

→ *R. Vincent*, service Evaluation et prévention du risque chimique
P. Wild, service Epidémiologie
L. Thiéry, service Métrologie-acoustique-vibrations,
 du Centre de recherche de l'INRS,
 Nancy
A. Leplay, F. Marsenac, Rhône-Poulenc Industrialisation, 69150 Décines
B. Despres, Rhodia, 69190 Saint-Fons

ALTREX : un logiciel pour l'analyse statistique et l'interprétation des résultats de mesures

Cas des expositions professionnelles aux agents chimiques et au bruit

THE ALTREX SOFTWARE: A TOOL FOR THE STATISTICAL ANALYSIS AND INTERPRETATION OF MEASUREMENT RESULTS.

ASSESSMENT OF OCCUPATIONAL EXPOSURE TO CHEMICALS AND NOISE

The interpretation of occupational exposure measurements is an important step when assessing workplace exposure to stressors. Statistical analysis procedures recommended by several industrial hygiene standards were gathered in the ALTREX software. Statistical tests included in ALTREX make it possible to analyse exposure variations and to establish a diagnosis of the exposure situation, based on the probability of exposures exceeding threshold limit values. ALTREX can be used to process two types of measurements: chemical substance and noise exposure.

- occupational exposure
- chemical substance • noise
- software • statistical analysis

L'interprétation des résultats de mesures d'exposition est une phase importante dans l'évaluation des expositions aux nuisances sur les lieux de travail. Les méthodologies d'analyse statistique, recommandées par diverses normes, ont donné lieu à la réalisation du logiciel ALTREX. Les différents tests mis en œuvre permettent d'analyser la variabilité des expositions et d'établir un diagnostic de la situation d'exposition, à partir de la probabilité de dépassement des valeurs limites d'exposition professionnelle. ALTREX permet de traiter des résultats de mesures d'exposition à deux types de nuisances : les agents chimiques et le bruit.

• exposition professionnelle • agent chimique • bruit • logiciel • analyse statistique

Interpréter les résultats de mesures d'exposition est une phase importante de la stratégie d'évaluation des expositions aux nuisances sur les lieux de travail. Des conclusions issues de cette analyse dépendent des mises en place de mesures correctives et/ou de plans de contrôles périodiques de l'exposition. De façon à aider l'hygiéniste industriel dans cette interprétation, l'INRS et la société Rhône-Poulenc, sur la base de leurs expériences [1 à 3], ont conçu un outil d'analyse statistique et d'interprétation des mesures d'exposition professionnelles aux agents chimiques et au bruit : le logiciel ALTREX [4] (Analyse Log-normale et Traitement des mesures d'EXposition).

Présentation générale

La méthodologie développée dans ALTREX permet à l'hygiéniste industriel de formaliser l'analyse des résultats et l'incite à contrôler la qualité et la représentativité des mesures d'exposition avant d'établir un diagnostic pour un Groupe d'Exposition Homogène (GEH) constitué a priori à partir du poste de travail et des tâches effectuées par les salariés.

A partir d'un nombre limité de mesures comparables (méthodes et durée de prélèvement identiques...) et sous l'hypothèse de distribution normale ou log-normale, ALTREX calcule la probabilité de dépassement des valeurs limites d'exposition professionnelles, réglementaires ou recom-

GLOSSAIRE

Coefficient de doublement (en anglais « exchange rate ») : il est nécessaire pour calculer un niveau sonore continu équivalent. Il détermine la combinaison entre un niveau sonore et une durée. Quand un niveau de bruit continu est diminué par la valeur en dB(A) de ce coefficient de doublement, il faut que la durée d'exposition soit doublée pour que le niveau sonore continu équivalent reste le même. Le coefficient de doublement est déterminé par la réglementation ou la normalisation en usage dans les divers pays. Il vaut 3 dB(A) dans les pays européens, mais 4 ou 5 dB(A) aux Etats-Unis.

Distribution log-normale : les logarithmes de la série de mesures suivent une loi de distribution normale.

Droite de Henri : elle permet de vérifier l'ajustement d'une loi normale ou log-normale à une série de mesures. L'axe des ordonnées correspond aux fréquences cumulées en mode gaussien, l'axe des abscisses correspond aux valeurs des mesures; l'échelle est arithmétique dans le cas d'un ajustement à une loi normale, elle est logarithmique dans le cas d'un ajustement à une loi log-normale. Un relatif alignement des points le long de cette droite permet de valider l'une ou l'autre hypothèse de distribution.

Ecart-type géométrique (EG) : il caractérise la dispersion des mesures d'exposition aux agents chimiques si l'hypothèse de distribution log-normale est vérifiée. Il est indépendant des unités de mesure. L'EG est l'exponentiel de l'écart-type des valeurs logarithmiques des résultats de mesures, il fournit la même information que l'Indice de Rappaport (IR),

$$EG = \exp(0,255 \times \log(IR)).$$

Groupe d'exposition homogène (GEH) : Il s'agit d'une situation d'exposition professionnelle à un risque défini en relation avec une série de tâches bien identifiées, et a priori reproductibles. Un GEH peut concerner un ou plusieurs travailleurs, exposés au(x) même(s) agent(s) chimique(s) et effectuant les mêmes tâches. Il en est de même pour l'exposition au bruit quand les circonstances de l'exposition peuvent être considérées comme semblable a priori.

Un groupe est dit homogène :

- après acceptation d'une hypothèse sur la distribution des données observées (normale ou log-normale),
- par la dispersion limitée de la distribution des mesures d'exposition : elle est caractérisée par l'écart-type géométrique (EG) pour

l'exposition aux agents chimiques, et par l'écart-type pour l'exposition au bruit,

- par l'absence d'une dérive temporelle des résultats de mesure,
- par l'absence d'hétérogénéité entre les différents groupes de mesures définis a priori. Cette hétérogénéité est évaluée par une analyse de variance.

Intervalle de confiance à p % d'une grandeur : c'est un intervalle qui a une probabilité égale à p % de contenir la vraie valeur de cette grandeur. Plus p est grand, plus l'intervalle de confiance est large.

