

Interprétation statistique des résultats de mesure

Objectifs

L'objectif du diagnostic est de juger si potentiellement les concentrations sont acceptables vis-à-vis des objectifs fixés. Par exemple, les travailleurs du Groupe d'Exposition Similaire (GES) sont-ils trop exposés ? Le procédé est-il trop émissif, la ventilation permet-elle d'évacuer efficacement les polluants ? Le médecin du travail estime-t-il que le travailleur exerce son activité dans de bonnes conditions ?

Aspects théoriques	2
Calcul de la concentration	4
Les limites de détection et de quantification	5
Méthodologie d'analyse statistique par Groupe d'Exposition Similaire	6
Analyse comparative des résultats : entre 3 et 5 mesures	8
Analyse statistique simple des résultats : à partir de 6 mesures	8
Analyse statistique robuste des résultats selon les modalités décrites dans le décret 2009-1570 du 15 décembre 2009 : à partir de 9 mesures.....	9
Analyse statistique dédiée : à partir de 30 mesures	10
Les multi-expositions	10
l'absence de valeur Limite	12
Les mesures en temps réel	13
Le rapport	14
Bibliographie	16
Auteurs	16
Historique	16

ASPECTS THEORIQUES

L'évaluation de l'exposition par les mesures repose sur la notion fondamentale **d'échantillonnage**. L'échantillonnage consiste à extraire un sous ensemble d'individus supposés représentatifs d'une population. Cette notion est courante dans le domaine du sondage d'opinion : un sous ensemble de personnes est choisi pour représenter la population française (tranche d'âge, catégorie socio professionnelle...). En hygiène industrielle, un sous ensemble de mesures est extrait de l'ensemble des mesures possiblement réalisables. Par exemple, un Groupe d'Exposition Similaire (<http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-strategie-principe.pdf>) est composé de 10 travailleurs qui réalisent leur activité 200 jours par an, la population de mesures individuelles pour un jour complet travaillé est $10 \times 200 = 2000$.

L'**extrapolation** consiste à élaborer des conclusions sur l'ensemble de la population, en ayant seulement un échantillon disponible. En conséquence, la représentativité de l'échantillon revêt une importance cruciale : il serait incorrect d'élaborer des conclusions sur l'ensemble de la population française sur la base d'un sous ensemble composé uniquement d'individus âgés de 15 à 20 ans. De la même manière, il est incorrect d'élaborer des conclusions sur l'exposition des travailleurs d'un GES sur la base d'un sous ensemble de mesures réalisées un 2 juillet seulement.

L'extrapolation peut être réalisée via des **modèles statistiques**. Le principe consiste à poser un ensemble d'hypothèses auxquelles doit se conformer la population. Ces hypothèses sont représentées sous la forme d'un modèle : une équation, loi de distribution de probabilités, des relations empiriques... Par exemple le nombre de téléphones portables en activité en France peut être extrapolé par les réponses à la question « possédez-vous un téléphone portable ? ». Le nombre de personnes interrogées est connu, 1 000 par exemple dont 600 répondent « oui ». Le nombre de personnes total est aussi connu (65 000 000 par exemple). En considérant des hypothèses simples, un modèle tout aussi simple peut être une formule multiplicative ($65\,000\,000 \times 600 / 1000 = 39\,000\,000$). En hygiène du travail, il est admis depuis près de 40 ans [1] qu'un type de modèle, plus complexe, mais dont la fonction reste la même est la loi de distribution de probabilités log normale. L'hypothèse retenue est que toute population de mesures d'exposition suit cette loi et que ce modèle s'applique.

La loi de distribution de probabilités log normale sert à extrapoler l'échantillon de mesures à la population complète. Si cette loi est largement utilisée pour l'évaluation de l'exposition professionnelle aux substances chimiques, elle peut également être appliquée pour des agents biologiques. Une loi de distribution log normale est représentée sous la forme d'une densité de probabilités (figure 1).

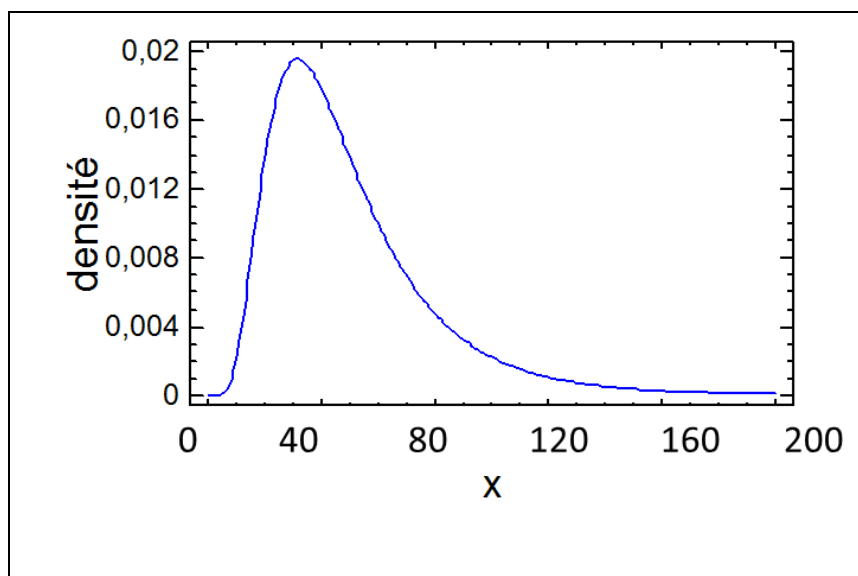


Figure 1. Densité de probabilités selon une loi log normale. En abscisses « X » la valeur de concentration est lue, en ordonnées « densité » la probabilité est lue. Dans le cas de mesures d'exposition, la valeur X est une mesure de concentration qui peut s'exprimer en mg/m^3 . La densité est la probabilité d'obtenir cette valeur lors d'un contrôle inopiné. L'aire sous la courbe (intégrale) vaut 100 %.

