

PREAMBULE

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué de laboratoires de l'Ecole des Mines de Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches finalisées à la demande du Ministère chargé de l'environnement, sous la coordination technique de l'ADEME et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique supportés financièrement par la Direction des Préventions des Pollutions et des Risques du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.

**LABORATOIRE NATIONAL DE METROLOGIE
ET D'ESSAIS**

DIVISION Métrologie chimique et biomédicale

**Rédaction de guides pratiques de
calcul d'incertitudes**

***Caroline CHMIELIEWSKI
Jacques LACHENAL
Béatrice LALERE
Tatiana MACE
Christophe SUTOUR***

ECOLE DES MINES DE DOUAI

DEPARTEMENT CHIMIE ET ENVIRONNEMENT

**Rédaction de guides pratiques de
calcul d'incertitudes**

Hervé PLAISANCE et François MATHE

Convention : 000070

Novembre 2006

**INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL
ET DES RISQUES**

DIRECTION DES RISQUES CHRONIQUES
Unité Qualité de l'Air

**Rédaction de guides pratiques de
calcul d'incertitudes**

Jean POULLEAU, Cécile RAVENTOS

GUIDE PRATIQUE D'UTILISATION

**POUR L'ESTIMATION DE L'INCERTITUDE DE MESURE
DES CONCENTRATIONS EN POLLUANTS DANS L'AIR AMBIANT**

Partie 1 : Généralités

Projet du 07/11/2006

Version 5

NOVEMBRE 2006

Table des matières

Table des matières.....		2
1	Textes de référence	4
1.1	Normes.....	4
1.2	Textes réglementaires.....	5
1.3	Autres textes de référence	5
2	Définitions.....	6
2.1	Analyseur de gaz.....	6
2.2	Caractéristique de performance	6
2.3	Coefficient de sensibilité.....	6
2.4	Correction.....	6
2.5	Covariance.....	6
2.6	Critère de performance	6
2.7	Facteur d'élargissement.....	6
2.8	Grandeur d'influence.....	6
2.9	Incertitude de mesure	7
2.10	Incertitude élargie.....	7
2.11	Incertitude-type	7
2.12	Incertitude-type composée	7
2.13	Interférence.....	7
2.14	Intervalle de confiance	8
2.15	Mesurage	8
2.16	Mesurande	8
2.17	Station de mesure	8
2.18	Traçabilité	8
2.19	Valeur cible (pour l'ozone).....	9
2.20	Valeur limite.....	9
3	Généralités sur les incertitudes de mesure	9
3.1	Résultat de mesurage et incertitude.....	9
3.2	Concept d'incertitude de mesure	9
3.3	Quels outils pour estimer l'incertitude d'un résultat de mesurage ?.....	10
Annexe A : Valeurs limites et objectif de qualité des données dans le domaine de la qualité de l'air pour l'Union européenne		19
Annexe B : Mode d'évaluation de l'incertitude-type et choix de la loi de distribution.....		20
Annexe C : Lecture d'un certificat d'étalonnage		22

Introduction

Ce guide a pour objectif d'aider les utilisateurs de systèmes automatiques ou manuels de mesure de concentrations en polluants gazeux à l'air ambiant, à déterminer l'incertitude associée aux résultats de mesurage fournis pour l'ensemble de la gamme de mesure utilisée.

Le guide décrit comment établir un budget d'incertitudes à partir des caractéristiques de performance de la méthode incluant la ligne de prélèvement associée et la technique analytique, en prenant en compte les conditions d'environnement pouvant avoir une influence sur le résultat de mesurage. Ce budget ne prend pas en compte le problème éventuel du manque de représentativité spatiale de l'échantillon.

Le calcul de l'incertitude associée aux résultats de mesurage fournis par les analyseurs d'air ambiant utilisés en poste fixe ou mobile ou fournis par les méthodes manuelles est nécessaire pour s'assurer que la méthode de mesurage mise en œuvre répond aux exigences réglementaires. En effet, les Directives européennes relatives à la fixation de valeurs limites de certains polluants dans l'air ambiant définissent un niveau d'incertitude relative à ne pas dépasser (pour un niveau de confiance de 95%) à la valeur limite (voir en annexe A les valeurs maximales des incertitudes relatives).

Il est à noter que ces incertitudes (aussi appelées "exactitude" dans certaines Directives) correspondent à des incertitudes élargies, avec un coefficient d'élargissement pris égal à 2. Ces incertitudes peuvent également être assimilées à des intervalles de confiance.

L'estimation de l'incertitude de mesure pourra être abordée de façon légèrement différente suivant qu'il s'agit :

- **De qualifier le système de mesure** : dans ce cas, le calcul d'incertitude est effectué avant la mise en œuvre du matériel sur site, afin de vérifier que l'analyseur permet de mesurer le composé visé au niveau de la valeur limite en respectant un seuil d'incertitude fixé par la réglementation, ou éventuellement choisi par l'utilisateur. La conformité de la méthode automatique à ce seuil d'incertitude doit être un des critères de choix de cette dernière.
- **De qualifier la qualité d'un mesurage sur site** : le calcul est alors effectué après le mesurage, afin de déterminer l'incertitude associée au résultat de mesurage obtenu, en prenant en compte les spécificités du site pendant la période de mesure considérée (conditions d'environnement, matrice) et dans le cas de l'utilisation d'un analyseur de gaz automatique, la dérive de celui-ci sur cette période ainsi que le traitement ultérieur des données fournies par l'analyseur. Ce calcul est nécessaire afin de s'assurer que la mise en œuvre de la méthode de mesurage considérée permet de respecter l'exigence réglementaire relative à l'incertitude de mesure dans les conditions de site et dans le temps. C'est ce cas qui est plus particulièrement développé dans le présent guide.

Un organisme doit pouvoir déterminer les incertitudes associées à ses résultats de mesurage¹ lorsqu'il est amené à établir une comparaison entre les résultats de ses mesurages et des valeurs limites réglementaires.

¹ Extraits de la norme NF EN ISO/CEI 17025 :

Paragraphe 5.4.6.2 : Les laboratoires doivent posséder et appliquer des procédures pour estimer l'incertitude de mesure.

Paragraphe 5.4.6.3 : Lorsqu'on estime l'incertitude de mesure, il faut prendre en compte, en utilisant des méthodes d'analyse appropriées, toutes les composantes de l'incertitude qui ont une importance dans la situation donnée.