Indice d'exposition (IE) : dans le cas d'une exposition à une substance isolée, l'IE est le rapport de l'exposition mesurée à la valeur limite d'exposition. Quand plusieurs substances sont supposées agir simultanément sur le même organe cible de l'organisme humain, il est préférable de considérer l'effet combiné de ces substances plutôt que l'effet de chacune d'entre elles considérée individuellement. L'IE est alors calculé en référence à cette convention d'additivité, c'est donc la somme des rapports concentration atmosphérique de chaque substance sur valeur limite correspondante. IE supérieure à 1 indique que la valeur limite du mélange des différentes substances est dépassée.

Indice de Rappaport (IR) : autre manière de caractériser la dispersion des mesures d'exposition aux agents chimiques sous réserve que l'hypothèse de distribution log-normale soit vérifiée. Sa valeur correspond au rapport du percentile 97,5 de la distribution sur le percentile 2,5. Comme l'EG, il est indépendant des unités de mesure. La relation entre l'EG et l'indice de Rappaport est donnée par la formule suivante : $IR = \exp(4,92 \log(EG))$.

Moyenne géométrique : c'est l'exponentielle de la moyenne arithmétique des logarithmes d'une série de mesures. Dans le cas d'une distribution log-normale, elle correspond à la médiane de la série de mesures.

Niveau sonore continu équivalent : c'est le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A. C'est un niveau sonore moyen calculé à partir des valeurs mesurées L_i pondérées par les durées correspondantes t_i . En introduisant un coefficient Q (égal à 10 en France et dans les pays européens, égal à 16,61 aux USA), il s'écrit : $L_{eq} = Q \cdot \log_{10}[(1 / \sum T_i) \cdot (\sum T_i \cdot 10^{L_i/Q})]$

Percentiles : Les percentiles et leurs intervalles de confiance sont calculés en s'ap-

puyant sur une hypothèse : la distribution des données est soit normale, soit log-normale. Formellement, le x-ième percentile est la valeur qui scinde une distribution de sorte que x % des résultats lui soient inférieurs. Le 50^e percentile est appelé la médiane. L'intervalle de confiance d'un percentile est appelé également intervalle de tolérance.

Probabilité de dépassement d'une valeur limite : c'est la probabilité, estimée d'après les résultats de mesures, que l'exposition excède la valeur limite. Cette probabilité est calculée en supposant que la distribution des résultats est normale ou log-normale, et que les données sont caractéristiques d'un GEH.

Seuil de test : il est employé quand le GEH est évalué sous les hypothèses suivantes :

- conformité avec un type donné de distribution (log-normale, normale),
- absence d'une dérive dans le temps, homogénéité des différents groupes de mesurage.

Le résultat est déclaré significatif et l'hypothèse est rejetée lorsque la valeur p de la probabilité indiquée par le test est inférieure au seuil de test. Plus le seuil choisi est bas, plus la probabilité de conclure par erreur est faible.

Test de log-normalité : l'hypothèse de log-normalité est contrôlée après transformation logarithmique des données à l'aide du test de Shapiro-Wilk, adapté par P. Royston afin de prendre en compte les valeurs censurées pour lesquelles le seul résultat de mesure connu est d'être inférieur au seuil de détection de l'appareillage employé.

Test de normalité : cette hypothèse est contrôlée à l'aide du test de Shapiro-Wilk, adapté par P. Royston, afin de prendre en compte les valeurs censurées pour lesquelles le seul résultat de mesure connu est d'être inférieur au seuil de détection de l'appareillage employé.

Test de tendance : ce test est employé pour détecter dans les données la présence éventuelle d'une dérive temporelle. Il est basé sur le coefficient de corrélation (r) des rangs de Spearman calculé sur les mesures et sur les dates auxquelles elles ont été effectuées. Si la probabilité p associée à cette corrélation est inférieure au seuil de test, alors la tendance est significative. Une valeur de r positive correspond à une augmentation, alors qu'une valeur négative correspond à une diminution de l'exposition au cours du temps.

mandées. ALTREX calcule également les paramètres classiques de distribution (médiane, moyenne, écart-type, écart-type géométrique (EG) et leurs intervalles de confiance associés) en tenant compte des résultats de mesures inférieurs au seuil de quantification.

D'autres procédures permettent de vérifier l'ajustement graphique d'une série de résultats à une loi de distribution, de tester l'absence de dérive temporelle (tendance à l'augmentation ou à la diminution de l'exposition au cours du temps), d'analyser la variance des expositions au sein d'un GEH en fonction de différentes variables explicatives (analyse de variance).

ALTREX est un outil de gestion, de traitement, d'analyse et de présentation des résultats de mesures d'exposition professionnelle. Il nécessite un environnement Microsoft Windows (1).

ALTREX est un outil d'aide au diagnostic de la situation d'exposition professionnelle, qui en aucun cas ne saurait se substituer au jugement professionnel de l'hygiéniste industriel.

Le diagnostic est fondé sur l'application des normes ou des recommandations suivantes :

a) pour les expositions aux agents chimiques

L'analyse des résultats développée dans ALTREX est issue des recommandations de l'American Industrial Hygiene Association (AIHA) [5], de la normalisation européenne [6], des publications de la British Occupational Hygiene Society (BOHS) [7], du guide de l'INRS pour l'évaluation du risque d'exposition aux agents chimiques sur les lieux de travail [8].

b) pour l'exposition au bruit

ALTREX facilite l'application de la norme NF S 31-084 [9]. De plus il comprend un module complémentaire constitué d'une « calculatrice de décibels », rendant aisés tous les calculs de Leq, toutes les additions (ou soustractions) de valeurs exprimées en dB.

Signalons également que des normes ou recommandations différentes sont employées dans divers pays, notamment les Etats-Unis. Pour tenir compte des divers pays, deux configurations sont disponibles : la configuration « Europe » et la configuration « USA ». Pour appliquer la réglementation française, on veillera à n'employer que la configuration « Europe ».

La définition des termes utilisés dans l'étude figure dans le glossaire ci-contre.