Cette densité de probabilités peut être utilisée pour calculer la probabilité qu'une mesure d'exposition dépasse une valeur X, cette probabilité est appelée « probabilité de dépassement », souvent notée $p(x>X)$. Graphiquement, une verticale qui coupe l'axe des abscisses en X est tracée, puis l'aire sous la courbe est calculée, à droite de cette verticale (figure 2).

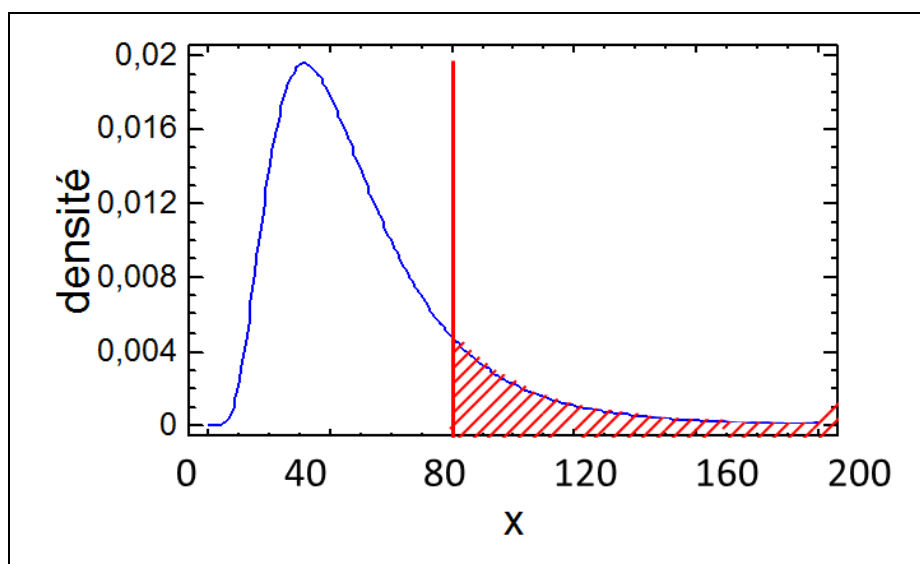


Figure 2. Densité de probabilités selon une loi log normale et matérialisation de la probabilité de dépassement de la valeur $X=80$, ici 27%. L'aire sous la courbe à droite de la verticale est la probabilité de dépassement.

On peut accompagner cette probabilité de dépassement par un intervalle de confiance, qui est utile pour prendre en compte les incertitudes liées à la qualité de l'échantillonnage.

CALCUL DE LA CONCENTRATION

La concentration est le résultat du calcul du rapport entre la quantité de polluant dosé par l'analyse, généralement exprimé en mg et le volume d'air prélevé, exprimé en m³. Cette procédure ne s'applique que lorsque la valeur limite a été établie pour une durée moyenne de 8 heures, pondérée sur le temps.

L'exposition moyenne pondérée sur 8 heures est égale à :

$$\frac{\sum_{i=1}^n C_c t_i}{t_i} = \frac{C_1 t_1 + C_2 t_2 + \dots + C_n t_n}{8}$$

Période considérée	Nombre de prélèvements	Durée de l'échantillonnage ou de la phase de travail (h)	Niveau d'exposition (mg/m ³)
8 h 00-10 h 00	1	2	0,65
10 h 00-10 h 30	0	0,5	0
10 h 30-12 h 00	1	1,5	0,37
13 h 00-16 h 00	1	3	0,48
16 h 00-17 h 00	0	1	0
Durée totale	3	8	

Cas d'une journée de travail de 8 heures : Résultats des mesures d'exposition effectuées à l'aide de 5 prélèvements successifs de durées variables sur une journée de travail égale à 8 heures.

Pendant les périodes 10 h 00 - 10 h 30 et 16 h 00 - 17 h 00, **l'exposition du travailleur est supposée nulle**, en raison de l'activité, aucun prélèvement n'a donc été effectué.

La valeur d'exposition moyenne pondérée sur 8 heures est égale à :

$$\frac{0,65 \times 2 + 0 \times 0,5 + 0,37 \times 1,5 + 0,48 \times 3 + 0 \times 1}{8} = \frac{1,3 + 0 + 0,55 + 1,44 + 0}{8} = 0,41 \text{ mg/m}^3$$

Dans le cas où le prélèvement n'a pas pu couvrir l'ensemble de la durée d'exposition du travailleur, c'est-à-dire que l'exposition du travailleur n'est pas supposée connue pendant les périodes où il n'y a pas eu de prélèvement des hypothèses doivent être formulées. Elles reposent sur la connaissance du préventeur du poste du travail (recueillie lors de la stratégie de prélèvement <http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-strategie-principe.pdf>). Dans la situation où le travailleur n'était pas exposé, car affecté à une autre tâche par exemple, l'exposition aux substances ciblées par les prélèvements peut être supposée nulle. Dans la situation où l'exposition du salarié était identique, l'exposition sur la période non prélevé est supposée comme équivalente à celle sur la période prélevée.

Période considérée	Nombre de prélèvements	Durée de l'échantillonnage de la phase de travail (h)	Niveau d'exposition (mg/m ³)
7 h 00-8 h 00	1	1	0,85
8 h 00-11 h 00	1	3	0,55
11 h 00-12 h 00	1	1	1,12
12 h 00-13 h 00	0	-	repas
13 h 00-17 h 00	1	4	0,36
17 h 00-19 h 00	1	2	0,72
Durée totale		11	

Cas d'une journée de travail supérieure à 8 heures : Résultats des mesures d'exposition effectuées à l'aide de prélèvements successifs sur une journée de travail égale à 11 heures.

