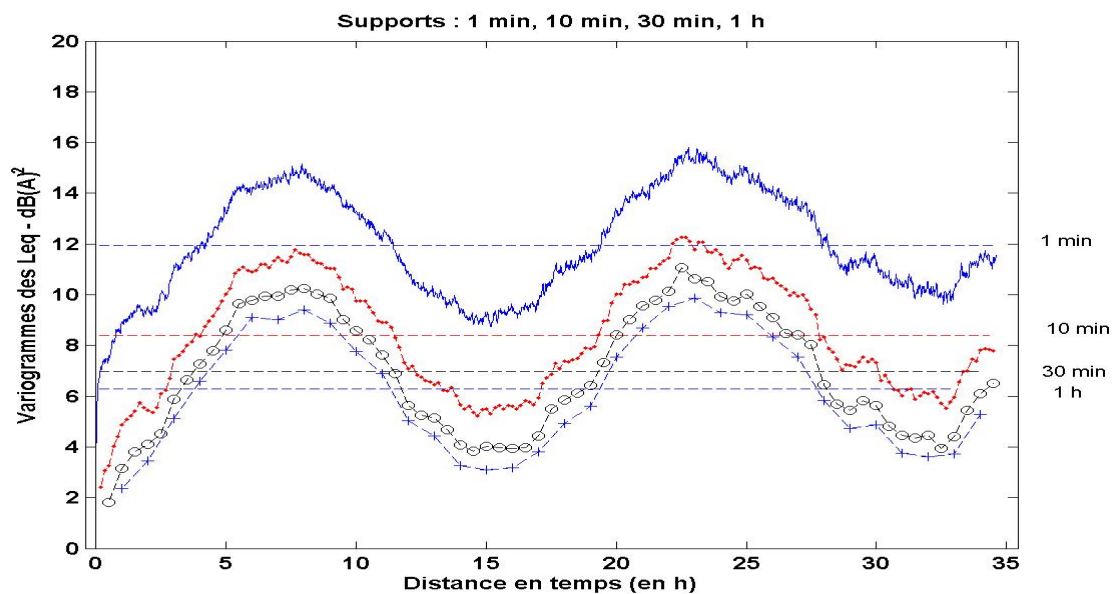


Figure 4.4 : GEH des extrudeurs : Variogrammes des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$, aux supports de 1 min, 10 min, 30 min, 1 h

Durée d'intégration, dT en min	1	10	30	60
N, Nombre de valeurs $L_{Aeq,dT}$	4153	415	138	69
$L_{Aeq,T}$ Estimateur du bruit moyen, en énergie, en dB(A)	90,4	90,4	90,4	90,4
Moyenne arithmétique des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	88,8	89,4	89,6	89,7
Ecart type S_L des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	3,5	2,9	2,6	2,5
Lhn, Estimateur de la moyenne sous hypothèse normale, en dB(A)	90,2	90,4	90,4	90,4
Normalité acceptable ?	Non	Oui	Oui	Oui
Incertitude d'échantillonnage $U_1(dT)$	0,1	0,3	0,4	0,6
Incertitude d'appareillage U_2	1,5	1,5	1,5	1,5
Incertitude globale U	1,5	1,5	1,6	1,6
Niveau de bruit élargi, en dB(A)				
$L^*_E(dT) = L_{Aeq,T} + U$	91,9	91,9	92,0	92,0
$L^*_{hn}(dT) = Lhn + U$	91,7	91,9	91,9	92,0

Tableau 4.3 : GEH des extrudeurs – Caractéristiques statistiques de l'ensemble des données mesurées

4.4. Discussion - Conclusion

Examinons en premier lieu l'homogénéité de l'exposition au bruit du groupe des extrudeurs. Elle a été appliquée successivement à 2 types de résultats disponibles :

- Les 11 séries mesurées initiales. Leur durée moyenne étant supérieure à 6 h, ces séries reflètent la variabilité entre journées de travail de l'exposition des extrudeurs. Les niveaux de bruit globaux des séries mesurées (cf tableaux 4.1 et 4.2) sont relativement dispersés : écart entre niveau maxi et mini de 8,2 dB(A) ; écart type de 2,2 dB(A).
- Les niveaux de bruit recomposés à l'aide de la durée d'intégration dT, dans l'ensemble des périodes mesurées. Leur écart type S_L est compris entre 2,5 et 3,5 dB(A) quand dT varie de 1 à 60 min, (cf tableau 4.3). Les variogrammes (figure 4.4) montrent une structure périodique, avec un cycle de durée quasiment égale à celle des périodes de mesure, qui provient de la variabilité entre journées de travail.

Dans ces conditions, l'hypothèse initiale d'homogénéité de l'exposition de ce groupe de travailleurs au bruit ne peut pas être validée, ni entre journées de travail, ni dans l'ensemble des 69 h de mesure réalisées dans ce groupe. Sur le plan de la pratique métrologique, on retiendra qu'une période de 8 h ne serait pas suffisante, en durée, pour refléter la variabilité de l'exposition au bruit de ce groupe de travailleurs à moyen terme. Compte tenu des variations d'exposition au bruit constatées entre journées de travail et de l'impossibilité d'identifier un facteur susceptible de les expliquer, on évitera d'extrapoler à long terme le résultat qui sera issu de la période mesurée.

L'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit des séries mesurées initiales a été acceptée. Appliquée à l'ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ après recombinaison des séries à l'aide de la durée d'intégration dT, l'hypothèse de normalité a été acceptée si dT égal 10 min, 30 min ou 60 min. Au support de 1 min, l'hypothèse a été rejetée par le test statistique. Toutefois, l'histogramme de la figure 4.3 montre que la distribution du bruit reste proche d'une distribution normale (le résultat du test s'explique, dans ce cas, par le très grand nombre de valeurs).

L'effet de l'accroissement de la durée d'intégration dT sur la variabilité du bruit se traduit par un resserrement des histogrammes (figure 4.3) d'amplitude assez limitée, qui est quantifiée par les écarts types S_L (tableau 4.3) : leur valeur passe de 3,5 à 2,5 dB(A) quand dT croît de 1 à 60 min.

Comparons les 2 types d'estimations du niveau du bruit moyen, celle qui résulte du calcul en énergie et celle qui résulte du calcul basé sur l'hypothèse de normalité (tableau 4.3). Les 2 estimations s'élèvent 90,4 dB(A), sans écarts supérieurs à 0,1 dB(A), à 3 supports : 10, 30 et 60 min. A ces 3 supports, l'hypothèse de normalité ayant été validée, le résultat précédent est conforme au résultat attendu. Au support de 1 min, utiliser le critère d'estimation basé sur l'hypothèse de normalité - alors que l'hypothèse fut rejetée à ce support - induirait une sous estimation du bruit de 0,2 dB(A), par rapport au niveau moyen calculé en énergie.

Examinons enfin les différentes estimations du niveau du bruit élargi pour ce GEH. A l'aide des séries initiales (tableau 4.2), l'estimation du niveau de bruit élargi s'élève à 92,5 dB(A). Quand l'ensemble des données a été analysé aux supports de 10, 30 et 60 min, l'estimation s'élève à 92,0 dB(A), à 0,1 dB(A) près selon la valeur dT (tableau 4.3). Il y a donc un écart de 0,5 dB(A) entre ces 2 modes d'estimations. Pour ce GEH, la variabilité entre journée étant importante bien que non expliquée, la première estimation semble préférable à la seconde, car elle traduit mieux

la variabilité entre journées de travail. On retiendra donc *in fine* la valeur de 92,5 dB(A) comme niveau de bruit élargi pour ce GEH.

Conclusions :

- Dans le groupe des extrudeurs, l'exposition au bruit présente une variabilité, qui paraît liée aux différences entre journées de travail ; parmi les informations collectées sur les circonstances du travail de ces opérateurs, aucun facteur n'a pu être identifié pour expliquer les variations constatées.
- Dans ces conditions, il n'est pas été possible de valider l'hypothèse d'homogénéité de l'exposition au bruit du groupe des extrudeurs, ni entre journées mesurées, ni globalement dans l'ensemble des périodes mesurées (69 h).
- L'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit élémentaires $L_{Aeq,dT}$ en dB(A) est acceptable pour les séries mesurées initiales et pour l'ensemble des données analysées aux 3 durées d'intégration dT de 10 min, 30 min, 60 min.
- Durant l'ensemble des périodes mesurées, soit 69 h, le niveau de bruit moyen a été estimé à 90,4 dB(A).
- La meilleure estimation du bruit élargi pour ce GEH est de 92,5 dB(A). Elle s'appuie sur les séries mesurées initiales.
- L'incertitude globale sur ce niveau moyen est de 2,1 dB(A). Elle se décompose ainsi :
 - o incertitude d'échantillonnage du bruit pour ce GEH, estimée à 1,5 dB(A),
 - o incertitude d'appareillage de 1,5 dB(A).
- L'estimation du niveau de bruit élargi ne peut pas être extrapolée au-delà du domaine étudié ici, compte tenu de variations du bruit non expliquées entre périodes de 8 h.