1. Exposition aux agents chimiques

1.1. Méthodologie d'analyse des mesures d'exposition aux agents chimiques

ALTREX donne un diagnostic de conformité de l'exposition d'un groupe d'exposition homogène (GEH) en référence à une valeur limite et à partir de prélèvements représentatifs et homogènes : durée, débit de prélèvement, conditions d'analyse identiques. De façon à établir ce diagnostic, ALTREX vérifie les hypothèses associées à un GEH : loi de distribution statistique (loi log-normale ou normale), absence de dérive temporelle, pas de dispersion importante des résultats. Après avoir testé ces différentes hypothèses, ALTREX calcule la probabilité de dépassement, c'est-à-dire la probabilité que les salariés appartenant au GEH soient exposés à des niveaux supérieurs à la valeur limite d'exposition (VME ou VLE). La conformité est établie en référence à cette probabilité. Elle est représentée par trois « couleurs » :

■ **Zone « verte »** : la situation d'exposition est jugée « acceptable » (diagnostic vert) si *la probabilité de dépassement de la valeur limite est inférieure à ce seuil.*

Le seuil par défaut est fixé à 0,1 % (voir l'annexe indicative 4 de la norme européenne EN 689 [6]), mais il peut être modifié en fonction du type de danger(s) associé(s) à (aux) l'agent(s) chimique(s). Une valeur de 0,1 % signifie que probablement, l'exposition sera supérieure à la valeur limite moins de 1 fois sur 1000 : 1 journée sur 1000 dans le cas de mesures visant à estimer l'exposition en référence à une VME ou pendant 15 minutes sur 1000 x 15 minutes dans le cas de mesures visant à estimer l'exposition à une VLE.

■ **Zone « rouge »** : la situation d'exposition est jugée « excessive » (diagnostic rouge) si *la probabilité de dépassement de la valeur limite est supérieure à ce seuil.* Le seuil par défaut est fixé à 5 % (cf. annexe 4 de la norme européenne EN 689 [6]) mais il peut être modifié en fonction du type de danger(s) associé(s) à (aux) l'agent(s) chimique(s). Une valeur de 5 % signifie que probablement l'exposition sera supérieure à la valeur limite plus de 5 fois sur 100 : 5 journées sur 100 dans le cas de mesures visant à estimer l'exposition en référence à une VME ou pendant 15 minutes sur 100 x 15 minutes dans le cas de mesures visant à estimer l'exposition à une VLE.

■ **Zone « orange »** : La situation d'exposition semble inférieure à la valeur limite (diagnostic orange) si *la probabilité de dépassement est supérieure à 0,1 % et inférieure à 5 %.* Ce diagnostic incertain devra être confirmé par des mesures complémentaires. L'hygiéniste industriel pourra également collecter des informations supplémentaires sur la série de mesures pour étayer son diagnostic.

Les limites de ces probabilités peuvent être modifiées par l'hygiéniste à partir de son jugement professionnel et en tenant compte des dangers associés à l'agent chimique responsable de l'exposition. La probabilité de dépassement d'une valeur limite est calculée, sous hypothèse d'une distribution log-normale, à partir de la moyenne géométrique et de l'écart-type géométrique [10].

Lorsque les résultats mesurés sont accompagnés de variables explicatives (période de mesure, poste, circonstance d'exposition...), ALTREX vérifie l'homogénéité des mesures en référence à ces variables explicatives en réalisant une analyse de variance.

Conformément à la littérature spécialisée, ALTREX teste par défaut une hypothèse de distribution log-normale des résultats de mesures d'exposition [11]. Cependant, en présence de conditions d'exposition très stables, l'hypothèse de distribution normale peut également être vérifiée. L'application d'ALTREX est illustrée par l'analyse d'une série de mesures d'exposition au styrène.

(1) Le logiciel est disponible dans le commerce en s'adressant à : Sté ARELCO, 2 avenue Ernest-Renan - 94120 Fontenay-sous-Bois.

1.2. Analyse d'une série de mesures d'exposition au styrène

1.2.1. Description des données

Quinze mesures d'exposition au styrène ont été réalisées à un poste de travail dit de « stratification », situé dans un atelier de moulage au contact de coffrets en matériau composite réalisés à partir de fibre de verre et de résine polyester en solution dans le styrène.

L'objectif de ces mesures était de vérifier la conformité de l'exposition en référence à la VME de 50 ppm. Les mesures d'exposition concernent un GEH, défini a priori, et constitué de deux salariés : « Pierre » et « Jacques ». Les salariés travaillent en poste, le matin ou l'après-midi, par rotations successives, et leur exposition a été évaluée durant différentes journées. Les mesures sont comparables car la même méthode de prélèvement a été employée, avec des durées de mesures identiques. Pour traiter cet exemple nous utiliserons les résultats du *tableau 1*, qui spécifie les valeurs de deux variables explicatives, la période de travail (selon 2 modalités : matin et après-midi) et les salariés (modalités : Pierre et Jacques).

L'examen de cette série indique tout d'abord qu'aucun résultat de mesure d'exposition n'est supérieur à 50 ppm. Par contre, trois résultats sont inférieurs au seuil de quantification (notés respectivement < 2,5; < 5; < 10 sur le tableau) et un algorithme a été spécialement développé pour traiter ce type de résultats dans ALTREX, lors du calcul des probabilités de dépassement. Dans ce cas, l'estimation du maximum de vraisemblance est ajustée par un algorithme de Newton-Raphson alors que l'intervalle de confiance de la probabilité de dépassement est obtenu par une méthode de simulation de Monte-Carlo (« Gibbs sampling ») [12].

1.2.2. Définition des paramètres de calcul

Pour effectuer l'analyse statistique des résultats, ALTREX utilise un certain nombre de tests dont les paramètres peuvent être modifiés facilement par l'utilisateur. Les principaux paramètres, fixés par défaut, sont les suivants.