La valeur d'exposition moyenne pondérée sur 8 heures est égale à :

$$\frac{0,85 \times 1 + 0,55 \times 3 + 1,12 \times 1 + 0,36 \times 4 + 0,72 \times 2}{8} = \frac{0,85 + 1,65 + 1,12 + 1,44 + 1,44}{8} = 0,81 \text{ mg/m}^3$$

LES LIMITES DE DETECTION ET DE QUANTIFICATION

La **limite de détection** est la valeur de concentration telle que l'analyse ne permet pas d'affirmer que le polluant est présent. En dessous de cette valeur de concentration, le polluant cherché est considéré comme n'ayant pas été identifié.

La **limite de quantification** est la valeur de concentration telle que l'analyse ne permet pas de donner la valeur exacte de polluant. Le polluant est bel est bien présent, mais la concentration est inférieure à la limite de quantification (LQ).

D'un point de vue statistique, les mesures inférieures à la LQ sont nommées « valeurs censurées à gauche » car elles se situent dans la partie la plus à gauche de l'axe des abscisses d'une densité de probabilités (valeurs faibles). L'extrapolation à partir de ce type de valeurs est souvent difficile et plusieurs méthodes statistiques ont été proposées pour y faire face. En effet, ceci revient à ne pas disposer de l'information concernant les valeurs faibles. De ce fait, l'absence de ces informations est de nature à remettre en cause l'intégralité de la courbe et donc *in fine* le diagnostic (figure 3).

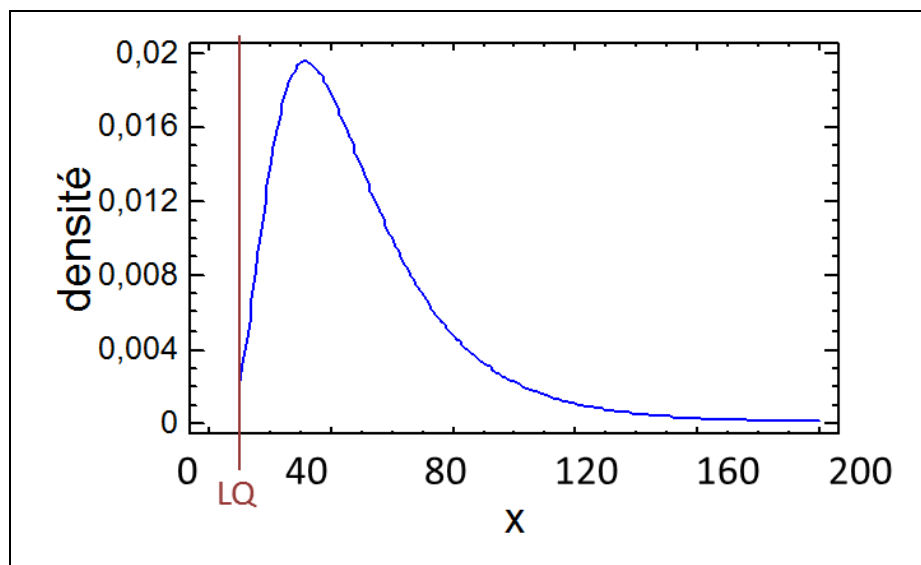


Figure 3. Dans cet exemple, une Limite de Quantification à 10 est placée. Toutes les mesures inférieures ne sont pas connues et l'absence de ces valeurs remet en cause la courbe elle-même.

La méthode la plus simple pour pallier à cette difficulté se nomme « imputation » et elle consiste à remplacer la valeur censurée par une autre valeur déterministe. La plupart du temps la valeur de la LQ divisée par deux est utilisée.

Des méthodes plus complexes reposent sur l'idée d'utiliser une gamme de valeurs possibles : la véritable valeur n'est pas connue, mais elle est inférieure à la LQ. Le modèle extrapolé est construit de telle sorte que cette information est prise en compte sans qu'une valeur finie ne soit utilisée en remplacement de la valeur censurée. Il y a différentes manières d'utiliser ces méthodes, toujours avec un logiciel approprié, comme par exemple AltrexChimie (<http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil13>) ou NDExpo (http://www.dsest.umontreal.ca/recherche_rayonnement/NDExpo.html). Lorsque la proportion de valeurs censurées est importante, ces méthodes fonctionnent mal.

Sauf cas particuliers, la LQ des analyses est souvent très largement inférieure aux valeurs limites. Il est admis que *a minima*, les LQ devraient être inférieures à 10 % de la VLEP [2]. Aussi, il n'apparaît pas indispensable de mettre systématiquement en œuvre des méthodologies complexes pour le traitement des valeurs censurées et l'utilisation de la LQ divisée par deux paraît suffisante.

METHODOLOGIE D'ANALYSE STATISTIQUE PAR GROUPE D'EXPOSITION SIMILAIRE

Quel que soit l'objectif, la quantité de mesures réalisées par GES conditionne la manière de porter le diagnostic. Les situations ci-dessous s'appliquent préférentiellement aux substances chimiques, du fait de la plus grande dispersion des mesures de bio-aérosols [3], il est vraisemblable que le nombre de mesures requises pour l'évaluation du risque biologique soit plus important pour obtenir un diagnostic acceptable. 5 familles de situations sont distinguées dont les contours sont nuancés (Figure 4).