Dans son document d'application de l'ISO 17025, le COFRAC mentionne la nécessité pour les organismes voulant être accrédités de présenter :

Cette incertitude doit être déterminée par l'intermédiaire d'un budget d'incertitude et le résultat doit être « consolidé »² en le rapprochant des intervalles de confiance de répétabilité et reproductibilité déterminés selon l'ISO 5725-2 lors d'exercices interlaboratoires ou par toute autre vérification sur le terrain.

Le présent guide, basé à la fois sur les spécifications de la norme ISO 14956 et sur le GUM (guide pour l'expression de l'incertitude de mesure - NF ENV 13005), décrit comment établir les budgets d'incertitudes dans le cas des mesurages à l'air ambiant. Il est constitué des parties suivantes :

- PARTIE 1 : Généralités sur les incertitudes et description des étapes pour établir le budget d'incertitude dans le cas des systèmes de mesure automatiques et manuels de composés gazeux. La méthodologie ainsi décrite est ensuite mise en application dans différents exemples.
- PARTIE 2 : Estimation des incertitudes sur les mesurages automatiques de SO₂, NO/ NO₂, O₃ et CO réalisés sur site
- PARTIE 3 : Estimation des incertitudes sur les mesurages de benzène réalisés sur site par la méthode manuelle du tube à diffusion suivie d'une désorption thermique en laboratoire
- PARTIE 4 : Estimation des incertitudes sur les mesurages de dioxyde d'azote réalisés sur site par la méthode manuelle du tube à diffusion suivie d'une analyse spectrophotométrique en laboratoire
- PARTIE 5 : Estimation des incertitudes sur les concentrations massiques de particules mesurées en automatique

1 Textes de référence

1.1 Normes

Ce document comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Les références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à ce guide que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière référence de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

NF X 07-001 : 1994, Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie (VIM)

NF ISO 5725-2 : 1994, Application de la statistique - Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 2 : méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesurage normalisée

-
- La liste des composantes des incertitudes associée aux étendues de mesure ;
 - La quantification de chacune des composantes ;
 - Le mode de calcul de l'incertitude globale.

² Il s'agit d'une recommandation de l'ISO/CEI 17025 au paragraphe 5.9 : "la surveillance de la qualité des résultats d'essai peut inclure la participation à des programmes de comparaisons entre laboratoires ou d'essais d'aptitude" et d'une exigence de l'ISO 14956 au paragraphe 9 : "Avant d'accepter définitivement la série des caractéristiques métrologiques pour lesquelles l'équation $U_c < U_{req}$ est vérifiée, la méthode doit être mise en œuvre dans les conditions régnant sur le terrain afin de s'assurer que ses données métrologiques et son incertitude de mesure calculée sont conformes aux résultats obtenus dans les conditions régnant sur le terrain."

NF ISO 5725-6 : 1994, Application de la statistique - Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 6 : utilisation dans la pratique des valeurs d'exactitude

NF ENV 13005 : 1999, Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure

NF EN ISO/CEI 17025 : 2005, Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais

NF EN ISO 14956 : 2002, Qualité de l'air – Evaluation de l'aptitude à l'emploi d'une procédure de mesurage par comparaison avec une incertitude de mesure requise

NF EN 14211 : 2005, Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en dioxyde d'azote et monoxyde d'azote par chimiluminescence

NF EN 14212 : 2005, Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en dioxyde de soufre par fluorescence UV

NF EN 14625 : 2005, Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en ozone par photométrie UV

NF EN 14626 : 2005, Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en monoxyde de carbone par la méthode à rayonnement infra-rouge non-dispersif

NF EN 14662-4, Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en benzène – Partie 4 : Échantillonnage par diffusion suivi d'une désorption thermique et d'une chromatographie gazeuse

NF EN 13528-2 : 2003, Qualité de l'air ambiant - Échantillonneurs par diffusion pour la détermination des concentrations des gaz et des vapeurs - Exigences et méthodes d'essai - Partie 2 : Exigences spécifiques et méthodes d'essai

NF X 43015 : 1976, Pollution atmosphérique - Teneur de l'air atmosphérique en dioxyde d'azote – Méthode de dosage par piégeage sur filtre imprégné de triéthanolamine

NF X 43-009 : 1973, Pollution atmosphérique - Teneur de l'air atmosphérique en dioxyde d'azote (Méthode de Griess-Saltzman)

NF ISO 11222 : 2002, Qualité de l'air - Détermination de l'incertitude de mesure de la moyenne temporelle de mesurages de la qualité de l'air

1.2 Textes réglementaires

- Directive 1999/30/CE du Conseil du 22 avril 1999 relative à la fixation de valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant.
- Directive 2000/69/CE du Parlement Européen et du Conseil du 16 novembre 2000 concernant les valeurs limites pour le benzène et le monoxyde de carbone dans l'air ambiant.
- Directive 2002/3/CE du Parlement Européen et du Conseil du 12 février 2002 relative à l'ozone dans l'air ambiant.

1.3 Autres textes de référence

Guide ADEME, référence 4414 : 2002, Échantillonneurs passifs pour le dioxyde d'azote.

Guide EURACHEM / CITAC, « Quantifier l'incertitude dans les mesures analytiques » - 2^{ème} édition (2000).

2 Définitions

2.1 Analyseur de gaz

Instrument analytique fournissant un signal de sortie qui est une fonction de la composition d'un (ou plusieurs) constituant(s) d'un mélange gazeux.

2.2 Caractéristique de performance

Un des paramètres caractérisant l'équipement afin de définir sa performance, par exemple la linéarité.

2.3 Coefficient de sensibilité

Dérivée partielle $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, f étant le modèle mathématique du processus de mesurage et x_i la valeur de la grandeur d'entrée X_i du modèle mathématique.

2.4 Correction

Valeur ajoutée algébriquement au résultat brut d'un mesurage pour compenser une erreur systématique.

NOTES 1. La correction est égale à l'opposé de l'erreur systématique estimée.
 2. Puisque l'erreur systématique ne peut pas être connue parfaitement, la compensation ne peut pas être complète.

2.5 Covariance

Mesure de la dépendance mutuelle de deux variables aléatoires.

2.6 Critère de performance

Valeur limite associée à une caractéristique de performance pour l'évaluation de la conformité.

2.7 Facteur d'élargissement

Facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude-type composée pour obtenir l'incertitude élargie.

NOTE 1 Un facteur d'élargissement k a sa valeur typiquement comprise entre 2 et 3.

NOTE 2 Un facteur d'élargissement égal à 2 correspond à un intervalle de confiance proche de 95%.

2.8 Grandeur d'influence

Grandeur qui n'est pas le mesurande mais qui a un effet sur le résultat du mesurage.