5. CARACTERISTIQUES DES DONNEES DU GEH « CONDUCTEURS »

5.1. Travail effectué par le GEH

Ce GEH regroupe 27 opérateurs, affectés à la conduite de 3 lignes de production, en grande série, de capsules d'aluminium. 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 inclut la conduite, la surveillance de la ligne de production et les interventions en cas de bourrage sur un des équipements de la ligne. Il alterne de multiples interventions de durée inférieure à la minute, en différents points de la ligne, sans aucun repère en durée. Dans ces conditions, la segmentation du travail effectué entre tâches nettement identifiables n'a pas été possible.

5.2. Séries mesurées

Ce GEH a fait l'objet de 17 séries de mesures, réparties sur 3 lignes de production parmi 5 périodes de mesures. Leurs caractéristiques sont indiquées au tableau 5.1.

Repère	Période de mesurage		Résultat du mesurage	
	Date	Poste	Durée de mesurage T, en min	Niveau de bruit $L_{Aeq,T}$ en dB(A)
bo11	13/4/4	Après midi	327	87,6
bo12	13/4/4	Après midi	272	88,9
bo2	14/4/4	Matin	194	87,5
bo31	14/4/4	Après midi	391	87,5
bo32	14/4/4	Après midi	389	87,6
bo4	15/4/4	Matin	175	87,3
bo5	15/4/4	Après midi	389	88,7
ma1	14/4/4	Matin	173	92,7
ma2	14/4/4	Matin	192	91,9
ma3	14/4/4	Après midi	355	91,4
ma4	15/4/4	Matin	165	91,8
ma5	15/4/4	Après midi	377	91,0
st1	13/4/4	Après midi	326	90,3
st2	14/4/4	Matin	186	89,7
st3	14/4/4	Après midi	382	89,3
st4	15/4/4	Matin	173	89,0
st5	15/4/4	Après midi	387	87,9

Tableau 5.1 : GEH des Conducteurs : Caractéristiques des périodes de mesurage de l'exposition au bruit

Entre les 17 séries mesurées, une analyse de variance appliquée aux données du tableau 5.1 a mis en évidence un effet significatif du facteur « Ligne de fabrication » sur les niveaux de bruit $L_{Aeq,T}$ globaux des séries. Cet effet peut être résumé par le niveau de bruit $L_{Aeq,T}(\text{ligne})$ moyen attribuable à chaque ligne de production :

- Ligne « bo » : $L_{Aeq,T}(\text{bo}) = 87,9 \text{ dB(A)}$;
- Ligne « ma » : $L_{Aeq,T}(\text{ma}) = 91,6 \text{ dB(A)}$;
- Ligne « st » : $L_{Aeq,T}(\text{st}) = 89,2 \text{ dB(A)}$.

L'hypothèse de normalité de la distribution des niveaux de bruit globaux des séries mesurées initiales est acceptable (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %).

Les autres statistiques élémentaires et les estimations qui en résultent ont été regroupées dans le tableau 5.2.

Nombre de séries mesurées	NS	17
Durée mesurée cumulée (hors pauses)	T	81 h (4853 min)
$L_{Aeq,T}$ = Estimation du niveau de bruit moyen, en énergie, en dB(A)	$L_{Aeq,T}$	89,6
Moyenne arithmétique des NS valeurs $L_{Aeq,T}$, en dB(A)	L_{ar}	89,4
Ecart type des 17 valeurs $L_{Aeq,T}$ (série), en dB(A)	S_L	1,8
L_{hn} = Estimateur du niveau de bruit moyen, sous hypothèse normale, $L_{hn} = L_{ar} + 0,115 * S_L^2$	L_{hn}	89,8
Normalité acceptable ?	-	Oui
Incertitude d'échantillonnage	$U_1(\text{réf})$	0,9
Incertitude d'appareillage	U_2	1,5
Incertitude globale $U = (U_1(\text{réf})^2 + U_2^2)^{0,5}$	U	1,7
Niveau de bruit élargi, dB(A), $L^*(E) = L_{Aeq,T} + U$	$L^*(E)$	91,3

Tableau 5.2 : GEH des Conducteurs : statistiques élémentaires des séries mesurées

Après transformation de la durée d'intégration élémentaire à 1 min, la figure 5.1 présente l'ensemble des séries mesurées.

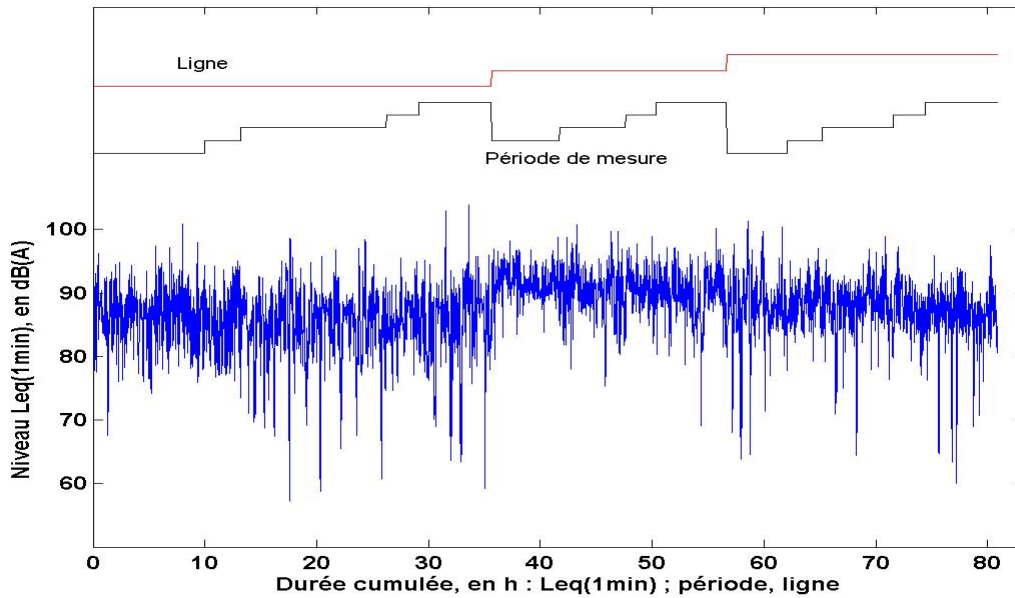


Figure 5.1 : GEH des Conducteurs - Ensemble des mesures : niveaux de bruit $L_{Aeq}(1 \text{ min})$ et repérage des mesures par ligne et période de mesure.

5.3 Variations de l'exposition au bruit durant le temps

L'ensemble des données mesurées, $L_{Aeq,dT}$, a été analysé à quatre durées d'intégration dT (ou support en temps) de 1 min, 10 min, 30 min et 60 min. Les résultats suivants sont fournis :

- ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$: figure 5.2 ;
- histogrammes des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$: figure 5.3 ;
- variogrammes (qui renseignent sur l'auto corrélation des données) : figure 5.4 ;
- caractéristiques statistiques : tableau 5.3.

La validité de l'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ a été testée :

- graphiquement : la distribution normale, de même moyenne et écart type que celle des niveaux $L_{Aeq,dT}$ mesurés, a été tracée sur l'histogramme de la figure 5.3 (trait continu).
- numériquement : un test statistique a été appliqué pour savoir si l'hypothèse de normalité devait être rejetée (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %). Le résultat est indiqué dans le tableau 5.3.