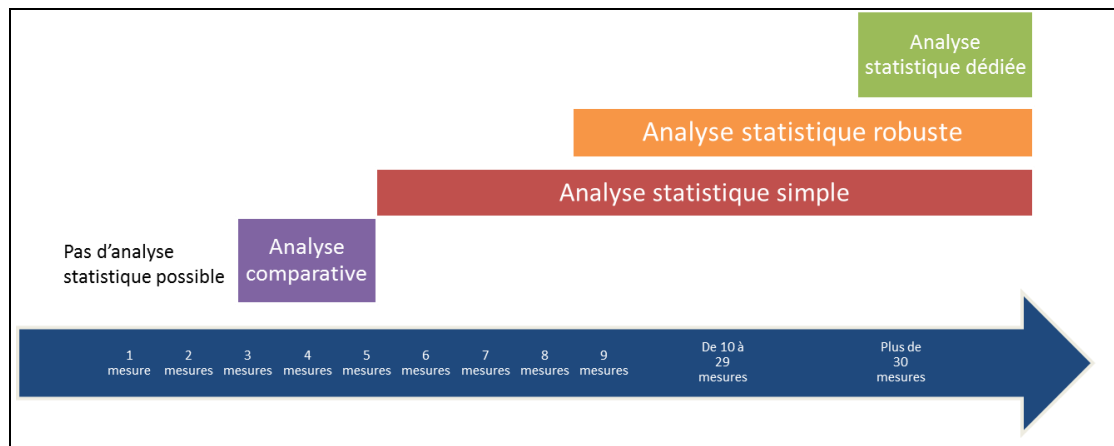


Figure 4. Types d'analyses statistiques réalisables en fonction du nombre de mesures disponibles par GES

- ◆ Très peu de mesures ont été réalisées (1 ou 2) : il n'est pas possible d'extrapoler un modèle de données à partir d'un si petit échantillon. **Une analyse statistique n'est pas possible.** Le jugement d'expert revêt un rôle crucial dans cette situation où chaque mesure doit être critiquée et mise en perspective avec ses conditions de réalisation. S'il n'est pas possible d'établir un jugement d'expert suffisamment fiable, des mesures complémentaires doivent être effectuées pour conclure.
- ◆ Peu de mesures ont été réalisées (entre 3 et 5) : l'échantillonnage représente une faible partie de la population. Il est hasardeux d'affirmer que le modèle de données log normal choisi comme hypothèse s'adapte bien à la situation observée et une **analyse comparative des résultats** peut être utilisée : la méthode décrite dans la note documentaire [4] peut être appliquée.
- ◆ Au moins 6 mesures ont été réalisées : une **analyse statistique simple** consiste à calculer des indicateurs statistiques standards comme la moyenne, l'écart type, la médiane, les centiles. Il est souhaitable de construire des graphiques, boîtes à moustaches ou toute autre représentation pertinente des données. La méthode décrite dans le décret 2009-1570 du 15 décembre 2009 http://www.travailler-mieux.gouv.fr/IMG/pdf/D_controlrisqchim.pdf peut éventuellement être suivie, mais lorsque moins de 9 mesures ont été réalisées, une attention particulière doit être portée à l'hypothèse de log normalité (test de Shapiro-Wilk, voir plus loin).
- ◆ Une quantité raisonnable de mesures a été réalisée (plus de 9) : l'échantillonnage représente une partie non négligeable de la population. Le modèle de données log normal est approprié pour décrire l'ensemble de mesures. **Une analyse statistique robuste** des mesures selon les modalités décrites dans le décret 2009-1570 du 15 décembre 2009 peut être réalisée. Les statistiques descriptives de l'analyse simple y sont adjointes. Lorsque plus de 20 mesures sont disponibles, les résultats de cette analyse statistique sont difficilement contestables. Une incohérence entre les résultats d'analyse statistique et le jugement de l'expert doit être examinée avec la plus grande attention afin d'en déterminer la source et de réagir en conséquence.
- ◆ Une grande quantité de mesures a été réalisée (plus de 30) : l'échantillonnage représente une partie importante de la population. Le modèle log normal devrait être approprié mais la quantité de données requiert une attention particulière. **Une analyse statistique dédiée** et spécifique devrait être réalisée, permettant d'aboutir à des conclusions considérées comme très fiables. Le jugement de l'expert vient en appui de ces conclusions.

ANALYSE COMPARATIVE DES RESULTATS : ENTRE 3 ET 5 MESURES

La méthode

En plus de présenter les mesures une à une et de les replacer dans le contexte de leur réalisation, une évaluation grossière de la situation peut être établie en utilisant la méthodologie issue de la note [4].

- ◆ Si la série de mesures est composée de 3 valeurs et que ces valeurs sont toutes inférieures à 10 % de la valeur limite, alors la situation est probablement acceptable.
- ◆ Si la série de mesures est composée de 4 valeurs et que ces valeurs sont toutes inférieures à 15 % de la valeur limite, alors la situation est probablement acceptable.
- ◆ Si la série de mesures est composée de 5 valeurs et que ces valeurs sont toutes inférieures à 20 % de la valeur limite, alors la situation est probablement acceptable.
- ◆ Dans tous les autres cas, des solutions de prévention sont à mettre en œuvre car la situation n'est probablement pas acceptable.

Les outils

Aucun outil spécifique n'est requis.

Exemple 1

Pour un GES, 3 mesures d'une substance dont la valeur limite est 1 mg/m^3 ont été réalisées : 0.02 mg/m^3 ; 0.09 mg/m^3 et 0.12 mg/m^3 .

La mesure de 0.12 mg/m^3 est supérieure à 10 % de la valeur limite, en l'absence de plus d'informations, des solutions de prévention doivent être mises en œuvre.

Exemple 2

Une mesure supplémentaire est réalisée et la valeur de 0.13 mg/m^3 est obtenue. Les quatre valeurs obtenues sont inférieures à 15 % de la valeur limite. La situation est probablement acceptable.

ANALYSE STATISTIQUE SIMPLE DES RESULTATS : A PARTIR DE 6 MESURES

La méthode

Cette analyse vise à construire des indicateurs statistiques permettant de synthétiser la série de mesures

- ◆ La moyenne arithmétique des valeurs donne une vue d'ensemble du niveau d'exposition des travailleurs du GES.
- ◆ L'écart type des valeurs donne une idée de la dispersion des mesures et donc de l'importance de la variabilité des conditions d'exposition des travailleurs du GES.
- ◆ La moyenne géométrique et l'écart type géométrique qui permet d'apprécier l'homogénéité d'un GES. Un écart type géométrique supérieur à 3 tend à invalider l'hypothèse que les mesures sont réalisées dans le cadre d'un GES [5].
- ◆ La valeur de la variable U (selon la formule décrite dans le décret 2009-1570 du 15 décembre 2009 qui utilise la moyenne géométrique et l'écart type géométrique) est comparée au seuil défini dans l'arrêté, en fonction du nombre de mesures. Sous réserve que les autres points définis dans l'arrêté soient respectés (stratégie adoptée, nombre de mesures approprié, validation des GES, accréditation, analyses conformes...), un diagnostic réglementaire peut être porté.