Loi de distribution : log-normale

ALTREX vérifiera la validité de cette hypothèse en appliquant le test de Shapiro-Wilk [13], adapté par Royston [14] à la série de résultats. La variable W employée dans le test statistique de

TABLEAU 1

RÉSULTATS DES MESURES D'EXPOSITION AU STYRÈNE

Date	[Styrène] (ppm)	Période	Salarié
05/06/1997	11,6	Matin	Pierre
07/06/1997	< 2,5	Matin	Jacques
07/06/1997	5,9	Matin	Pierre
08/06/1997	10,3	Matin	Jacques
09/06/1997	9,5	Matin	Pierre
05/07/1997	19,5	Après-midi	Jacques
07/07/1997	< 5	Matin	Pierre
07/07/1997	17,2	Matin	Jacques
08/07/1997	20,1	Après-midi	Pierre
09/07/1997	19,8	Après-midi	Jacques
05/08/1997	29,4	Après-midi	Pierre
07/08/1997	< 10	Matin	Jacques
07/08/1997	30,3	Après-midi	Pierre
08/08/1997	33,4	Après-midi	Jacques
09/08/1997	39,5	Après-midi	Pierre

Shapiro-Wilk fournit une estimation du carré du coefficient de corrélation linéaire dans une représentation en échelle gaussienne; elle mesure donc la distance entre la distribution observée des logarithmes des expositions et une distribution normale. Le rejet de l'hypothèse nulle de normalité n'est acceptable que si la probabilité d'observer une valeur donnée W est inférieure au seuil du test (5 % par défaut). Dans ce cas, le test est significatif. Dans ce test statistique une valeur de W proche de 1 indique la validité de l'hypothèse testée. Le seuil de significativité à 5 % dépend du nombre de mesures réalisées.

Écart-type géométrique (EG) = 3

Si l'écart-type géométrique observé pour le jeu de données est supérieur à 3, l'hypothèse de groupe d'exposition homogène (GEH) ne sera pas validée. Comme l'écart-type géométrique est l'exponentiel de l'écart-type des valeurs logarithmiques des résultats de mesures, on notera qu'un écart type géométrique égal à 3 signifie que l'exposition d'un GEH varie d'un facteur un à mille. Cette variabilité des expositions correspond à des situations de travail habituelles [15].

Diagnostic vert : < 0,1 %;

Diagnostic rouge : > 5 %;

Seuil de test : p = 5 %;

Intervalle de confiance : 90 %;

Percentiles : les percentiles 50 (médiane) et 95 de la distribution.

1.2.3. Résultats et interprétation

Le rapport détaillé (cf. *annexe* en fin d'article) reprend l'ensemble des informations relatives à la série de mesures et les résultats de l'analyse statistique :

Informations sur le poste de travail, VME.

Nombre total de mesures et nombre de mesures inférieures au seuil de quantification.

Hypothèse de distribution testée : ici log-normale.

L'hypothèse de distribution log-normale est acceptée car W = 0,97 et p = 83,38 % (nettement supérieur au seuil d'acceptation fixé à 5 %).

Probabilité de dépassement de la VME : 7,02 % et son intervalle de confiance à 90 % (1,53 - 20,77 %). La situation d'exposition correspond a priori à un diagnostic rouge.

Moyenne arithmétique : 17,02 ppm.

Estimation de la moyenne arithmétique sous hypothèse de distribution log-normale et son intervalle de confiance : 19,47 ppm (13,11 - 41,39 ppm). La moyenne arithmétique est obtenue à l'aide d'un esti-

mateur proposé par Aitchison et Brown [16] dans le cas d'une distribution log-normale.

Ecart-type géométrique : 2,56.

Valeur de l'indice de Rappaport : 39,57.

L'indice de Rappaport [17] caractérise d'une autre manière que le paramètre EG, la dispersion des mesures d'exposition.

Résultats du test de tendance de Spearman [18] : significatif ($r = 0,93$; $p = 0,3$ % inférieur au seuil de test fixé à 5 %). ALTREX a détecté une tendance à l'augmentation des valeurs d'exposition en fonction du temps. L'hygiéniste devra se poser des questions et apporter les réponses relatives à cette situation, par exemple : augmentation de l'exposition liée à la détérioration du procédé au cours du temps, dérive de la méthode d'analyse et de prélèvement, etc. Dans le cas de cette série de mesures, l'hygiéniste a pu identifier les raisons de cette tendance qui était due au colmatage progressif du filtre situé sur le dispositif de captage à la source.

Analyse de variance

Les résultats de l'analyse de variance indiquent qu'il existe une différence significative ($F = 17,79$; $p = 0,1$ % inférieur au seuil de test fixé à 5 %) entre les mesures effectuées le matin (moyenne = 12,09 ppm) ou l'après-midi (moyenne = 26,48 ppm). En revanche, il n'existe pas

de différence significative ($F = 0,02$; $p = 88,53$ %) entre l'exposition des salariés « Pierre » et « Jacques » (Moyenne d'exposition pour Pierre = 17,09 ppm, pour Jacques = 17,82 ppm). Un tel constat doit inciter l'hygiéniste à élucider les causes d'une telle différence en recherchant ce qui distingue les tâches et opérations effectuées durant ces deux périodes. La façon de travailler de Pierre ou Jacques ne peut être mise en cause. Par contre, après enquête sur le terrain, l'hygiéniste a élucidé la cause d'une telle différence entre le matin et l'après-midi. La différence de rythme de production entre l'atelier de moulage et l'atelier de finition où sont repris les coffrets fabriqués, provoque systématiquement un engorgement qui se traduit par un stockage prolongé des coffrets dans l'atelier de moulage en début d'après-midi.

Les coffrets ainsi stockés libèrent du styrène monomère qui contribue à augmenter le niveau de pollution dans l'atelier de moulage.

Valeur et intervalle de confiance à 90 % (IC) des percentiles

Percentile 50 (12,54; IC = 7,87 - 19,14) et percentile 95 (58,69; IC = 34,71-151,9). Ces résultats indiquent que 5 % des expositions ou que sur 100 jours travaillés, pendant 5 jours l'exposition sera de 58,69 ppm et se situera entre 34,71 et 151,9 ppm pour un intervalle de confiance à 90 %. Ce résultat confirme le diagnostic rouge éta-

bli, pour cette situation d'exposition, à l'aide du calcul de la probabilité de dépassement de la VME.

Le graphe des fréquences cumulées

ALTREX permet d'obtenir immédiatement un graphe des fréquences cumulées. Les valeurs mesurées sont représentées sur ce graphique simultanément avec une droite de Henri.