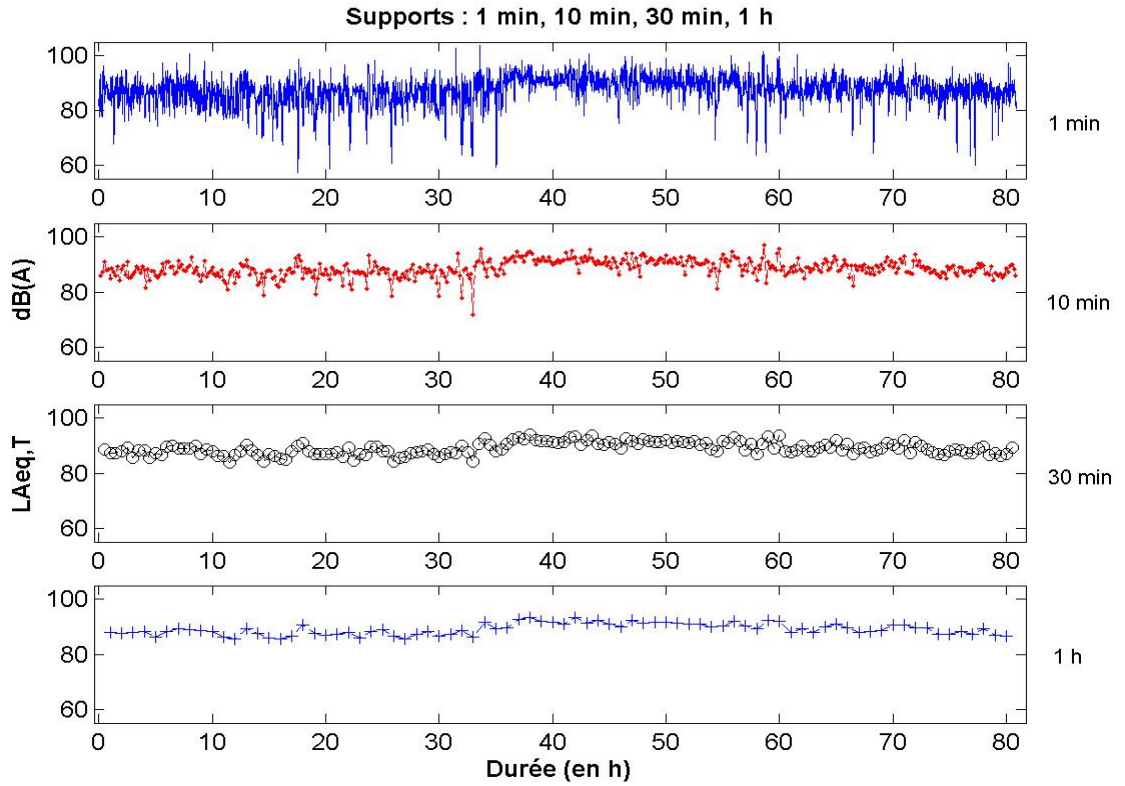


Figure 5.2 : GEH des conducteurs – Niveaux de bruit mesurés $L_{Aeq,dT}$, aux quatre durées d'intégration, $dT = 1 \text{ min}, 10 \text{ min}, 30 \text{ min}, 60 \text{ min}$.

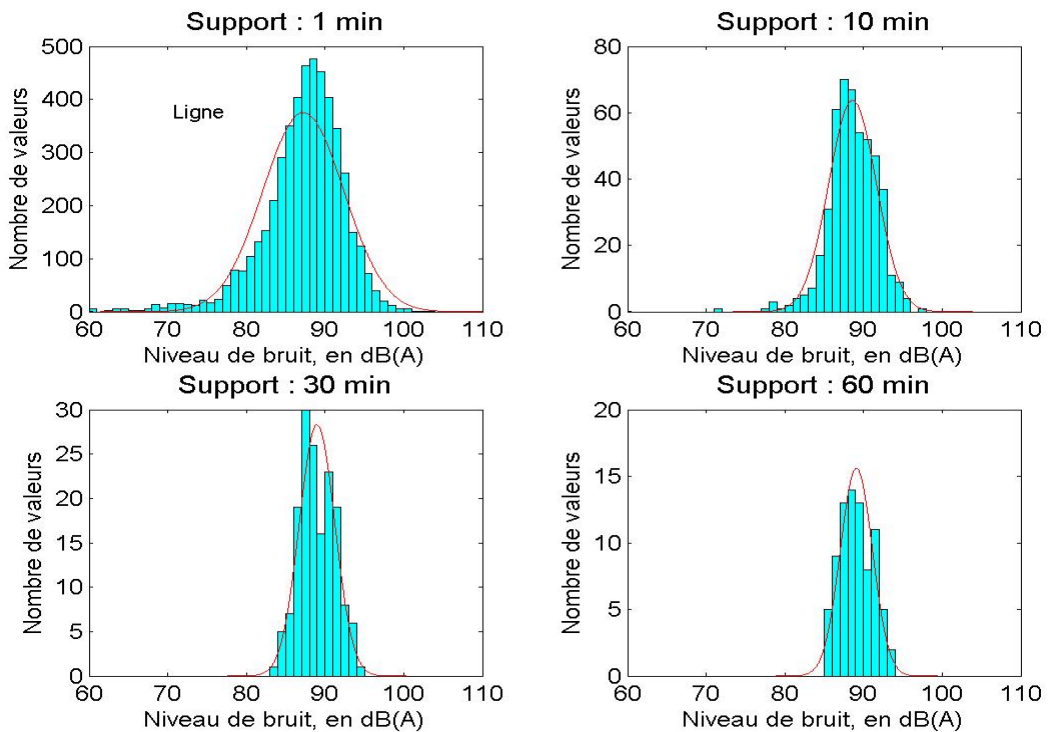


Figure 5.3 : GEH des Conducteurs – Histogrammes des niveaux $L_{Aeq,dT}$ calculés à quatre supports d'intégration ($dT = 1 \text{ min}, 10 \text{ min}, 30 \text{ min}, 1 \text{ h}$), dans l'ensemble des périodes mesurées, en dB(A)

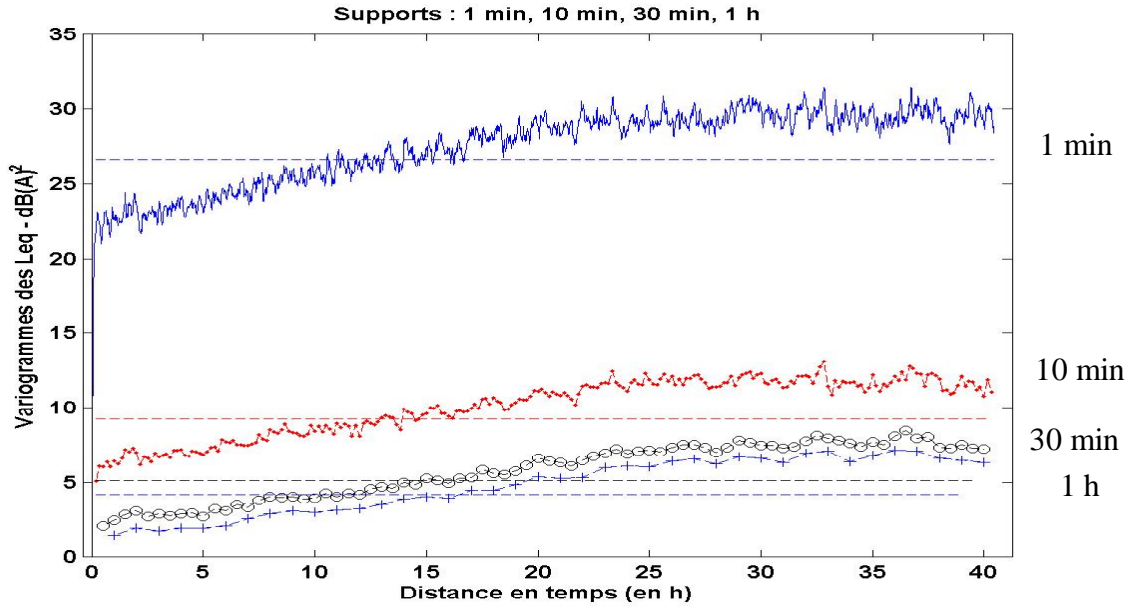


Figure 5.4 : Variogrammes des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ aux supports dT de 1 min, 10 min, 30 min, 1 h. En tiret : variance expérimentale des données (S_L^2) à chaque support

Durée d'intégration, dT en min	1	10	30	60
N, Nombre de valeurs $L_{Aeq,dT}$	4853	485	161	80
$L_{Aeq,T}$ Estimation du bruit moyen, en énergie, en dB(A)	89,6	89,6	89,6	89,6
Moyenne arithmétique des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	87,2	88,6	89,0	89,1
Ecart type des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	5,2	3,0	2,3	2,0
Lhn, Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale, en dB(A)	90,3	89,7	89,6	89,6
Normalité acceptable ?	Non	Non	Oui	Oui
Incertitude d'échantillonnage du GEH, $U_1(dT)$, en dB(A)	0,2	0,3	0,3	0,4
Incertitude d'appareillage U_2 , en dB(A)	1,5	1,5	1,5	1,5
Incertitude globale U, en dB(A)	1,5	1,5	1,5	1,6
Niveau de bruit élargi, en dB(A) $L^*_E(dT) = L_{Aeq,T} + U$ $L^*_{ln}(dT) = Lhn + U$	91,1 91,8	91,1 91,2	91,1 91,1	91,1 91,1

Tableau 5.3 : GEH des Conducteurs - Caractéristiques statistiques de l'ensemble des données mesurées

5.4. Discussion - Conclusion

Examinons en premier lieu l'hypothèse d'homogénéité de l'exposition au bruit du groupe des conducteurs. Elle a été appliquée successivement à 2 types de résultats disponibles :

- Les 17 séries mesurées initiales. Les niveaux de bruit globaux des séries mesurées (cf. tableaux 5.1 et 5.2) sont peu dispersés : écart entre niveau maxi et mini de 5,4 dB(A) ; écart type de 1,8 dB(A). Toutefois, l'analyse de variance a mis en évidence un effet significatif du facteur « Ligne de fabrication », expliquant une part des écarts de niveaux de bruit $L_{Aeq,T}$ globaux entre séries. L'écart maximum sur les niveaux du bruit moyen entre lignes est de 3,7 dB(A).
- Les niveaux de bruit dans l'ensemble des périodes mesurées après recombinaison à l'aide de la durée d'intégration dT . Leur écart type S_L est compris entre 2,0 et 5,2 dB(A) quand dT varie de 1 à 60 min, (cf tableau 5.3). Les variogrammes (figure 5.4) présentent une dérive dans le temps qui ne permet pas de valider l'hypothèse d'homogénéité des données.