Exemple a) Température d'un micromètre lors de la mesure d'une longueur.

 b) Fréquence lors de la mesure de l'amplitude d'une tension électrique alternative.

- c) Concentration en bilirubine lors de la mesure de la concentration en hémoglobine dans un échantillon de plasma sanguin humain.

2.9 Incertitude de mesure

Paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

- NOTES
1. Le paramètre peut être, par exemple, un écart-type (ou un multiple de celui-ci) ou la demi-largeur d'un intervalle de niveau de confiance déterminé.
 2. L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurages et peuvent être caractérisées par des écart-types expérimentaux. Les autres composantes, qui peuvent aussi être caractérisées par des écart-types, sont évaluées en admettant des distributions de probabilité, d'après l'expérience acquise ou d'après d'autres informations.
 3. Il est entendu que le résultat du mesurage est la meilleure estimation de la valeur du mesurande, et que toutes les composantes de l'incertitude, y compris celles qui proviennent d'effets systématiques, telles que les composantes associées aux corrections et aux étalons de référence, contribuent à la dispersion.

2.10 Incertitude élargie

Grandeur définissant un intervalle, autour du résultat d'un mesurage, dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande.

- NOTES
1. La fraction peut être considérée comme la probabilité ou le niveau de confiance de l'intervalle.
 2. L'association d'un niveau de confiance spécifique à l'intervalle défini par l'incertitude élargie nécessite des hypothèses explicites ou implicites sur la loi de probabilité caractérisée par le résultat de mesure et son incertitude-type composée. Le niveau de confiance qui peut être attribué à cet intervalle ne peut être connu qu'avec la même validité que celle qui se rattache à ces hypothèses.
 3. L'incertitude élargie est aussi appelée « incertitude globale » lorsqu'il s'agit d'une incertitude-type composée élargie.

2.11 Incertitude-type

Incetitude du résultat d'un mesurage exprimée sous la forme d'un écart-type.

2.12 Incertitude-type composée

Incetitude-type du résultat d'un mesurage, lorsque ce résultat est obtenu à partir des valeurs d'autres grandeurs, égale à la racine carrée d'une somme de termes, ces termes étant les variances ou covariances de ces autres grandeurs, pondérées selon la variation du résultat de mesure en fonction de celle de ces grandeurs.

2.13 Interférence

Réponse de l'analyseur aux interférents.

2.14 Intervalle de confiance

Intervalle aléatoire (t_1, t_2) dépendant de l'échantillon, tel que :

$$P(t_1 \leq \theta \leq t_2) = 1 - \alpha$$

Avec :

- θ le paramètre inconnu de la population,
- t_1 et t_2 les limites de confiance,
- $1 - \alpha$ le niveau de confiance.

NOTE Cet intervalle est tel que, si l'expérience était répétée un grand nombre de fois dans les mêmes conditions, θ appartiendrait à cet intervalle dans $100 \cdot (1 - \alpha) \%$ des cas.

2.15 Mesurage

Ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer la valeur du mesurande.

NOTE Le déroulement des opérations peut être automatique.

Il est à noter que le terme « mesure » est parfois utilisé à la place du terme « mesurage » (ex : station de mesure).

2.16 Mesurande

Grandeur particulière soumise à mesurage.

EXEMPLE Pression de vapeur d'un échantillon donné d'eau à 20°C.

NOTE La définition du mesurande peut nécessiter des indications relatives à des grandeurs telles que le temps, la température et la pression.

2.17 Station de mesure

Abri ou bâtiment situé sur le site de mesurage, dans lequel un analyseur de gaz destiné à mesurer les concentrations en polluant est installé, de sorte que ses performances et son fonctionnement soient conformes aux exigences prescrites.

2.18 Traçabilité

Propriété du résultat d'un mesurage ou d'un étalon tel qu'il puisse être relié à des références déterminées, généralement des étalons nationaux ou internationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaisons ayant toutes des incertitudes déterminées.

- NOTES
1. Ce concept est souvent exprimé par l'adjectif traçable.
 2. La chaîne ininterrompue de comparaisons est appelée chaîne de raccordement aux étalons ou chaîne d'étalonnage.
 3. La manière dont s'effectue la liaison aux étalons est appelée raccordement aux étalons.

2.19 Valeur cible (pour l’ozone)

Concentration dans l'air ambiant fixée dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs pour la santé des personnes et l'environnement dans son ensemble qu'il convient d'atteindre, si possible, dans un délai donné.

NOTE Cette valeur est fixée par la réglementation européenne (ex : directive).

2.20 Valeur limite

Concentration fixée sur la base de connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans un délai donné, et à ne pas dépasser une fois atteinte.

NOTE Cette valeur est fixée par la réglementation européenne (ex : directive).

3 Généralités sur les incertitudes de mesure

3.1 Résultat de mesurage et incertitude

Un résultat de mesurage est une information technique qui est utilisée habituellement pour prendre une décision. Il est essentiel que tout utilisateur d'un résultat de mesurage ait une appréciation de la fiabilité et de la qualité de l'information qu'il va utiliser.

Les spécialistes du mesurage et de la métrologie ont défini un terme spécifique pour quantifier la fiabilité ou la qualité d'un résultat de mesurage : l'incertitude. Ce terme à connotation plutôt négative montre le degré d'ignorance et de doute attaché au résultat, mais c'est en fait un précieux outil pour caractériser la qualité du résultat de mesurage et plus généralement de l'information supportée par ces résultats.

3.2 Concept d'incertitude de mesure

Ce terme fait l'objet d'un consensus international au niveau de sa définition. Celle-ci figure dans le VIM, Vocabulaire International des termes fondamentaux et généraux de Métrologie publiée en 1994 (NF X 07-001) :

Paramètre qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

Dans le vocabulaire des métrologues, le mesurande désigne la grandeur que l'opérateur cherche à mesurer. Cette définition permet de représenter le résultat d'un mesurage, non pas comme une valeur unique, mais comme un ensemble de valeurs numériques pas toujours toutes également probables.

Le schéma de la figure 1 illustre une distribution de valeurs attribuables au mesurande, qui n'ont pas toutes la même probabilité.