Sur la *figure 1*, les résultats de mesure sont représentés avec un signe de couleur différente pour la première variable explicative, la « période » de mesurage, et les valeurs inférieures au seuil de quantification sont entre parenthèses.

La droite coupe l'axe des probabilités de dépassement de la valeur admissible dans la zone rouge. L'intervalle de confiance de cette probabilité recouvre les zones orange et rouge. Un des intérêts de ce graphique est de faire ressortir la présence de deux types de groupes de données, qui correspondent dans cet exemple aux différences expliquées par la variable « période ».

Sur la *figure 2*, les résultats de mesure sont représentés suivant la modalité salarié (Pierre ou Jacques).

Dans ce cas, on constate que les points sont régulièrement répartis et que la variabilité de l'exposition n'est pas liée à la variable « salarié ». Cet examen graphique confirme les résultats de l'analyse de variance.

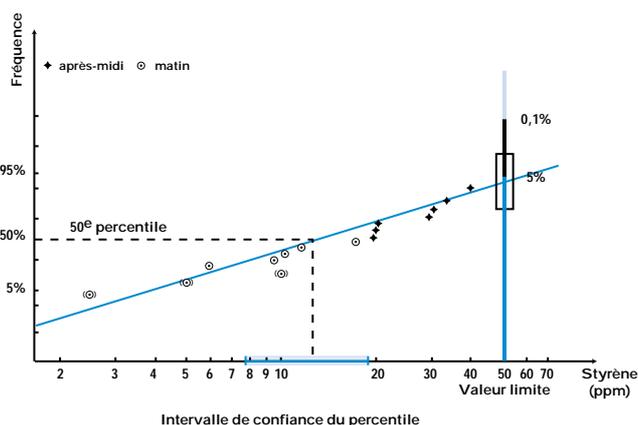


Fig. 1. Ajustement log-normal des fréquences cumulées pour la variable période (produit chimique : styrène) - Valeurs censurées entre parenthèses - Fichier : CNDSTY - Etablissement : usine A - Atelier : moulage de coffrets - Poste de travail : stratification - Valeur limite : 50 ppm

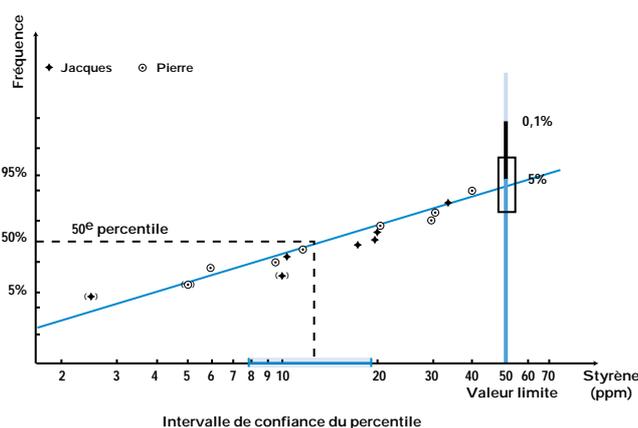


Fig. 2. Ajustement log-normal des fréquences cumulées pour la variable salarié (produit chimique : styrène) - Valeurs mesurées entre parenthèses - Conditions de mesures : cf. fig. 1

1.2.4. Conclusions de l'évaluation et apport d'ALTREX

Dans l'exemple traité ici, l'hypothèse de groupe d'exposition homogène n'est pas vérifiée, pour deux raisons. La variable « période » semble jouer un rôle déterminant dans la variabilité de l'exposition. De plus, une tendance à l'augmentation de l'exposition au cours du temps a été notée.

La situation d'exposition est jugée excessive (« diagnostic rouge », probablement « entre orange et rouge »), compte tenu de la probabilité de dépassement de la valeur limite (ici VME de 50 ppm). ALTREX indique que ce diagnostic ne peut être appliqué sans examen critique de la qualité des données, en raison du manque d'homogénéité des résultats de mesure. L'hygiéniste devra donc préconiser des mesures correctives : nettoyage du filtre du dispositif de captage, solutions au problème de pollution lié au stockage des coffrets (en modifiant par exemple le processus de travail). Lorsque ces mesures correctives auront été appliquées et validées (vérification technique et suivi de l'efficacité du dispositif de captage, par exemple), il devra effectuer une nouvelle série de mesures qui lui permettront de caractériser la situation d'exposition en référence à la VME de 50 ppm.

L'application de la méthodologie statistique mise en œuvre dans ALTREX a permis à l'hygiéniste industriel d'objectiver son diagnostic et l'a également incité à rechercher les causes de la variabilité et de la tendance temporelle observées sur la série de mesures.

Le cas de l'exposition simultanée à plusieurs agents chimiques peut être également traité par ALTREX, sous réserve que les effets toxiques des différents agents chimiques agissent sur un même organe cible de l'organisme. Dans ce cas, ALTREX applique l'analyse statistique aux indices d'exposition de la série de mesures. L'indice d'exposition d'une série de mesures correspond à la sommation des concentrations mesurées pour chaque polluant rapportées aux valeurs limites correspondantes [19]. Dans ce cas, la valeur limite du mélange est égale à 1.

2. Exposition au bruit

2.1. Méthodologie d'analyse des mesures d'exposition au bruit

ALTREX contient deux modules concernant l'exposition au bruit :

- **Le module appelé « exposition sonore »** permet la saisie de mesures d'exposition sonore réalisées dans un groupe d'exposition homogène et l'expression du résultat obtenu (valeur moyenne du groupe et précision), comparativement à un seuil d'exposition fixé par défaut à 85 dB (A).

- **Le module appelé « niveau sonore équivalent »** est une « calculatrice à dB ». Il combine une série de niveaux sonores avec leurs durées respectives pour calculer le niveau sonore équivalent global.

Le calcul de l'exposition sonore moyenne est effectué en supposant que les données analysées sont constituées de mesurages d'exposition sonore quotidienne (représentatifs de l'exposition durant 8 heures ou un poste de travail) concernant un groupe de travailleurs considéré comme un GEH.

ALTREX examine en premier lieu la validité des hypothèses associées à cette caractéristique d'homogénéité. Ceci comprend un test sur la distribution statistique,

un sur l'absence de dérive temporelle des résultats, un sur l'absence de dispersion excessive des valeurs, ainsi qu'une analyse de variance.