L'analyse des données a donc mis en évidence des différences d'exposition au bruit entre opérateurs, attribuables à la ligne de fabrication qu'ils conduisent. Ceci ne permet pas de valider l'hypothèse d'homogénéité de l'exposition au bruit, ni entre journées de travail, ni dans l'ensemble des périodes mesurées (80 h).

Toutefois, une étude complémentaire a été réalisée, en distinguant les données mesurées par ligne de fabrication. Les variogrammes qui furent obtenus ainsi sont très stables : ils convergent nettement vers la variance expérimentale à partir de la distance en temps de 30 min. Ceci confirme que l'effet « ligne » explique la variabilité des données quand le GEH est composé des opérateurs affectés aux 3 lignes étudiées. Ce résultat complémentaire permet de tirer deux conséquences :

- la structure de variation en temps de l'exposition au bruit des conducteurs de chaque ligne peut être considérée comme bien quantifiée.
- la stabilité des variogrammes, calculés par lignes de fabrication, autorise une extrapolation du résultat de l'estimation, au-delà des périodes mesurées.

L'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit des séries mesurées initiales a été acceptée. Appliquée à l'ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ recomposés par une durée d'intégration dT , l'hypothèse de normalité a été acceptée aux supports de 30 min et 60 min. Aux supports de 1 min et 10 min, bien que l'hypothèse ait été rejetée par le test statistique, les histogrammes de la figure 5.3 montrent des écarts qui restent assez limités, par rapport à une distribution normale.

L'effet de l'accroissement de la durée d'intégration dT sur la variabilité du bruit se traduit par un net resserrement des histogrammes (figure 5.3), qui peut être quantifié par les écarts types S_L (tableau 5.3) : leur valeur passe de 5,2 à 2,0 dB(A) quand dT croît de 1 à 60 min.

Comparons les 2 types d'estimations du niveau du bruit moyen, celle qui résulte du calcul en énergie et celle qui résulte du calcul basé sur l'hypothèse de normalité (cf tableau 5.3). Aux supports où la normalité a été acceptée (30 et 60 min), les deux critères d'estimations fournissent exactement le même résultat : 89,6 dB(A) ; on retrouve le résultat qui était attendu. Aux 2 autres

supports, l'emploi du critère d'estimation basé sur l'hypothèse de normalité, alors que l'hypothèse a été rejetée, induirait un écart négligeable au support de 10 min (0,1 dB(A)), et une sur estimation du bruit de 0,7 dB(A) au support de 1 min, par rapport au niveau moyen calculé en énergie.

Le niveau de bruit élargi estimé à l'aide des séries initiales (tableau 5.2) s'élève à 91,3 dB(A). Cette valeur est très proche des estimations basées sur l'ensemble des données, qui sont égales à 91,1 dB(A) à 0,1 dB(A) près quelque soit dT, quand on emploie l'estimateur de la moyenne en énergie. On retiendra donc in fine l'estimation qui reflète le mieux la variabilité entre lignes de production, soit celle de 91,3 dB(A).

Conclusions :

- Les données mesurées ne permettent pas de valider l'hypothèse d'homogénéité de l'exposition au bruit appliquée à tout le groupe des conducteurs ; ceci résulte d'une variabilité de l'exposition au bruit expliquée par les 3 lignes de production auxquelles les conducteurs sont affectés.
- L'hypothèse d'homogénéité serait acceptée si des sous groupes distinguaient les conducteurs de chacune des 3 lignes étudiées. Toutefois, l'intérêt d'une telle distinction, pour la pratique métrologique, reste discutable, compte tenu de l'organisation du travail dans l'atelier étudié.
- L'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit des séries mesurées initiales a été acceptée. Appliquée à l'ensemble des données mesurées, elle est acceptable aux durées d'intégration dT de 30 min et 60 min.
- Durant l'ensemble des périodes mesurées, soit 69 h, le niveau de bruit moyen a été estimé à 89,6 dB(A).
- La meilleure estimation du niveau de bruit élargi pour ce GEH est de 91,3 dB(A). Elle s'appuie sur les séries mesurées initiales.
- L'incertitude globale sur ce niveau élargi est de 1,7 dB(A). Elle se décompose ainsi :
 - o incertitude d'échantillonnage du bruit pour ce GEH, estimée à 0,9 dB(A),
 - o incertitude d'appareillage de 1,5 dB(A).
- L'estimation du niveau de bruit élargi peut être extrapolée, au-delà du domaine étudié ici, pour fournir une estimation du bruit élargi à long terme.

6. CARACTERISTIQUES DU GEH « REGLEURS »

6.1 Travail effectué

Un atelier de production regroupe une vingtaine de lignes de production automatisée en grande série de petites pièces d'aluminium. En mode normal, la production est assurée par des opérateurs. Les régleurs sont chargés d'intervenir sur toutes les lignes de production à la demande des opérateurs, pour assurer les réglages machines, les changements de production. Ils réalisent aussi les opérations de maintenance périodique. Leur groupe comprend 9 personnes.

Leur travail n'est pas prévu d'avance, hormis quelques interventions de type maintenance lourde. Les interventions effectuées ne faisant pas l'objet d'un compte rendu écrit, aucun repère n'existe sur la nature, la localisation et la durée des tâches effectuées. Dans ces conditions, aucune distinction entre tâche n'a été effectuée pour mesurer l'exposition des régleurs au bruit.

6.2 Séries mesurées

Ce GEH a fait l'objet de 9 séries de mesures, réparties sur 6 périodes.

Les caractéristiques des séries mesurées sont indiquées au tableau 6.1. Les statistiques élémentaires sur les 9 séries mesurées ont été regroupées dans le tableau 6.2.

L'hypothèse de normalité de la distribution des niveaux de bruit globaux des séries mesurées initiales est acceptable (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %).

Après transformation de la durée d'intégration élémentaire à 1 min, la figure 6.1 présente l'ensemble des séries mesurées.

Repère	Période de mesurage		Résultat du mesurage	
	Date	Poste	Durée de mesurage T, en min	Niveau de bruit $L_{Aeq,T}$ en dB(A)
regl1	13/4/4	Après midi	316	89,6
regl2	14/4/4	Matin	178	92,4
regl3	14/4/4	Après midi	376	90,2
regl41	15/4/4	Matin	180	91,2
regl42	15/4/4	Matin	180	90,4
regl5	15/4/4	Après midi	420	88,6
regl61	16/4/4	Matin	191	90,7
regl62	16/4/4	Matin	259	88,7
regl63	16/4/4	Matin	246	91,6

Tableau 6.1 : GEH des Régleurs : Caractéristiques des périodes de mesurage de l'exposition au bruit

Nombre de séries mesurées	NS	9
Durée mesurée cumulée (hors pauses)	T	39 h (2346 min)
$L_{Aeq,T}$ = Estimation du niveau de bruit moyen, en énergie, en dB(A)	$L_{Aeq,T}$	90,3
Moyenne arithmétique des NS valeurs $L_{Aeq,T}$, en dB(A)	L_{ar}	90,4
Ecart type des 9 valeurs $L_{Aeq,T}$ (série), en dB(A)	S_L	1,3
L_{hn} = Estimateur du niveau de bruit moyen, sous hypothèse normale, $L_{hn} = L_{ar} + 0,115 * S_L^2$	L_{hn}	90,6
Normalité acceptable ?	-	Oui
Incertitude d'échantillonnage	$U_1(\text{réf})$	0,9
Incertitude d'appareillage	U_2	1,5
Incertitude globale $U = (U_1(\text{réf})^2 + U_2^2)^{0,5}$	U	1,7
Niveau de bruit élargi, dB(A), $L^*(E) = L_{Aeq,T} + U$	$L^*(E)$	92,0