- ◆ Des graphiques pertinents selon le contexte : histogrammes, boîtes à moustache, nuages de points...

Les outils

Une simple calculatrice ou un logiciel de type tableur (Microsoft Excel ou OpenOffice Calc) permettent de réaliser ces opérations.

ANALYSE STATISTIQUE ROBUSTE DES RESULTATS SELON LES MODALITES DECRITES DANS LE DECRET 2009-1570 DU 15 DECEMBRE 2009 : A PARTIR DE 9 MESURES

La méthode

Même si l'objectif des mesurages n'est pas d'évaluer l'exposition selon des critères réglementaires, la méthodologie de calcul proposée dans le décret peut être appliquée. A partir des valeurs calculées de la moyenne géométrique, notée M_g , de l'écart type géométrique, noté S_g et d'une valeur limite, la valeur de la variable U peut être calculée.

La variable U est le reflet de la probabilité de dépassement de la valeur limite. Pour prendre en compte les incertitudes, un intervalle de confiance à 70 % est adjoint. Ceci revient à considérer une aire sous la courbe plus importante que la définition initiale de la probabilité de dépassement (Figure 5).

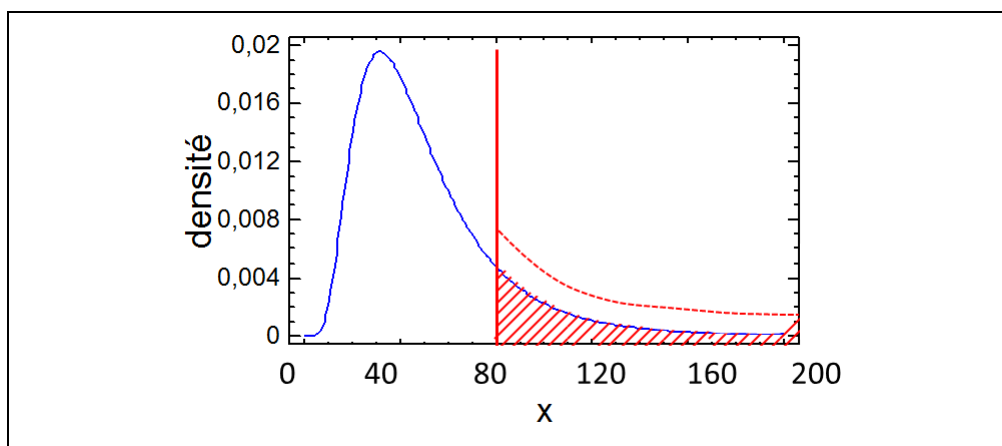


Figure 5. Représentation de la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70 % sur la probabilité de dépassement de la valeur limite. L'aire à droite de la ligne verticale et en dessous de la courbe en pointillé est cette borne supérieure.

Les outils

Il est possible de réaliser une partie des calculs à l'aide d'une simple calculatrice ou un logiciel de type tableur (Microsoft Excel ou OpenOffice Calc). Cependant, certains indicateurs requièrent d'autres outils et en particulier le logiciel AltrexChimie.

Exemple

On dispose de 9 mesures de concentration en mg/m^3 : 76, 61, 66, 16, 18, 39, 51, 42, 146 pour une substance dont la Valeur Limite est de $192\text{mg}/\text{m}^3$.

La moyenne arithmétique est la somme des valeurs divisées par le nombre de valeurs

$$\bar{M} = \frac{76 + 61 + 66 + 16 + 18 + 39 + 51 + 42 + 146}{9} = 57,22$$

L'écart type arithmétique est la racine carrée de la somme des carrés des écarts à la moyenne divisée par le nombre de valeurs moins 1

$$S = \sqrt{\frac{(76 - 57,22)^2 + (61 - 57,22)^2 + \dots + (146 - 57,22)^2}{8}} = 38,99$$

Lorsque l'on parle de moyenne ou d'écart type « géométrique », les logarithmes népériens des valeurs mesurées sont employés, pour repasser ensuite en exponentielle

$$Mg = e^{\frac{\ln(76) + \ln(61) + \ln(66) + \ln(16) + \ln(18) + \ln(39) + \ln(51) + \ln(42) + \ln(146)}{9}} = 46,79$$

$$Sg = e^{\sqrt{\frac{(\ln(76) - \ln(Mg))^2 + (\ln(61) - \ln(Mg))^2 + \dots + (\ln(146) - \ln(Mg))^2}{8}}} = 1,99$$

L'écart type géométrique est 1.99 n'invalide pas l'hypothèse du GES, la règle admise étant que cette valeur devrait être inférieure à 3 (voir section ci-dessus « Analyse statistique simple des résultats »).

Le calcul de U donne la valeur de 2,038. Pour 9 mesures, le seuil est 2,035. Ainsi, U est supérieur au seuil et on peut donc conclure à un diagnostic de respect de la VLEP. La valeur de U est toutefois très proche du seuil.

Pour aller plus loin, un logiciel spécifique peut être utilisé, comme Stata, SAS, R ou plus simplement AltrexChimie afin de calculer la valeur « p » du test de Shapiro-Wilk. Cette valeur renseigne sur la qualité de l'adéquation de l'échantillon avec l'hypothèse de log-normalité des résultats. En l'occurrence, l'hypothèse de distribution log normale n'est pas validée. Par conséquent, la probabilité de dépassement est calculée et vaut 1.85 %. De la même manière, la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70 % prend pour valeur 4.91 %. Potentiellement, 4.91 % des mesures pourraient dépasser la VLEP, alors que le seuil admis est 5 %.