L'expression du résultat du diagnostic d'ALTREX dépend de la configuration choisie. L'emploi d'ALTREX en France impose de choisir la configuration « Europe » pour exprimer le résultat conformément à la réglementation. Ce choix fixe le paramètre nommé dans ALTREX « Coefficient de doublement » à 3 dB (A) (voir dans le glossaire les définitions de ce coefficient et celles des termes statistiques employés).

Le diagnostic concerne le niveau sonore équivalent du groupe. Les seuils sont de 85 dB (A) et 90 dB (A) par défaut, mais peuvent être modifiés dans l'écran Options. Par ailleurs, il est possible de contrôler l'homogénéité des mesurages selon une ou plusieurs variables explicatives constituant des groupes par une analyse de variance.

Interprétation

Parfois, les résultats de l'analyse ne permettent pas de conclure que l'exposition sonore est nettement acceptable ou nettement inacceptable. C'est le cas lorsque l'intervalle de confiance du niveau continu équivalent comprend le seuil de 85 dB (A).

L'hygiéniste doit alors :

- soit poursuivre le mesurage afin d'affiner la distribution des résultats et d'obtenir un

TABLEAU II

RÉSULTATS DES MESURES D'EXPOSITION AU BRUIT

Date	L Aeq,T [dB (A)]	Lpc > 135 dB	Lpc > 140 dB	Période	Type de tour
5/06/1997	83,5	0	0	Matin	A
5/06/1997	89,8	0	0	Après-midi	A
5/06/1997	92,2	0	0	Matin	B
7/06/1997	84,3	0	0	Après-midi	B
7/06/1997	78,6	0	0	Après-midi	A
7/06/1997	86,4	1	0	Matin	A
7/06/1997	88,2	0	0	Matin	B
10/06/1997	82,6	1	0	Matin	A
10/06/1997	79,5	0	0	Après-midi	A
10/06/1997	85,7	0	0	Matin	B
10/06/1997	87,2	0	0	Après-midi	B
6/09/1997	85,1	0	0	Matin	A
6/09/1997	92,1	0	0	Après-midi	B
6/09/1997	83	0	0	Matin	A

intervalle de confiance plus étroit,

- soit collecter des informations supplémentaires sur les circonstances de l'exposition afin d'étayer son jugement professionnel pour caractériser plus précisément la situation d'exposition.

ALTREX admet par défaut que la distribution statistique des données analysées, exprimées en dB (A), suit une loi normale.

Les différentes modalités d'ALTREX sont illustrées ci-dessous par l'analyse d'une série de mesures d'exposition au bruit.

2.2. Analyse d'une série de mesures d'exposition au bruit

2.2.1. Description du jeu de données

Les données sont présentées dans le *tableau II*. Quatorze mesures d'exposition sonore ont été réalisées sur un ensemble de salariés affectés au poste de travail « tournage » situé dans l'atelier Mécanique de l'établissement A. L'objectif de ces mesures est de préciser comment se situe l'exposition sonore quotidienne de ces travailleurs par rapport au seuil d'exposition réglementaire de 85 dB (A).

Ces mesures d'exposition sonore concernent un GEH, défini a priori par une analyse du travail. Les conditions d'exposition de ce groupe sont supposées initialement homogènes. Les mesurages ont été effectués à quatre dates différentes, en observant deux périodes de travail : les postes du matin ou de l'après-midi. Dans cet atelier, les tourneurs commandent deux types de tours, repérés par A et B.

Chaque mesure fournit deux résultats :

- les niveaux acoustiques continus équivalents, en dB (A),
- le nombre de valeurs de niveaux de pression acoustique de crête L_{pc} qui excèdent les seuils de 135 et 140 dB.

La période de travail et le type de tour sont des variables explicatives que l'on souhaite utiliser dans l'analyse des résultats.

2.2.2. Définition des paramètres de calcul

ALTREX utilise les paramètres fixés par défaut, en employant la configuration de calcul « Europe » et le coefficient de doublement de 3 dB. Ces paramètres sont les suivants :

Ecart-type = 4 dB;

Valeur limite : niveau sonore moyen pondéré en temps, égal à 85 dB (A);

Seuil de signification : p = 5 %;

Intervalle de confiance : 95 %;

Percentiles : 95, 90 et 50 %.

2.2.3. Résultats et interprétation

Les résultats obtenus sont représentés en *annexe*. Le rapport détaillé reprend les informations en présentant l'ensemble des paramètres et des résultats numériques de l'analyse statistique :

- informations générales sur la série de mesures,
- niveau sonore limite considéré,
- nombre total de mesures réalisées,
- nombre de dépassements des valeurs seuils de L_{pc} 135 et 140 dB,
- hypothèse de distribution testée : ici loi normale,
- niveau sonore équivalent et son intervalle de confiance.

Niveau moyen L_{Aeq,T} = 87,3 dB(A), avec un intervalle de confiance à 95 % compris entre 84,9 et 89,7 dB (A).

Ecart-type : 4,13 dB (A).

Supérieur à la limite fixée préalablement, cette valeur indique une variabilité importante de l'exposition.

Résultats du test de tendance

de dérive temporelle de Spearman : message indiquant un nombre insuffisant de dates différentes pour que le test soit effectué.

Résultats du test de normalité

de Shapiro-Wilk : W = 0,97 et p = 86 % (nota : plus la valeur de W tend vers 1, plus l'hypothèse de distribution normale est confirmée). Hypothèse acceptée, car p n'est pas inférieur à 5 %.

Résultats de l'analyse de variance :

ils indiquent l'existence d'une différence significative (F = 6,31 ; p = 2,7 %) entre les mesures d'exposition concernant les opérateurs des tours de type A (moyenne = 83,6 dB(A)) et ceux des Tours de type B (moyenne = 88,3 dB(A)). Par contre, il n'existe pas de différence significative (F = 0,06 ; p = 80,4 %) entre les périodes du matin (moyenne = 85,8 dB(A)) et de l'après-midi (moyenne = 85,2 dB(A)).