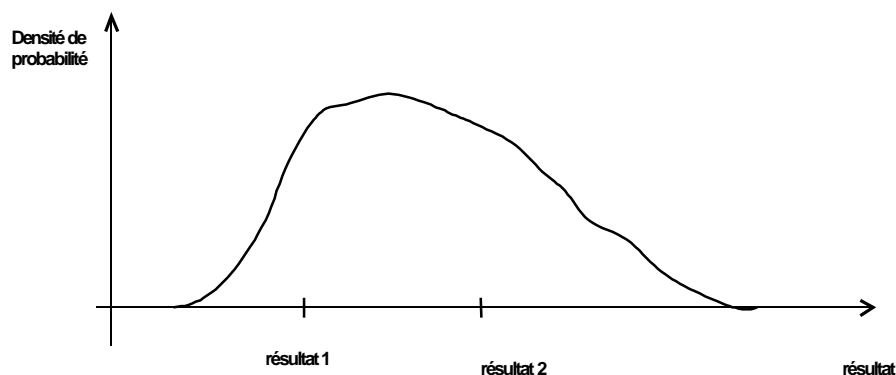


Figure 1 : Exemple de distribution de valeurs attribuables au mesurande

Il est donc nécessaire de définir comment rendre compte du résultat, et comment caractériser l'ensemble des valeurs qui pourraient être attribuées au mesurande.

Deux paramètres sont classiquement employés par les statisticiens pour caractériser un ensemble de données, à savoir un paramètre de position et un paramètre de dispersion (Cf. figure 2) :

- Le paramètre de position est l'espérance mathématique $E(Y)$ de la variable aléatoire « résultat de mesurage », qui n'est pas autre chose que la valeur annoncée du résultat ; c'est la valeur à laquelle il est donné la plus grande confiance.
- Le paramètre de dispersion est l'écart-type $u(Y)$, également appelé incertitude-type ; il représente la dispersion des valeurs attribuables au mesurande.

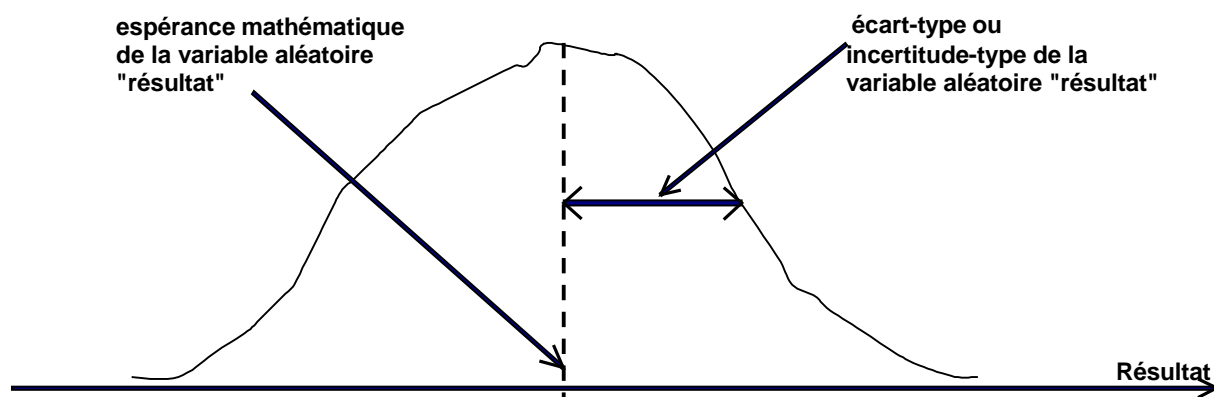


Figure 2 : Expression du résultat de mesurage par un paramètre de position et un paramètre de dispersion

Le résultat de mesurage est donc caractérisé par un paramètre de position, la valeur annoncée et un paramètre de dispersion, l'incertitude.

3.3 Quels outils pour estimer l'incertitude d'un résultat de mesurage ?

3.3.1 Un texte fondamental

Depuis quelques années, un consensus international s'est établi pour définir une méthode d'évaluation de l'incertitude d'un résultat de mesurage. Le Guide pour l'expression de l'Incertainitude de Mesure (GUM, NF ENV 13005) est devenu le document universel de référence. Cependant, d'autres textes décrivent maintenant des approches complémentaires, notamment fondées sur l'utilisation des données de validation des méthodes d'analyse.

L'approche GUM part du principe qu'un modèle mathématique est établi pour décrire le processus de mesurage. Ce modèle comporte les différentes informations utilisées pour calculer le résultat de mesurage. Ces informations appelées aussi grandeurs d'entrées peuvent être, par exemple, les observations de l'instrument ou des instruments de mesure utilisés, les corrections appliquées pour compenser des effets de nature systématique, des valeurs de constantes physiques...

Le modèle mathématique décrivant le processus de mesurage s'écrit sous la forme d'une équation où le résultat de mesurage Y est relié fonctionnellement à différentes grandeurs d'entrées X_i .

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

Chacune de ces informations ou grandeurs d'entrée X_i , est entachée d'un doute ou pour utiliser un terme plus technique, d'une incertitude appelée incertitude-type et notée $u(x_i)$. La loi de propagation de l'incertitude décrite dans le GUM permet de combiner les différentes incertitudes des grandeurs d'entrées du modèle pour calculer (propager) l'incertitude sur le résultat annoncé.

3.3.2 Démarche pour l'estimation de l'incertitude de mesure (application de la procédure décrite dans le GUM au chapitre 8)

— 1^{ière} étape : Calcul du résultat de mesurage

- Définition du mesurande Y
- Analyse du processus de mesurage
- Ecriture du modèle mathématique décrivant le processus de mesurage

— 2^{ième} étape : Calcul des incertitudes-types $u(x_i)$

- Estimation des incertitudes-types sur les grandeurs d'entrée du modèle
 - Au moyen de techniques statistiques (évaluation de type A)
 - Au moyen de connaissances acquises, de l'expérience (évaluation de type B)
- Estimation des covariances $u(x_i, x_j)$

— 3^{ième} étape : Propagation des incertitudes

- Utilisation de la loi de propagation de l'incertitude
- Définition des coefficients de sensibilité $\frac{\partial f}{\partial x_i}$
- Estimation de l'incertitude-type composée $u_c(y)$

— 4^{ième} étape : Expression du résultat de mesurage et de son incertitude élargie U

3.3.3 Etape 1 : Calcul du résultat de mesure

3.3.3.1 Définition du mesurande

Dans le contexte de l'estimation de l'incertitude, une étape essentielle consiste à établir clairement et sans ambiguïté ce qui va être mesuré et de donner une expression quantitative reliant la valeur du mesurande aux paramètres dont il dépend.

Par exemple, dans le cas présent, un des paramètres à définir est le pas de temps sur lesquels seront donnés les résultats : est-ce la concentration instantanée ou la concentration moyenne journalière ? Une fois le mesurande déterminé de façon précise, il est alors plus facile de modéliser le processus de mesure et de calculer l'incertitude associée.

