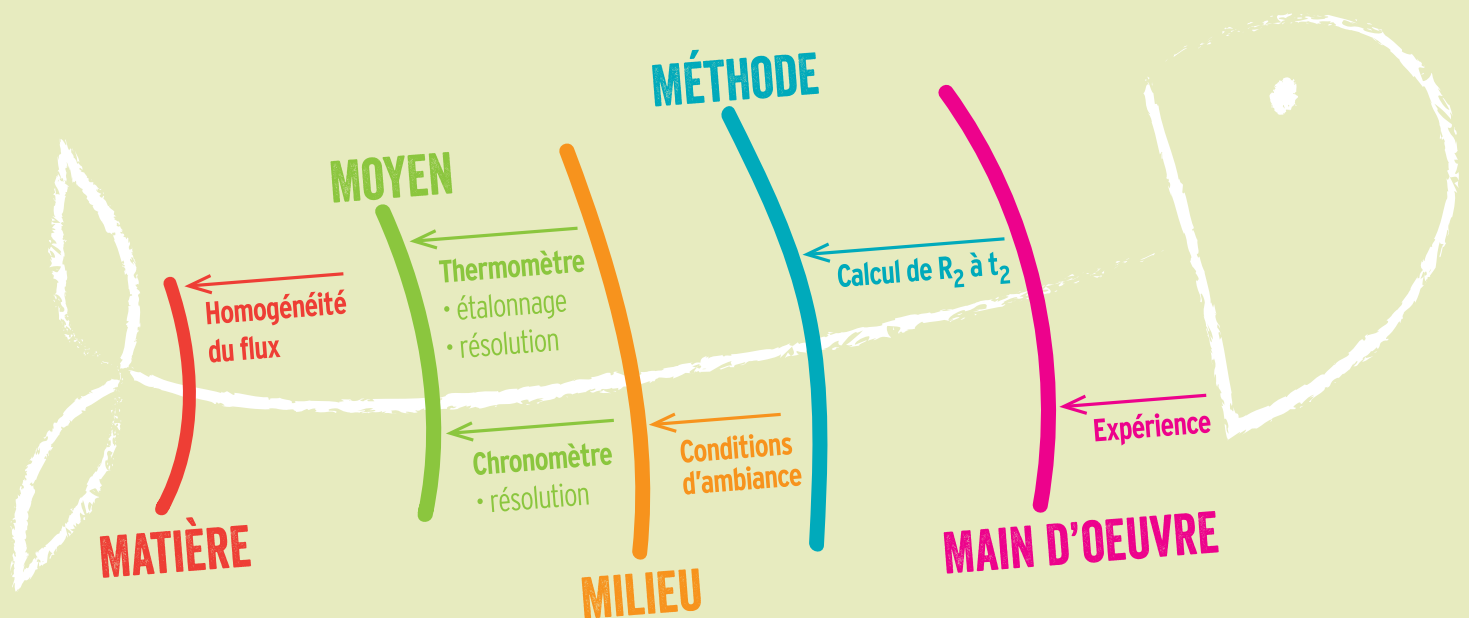


PROCESSUS DE MESURE : ÉVALUER LES INCERTITUDES 20 exemples

LES GUIDES TECHNIQUES
DU COLLÈGE FRANÇAIS DE MÉTROLOGIE

PROCESSUS DE MESURE :
ÉVALUER LES INCERTITUDES
20 exemples



PROCESSUS DE MESURE : ÉVALUER LES INCERTITUDES 20 exemples

© CFM et AFNOR Éditions 2018

Couverture : création AFNOR Éditions – Exécution : Atelier du Livre (Caroline Joubert)

Crédit photo © 2018 Adobe Stock

ISBN 978-2-12-465685-1



Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1^{er} juillet 1992, art. L 122-4 et L 122-5, et Code pénal, art. 425).