Tableau 6.2 : GEH des Régleurs : statistiques élémentaires des séries mesurées

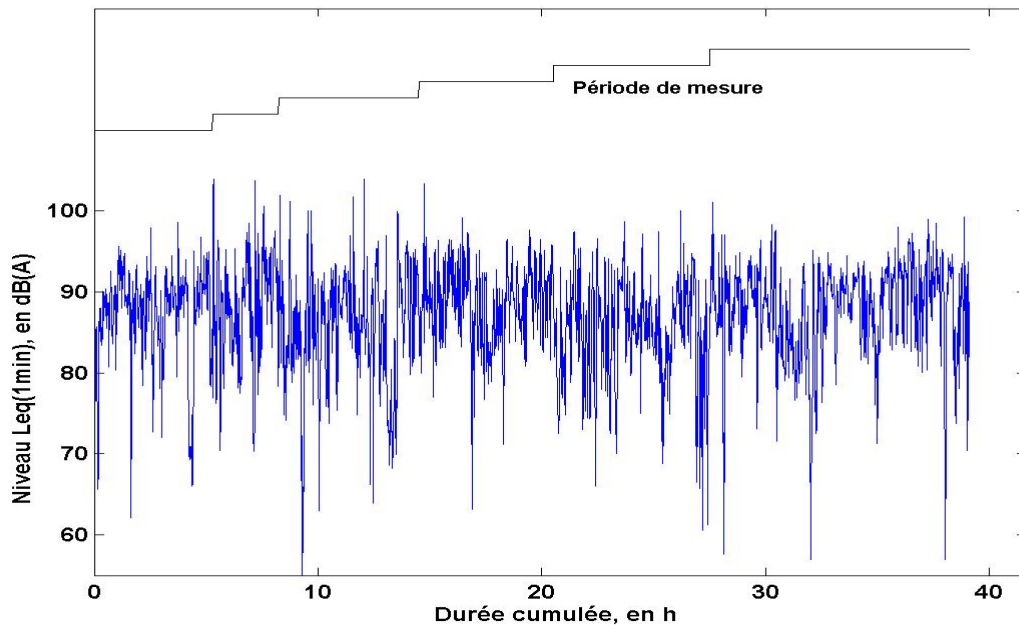


Figure 6.1 : GEH des Régleurs - Ensemble des mesures : niveaux de bruit $L_{Aeq}(1 \text{ min})$ et repérage des périodes de mesure.

6.3 Variations de l'exposition au bruit durant le temps

Les séries mesurées, $L_{Aeq,dT}$, ont été analysées à quatre durées d'intégration dT (ou support en temps) de 1 min, 10 min, 30 min et 60 min. Les résultats suivants sont fournis :

- ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$: figure 6.2 ;
- histogrammes des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$: figure 6.3 ;
- variogrammes (qui renseignent sur l'auto corrélation des données) : figure 6.4 ;
- caractéristiques statistiques : tableau 6.3.

La validité de l'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ a été testée :

- graphiquement : la distribution normale, de même moyenne et écart type que celle des niveaux $L_{Aeq,dT}$ mesurés, a été tracée sur l'histogramme de la figure 6.3 (trait continu).
- numériquement : un test statistique a été appliqué pour savoir si l'hypothèse de normalité devait être rejetée (test de Lilliefors, au seuil de confiance de 95 %). Le résultat est indiqué dans le tableau 6.3.

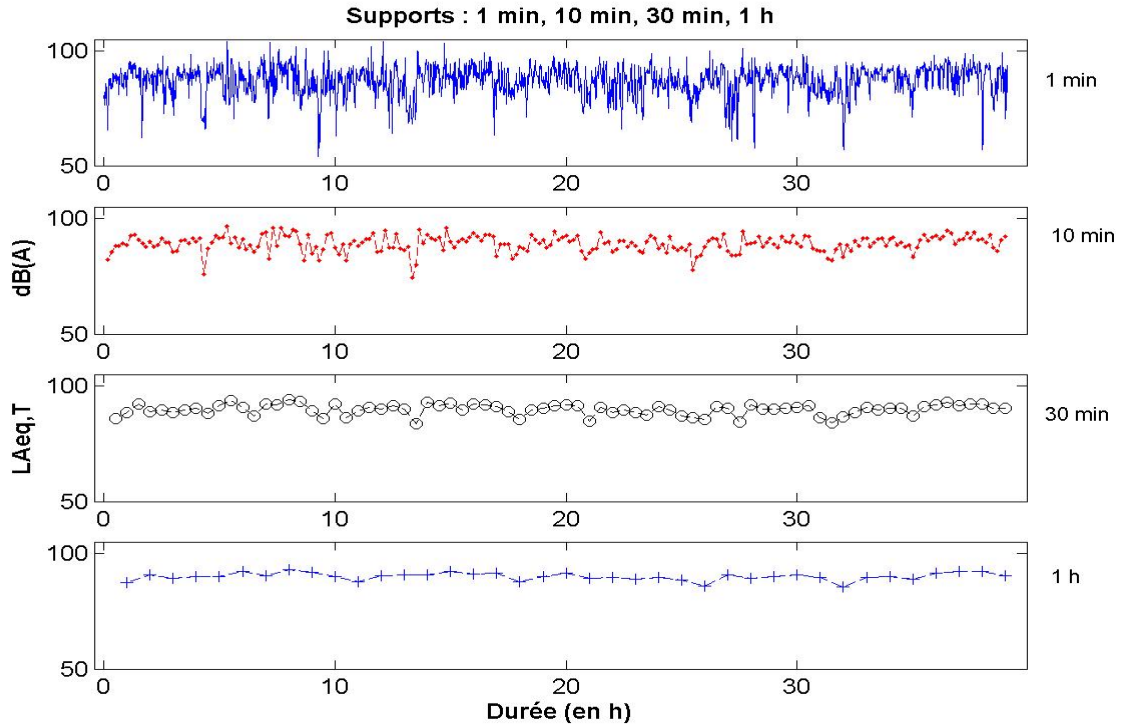


Figure 6.2 : GEH des Régleurs – Niveaux de bruit mesurés $L_{Aeq,dT}$, à quatre durées d’intégration, $dT = 1 \text{ min}, 10 \text{ min}, 30 \text{ min}, 60 \text{ min}$.

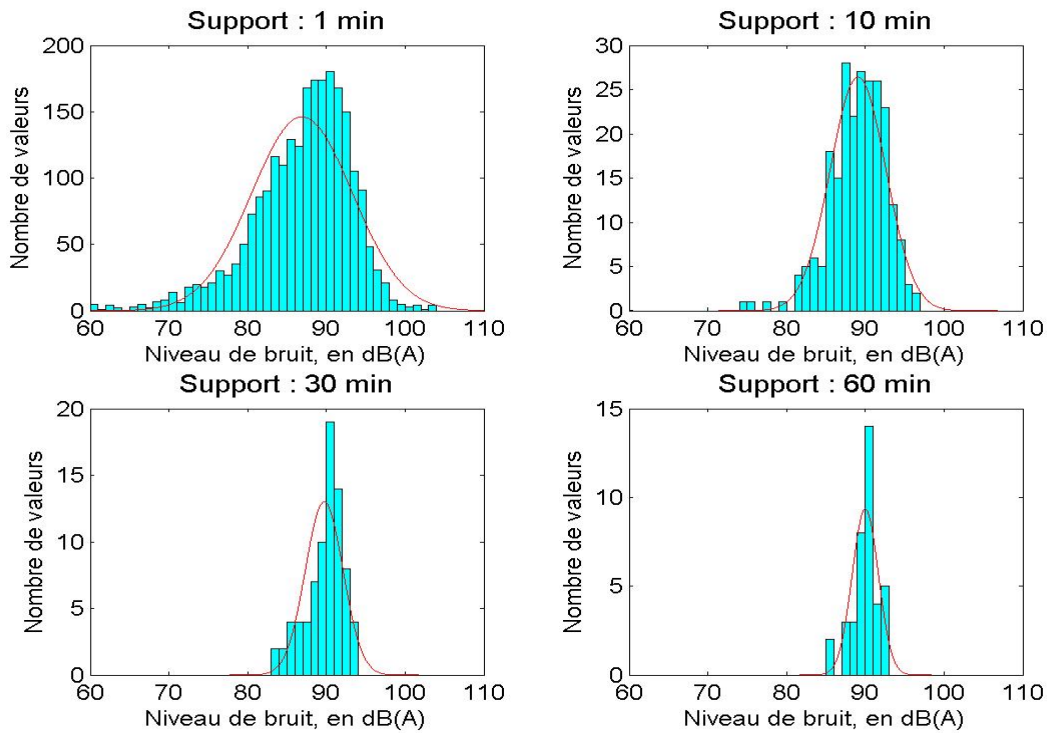


Figure 6.3 : GEH des Régleurs – Histogrammes des niveaux $L_{Aeq,dT}$, en dB(A), aux quatre durées d’intégration, dans l’ensemble des périodes mesurées