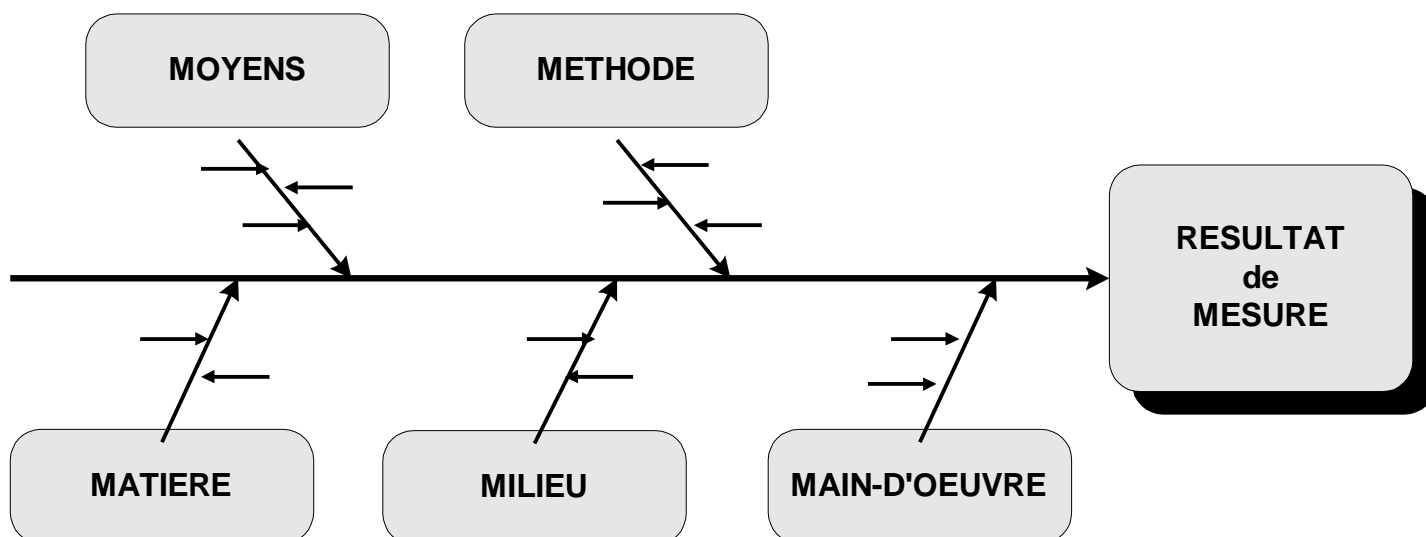
3.3.3.2 Méthode d'analyse du processus de mesure

Analyser correctement le processus de mesure est très certainement la tâche la plus difficile et la plus délicate de l'évaluation des incertitudes. Cette analyse requiert compétences techniques et sens de l'analyse. Elle doit être pratiquée par une personne maîtrisant parfaitement la technique de mesure.

Dans le cadre de ce guide, il est utilisé pour l'analyse des processus de mesure, la méthode dite "des 5 M". D'autres techniques sont utilisables, par exemple celles des diagrammes de cause / effet, technique préconisée dans le guide EURACHEM Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement (QUAM).

La mise au point du "bon modèle" mathématique nécessite d'avoir analysé finement le processus de mesure de manière à identifier de la façon la plus exhaustive possible les causes potentielles d'incertitude.

La technique des "5 M" permet, à partir d'une réflexion approfondie et d'une très bonne connaissance du processus de mesure, de recenser toutes ces causes.



La méthode des « 5M » consiste à se poser 5 questions : quels sont les facteurs liés aux moyens, à la méthode, au milieu, à la matière et à la main d'œuvre qui influencent le résultat de mesure ?

Le but étant ensuite de réduire l'influence des facteurs qui auront été identifiés.

Les méthodes pour diminuer l'influence de ces facteurs sont les suivantes :

- Les facteurs de nature aléatoire (erreurs aléatoires) sont généralement diminués en répétant les mesurages et en calculant la moyenne arithmétique des lectures.
- Les facteurs de nature systématique (erreurs systématiques) sont diminués en appliquant des corrections.

3.3.3.3 Diminution des erreurs aléatoires par répétition des mesurages

L'erreur aléatoire provient probablement de variations temporelles et spatiales non prévisibles ou stochastiques de grandeurs d'influence. Les effets de telles variations, appelés ci-après effets aléatoires, entraînent des variations pour les observations répétées du mesurande.

Bien qu'il ne soit pas possible de compenser l'erreur aléatoire d'un résultat de mesurage, elle peut généralement être réduite en augmentant le nombre d'observations. Son espérance mathématique ou valeur espérée est égale à zéro.

NOTE "L'écart-type expérimental de la moyenne arithmétique d'une série d'observations *n'est pas* l'erreur aléatoire de la moyenne, bien qu'on le désigne ainsi dans certaines publications. Mais c'est, en fait, une mesure de l'incertitude de la moyenne due aux effets aléatoires. La valeur exacte de l'erreur sur la moyenne provenant de ces effets ne peut pas être connue." (GUM § 3.2.2).

3.3.3.4 Réduction des erreurs systématiques par application de corrections

Cette opération est indéniablement la plus difficile pour le métrologue ; elle va requérir de sa part un sens aigu de l'analyse. Le processus de mesurage doit être étudié de façon à identifier le maximum de causes d'erreur, puis les corrections nécessaires pour compenser ces erreurs présumées doivent être estimées.

Une grande connaissance du procédé de mesurage et des principes physiques mis en jeu est bien souvent nécessaire pour identifier les facteurs qui peuvent avoir une influence sur le résultat de mesurage.

Dans la pratique, de nombreuses sources d'erreurs peuvent intervenir :

- effet des grandeurs d'influence (température, pression, humidité...),
- interférence (effet de matrice),
- erreur de justesse des instruments,
- perturbation de la grandeur mesurée par la présence de l'instrument de mesurage,
- erreur d'arrondissement,
- erreur dans un algorithme de traitement de résultats de mesurage,
- erreur introduite par la méthode de mesurage,
- erreur introduite par le mode opératoire...

Dans le cas général, de nombreuses corrections sont appliquées soit pour tenter de compenser les erreurs présumées, soit pour exprimer les résultats dans des conditions standards.

Pour celles qui sont identifiées, des corrections sont appliquées pour les compenser. Toutefois, malgré ces corrections, il subsistera un doute, une incertitude sur la valeur des corrections.