ANALYSE STATISTIQUE DEDIEE : A PARTIR DE 30 MESURES

Une analyse statistique dédiée est réalisée par un professionnel du traitement de données, en collaboration avec les experts en analyse du risque chimique. La méthode et les outils à employer sont définis par ces deux acteurs.

LES MULTI-EXPOSITIONS

En situation de travail, il est rare que les travailleurs d'un GES ne soient exposés qu'à un seul polluant chimique simultanément : dans la plupart des cas, plusieurs substances sont présentes dans l'atmosphère de travail. En conséquence, plusieurs substances sont prélevées, plusieurs analyses sont réalisées et plusieurs diagnostics d'exposition sont établis.

Toutefois, certaines substances ont des effets similaires sur l'organisme humain. Par exemple, la plupart des solvants ont un effet sur le système nerveux : des vertiges ou une sensation d'ébriété. Le morcellement des analyses et des diagnostics ne permet pas de prendre en considération ces effets similaires.

Dans une situation de multi-exposition, des diagnostics spécifiques doivent être réalisés pour chacun des

effets similaires possibles dus à l'ensemble des substances présentes au poste de travail.

Pour ce faire, il faut d'abord identifier les effets similaires des substances : le logiciel MiXie www.inrs-mixie.fr permet de réaliser cette opération pour 118 substances couramment rencontrées.

Par exemple, le toluène et le styrène contribuent à 4 classes d'effets similaires sur les travailleurs

- ◆ Atteintes oculaires ;
- ◆ Atteintes des voies respiratoires supérieures ;
- ◆ Atteintes du système nerveux central ;
- ◆ Atteintes du système auditif.

L'indice d'exposition des mesures des substances peut ensuite être utilisé pour calculer un diagnostic de multi-exposition. L'indice d'exposition I par mesure est adimensionnel, il est défini par

$$I = \frac{\text{Mesure}}{\text{Valeur Limite}}$$

Lorsque l'indice d'exposition dépasse 1, cela signifie que la mesure est supérieure à la valeur limite. Par conséquent, la situation de travail correspondante est trop exposante pour l'opérateur.

Le principe d'additivité consiste à admettre que les effets des substances s'additionnent. Ce principe est matérialisé par le calcul de l'indice d'exposition cumulé des substances par classe d'effet.

$$I_{\text{cumulé}} = \sum_i \frac{\text{Mesure}_i}{VL_i}$$

Les mesures utilisées doivent avoir été réalisées dans des conditions identiques : idéalement issues d'une même analyse sur un même prélèvement. A défaut, les mesures doivent être comparables : même objectif, mêmes conditions de prélèvement. Si l'indice d'exposition cumulé dépasse 1, cela signifie que le mélange de substances, pour un effet commun sur la santé, est en concentration trop importante et que l'opérateur est en situation de surexposition.

Par exemple, à l'issue de l'analyse du prélèvement p1, 50 mg/m³ de toluène et 100 mg/m³ de styrène sont trouvés. Les valeurs limites du toluène et du styrène étant respectivement de 76.8 mg/m³ et 215 mg/m³, les indices d'exposition respectifs sont :

$$I_{\text{toluène}} = 50 / 76.8 = 0.65$$

$$I_{\text{styrène}} = 100 / 215 = 0.47$$

L'indice d'exposition cumulé est de :

$$I_{\text{cumulé}} = 0.65 + 0.47 = 1.12$$

Les deux mesures sont inférieures à la valeur limite, mais l'indice d'exposition cumulé est supérieur à 1. Pour les 4 classes d'effets précitées, il y a surexposition de l'opérateur lors de la situation de travail observée.

Note : L'exposition à des mélanges peut donner lieu à divers phénomènes pouvant affecter la toxicité des substances prises individuellement : l'additivité prise comme hypothèse par défaut dans MiXie France mais aussi l'infra-additivité (le mélange est moins toxique que l'addition de la toxicité des substances) ou la supra-additivité (les effets sont synergiques, supérieurs à l'additivité des substances). Une analyse approfondie de la littérature sur les mélanges peut être nécessaire pour détailler ces mécanismes.

Comme pour l'établissement d'un diagnostic d'exposition en mono-exposition, la variabilité cumulée des mesures doit être prise en considération dans le cas d'une multi-exposition. Ainsi, la méthode proposée dans la section précédente s'applique : il faut remplacer les mesures unitaires par les indices d'exposition cumulés et considérer une valeur limite de 1 pour construire une probabilité de dépassement et d'autres indicateurs pertinents selon le contexte.

L'ABSENCE DE VALEUR LIMITE

Il n'existe pas toujours de valeur limite définie pour les substances. C'est en particulier le cas des bio-aérosols et des nano-aérosols pour lesquels des valeurs guide qui ne sont pas basées sur des données toxicologiques ont parfois été proposées [6][7].

Néanmoins, dans un objectif de prévention des risques, la réduction des expositions des travailleurs aux substances supposées dangereuses est souhaitable, même en l'absence de valeur limite. Le principe consiste à prioriser les situations de travail par niveau d'exposition, en rapport à une situation de référence. Ainsi, si un GES « référence » a bien été défini pour faire partie de la stratégie de prélèvement, son niveau d'exposition est supposé faible, voire nul. Il peut s'agir par exemple de prélèvements réalisés dans un local tertiaire attendant aux postes de travail. L'analyse statistique des mesures par GES peut alors être caractérisée par la mise en œuvre de la méthode utilisée par l'AIHA, l'association des hygiénistes du travail des Etats Unis [8]. L'indicateur statistique à calculer est le 95eme centile de la distribution de probabilités log normale. Il se calcule par exemple avec MS Excel, avec la formule suivante

$$= LOI.LOGNORMALE.INVERSE(0,95; \ln(Mg); \ln(Sg))$$

Les valeurs des 95emes centiles obtenues pour chaque GES sont alors comparées entre elles et avec la référence. Des solutions de prévention peuvent alors être mises en œuvre pour les GES les plus exposés aux substances chimiques ou biologiques sans valeur limite.