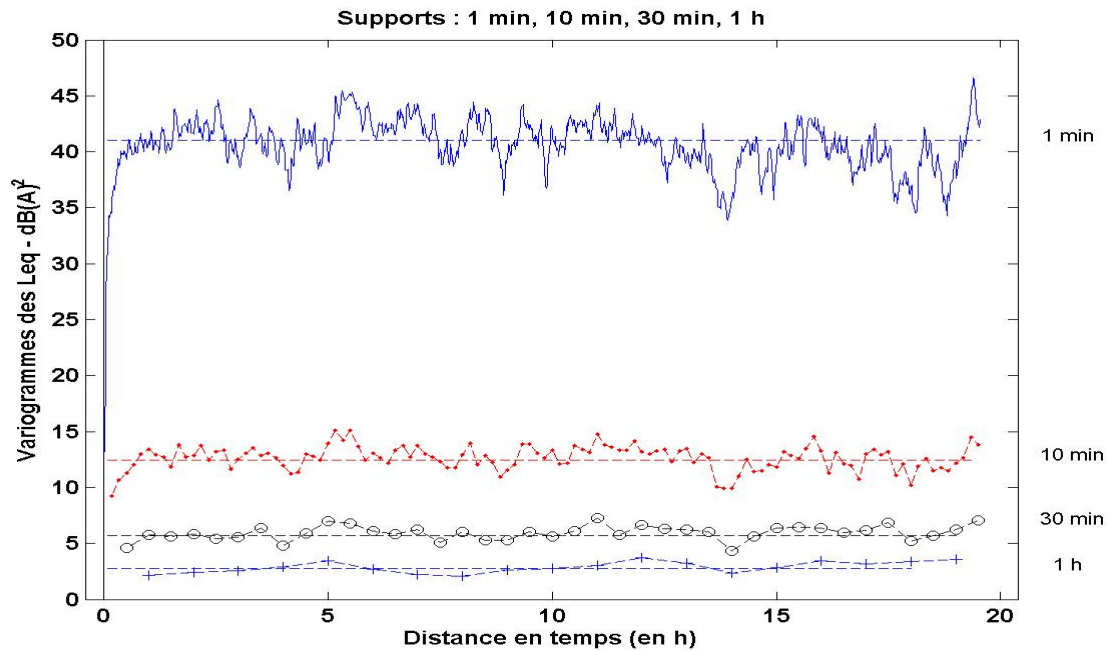


Figure 6.4 : Variogrammes, aux supports de 1 min, 10 min, 30 min, 1 h. En tiret : variance expérimentale des données (S_L^2) aux 4 supports considérés

Durée d'intégration, dT en min	1	10	30	60
N, Nombre de valeurs $L_{Aeq,dT}$	2346	234	78	39
$L_{Aeq,T}$ Estimation du bruit moyen, en énergie, en dB(A)	90,3	90,3	90,3	90,3
Moyenne arithmétique des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	86,9	89,1	89,7	90,0
Ecart type des N valeurs $L_{Aeq,dT}$, en dB(A)	6,4	3,5	2,4	1,7
Lhn, Estimateur du bruit moyen, sous hypothèse normale, en dB(A)	91,6	90,5	90,4	90,3
Normalité acceptable ?	Non	Oui	Non	Oui
Incertitude d'échantillonnage $U_1(dT)$, en dB(A)	0,3	0,5	0,5	0,5
Incertitude d'appareillage U_2	1,5	1,5	1,5	1,5
Incertitude globale U, en dB(A)	1,5	1,6	1,6	1,6
Niveau de bruit élargi, en dB(A)	91,8	91,9	91,9	91,9
$L^*_E(dT) = L_{Aeq,T} + U$	93,2	92,1	92,0	91,9
$L^*_{lm}(dT) = Lhn + U$				

Tableau 6.3 : GEH des Régleurs - Caractéristiques statistiques de l'ensemble des données mesurées

6.4 Discussion - Conclusion

Examinons en premier lieu l'hypothèse d'homogénéité de l'exposition au bruit du groupe des régleurs. Elle a été appliquée successivement à 2 types de résultats disponibles :

- Les 9 séries mesurées initiales. Les niveaux de bruit globaux des séries (cf. tableaux 6.1 et 6.2) sont peu dispersés : écart entre niveau maxi et mini de 3,8 dB(A) ; écart type de 1,3 dB(A).
- Les niveaux de bruit dans l'ensemble des périodes mesurées après recombinaison à l'aide de la durée d'intégration dT. Leur écart type S_L est compris entre 1,7 et 6,4 dB(A) quand dT varie de 60 à 1 min, (cf. tableau 6.3). Les variogrammes (figure 6.4) sont très stables, et pratiquement confondus avec la variance expérimentale dès 30 min de distance.

Dans ces conditions, on peut valider l'hypothèse d'homogénéité de l'exposition au bruit du groupe des régleurs, quand elle est appliquée à la fois à leurs journées de travail et globalement, à l'ensemble des périodes mesurées.

De plus, pour ce GEH, on peut considérer qu'on dispose d'une estimation de l'exposition au bruit à long terme, extrapolable au-delà du domaine étudié (39 h), tant que les conditions d'exposition au bruit de ce groupe de régleurs restent comparables à celles de la période étudiée.

L'hypothèse d'indépendance de mesures successives peut être validée à partir d'une distance en temps indiquée par les variogrammes (figure 6.4.), correspondant à leur convergence avec la variance expérimentale. Elle est acceptable dès 30 min de distance. L'hypothèse d'indépendance est donc acceptable dès que les mesures sont séparées d'une distance minimum de 30 min.

L'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit a été acceptée pour les 9 séries mesurées initiales. Appliquée à l'ensemble des valeurs mesurées aux supports dT, cette hypothèse a été acceptée quand dT vaut 10 et 60 min, et refusée aux valeurs de 1 et 30 min. On retiendra de ces résultats que l'accroissement de la durée d'intégration transforme la distribution des valeurs $L_{Aeq,dT}$ dans un sens qui n'est pas prévisible, mais dépend de la structure des données.

L'effet de la durée d'intégration dT sur la variabilité du bruit a été étudié en recomposant les séries $L_{Aeq,dT}$ de bruit mesuré avec des durées dT comprises entre 1 min et 60 min. L'accroissement de dT se traduit par un resserrement très net des histogrammes de la figure 6.3, qui peut être quantifié par l'écart type indiqué au tableau 6.3 : il est réduit de 6,4 à 1,7 dB(A) quand dT passe de 1 à 60 min.

Comparons les 2 types d'estimations du niveau du bruit moyen, celle qui résulte du calcul en énergie et celle qui résulte du calcul basé sur l'hypothèse de normalité (cf. tableau 6.3). Selon le support considéré (de 1 ; 10 ; 30 ou 60 min) les écarts diminuent (de 1,3 ; 0,2 ; 0,1 à 0 dB(A)). On notera qu'au support de 10 min, où l'hypothèse de normalité a été acceptée, un écart de 0,2 dB(A) a été constaté alors que la valeur attendue est nulle ; toutefois, l'amplitude de cet écart reste très limitée.

Le niveau de bruit élargi estimé à l'aide des séries initiales (tableau 6.2) s'élève à 92,0 dB(A). Quand le niveau de bruit élargi a été estimé dans l'ensemble des données analysées aux supports dT de 10, 30 ou 60 min (tableau 6.3), l'estimation est identique, à 0,1 dB(A) près à la valeur précédente.

Conclusions :

- Les données mesurées permettent de valider l'hypothèse d'homogénéité de l'exposition au bruit du groupe des régleurs.
- L'hypothèse d'une distribution normale des niveaux de bruit des séries mesurées initiales a été acceptée. Appliquée à l'ensemble des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ mesurés, elle a été acceptée aux durées d'intégration dT de 10 min et 60 min.
- Durant l'ensemble des périodes mesurées, soit 39 h, le niveau de bruit moyen a été estimé à 90,3 dB(A).
- L'estimation finale du niveau de bruit élargi s'élève à 92,0 dB(A). Elle s'appuie sur les séries mesurées initiales.
- L'incertitude globale sur ce niveau moyen est de 1,7 dB(A). Elle se décompose ainsi :
 - o incertitude d'échantillonnage du bruit pour ce GEH, estimée à 0,6 dB(A),
 - o incertitude d'appareillage de 1,5 dB(A).
- La structure temporelle de variabilité du bruit de ce GEH permet de considérer que le niveau de bruit élargi peut être extrapolé au-delà du domaine temporel observé, tant que les circonstances d'exposition au bruit de ce GEH restent semblables.