Par ailleurs, il est important de noter que, même si une correction n'est pas connue, il est essentiel de la faire figurer dans le modèle mathématique décrivant le processus de mesure ; sa valeur sera prise égale à zéro, mais son incertitude-type associée et donc sa contribution à l'incertitude sur le résultat de mesure sera quand même prise en compte.

3.3.3.5 Modélisation du processus de mesure

Modéliser le processus, c'est transcrire sous forme d'écriture mathématique la façon dont sont utilisées toutes les informations qui sont à la disposition de l'expérimentateur, pour calculer le résultat de mesure ou d'essai qu'il annonce. Ce sont par exemple : une série de lectures de l'instrument, la valeur d'une correction lue dans un certificat d'étalonnage, la valeur d'une grandeur obtenue dans un manuel, le mesurage ou l'estimation des effets d'une grandeur d'influence... Se reporter à l'annexe B pour l'exploitation du certificat d'étalonnage.

Le mesurande Y est déterminé à partir de N autres grandeurs X_1, X_2, \dots, X_N à travers la relation fonctionnelle f . Le modèle du processus est alors :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

Parmi les X_i figurent les corrections (ou les facteurs correctifs) ainsi que des grandeurs qui prennent en compte toutes les autres sources de variabilité telles que les différents observateurs, les instruments, les échantillons, les laboratoires et les périodes de mesure.

La fonction f n'exprime donc pas simplement une loi physique, mais le processus de mesure ou d'essai et en particulier, la fonction doit contenir toutes les grandeurs qui contribuent significativement à l'incertitude du résultat final.

Lorsque plusieurs grandeurs d'entrée X_i, X_j dépendent d'une même grandeur t , il est parfois utile, d'écrire le modèle mathématique développé en explicitant les grandeurs d'entrée concernées en fonction de cette même grandeur t de façon à éviter l'introduction de termes de covariance dans l'application ultérieure de la loi de propagation des incertitudes.

3.3.4 Etape 2 : Calcul des incertitudes-types

Cette étape consiste à calculer les incertitudes-types $u(x_i)$ de chacune des grandeurs d'entrée X_i .

Le GUM propose deux types de méthodes pour évaluer ces incertitudes-types.

3.3.4.1 Les méthodes d'évaluation de type A

Les méthodes d'évaluation de type A se fondent sur l'application de méthodes statistiques à une série de déterminations répétées. Elles sont principalement utilisées pour quantifier les incertitudes de répétabilité des processus de mesure.

Lorsqu'un procédé de mesure est répété en conservant (au mieux) les mêmes conditions, une dispersion des valeurs mesurées est généralement constatée si le procédé de mesure a une résolution suffisante. Avec n valeurs indépendantes (x_i), le meilleur estimateur de l'espérance de la population est donné par la moyenne arithmétique des valeurs individuelles \bar{x} .

L'estimateur de l'espérance est donné par :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

L'estimateur de l'écart-type (expérimental) est donné par :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

L'opérateur réalise souvent de nombreuses séries de mesures (le nombre de mesures à l'intérieur des séries pouvant être différent) avec la même méthode, la même procédure, les mêmes instruments et dans des conditions similaires.

De ces différentes séries, il pourra calculer des estimateurs de la variance de la population : $s_1^2, s_2^2, \dots, s_k^2$

Chacune des séries correspondant à un nombre de mesures (n_1, n_2, \dots, n_k).

NOTE Une meilleure connaissance de la variance de la population totale peut être obtenue en combinant ces différents estimateurs (variance accumulée) :

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2 + \dots + (n_k - 1)s_k^2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1) + \dots + (n_k - 1)} \quad (4)$$

Ce qui s'écrit également en fonction du nombre de degrés de liberté $\nu_i = n_i - 1$.

$$s^2 = \frac{\nu_1 s_1^2 + \nu_2 s_2^2 + \dots + \nu_k s_k^2}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_k} \quad (5)$$

3.3.4.2 Les méthodes d'évaluation de type B

Elles sont utilisées pour quantifier les incertitudes des différentes composantes intervenant dans le modèle du processus de mesure : incertitude sur les corrections d'étalonnage, incertitude sur les corrections d'environnement, etc. Les méthodes d'évaluation de type B sont employées lorsqu'il n'est pas souhaité ou lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser des méthodes statistiques.

Ces méthodes d'évaluation de type B se fondent sur l'expérience des opérateurs, sur l'exploitation des essais antérieurs, sur la connaissance des phénomènes physiques...

Pour chacun des X_i intervenant dans le modèle décrivant le processus de mesure, les incertitudes-types correspondantes sont appréciées en utilisant toutes les informations techniques disponibles (étendue des valeurs possibles et distribution a priori).

Différentes formes de distribution sont utilisées pour l'évaluation des incertitudes selon les méthodes de type B : les plus courantes sont la loi uniforme, la loi normale tronquée, la distribution triangle, la distribution en U. Se reporter à l'annexe C pour la description des lois usuelles.

Exemple Une correction doit être appliquée dans un processus de mesure, mais cette correction (x_i) n'est pas très bien connue ; la seule information est qu'elle est comprise entre deux limites, inférieure (a_{ii}) et supérieure (a_{is})

La valeur de la correction est estimée par :

$$x_i = \frac{1}{2} (a_{ii} + a_{is}) \quad (6)$$

et l'estimateur de la variance correspondante est :

$$s_{x_i}^2 = \frac{1}{12} (a_{ii} - a_{is})^2 \quad (7)$$

Si la différence entre les deux limites (inférieure et supérieure) est notée d ou $2a_i$, alors l'équation précédente peut s'écrire :

$$s_{x_i}^2 = \frac{1}{3} a_i^2 = \frac{1}{12} d^2 \quad (8)$$

D'où l'estimation de l'incertitude-type sur x_i :

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}} = \frac{d}{\sqrt{12}} \quad (9)$$

Ces calculs correspondent à une loi uniforme, ce qui signifie que x_i a la même chance de prendre une quelconque valeur dans l'intervalle $[a_{ii}, a_{is}]$.

3.3.5 Etape 3 : Propagation de l'incertitude

Lorsque le modèle est établi et que les incertitudes-types des grandeurs d'entrée du modèle sont évaluées, il est alors appliqué la loi de propagation de l'incertitude pour calculer l'incertitude-type composée associée au résultat de mesurage.

La loi de propagation de l'incertitude permet de calculer l'incertitude-type composée de y , $u_c(y)$ ou sa variance $u_c^2(y)$:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \times u^2(x_i) + 2 \times \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \times \frac{\partial f}{\partial x_j} \times u(x_i, x_j) \quad (10)$$

Avec :

— $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ le coefficient de sensibilité à la variable x_i

— $u^2(x_i)$ la variance de x_i

— $u(x_i, x_j)$ la covariance entre les variables x_i et x_j

La loi de propagation de l'incertitude qui dans sa généralité peut paraître un peu complexe, se simplifie dans bien des cas.