Par voie de conséquence, une « valeur de déclenchement d'actions de prévention » interne à l'entreprise pour une substance donnée peut être définie. L'employeur décide de cette valeur et de son évolution par l'examen des 95emes centiles.

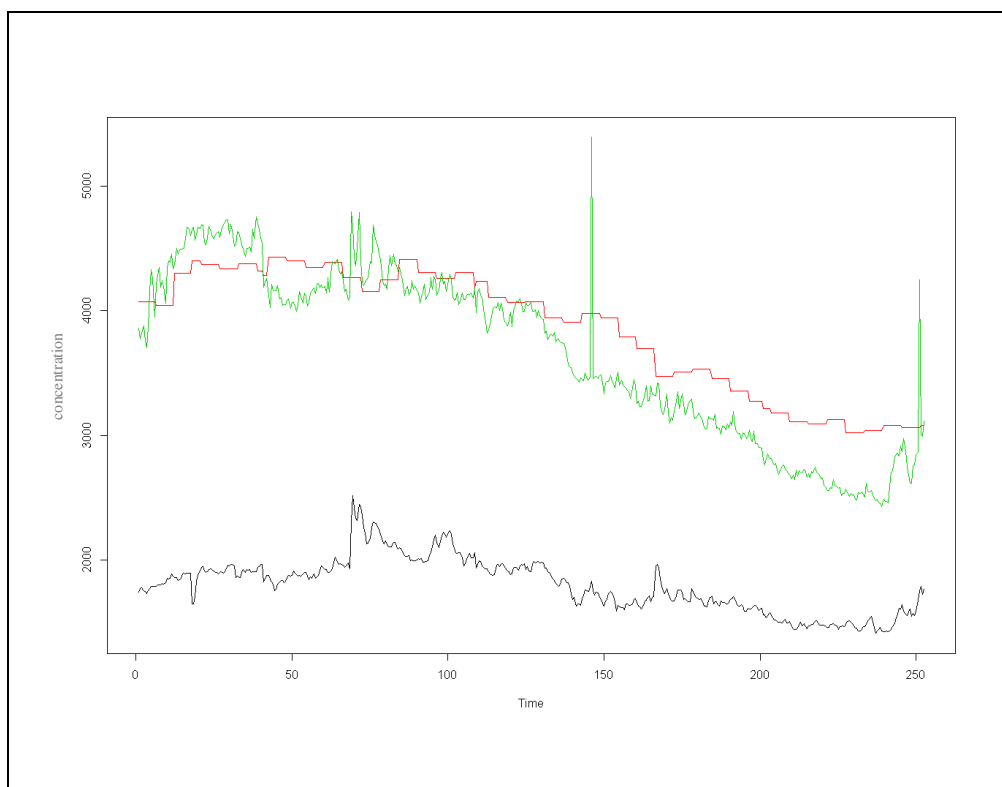
Exemple : Une entreprise a défini 10 GES exposés à une substance λ pour laquelle il n'existe aucune valeur limite réglementaire, scientifiquement admise ni technique. Six prélèvements ont été réalisés pour chaque GES et les résultats ont été analysés, incluant des prélèvements dans un local tertiaire de référence. Les résultats obtenus sont

GES	Valeur du 95eme centile
référence	7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N°7	87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N°4	102 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N°1	107 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N°10	171 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N°9	210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N°2	219 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N°3	233 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N°5	268 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N°6	789 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
N°8	819 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

L'employeur décide qu'une exposition supérieure à 100 fois la valeur de la concentration mesurée dans le local de référence de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est trop élevée soit $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ceci impose d'apporter des actions de prévention aux GES n°6 et n°8. Lors de mesures ultérieures, cette valeur pourra être révisée, toujours dans l'objectif de réduire les expositions.

LES MESURES EN TEMPS REEL

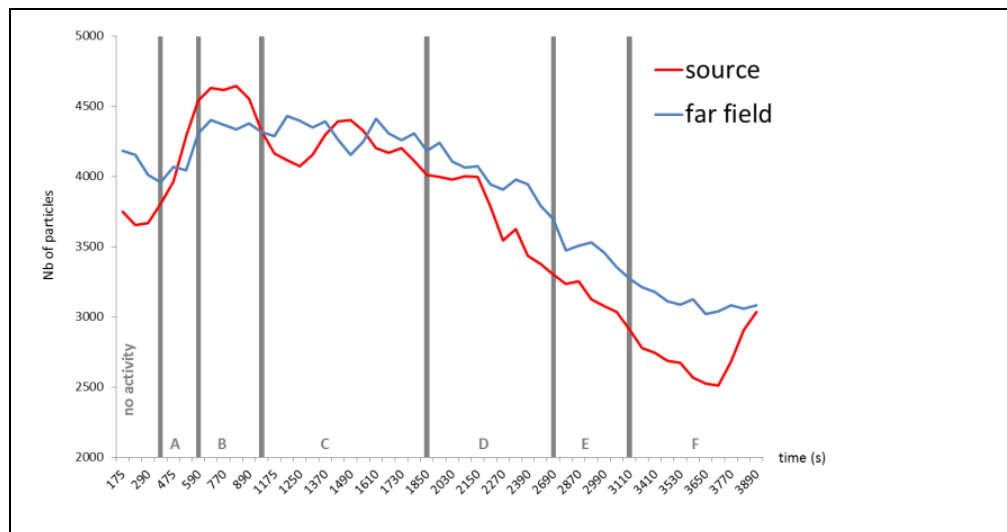
Le résultat d'une mesure en temps réel se présente sous la forme d'un graphique avec en abscisses le temps et en ordonnées la valeur de concentration instantanée.