Collège Français de Métrologie
1, rue Gaston Boissier
75724 Paris Cedex 15
Tél. : + 33 (0) 4 67 06 20 36
www.cfmetrologie.com/fr/bibliotheque

AFNOR
11, rue Francis de Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél. : + 33 (0) 1 41 62 80 00
www.afnor.org/editions



Le Collège Français de Métrologie (CFM) est une association à vocation industrielle qui rassemble tous les acteurs du monde de la mesure : utilisateurs de moyens de mesure dans l'industrie et les laboratoires, responsables de laboratoires et de centres techniques, fabricants et prestataires, universitaires et autres.

Fondé avec le soutien du ministère chargé de l'Industrie, du Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), du Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT) et de Peugeot Citroën Automobiles (PSA), le CFM rassemble aujourd'hui près de 500 adhérents.

Apporteur d'informations et de contenu technique, notre mission est de vous permettre d'améliorer et d'optimiser vos processus de mesure. Les professionnels de tous niveaux et de tous les secteurs d'activités sont concernés.

Le but est de vous faire gagner du temps et de vous permettre de répondre au plus vite à vos interrogations.

Grâce à sa bibliothèque technique et notamment à ses Guides, le CFM est devenu la référence de la documentation dans le monde de la mesure.

Le rapprochement avec AFNOR Éditions, qui est lui aussi est un autre référent mais de la Norme, permettra aux deux entités de se compléter l'un et l'autre tout en gardant leurs niveaux d'exigence et tout en continuant d'améliorer les connaissances.

Véritable pôle d'échange qui facilite les rencontres et le partage d'expériences, intégrez vous aussi notre réseau en devenant l'un de nos membres privilégiés !

Visitez notre site Internet et analysez toute notre offre sur www.cfm metrologie.com.

Prenez la mesure de votre avenir !
Le CFM

Vous ne connaissiez pas encore AFNOR en tant qu'éditeur ? Pourtant, depuis plusieurs années nous nous affirmons en tant qu'acteur de premier plan dans le paysage de la littérature professionnelle !

Face aux grandes tendances qui impactent votre environnement économique, nous vous offrons les meilleures solutions.

Dans un monde où les risques externes sont nombreux, AFNOR Éditions apporte de véritables solutions et méthodes pour aider les dirigeants dans leurs prises de décision.

Quels que soient votre secteur d'activité et votre fonction dans l'entreprise, nous vous proposons un ouvrage capable de satisfaire vos attentes. Pour répondre à vos problématiques, nous avons spécialement développé des collections pratiques. Celle coéditée avec le CFM est la dernière-née !

Cette collection vous assure les compétences des meilleurs experts et traite de l'ensemble des besoins auxquels vous êtes confrontés au quotidien.

Cette volonté d'accompagner votre développement et d'assurer votre pérennité est la marque de fabrique d'AFNOR Éditions. C'est notre mission.

Pour l'accomplir et la mener à bien, nous sélectionnons des auteurs experts et reconnus, ayant une véritable expérience de terrain.

Capables de transmettre simplement les outils, les méthodologies et les connaissances nécessaires, ils vous permettront d'aller de l'avant et d'améliorer vos performances.

Consultez sans tarder l'ensemble de notre catalogue de plus de 570 titres sur www.boutique.afnor.org/livres.

Accédez au savoir en illimité !
AFNOR Éditions

AVANT PROPOS

Le ministère chargé de l'Industrie, dans le cadre de sa procédure « Partenaires pour l'Europe » a soutenu la publication du recueil « 27 exemples d'Évaluation d'Incertitude d'Étalonnage ». Ce recueil diffusé actuellement par le Collège Français de Métrologie connaît un vif succès, mais les exemples traités ainsi ne concernent que des méthodes d'étalonnage. Le Collège Français de Métrologie a été encouragé à poursuivre cette action en développant un nouveau guide consacré à des exemples d'évaluation d'incertitude de résultats de mesure ou d'essais.