NOTE 1 Les dérivées partielles représentent les "coefficients de sensibilité du résultat" aux différentes grandeurs d'entrée. Par exemple, si dans le modèle mathématique intervient la température comme grandeur d'influence, alors la dérivée partielle correspondante représente le coefficient de sensibilité à une variation de la température de l'instrument de mesure.

NOTE 2 Dans le cas de grandeurs non corrélées, les covariances sont égales à zéro et l'équation (10) peut être simplifiée de la façon suivante :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \times u^2(x_i) \quad (11)$$

NOTE 3 Formule de propagation de l'incertitude relative

Dans le cas d'un modèle mathématique de la forme $Y = C \times X_1^{p_1} \times X_2^{p_2} \times \dots \times X_N^{p_N}$ où les exposants p_i sont des nombres connus, positifs ou négatifs, d'incertitudes négligeables, l'application de la loi de propagation de l'incertitude (10) conduit à :

$$u_c^2(y) = \left[\frac{\partial y}{\partial c} \right]^2 \times u^2(c) + \left[\frac{\partial y}{\partial x_1^{p_1}} \right]^2 \times u^2(x_1^{p_1}) + \left[\frac{\partial y}{\partial x_2^{p_2}} \right]^2 \times u^2(x_2^{p_2}) + \dots + \left[\frac{\partial y}{\partial x_N^{p_N}} \right]^2 \times u^2(x_N^{p_N}) \quad (12)$$

Soit, après calcul des dérivées,

$$u_c^2(y) = 0 + \left[c \times p_1 \times x_1^{p_1-1} \times x_2^{p_2} \times \dots \times x_N^{p_N} \right]^2 \times u^2(x_1^{p_1}) + \left[c \times x_1^{p_1} \times p_2 \times x_2^{p_2-1} \times \dots \times x_N^{p_N} \right]^2 \times u^2(x_2^{p_2}) \\ + \dots + \left[c \times x_1^{p_1} \times x_2^{p_2} \times \dots \times p_N \times x_N^{p_N-1} \right]^2 \times u^2(x_N^{p_N}) \quad (13)$$

L'équation (13) est ensuite divisée par y^2 , ce qui conduit à l'équation (14) :

$$\left[\frac{u_c(y)}{y} \right]^2 = \left[\frac{c \times p_1 \times x_1^{p_1-1} \times x_2^{p_2} \times \dots \times x_N^{p_N}}{c \times x_1^{p_1} \times x_2^{p_2} \times \dots \times x_N^{p_N}} \right]^2 \times u^2(x_1^{p_1}) + \left[\frac{c \times x_1^{p_1} \times p_2 \times x_2^{p_2-1} \times \dots \times x_N^{p_N}}{c \times x_1^{p_1} \times x_2^{p_2} \times \dots \times x_N^{p_N}} \right]^2 \times u^2(x_2^{p_2}) \\ + \dots + \left[\frac{c \times x_1^{p_1} \times x_2^{p_2} \times \dots \times p_N \times x_N^{p_N-1}}{c \times x_1^{p_1} \times x_2^{p_2} \times \dots \times x_N^{p_N}} \right]^2 \times u^2(x_N^{p_N}) \quad (14)$$

Après simplification, l'équation (14) prend la forme suivante :

$$\left[\frac{u_c(y)}{y} \right]^2 = \sum_{i=1}^N \left[p_i \times \frac{u(x_i)}{x_i} \right]^2 \quad (15)$$

On constate que les dérivées partielles n'interviennent plus dans la formule de propagation de l'incertitude relative, ce qui simplifie les calculs et implique son utilisation quand le modèle est multiplicatif.

Dans le cas particulier des mesurages effectués par tubes à diffusion (Partie 3 du présent guide), le modèle mathématique a la forme suivante :

$$Y = C \times X_1 \times X_2 \times \dots \times X_N \quad (16)$$

Comme $p_1 = p_2 = \dots = p_N = 1$, l'équation (15) se simplifie de la façon suivante :

$$\left[\frac{u_c(y)}{y} \right]^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{u(x_i)}{x_i} \right]^2 \quad (17)$$

3.3.6 Etape 4 : Expression du résultat final et de son incertitude

En général, l'incertitude est exprimée sous forme d'une incertitude élargie U , telle que :

$$U = k \times u_c(y) \quad (18)$$

où k est le facteur d'élargissement et $u_c(y)$ est l'incertitude-type composée.

La valeur du facteur d'élargissement k est choisie sur la base du niveau de confiance requis pour l'intervalle $[y - U; y + U]$, en général $k = 2$ ou 3 .

Les valeurs numériques de l'estimation Y et de son incertitude-type composée $u_c(y)$ ou de U ne doivent pas être données avec un nombre excessif de chiffres. Il suffit habituellement de fournir l'incertitude-type composée ou l'incertitude élargie avec 2 chiffres significatifs différents de zéro.

Pour la valeur numérique du résultat, le dernier chiffre à retenir est celui qui à la même position que le deuxième chiffre significatif dans l'expression de l'incertitude, soit par exemple :

$$C_{CO} = 45,2 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 5,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$C_{CO} = 45,20 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 0,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Pour arrondir les résultats, les règles de Gauss sont souvent utilisées. Elles sont définies comme suit :

- Lorsque le chiffre qui suit immédiatement le dernier chiffre à retenir est inférieur à 5, le dernier chiffre à retenir reste sans changement,
Ex : $1,024 \rightarrow$ arrondi à $1,02$
- Lorsque le chiffre qui suit immédiatement le dernier chiffre à retenir est supérieur à 5, le dernier chiffre à retenir est majoré d'une unité,
Ex : $1,027 \rightarrow$ arrondi à $1,03$
- Lorsque le chiffre qui suit immédiatement le dernier chiffre à retenir est égal à 5 et est suivi d'au moins un chiffre différent de zéro, le dernier chiffre à retenir est majoré d'une unité,
Ex : $1,0251 \rightarrow$ arrondi à $1,03$
- Lorsque le chiffre qui suit immédiatement le dernier chiffre à retenir est égal à 5 et n'est suivi d'aucun autre chiffre ou est seulement suivi de zéros, le dernier chiffre à retenir est conservé s'il est pair, augmenté s'il est impair.
Ex : $1,0250 \rightarrow$ arrondi à $1,02$
Ex : $1,0350 \rightarrow$ arrondi à $1,04$

Dans le cadre de la détermination des incertitudes élargies, les règles d'arrondissement de Gauss ont été simplifiées de la façon suivante : quel que soit le dernier chiffre, on arrondit toujours l'avant-dernier chiffre au chiffre supérieur.