7. COMPARAISON ENTRE ESTIMATEURS DU BRUIT MOYEN

Les résultats des estimations du niveau de bruit moyen de chaque GEH furent présentés dans les chapitres précédents en employant les deux estimateurs :

a) la moyenne en énergie :

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \text{Log} \sum_{i=1}^{i=N} (dT / T) \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,dT}(i)} \quad (1)$$

b) la moyenne sous hypothèse de normalité de la distribution des valeurs mesurées :

$$L_{hn} = L_{ar} + 0,115 \cdot S_L^2 \quad (2)$$

où : L_{ar} et S_L sont respectivement la moyenne arithmétique et l'écart type des N valeurs $L_{Aeq,dT}(i)$,

Ces estimateurs ont été définis dans la partie A de ce document (cf. Problématique : chapitre 7, annexe 1, annexe 2). Dans le présent chapitre, on a regroupé les résultats obtenus à l'aide de ces 2 estimateurs pour les 6 GEH étudiés, afin d'évaluer l'impact du choix de cet estimateur dans les résultats.

7.1 Synthèse des écarts observés entre les 2 estimateurs du bruit moyen

Le tableau 7.1 indique les écarts observés entre les deux estimateurs du bruit moyen, $L_{Aeq,T}$ et L_{hn} , quand on considère successivement deux types de données :

- les séries mesurées initiales,
- les séries $L_{Aeq,dT}$ obtenues par recombinaison des séries initiales à l'aide de 4 valeurs de la durée d'intégration dT .

Parmi ces données, les cas dans lesquels l'hypothèse de normalité a été rejetée ont été signalés par « * ».

	Ecart observé sur les séries initiales	Ecart observé sur les séries recomposées à l'aide d'une durée d'intégration dT spécifiée			
		$dT= 1 \text{ h}$	$dT= 30 \text{ min}$	$dT= 10 \text{ min}$	$dT= 1 \text{ min}$
1 - Fraiseurs	0	0	+0,1	+0,2	+0,5*
2 - Monteurs	-0,4	+0,1*	+0,7*	+1,6*	+3,3*
3 - Menuisiers	-0,2	+0,3*	+0,2*	-0,3*	-1,8*
4 - Extrudeurs	-0,2	0	+0,1	0	+0,2*
5 - Conducteurs	-0,2	0	0	-0,1*	-0,7*
6 - Régleurs	-0,2	0	-0,1*	-0,2	-1,4*

* Série pour laquelle l'hypothèse de normalité de la distribution a été rejetée

Tableau 7.1 : Ecart en dB(A) sur les niveaux de bruit moyen observés, entre l'estimation en énergie et l'estimation sous hypothèse normale ($L_{Aeq,T} - L_{hn}$).

Examinons tout d'abord les résultats du tableau 7.1 quand l'hypothèse de normalité est acceptable. Les écarts s'étendent tous de $-0,2$ à $+0,1$ dB(A) sauf dans le cas des monteuses (écart = $-0,4$ dB(A)).

Quand l'hypothèse de normalité a été rejetée, les écarts s'étendent de $-0,3$ à $+1,6$ dB quand dT varie de 1h à 10 min. On observe que le GEH des monteuses se distingue des 5 autres : il concentre les écarts les plus élevés. Pour les 5 autres GEH, les écarts s'étendent de $-0,3$ à $+0,3$ dB(A). Quand dT est réduit à 1 min, les écarts s'accroissent (de $-1,8$ à $+3,3$ dB(A)).

7.2 Discussion des écarts d'estimation du bruit moyen

Rappelons tout d'abord que l'écart ($L_{Aeq,T} - L_{hn}$) attendu, entre les deux estimateurs du bruit moyen, est nul quand l'hypothèse de normalité est vérifiée (cf. partie A, annexe 1).

Examinons les valeurs du tableau 7.1, en excluant en premier lieu de la discussion deux types de résultats : ceux qui ont été indiqués quand dT = 1 min et ceux du GEH des monteuses. Dans ce cas on note que :

- les écarts expérimentaux s'étendent de $-0,2$ à $+0,1$ dB(A) quand l'hypothèse de normalité est acceptable,
- les écarts expérimentaux s'étendent de $-0,3$ à $+0,3$ dB(A) quand l'hypothèse de normalité a été rejetée.

Quand l'hypothèse de normalité est acceptable les écarts observés sont donc conformes au résultat attendu à $0,2$ dB(A) près. Quand l'hypothèse a été rejetée, l'écart est accru d'une valeur insignifiante parmi les GEH étudiés : il croît de $0,2$ à $0,3$ dB(A). Ceci résulte d'une similitude entre les distributions expérimentales et celle d'une loi normale qui reste forte dans les GEH étudiés, comme le montre la figure 7.1.

Examinons ensuite les deux résultats exclus de la discussion précédente.

Quand dT = 1 min, le résultat a été mentionné surtout pour mettre en évidence un accroissement des écarts entre estimateurs quand dT diminue. Il est directement lié à l'accroissement des singularités de la distribution des niveaux de bruit, par rapport à une loi normale.

Les résultats du GEH des monteuses présentent une singularité : regrouper les écarts les plus élevés entre estimateurs. Pour l'expliquer, examinons la figure 7.1, qui présente les histogrammes des données recomposées au support dT de 10 min pour les 6 GEH. Cette figure montre que l'histogramme du GEH des monteuses est celui qui s'écarte le plus, parmi les 6 présentés, d'une distribution normale. Un même constat peut être dressé aux autres valeurs de dT. Il résulte des caractéristiques des tâches de ce groupe (montage = 93 % du temps à environ 83 dB(A) ; rivetage et usage d'outils pneumatiques bruyants = 7 % du temps à environ 100 dB(A)).

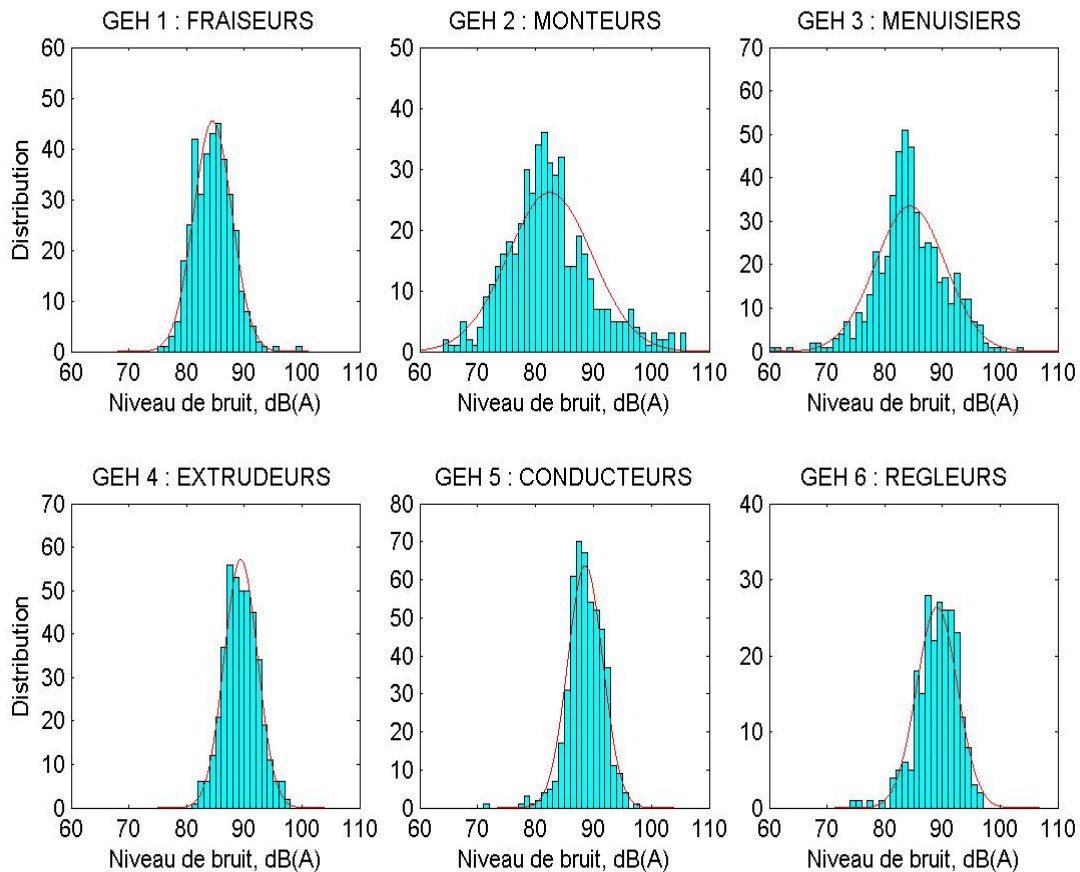


Figure 7.1 : Données expérimentales - Histogrammes des niveaux de bruit $L_{Aeq,dT}$ des 6 groupes de travailleurs étudiés, au support $dT = 10$ min.