En effet, de nombreuses décisions se fondent sur des résultats de mesure ou d'essai (conformité à une réglementation, comparaison de méthodes de mesure...) et la qualité des décisions repose en grande partie sur celle des résultats de mesure. Il est donc indispensable de fournir à tout utilisateur d'un résultat de mesure une information sur sa qualité, sa fiabilité et c'est le rôle de l'incertitude.

Depuis la publication du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) en 1995 qui fonde les principes de l'évaluation des incertitudes, de nombreux travaux ont été menés pour développer des méthodes « alternatives », plus faciles à mettre en œuvre, notamment lorsque la modélisation du processus de mesure ou d'analyse est impossible pour des raisons techniques ou économiques. Ces méthodes utilisent toutes les données expérimentales : répétabilité, reproductibilité, cartes de contrôle, essais interlaboratoires...

Les exemples présentés dans ce Guide sont à la fois divers par les domaines de mesure et d'essai mais également par les méthodes d'évaluation des incertitudes utilisées. Ils se fondent sur la méthode de modélisation (GUM) mais également sur l'application de méthodes additionnelles ou alternatives.

Le Collège Français de Métrologie espère que ce nouveau Guide permettra de faire progresser l'ensemble de la communauté des métrologues et du monde des essais.

Marc PRIEL
Directeur honoraire de la métrologie
Laboratoire national de métrologie et d'essais

Avertissement

Les exemples présentés dans ce guide sont le fruit de l'expérience des différents auteurs, parfois, par souci de pédagogie, ils ont été simplifiés et il appartient aux utilisateurs de ce document de les adapter à leur cas particulier. Le CFM décline toute responsabilité sur l'application des méthodes présentées dans ce Guide.

Remerciements

Le Collège Français de Métrologie, remercie très sincèrement l'association EURACHEM pour l'avoir autorisé à utiliser des exemples extraits du guide « Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement », 3rd Edition (2012), traduit en français par le Laboratoire national de métrologie et d'essais et disponible en auto-chargement sur site du LNE : Guide EURACHEM / CITAC : Quantifier l'incertitude des mesures analytiques, 3^e édition.

Nos remerciements s'adressent également au COFRAC pour son autorisation d'utilisation de données extraites du document SH GTA 14 Guide technique d'accréditation pour l'évaluation des incertitudes de mesure en biologie médicale.

Enfin que tous les auteurs d'exemples soient ici remerciés pour leur contribution à ce Guide.