- Ex : $1,02 \rightarrow$ arrondi à $1,1$
 $1,09 \rightarrow$ arrondi à $1,1$

Annexe A

Valeurs limites et objectif de qualité des données dans le domaine de la qualité de l'air pour l'Union européenne

Les incertitudes de mesure maximales à ne pas dépasser au niveau des valeurs limites sont imposées dans les Directives européennes. Elles sont exprimées en valeurs relatives, en pourcentage de la valeur limite considérée et sont récapitulées dans le tableau qui suit.

Les Directives européennes désignant ces valeurs comme des « incertitudes ou exactitudes pour un intervalle de fiabilité de 95% », il est admis que ces seuils sont à considérer comme des incertitudes élargies avec un coefficient d'élargissement égal à 2.

Polluant	Période de moyennage	Valeur limite ⁽¹⁾ ($\mu\text{g.m}^{-3}$) (mg.m^{-3} pour CO)	Objectif de Qualité des Données (dans la région de la valeur limite considérée)
SO ₂ ⁽²⁾	1 h (à partir de la donnée ¼ horaire)	350	± 15%
	24 h (à partir de la moyenne horaire)	125	
	Année civile & hiver (à partir de la moyenne horaire)	20	
NO ₂ ⁽²⁾	1 h (à partir de la donnée ¼ horaire)	200	± 15%
	Année civile (à partir de la moyenne horaire)	40	
NO ₂	Année civile	40	± 25% ⁽⁴⁾
NO _x	Année civile (à partir de la moyenne horaire)	30 ⁽³⁾	± 15%
CO	8 h glissant (à partir de la moyenne horaire)	10	± 15%
O ₃	1 h (seuil d'information, à partir de la donnée ¼ horaire)	180	± 15% ⁽⁵⁾
	1 h (seuil d'alerte, à partir de la donnée ¼ horaire, pendant 3h consécutives)	240	
	8 h glissant (Protection de la santé, à partir de la moyenne horaire)	120	
C ₆ H ₆	Année civile	5	± 30% ⁽⁴⁾

(1) : Le volume est ramené à une température de 293 K et à une pression de 101,3 kPa

(2) : Pour SO₂ et NO₂, il est à noter l'existence d'un seuil d'alerte à ne pas excéder sur 3 heures consécutives, respectivement de 500 $\mu\text{g.m}^{-3}$ et 400 $\mu\text{g.m}^{-3}$

(3) : Expression en équivalent de NO₂

(4) : Dans le cas des mesurages manuels par la méthode indicative des tubes à diffusion

(5) : Dans le cas de mesurages conjoints en O₃ et NO/NO₂, un objectif de qualité des données de ± 15% pour les mesurages fixes en continu en NO et NO₂ est requis

Annexe B

Lecture d'un certificat d'étalonnage

B.1 Etalonnage

L'étalonnage est l'ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs de la grandeur indiquées par un appareil de mesure (ou un système de mesure, ou les valeurs représentées par un mesurage matérialisé ou par un matériau de référence), et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisées par des étalons (VIM 6.11).

Le résultat d'un étalonnage peut être consigné dans un document appelé certificat d'étalonnage ou rapport d'étalonnage (VIM 6.11 note 3).

B.2 Contenu du certificat

Le certificat contient les renseignements suivants :

- Renseignements administratifs
 - Identification du laboratoire
 - Titre du document
 - Numéro d'identification du document
 - Date de l'étalonnage
 - Identification de l'instrument
 - Nombre de pages du document
 - Nom(s), titre(s) et signature(s) du ou des responsable(s) technique du laboratoire
- Informations techniques
 - Méthode d'étalonnage
 - Étalon(s) utilisé(s)
 - Conditions d'étalonnage
 - Déroulement des opérations
 - Résultats et incertitudes
- Annexes
 - Graphiques, formules de lissage, historique des résultats d'étalonnage antérieurs

B.3 Exploitation du certificat

A partir d'un mesurage individuel x ou d'une moyenne de n mesurages, réalisés dans des conditions de répétabilité, l'utilisateur pourra calculer une valeur corrigée du résultat de mesurage :

$$y = \bar{x} + C \quad \text{ou} \quad y = a \times \bar{x}$$

Alors, l'incertitude de mesure s'exprime par :

$$u^2(y) = u^2(\bar{x}) + u^2(C) \quad \text{ou} \quad \frac{u^2(y)}{y^2} = \frac{u^2(\bar{x})}{\bar{x}^2} + \frac{u^2(a)}{a^2}$$

La composante $u^2(C)$ ou $\frac{u^2(a)}{a^2}$ est fournie par le laboratoire d'étalonnage.

L'utilisateur doit évaluer la composante $u^2(\bar{x})$ en tenant compte de :

- la stabilité du processus de mesurage et la répétabilité de l'appareil,
- du nombre de points de mesure,
- des conditions d'installation de l'appareil,
- de l'incertitude de l'appareil associé s'il est différent de celui utilisé pour l'étalonnage,
- de la dérive entre deux étalonnages,
- etc...

Annexe C

Mode d'évaluation de l'incertitude-type et choix de la loi de distribution

Composante	Distribution à priori	Écart-type
Incertitude d'étalonnage - avant le 1.1.1992 : $U = 3 \cdot u_c$ - après le 1.1.1992 : $U = 2 \cdot u_c$	Convention	$\frac{U}{3}$
	Convention	$\frac{U}{2}$
Résolution d'un indicateur numérique : b	Uniforme	$\frac{b}{2\sqrt{3}}$
Hystérésis : différence maximum entre indications obtenues par valeurs croissantes et décroissantes : b	Uniforme	$\frac{b}{2\sqrt{3}}$
Dérive (3 cas possibles) : - tendance pouvant être modélisée - pas de tendance précise - dérive entre 2 étalonnages égale à a	Application d'une correction	Incertain sur la correction
	Reproductibilité	Méthode type A
	Uniforme	$\frac{a}{\sqrt{3}}$
Grandeurs d'influence variant entre 2 extremums $\pm a$ de façon sensiblement sinusoïdale (ex. : régulation de température d'un local)	Dérivée d'arc sinus	$\frac{a}{\sqrt{2}}$
Instrument conforme à une classe définie par $\pm a$	Uniforme	$\frac{a}{\sqrt{3}}$