Examinons le signe de l'écart observé pour le GEH des monteurs, quand $dT = 10$ min, soit : $(L_{Aeq,T} - L_{hn}) = +1,6$ dB(A). L'écart est positif. La figure 7.1 montre que la distribution des niveaux de bruit de ce GEH présente une dissymétrie orientée vers les forts niveaux de bruit. Alors que cette distribution n'est pas conforme à l'hypothèse de normalité, si on analyse les résultats en employant l'estimateur du bruit moyen sous hypothèse de normalité, le signe de l'écart observé indique que L_{hn} est inférieur à $L_{Aeq,T}$ de 1,6 dB(A).

En d'autres termes, sachant qu'il n'y a pas d'écart entre les deux estimateurs quand l'hypothèse de normalité est acceptable, on a montré avec l'exemple des monteurs le résultat suivant :

Quand la distribution des niveaux de bruit n'est pas conforme à la loi normale et présente une dissymétrie orientée vers les forts niveaux de bruit, l'emploi de l'estimateur du niveau de bruit moyen sous hypothèse de normalité conduit à sous estimer le niveau de bruit moyen en énergie. L'estimateur du niveau de bruit moyen en énergie semble donc préférable.

Ce résultat confirme celui qui avait été énoncé antérieurement, en conclusion des simulations ayant eu pour objet de comparer les deux estimateurs du niveau de bruit moyen, dans le cas de distributions non normales mais présentant des dissymétries semblables et de sens opposés (cf. Partie A, annexe 2).

Qu'en est-il si la dissymétrie est orientée à l'inverse du GEH des monteuses, dans le sens des faibles niveaux de bruit ? Les simulations antérieures ont montré que dans ce cas, les écarts ($L_{Aeq,T} - L_{hn}$) sont de signe négatif. Dans les données expérimentales, le tableau 7.1 montre un cas de ce type : le GEH des régleuses quand $dT = 1$ min, où ($L_{Aeq,T} - L_{hn}$) = -1,4 dB(A). On vérifie que l'histogramme correspondant à ce cas (cf. GEH 6, figure 6.3) présente effectivement une dissymétrie orientée vers les faibles niveaux de bruit.

On retrouve donc bien dans les données expérimentales les tendances observées dans les simulations. Ceci incite donc à garder la même conclusion, quant au choix final de l'estimateur du niveau de bruit moyen : Préférer l'estimateur du niveau de bruit moyen calculé en énergie à celui qui suppose l'hypothèse de normalité.

8. NIVEAU DE BRUIT ELARGI FINAL, PAR GEH

Après l'étude des 6 groupes d'exposition homogène (GEH), on a regroupé dans ce chapitre les résultats principaux.

Les résultats numériques principaux des 6 groupes d'exposition homogène (GEH) étudiés ont été regroupés dans le tableau 8.1.

Ce tableau indique :

- le niveau de bruit de référence, en dB(A) : il a été défini par le niveau du bruit moyen calculé en énergie, exprimé sans inclure d'incertitude ;
- les valeurs des 3 termes d'incertitudes, en dB(A) :
 - o incertitude d'échantillonnage du GEH, U_1 ;
 - o incertitude d'appareillage, U_2 ;
 - o incertitude totale U ;
- le niveau de bruit élargi final en dB(A), défini par la somme du niveau de bruit de référence et de son incertitude totale U.

Ces valeurs constituent les références auxquelles seront comparées les résultats issus d'échantillons tirés dans les séries mesurées. La comparaison des échantillons entre eux et avec les valeurs de référence fera l'objet de la partie suivante de cette étude, qui sera décrite dans un autre document à paraître.

GEH	Niveau de bruit de référence, dB(A)	Incertainde			Niveau de bruit élargi final, dB(A)	Dispose-t-on d'une estimation à long terme ?
		Liée à l'échantillonnage du GEH, U_1	Liée à l'appareillage, U_2	Totale U		
1 - Fraiseurs	86,0	0,6	1,5	1,6	87,6	Oui
2 - Monteurs	90,2	1,8	1,5	2,3	92,5	Oui
3 - Menuisiers	88,4	1,3	1,5	2,0	90,4	Oui
4 - Extrudeurs	90,4	1,5	1,5	2,1	92,5	Non
5 - Conducteurs	89,6	0,9	1,5	1,7	91,3	Oui
6 - Régleurs	90,3	0,9	1,5	1,7	92,0	Oui

Tableau 8.1 : Niveau de bruit de référence, incertainde et niveau de bruit élargi par GEH, en dB(A).

Le tableau 8.1 indique qu'on dispose d'une estimation de l'exposition à long terme pour 5 GEH parmi les 6 étudiés. On rappelle que « long terme » évoque la possibilité d'extrapoler le résultat,

au-delà des 80 h de mesurages, sur un intervalle de temps durant lequel les circonstances de l'exposition au bruit restent comparables à celles des périodes de travail étudiées.

Dans le cas du GEH des extrudeurs, la possibilité d'extrapolation a été rejetée, à cause d'une variabilité du bruit entre journées qui n'a pas pu être expliquée par les circonstances du travail de ce groupe.

Pour les 5 autres GEH, on a considéré comme acceptable la possibilité d'extrapoler les résultats, mais en s'appuyant sur des informations que résument le tableau 8.2 et qui diffèrent d'un GEH à l'autre :

- absence de variabilité notable entre séries dans le cas des fraiseurs et régleurs ;
- extrapolation fondée sur la recomposition de l'exposition globale à partir d'une analyse des tâches principales, dans le cas de monteurs et des menuisiers ;
- extrapolation acceptée pour le GEH des conducteurs, malgré la présence d'une certaine hétérogénéité dans les données ; cette hétérogénéité fut expliquée par les caractéristiques des 3 lignes de production que pilotent les membres de ce groupe.

Une remarque s'impose quand la possibilité d'extrapoler les résultats s'appuie sur une recomposition de l'exposition globale à partir de plusieurs tâches. Dans les 2 GEH où cette méthode a été appliquée, on doit noter que l'extrapolation a été fondée sur une estimation des durées relatives des tâches s'appliquant à un intervalle de temps supérieur à celui des périodes observées, ce qui autorise à parler de « long terme ». Si les durées relatives des tâches n'avaient été estimées que durant les périodes observées, la possibilité d'extrapolation aurait été refusée.

GEH	Validité des hypothèses appliquées aux séries initiales		Facteur à contrôler pour accroître l'homogénéité des données
	Normalité ?	Homogénéité ?	
1 - Fraiseurs	Oui	Oui	Néant
2 - Monteurs	Oui	Non	Tâches principales
3 - Menuisiers	Oui	Non	Tâches principales
4 - Extrudeurs	Oui	Non	Journée de travail
5 - Conducteurs	Oui	Non	Ligne de production
6 - Régleurs	Oui	Oui	Néant

Tableau 8.2 : Résumé de quelques caractéristiques de la variabilité observée entre séries mesurées initiales dans chaque GEH.

9. CONCLUSION

Ce document a rappelé tout d'abord la problématique de l'estimation de l'exposition au bruit professionnel. On a présenté les différents moyens utilisables dans la pratique de l'échantillonnage du bruit pour contrôler la représentativité des échantillons, pour caractériser leur variabilité en temps, pour estimer le niveau de bruit moyen et son incertitude. Ce rappel méthodologique a mis en évidence la nécessité de disposer de données d'exposition de long terme, afin de comparer ces différents moyens et de préciser leur domaine de validité.

On présente ensuite les méthodes qui furent appliquées afin de constituer une base de données d'exposition répondant à cette nécessité. L'exposition au bruit de six groupes de travailleurs a été étudiée, en collectant simultanément deux types d'informations : une analyse de l'activité réelle des opérateurs, un mesurage du bruit reçu en continu par exposimétrie. La collecte des données a été prolongée durant environ 80 h pour chaque groupe étudié.

On indique enfin les caractéristiques de chacun des 6 groupes étudiés, en détaillant tous les résultats qui découlent des différents moyens applicables pour estimer leur exposition au bruit. Ces résultats sont discutés par groupe, afin d'en extraire l'estimation la plus fiable possible du niveau de bruit moyen et de son intervalle de confiance, utilisables comme valeurs de références.

Cette base de données sera exploitée dans une autre étude, ayant pour objectif de comparer aux valeurs de référence présentées ici différents plans d'échantillonnage du bruit calqués sur les pratiques métrologiques habituelles. On en déduira des recommandations utiles à la métrologie de l'exposition au bruit professionnel.