Ont participé à la rédaction de ce guide

Pilotes du groupe de travail

Marine ESCUILLIE - CFM

Marc PRIEL - LNE/CFM

Auteurs

David BENHAMOU - CT2M

Isabelle BLANC - LNE

Jean-Marc BORDY - CEA/LNHB

Benoit BOUDIER - LDAR 02

Michèle DESENFANT - LNE

Jimmy DUBARD - LNE

Jean-Rémy FILTZ - LNE

Jean GAUDEMER - LNE

Eric GEORGIN - CETIAT

Boris GEYNET - CT2M

François HENNEBELLE - Université de Bourgogne

Sylvain LALOUE - LTC Métrologie

Bernard LARQUIER - BEA Métrologie

Maïwenn LE ROY - CEA/LNHB

Patrick LEBLOIS - COMMA CONSULTING

Frédéric LHOMME - STIL

Benoit SAVANIER - CETIAT

Nathalie SUGLIANO - CT2M

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
2. LE CONCEPT D'INCERTITUDE DE MESURE ET SON UTILISATION	1
2.1 Expression d'un résultat de mesure	1
2.2 Utilisation de l'incertitude dans les déclarations de conformité	2
3. TYPOLOGIE DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE DE MESURE	3
4. QUELLES JUSTIFICATIONS À L'UTILISATION DE MÉTHODES ADDITIONNELLES OU ALTERNATIVES	4
5. PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DES INCERTITUDES DE MESURE	5
5.1 Un tronc commun important	5
5.2 L'approche « modèle de mesure » (GUM)	5
5.3 L'approche « modèle statistique »	6
6. EN BREF, QUE FAUT-IL RETENIR ?	8
7. QUELLES PRÉCAUTIONS POUR L'ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE ?	9
8. EXEMPLE EN LIEN AVEC L'INDUSTRIE AGROALIMENTAIRE	11
8.1 Détermination du relargage de cadmium à partir d'un objet en céramique par spectrométrie d'absorption atomique	11
8.2 Détermination des fibres brutes présentes dans les aliments pour animaux	22
9. EXEMPLE ÉNERGIE	30
9.1 Electricité - Mesure d'échauffement par mesure de variation de résistance	30
9.2 Electricité – Mesure du champ électromagnétique émis par un appareil électronique	37
9.3 Efficacité énergétique : mesure du flux lumineux de lampes à LED	45
9.4 Efficacité énergétique : performance des modules photovoltaïques	50
9.5 Rendement d'une chaudière gaz selon la méthode du JCGM101	55
10. EXEMPLE FABRICATION MÉCANIQUE	68
10.1 Evaluation des incertitudes de l'écart individuel de pas d'une roue dentée cylindrique sur MMT	68
10.2 Mesure avec une colonne de mesure	80
10.3 Mesure avec un micromètre d'extérieur	87

11. EXEMPLE MEDICAL - SANTE	96
11.1 Rayonnement ionisant : irradiation de dosimètres par le service de radiothérapie dans le cadre d'un contrôle qualité externe	96
11.2 Rayonnement ionisant : contrôle qualité externe en radiothérapie	104
11.3 Biologie : application au dosage de l'acide urique dans le plasma	112
12. EXEMPLE DE FABRICATION	117
12.1 Mesure de la vitesse de convoyage de produits agroalimentaires soumis à un traitement thermique	117
12.2 Optique/photonique : mesure de l'épaisseur d'un revêtement par hauteur de marche	122
12.3 Thermique : mesure de l'humidité en un point dans un espace ouvert	126
12.4 Pesage : estimation de l'incertitude du taux de principe actif d'un produit industriel préparé par pesée	134
13. EXEMPLE SCIENCE DU VIVANT	146
13.1 Biologie hors-humaine : quantification des Legionella en Q-PCR	146
13.2 Analyse microbiologique : dénombrement des micro-organismes revivifiables à 22°C dans l'eau	149
14. EXEMPLE DE CALCUL D'ESTIMATION DES INCERTITUDES DE MESURE : PRISE EN COMPTE DE LA COVARIANCE DE DEUX PARAMETRES D'UN PROCESSUS	151

1. INTRODUCTION

De nombreuses décisions se fondent sur des résultats de mesure (conformité à une réglementation, comparaison de méthodes de mesure...) et la qualité des décisions repose en grande partie sur celle des résultats de mesure. Il est donc indispensable de fournir à tout utilisateur d'un résultat de mesure une information sur sa qualité, sa fiabilité et c'est le rôle de l'incertitude.

Depuis la publication du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) en 1995 qui fonde les principes de l'évaluation des incertitudes, de nombreux travaux ont été menés pour développer des méthodes « alternatives », plus faciles à mettre en œuvre, notamment lorsque la modélisation du processus de mesure ou d'analyse est impossible pour des raisons techniques ou économiques. Ces méthodes utilisent toutes les données expérimentales : répétabilité, reproductibilité, cartes de contrôle, essais inter laboratoires... et des informations tirées de la littérature : tolérances, classe d'appareil... Les travaux présentés dans ce guide comparent les résultats obtenus par la méthode de modélisation (GUM) avec l'incertitude obtenue avec l'application de méthodes additionnelles ou alternatives.

2. LE CONCEPT D'INCERTITUDE DE MESURE ET SON UTILISATION

2.1 EXPRESSION D'UN RESULTAT DE MESURE

Il est important pour le décideur public ou privé de comprendre le concept de résultat de mesure et d'incertitude associée à ce résultat pour se l'approprier.