Noter que dans les moyennes indiquées dans la rubrique analyse de variance, il s'agit de moyennes arithmétiques, à ne pas confondre avec les niveaux moyens continus équivalents.

Sur la *figure 3*, sont représentées les fréquences cumulées de la série de mesures avec la droite de Henri. Sur l'axe horizontal, le niveau sonore moyen L_{Aeq,T} global et son intervalle de confiance sont signalés. Dans l'exemple, la valeur de 85 dB (A) est pratiquement confondue avec la borne inférieure de l'intervalle de confiance.

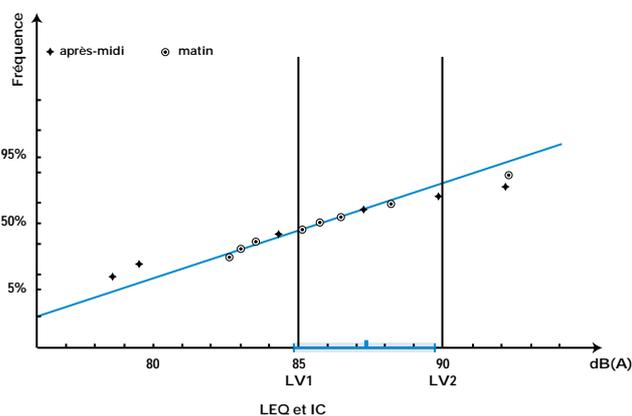


Fig. 3. Ajustement normal des fréquences cumulées pour la variable période (bruit) Fichier : CNDSON - Etablissement : usine A - Atelier : mécanique - Poste de travail : tournage - Valeur limite : 85 et 90 dB(A) (type : dosimétrie 8 heures)

2.2.4. Conclusions de l'évaluation et apport d'ALTREX

L'hypothèse de groupe d'exposition homogène n'est pas vérifiée, pour deux raisons :

- la dispersion des résultats est jugée excessive (l'écart-type est supérieur au seuil de 4 défini dans les paramètres de calcul),
- une des deux variables explicatives (ici le type de tour) peut expliquer une partie significative de la variabilité de l'exposition sonore.

Dans une telle situation, l'hygiéniste doit chercher à interpréter les écarts constatés, puis prendre une décision, en fonction de l'analyse statistique réalisée et de la collecte d'informations complémentaires. Parfois, il sera nécessaire de poursuivre le mesurage afin d'accroître la fiabilité de l'interprétation des résultats.

La situation d'exposition est jugée excessive compte tenu de la valeur du $L_{Aeq,T}$ global. Toutefois, ALTREX indique que ce diagnostic ne peut être validé sans examen critique de la qualité des données, en raison du manque d'homogénéité des résultats de mesure.

2.3. Emploi de « la calculette à décibels »

Les calculs de niveaux sonores équivalents sont facilités par « une calculette » que propose ALTREX. Plusieurs questions en illustrent l'intérêt :

- A quel niveau acoustique continu équivalent ramené à 8 heures correspond l'exposition à une impulsion caractérisée par un niveau $L_{Aeq,T}$ de 115 dB(A) durant 5 secondes, émise dans un bruit ambiant de 83 dB?
- Lorsque qu'un opérateur est employé durant une journée de travail à diverses phases d'activités distinctes, comment estimer son exposition sonore quotidienne, à partir des niveaux acoustiques continus équivalents et de la durée relative de chaque phase ?

Le résultat s'affiche avec ALTREX dès que les valeurs sont saisies.

CONCLUSION GENERALE

La méthodologie d'analyse statistique développée dans ALTREX constitue un outil d'aide à l'interprétation des mesures d'exposition pour l'hygiéniste industriel sans se substituer à son jugement et son expérience professionnelle. C'est un outil qui devra l'inciter :

- A soigneusement préparer les campagnes de mesurage afin d'identifier correctement les groupes d'exposition homogène;
- A recueillir, pendant les campagnes de mesurage, toutes les observations qui lui permettront d'expliquer et d'interpréter les anomalies signalées par les différents tests statistiques d'ALTREX (tendance temporelle, variance des expositions...);
- A ne porter un diagnostic sur une situation d'exposition qu'après avoir contrôlé la qualité des mesures.

Le logiciel ALTREX, désormais commercialisé en France et en Europe, est également un système de gestion des mesures d'exposition professionnelles. Il comporte une base de données qui permet à l'utilisateur d'exploiter ses résultats en fonction de différents critères : poste de travail, substance, atelier, probabilité de dépassement des VLEP (valeurs limites d'exposition professionnelle).