Exemple de mesures en temps réel. Les séries de mesures (rouge, vert, noir) ont été réalisées simultanément dans un atelier, à l'aide de compteurs d'ambiance localisés à différents endroits.

La plupart des valeurs limites sont déterminées au regard d'une dose toxicologique acceptable pendant une journée de travail d'une personne moyenne. En conséquence, si la quantification de l'exposition d'un groupe de travailleurs est recherchée, la méthode de mesure doit être adaptée à cet objectif. L'analyse en temps réel ne permet pas -en l'état- d'y répondre : l'équivalent est l'aire sous la courbe des mesures, calculée par l'intégrale mathématique.

La problématique majeure de la variabilité des expositions demeure là aussi prégnante, il en va de même pour les aspects théoriques d'échantillonnage représentatif et extrapolation par modèle.



Exemple de mesure en temps réel de nano particules. En rouge, la mesure à proximité de la source d'émission, en bleu une mesure éloignée (far field). Les barres verticales grises dissocient les différentes tâches émissives de nano-particules réalisées par l'opérateur pendant la période de mesure.

Dans ce cas, il n'existe pas de consensus permettant d'évaluer les expositions à partir de ce type de source de données, mais différentes solutions sont envisageables. La plus simple étant un commentaire descriptif des pics d'exposition, en relation avec la tâche effectuée. L'examen des valeurs de pics peut conduire au même type de raisonnement que celui décrit dans la section précédente. Pour le cas des nano-aérosols, des méthodes descriptives reposant sur la quantification de l'écart entre la mesure de référence et la mesure à la source ont été proposées par [9]. D'un point de vue européen, il est proposé d'utiliser une méthode statistique d'analyse des séries temporelles, ARIMA [10].

LE RAPPORT

Dans tous les cas, le rapport d'analyse doit faire apparaître

- ◆ Les données relatives à l'entreprise
 - ▶ Informations légales : nom, adresse, responsable...
 - ▶ Effectif de l'entreprise
- ◆ Les données relatives aux GES
 - ▶ Type de procédés exposants
 - ▶ Activité générale et cadence de travail
 - ▶ Tâches réalisées et métiers des travailleurs
 - ▶ Type de moyens de prévention mis en œuvre (ventilation, captage)
 - ▶ Port d'un équipement de prévention
- ◆ Pour chaque GES, le diagnostic porté
 - ▶ L'objectif : réglementaire (VLEP 8h, CT), validation de procédé...

- ▶ La validité de l'hypothèse d'homogénéité : écart type géométrique, adéquation au modèle de données...
- ▶ Les commentaires et analyses de l'hygiéniste industriel, la mise en perspective par expertise
- ▶ La conclusion
- ◆ Pour chaque diagnostic, les données relatives aux prélèvements
 - ▶ Toutes les valeurs d'analyse avec l'unité de mesure, incluant les dépassements de capacité des supports, les résultats d'analyse inférieurs à la limite de quantification et les mesures éventuellement éliminées de l'analyse. Les éventuelles pondérations relatives à la durée de prélèvement et/ou au port d'EPI doivent être détaillées
 - ▶ Des éléments permettant de juger de la représentativité de la mesure par rapport au GES, en particulier dans le cas où la mesure serait retirée de l'analyse
 - ▶ Commentaires et observations relevées par le préleveur durant le prélèvement
 - ▶ Informations générales : date, conditions climatiques
 - ▶ Informations techniques : type d'appareil de prélèvement, type d'analyse
 - ▶ Spécificités du travailleur au sein du GES

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Leidel N.; Busch K.A. ; Lynch J.R ; Occupational Exposure Sampling Strategy Manual ; NIOSH, US, Cincinnati, 1977
- [2] AFNOR ; NF EN 482 X43-277 - Exigences générales concernant les performances des procédures de mesurage des agents chimiques ; 1994
- [3] Duquenne P., Greff-Mirguet G. ; L'échantillonnage et l'analyse des aérosols microbiens ; Hygiène et Sécurité du Travail ; ND2222 ; <http://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ND/TI-ND-2222/nd2222.pdf> ; 2005
- [4] Grzebyk M., Sandino J.P. ; Aspects statistiques et rôle de l'incertitude de mesurage dans l'évaluation de l'exposition professionnelle aux agents chimiques ; Hygiène et Sécurité du Travail ; ND2231 ; [http://www.hst.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/HST_ND%202231/\\$File/ND2231.pdf](http://www.hst.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/HST_ND%202231/$File/ND2231.pdf) ; 2005
- [5] Mulhausen J. ; Establishing Similar Exposure Groups ; A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures, Fourth Edition ; AIHA ; 2015
- [6] Balty I., Bertrand N., David C., Burzoni S., Clerc F., Duquenne P., Simon X., Caron V., Facon B., Rénevoit V. ; Valeurs guides endotoxines – interprétation des résultats de métrologie des bioaérosols ; Hygiène et Sécurité du Travail ; NT25 ; <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2025> ; 2015
- [7] Ricaud M., Witschger O. ; Les nanomatériaux. Définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention ; ED6050 - <http://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-6050/ed6050.pdf> ; 2012
- [8] A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures, 4th edition ; AIHA Press ; ed S.D. Jahn, W.H. Bullock, J.S. Ignacio, 2015
- [9] F. Clerc, G.-H. Njiki-Menga, O. Witschger; Exploratory Study on a Statistical Method to analyze Time Resolved Data Obtained During Nanomaterial Exposure Measurements; Journal of Physics: conference series; 2013
- [10] R.H. Klein Entink, W. Fransman, D.H. Brouwer; How to statistically analyze nano exposure measurement results: using an ARIMA time series approach; Journal of Nanoparticle Research; Vol. 13 (12); 2011

AUTEURS

F. Clerc et G. Mater

INRS, Métrologie des polluants (metropol@inrs.fr)

HISTORIQUE

Version	Date	Modifications
1	Octobre 2015	Création de la fiche