Dans la dernière édition du Vocabulaire international de métrologie – concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM) 3^{ème} édition [1], on propose pour le terme résultat de mesure la définition suivante : *ensemble de valeurs attribuées à un mesurande complété par tout autre information pertinente disponible* (VIM 2.9).

En bref, le résultat de mesure est égal à une valeur mesurée avec son incertitude.

La note 1 éclaire la définition : *un résultat de mesure contient généralement des informations pertinentes sur l'ensemble de valeurs, certaines pouvant être plus représentatives du mesurande que d'autres. Cela peut s'exprimer sous la forme d'une fonction de densité de probabilité.*

Il faut donc comprendre que le résultat de mesure n'est pas une valeur unique mais une distribution de valeurs. Dans la pratique, on ne communique pas cette distribution, mais un « résumé » de cette distribution sous forme de deux paramètres : un paramètre de tendance centrale tel que la moyenne, la médiane et un paramètre de dispersion tel que l'écart-type ou l'inter-quantile à 95 % qui représente l'incertitude de mesure. Le terme incertitude de mesure selon la définition du VIM (3^{ème} édition) est un *paramètre qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées* (VIM 2.26), l'incertitude se quantifiera alors sous la forme d'un écart-type, d'un intervalle élargi.

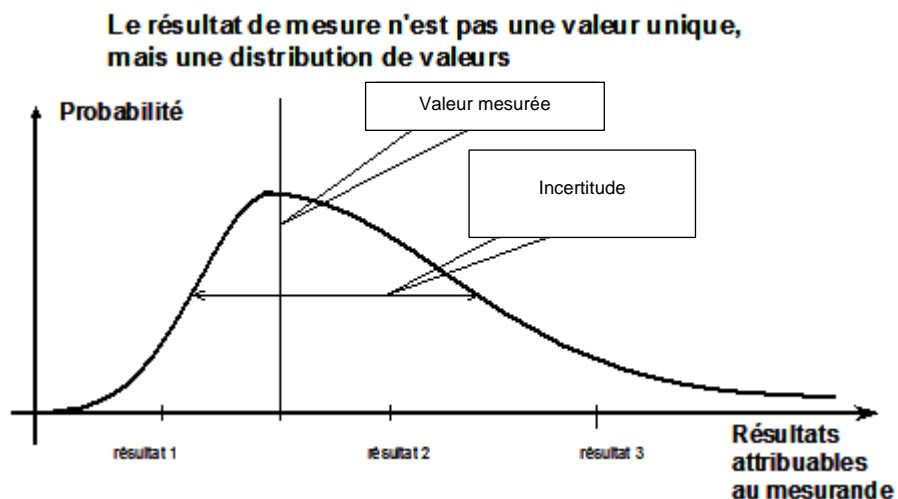


Figure 1 - le concept de résultat de mesure et de l'incertitude

Il faudra donc disposer de méthodes pour estimer cette dispersion des valeurs attribuées au mesurande. L'objectif de ce guide est de présenter ces différentes méthodes.

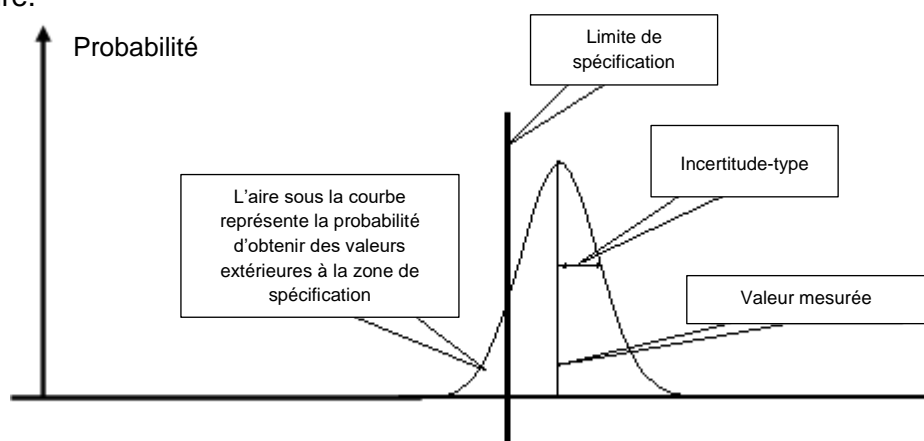
Comment utiliser cette information qui constitue l'incertitude de mesure ?