BIBLIOGRAPHIE

- VINCENT R., CIOLELLA A., WILD P., SERVAIS M. - Méthode de traitement statistique des résultats de mesures d'exposition aux substances chimiques : le logiciel STARTREX. In : *Maîtriser le risque au poste de travail, I^{ve} Colloque international du comité de recherche de l'AISS (Strasbourg, 22-23 octobre 1992)*. Nancy, Presses Universitaires de Nancy, 1993, pp. 311-326.
- LEPLAY A. - Application pratique d'une stratégie de prélèvements d'atmosphères au poste de travail. *Journal de Toxicologie Clinique et Expérimentale*, 1991, 2, pp. 113-121.
- DESPRES B. et coll. - Contrôle de l'exposition atmosphérique : une stratégie originale de prélèvements dans une usine de chimie organique. *Archives des Maladies Professionnelles*, 1989, 50, pp. 235-236.
- LEPLAY A., DESPRES B., VINCENT R., WILD P., THIERY L., AUBRUN J.-C. - ALTREX : logiciel d'interprétation de résultats de mesures d'expositions professionnelles. *Archives des Maladies Professionnelles*, 1996, 5, p. 402.
- HAWKINS N.C., NORWOOD S.K., ROCK J.-C. - A strategy for occupational exposure assessment. *Akron, American Industrial Hygiene Association*, 1991.
- NF EN 689 - Atmosphères des lieux de travail. Conseils pour l'évaluation de l'exposition aux agents chimiques aux fins de comparaison avec des valeurs limites et stratégie de mesurage. Paris - *La Défense, AFNOR*, 1995, 34 p.
- Sampling strategies for airborne contaminants in the workplace. *British Occupational Hygiene Society*, 1993, *Technical guide n° 11*.
- HERVE-BAZIN B. - Guide d'évaluation de l'exposition au risque toxique sur les lieux de travail par échantillonnage de l'atmosphère. *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et sécurité du travail*, 1989, 135, pp. 265-285.
- NF S 31-084 - Acoustique : méthode de mesurage des niveaux sonores en milieu de travail en vue de l'évaluation du niveau d'exposition sonore quotidienne des travailleurs. Paris - *La Défense, AFNOR*, 1987, 16 p.
- TUGGLE R.M. - Assessment of occupational exposure using one-sided tolerance limits. *American Industrial Hygiene Association. Journal*, 1982, 43, pp. 338-346.
- HARVEY R.P. - Statistical aspects of pollutant concentrations in working environments and their implications for air sampling strategies. *Health and Safety Executive, Occupational Hygiene Section F19 Report*, 1980, *FISM 9/1980/22*.
- WILD P., HORDAN R., LEPLAY A., VINCENT R. - Confidence intervals for probabilities of exceeding threshold limits with censored log-normal data. *Environmetrics*, 1996, 7, pp. 247-259.
- SHAPIRO S.S., WILK M.B. - An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 1965, 52, pp. 591-611.
- ROYSTON P. - A remark on algorithm AS 181 : the W test for normality. *Applied Statistics*, 1995, 44, pp. 547-551.
- AYER H.E. - A cost effective air sampling strategy. In : WILEY J. (éd.) - *Advances in air sampling*. Chelsea (Michigan), Lewis Publishers, 1988, pp. 305-317.
- AITCHISON J., BROWN J.A.C. - The lognormal distribution - With special reference to its use in economics. *Cambridge (Royaume-Uni), Cambridge University Press*, 1957.
- RAPPAPORT S.M. - Assessment of long term exposures to toxic substances in air. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1991, 35, pp. 61-121.
- LEHMAN E.L. - Nonparametric statistical methods based on ranks. *Holden-Day*, 1975, chap. 7.
- Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et sécurité du travail*, 1996, 153, ND 1953, pp. 557-574 (mise à jour décembre 1996).

ANNEXE

RAPPORTS DÉTAILLÉS D'EXPOSITION

EXPOSITION À UN AGENT CHIMIQUE

Date : 15/12/1997
 Etablissement : usine A
 Poste de travail : stratification
 Atelier : moulage de coffrets
 Agent chimique : styrène; type de valeur limite : VME = 50 ppm
 Nombre total de mesures : 15

- nombre de mesures inférieures au seuil de quantification : 3

Loi de distribution : log-normale
 Probabilité de dépassement de la valeur limite : 7,02 %

- intervalle de confiance (IC 90 %) : 1,53 % - 20,77 %

Moyenne arithmétique : 17,02 ppm

- moyenne arithmétique sous hypothèse de distribution log-normale : 19,47 ppm
- intervalle de confiance (IC 90 %) : 13,11 - 41,39 ppm

Ecart-type géométrique : 2,56
 Indice de Rappaport : 39,57
 Test de tendance :

- coefficient de corrélation des rangs de Spearman : 0,93
- p = 0,304 %

Attention : dérive significative des mesures au cours du temps.
 Test de log-normalité : W = 0,97; p = 83,380 %

EXPOSITION SONORE

Date : 22/12/1997
 Etablissement : usine A
 Poste de travail : tournage
 Atelier : mécanique
 Type de valeur limite : Dosimétrie 8 heures = 85/90 dB(A)
 Nombre total de dosimétries : 14

- dépassements des seuils : ≥ 135 dB : 2 fois; ≥ 140 dB : 0 fois

Loi de distribution : normale
 Niveau sonore équivalent : 87,35 dB (A);

- coefficient de doublement : 3
- intervalle de confiance (IC 95 %) : 84,96 - 89,73 dB (A)

Niveau moyen : 85,59 dB (A)
 Ecart-type : 4,13 dB (A)
Attention : variabilité importante des mesures

Test de tendance :

- coefficient de corrélation des rangs de Spearman : - 0,14
- p = 80,280 %

Attention : trop de valeurs égales (> 20 %), test peut-être imprécis
 Test de normalité : W = 0,97; p = 85,946 %

Analyse de variance

Variable explicative : période

Ecart-type géométrique inter-groupes : 1,71
 Ecart-type géométrique intra-groupe : 1,43

- rapport F = 17,79
- valeur de p = 0,101 %

Indice de Rappaport de variabilité inter-groupes : 8,26
 Indice de Rappaport de variabilité intra-groupe : 4,09

Modalité	Moyenne	Nombre d'observations
après-midi	26,48	7
matin	12,09	8

Les mesures d'exposition ne sont pas homogènes.

Variable explicative : salarié

Ecart-type géométrique inter-groupes : 1,00
 Ecart-type géométrique intra-groupe : 1,74

- rapport F = 0,02
- valeur de p = 88,530 %

Indice de Rappaport de variabilité inter-groupes : 1,00
 Indice de Rappaport de variabilité intra-groupe : 8,72

Modalité	Moyenne	Nombre d'observations
Jacques	17,82	7
Pierre	17,09	8

Intervalle de confiance des percentiles

Seuil de signification : 90,00 %

Percentile	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure
50,00 %	12,54	7,87	19,14
95,00 %	58,69	34,71	151,90

Unité de mesure : ppm.

Variable explicative : période

Ecart-type inter-groupes : 0,00
 Ecart-type intra-groupe : 4,29

- rapport F = 0,06
- valeur de p = 80,399 %

Modalité	Moyenne	Nombre d'observations
après-midi	85,25	6
matin	85,84	8

Variable explicative : type de tour

Ecart-type inter-groupes : 3,06
 Ecart-type intra-groupe : 3,48

- rapport F = 6,31
- valeur de p = 2,732 %

Modalité	Moyenne	Nombre d'observations
tour A	83,56	8
tour B	88,28	6

Les mesures d'exposition ne sont pas homogènes.

Intervalle de confiance des percentiles

Seuil de signification : 95,00 %

Percentile	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure
50,00 %	85,59	82,90	87,94
95,00 %	92,38	89,80	97,13

Unité de mesure : dB (A).