L'introduction du GUM [2] nous aide à préciser cette question :

[...] Lorsque l'on rend compte du résultat d'un mesurage d'une grandeur physique, il faut obligatoirement donner une indication quantitative sur la qualité du résultat pour que ceux qui l'utiliseront puissent estimer sa fiabilité. En l'absence d'une telle indication, les résultats de mesure ne peuvent plus être comparés soit entre eux, soit par rapport à des valeurs de référence données dans une spécification ou une norme [...].

2.2 UTILISATION DE L'INCERTITUDE DANS LES DECLARATIONS DE CONFORMITE

Comment décider de la conformité notamment lorsqu'un résultat de mesure est proche d'une limite de spécification, la figure 2 illustre cette situation avec une limite de spécification inférieure.



Le Risque = Probabilité d'occurrence de l'événement x coût de l'événement

Figure 2 - risque d'une décision de conformité, lorsque le résultat est proche d'une limite

Il est donc important pour les décideurs d'apprécier le risque associé à leur décision, c'est à dire la probabilité d'annoncer des faux négatifs ou positifs.

Actuellement, au niveau international on trouve le Guide ILAC G8 (2009) « Guidelines on Assessment and reporting of compliance with specification ». Au niveau Français il existe un fascicule de documentation qui traite de ces questions FD X 07-022 (2004) [3] Utilisation des incertitudes de mesure : présentation de quelques cas et pratiques usuelles.

Plus récemment, le JCGM, Joint Committee for Guides in Metrology, a publié un document, « Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment JCGM 106:2012 » qui développe une méthode pour traiter ces questions. Ce document porte également les références NF ISO/CEI Guide 98-4.

Au niveau de l'Afnor, un travail est en cours pour préparer un fascicule de documentation FD X07-039 « Rôle de l'incertitude de mesure dans l'évaluation de la conformité – Mise en œuvre de la norme NF ISO/CEI Guide 98-4 – Illustration au travers d'études de cas industriels ».

Au niveau Européen, la France a animé un groupe de travail du Bureau Technique du CEN qui a fait des propositions pour l'implémentation du concept d'incertitude dans les normes européennes. Les conclusions du groupe qui ont été reprises dans le document du CEN définissant les règles pour l'élaboration des normes européennes sont les suivantes : Toute nouvelle norme ou toute norme de méthode d'essais entrant en révision devra être complétée par un paragraphe traitant des incertitudes de mesure. Pour les déclarations de conformité, tant que les normes ne sont pas révisées on pourra déclarer la conformité jusqu'à la limite de spécification à moins que d'autres dispositions prévoient des règles différentes.

3. TYPOLOGIE DES METHODES D'EVALUATION DE L'INCERTITUDE DE MESURE

Le GUM présente les concepts nécessaires à l'évaluation de l'incertitude (définition précise du mesurande, liste des facteurs d'influence, quantification des incertitudes élémentaires...).

Il détaille aussi une méthode d'évaluation de l'incertitude appelée approche « modélisation » qui est la méthode de référence pour l'estimation des incertitudes. Des méthodes complémentaires de quantification de l'incertitude se sont développées, respectant néanmoins les concepts de base exposés dans le GUM [4], [5].

Une typologie de ces méthodes est présentée en faisant la distinction entre l'approche « modèle de mesure » et l'approche « modèle statistique ».

L'approche « modèle de mesure » est composée de :

- définition du mesurande ;
- analyse des facteurs d'influence (qui sont traduits en correction sous forme de grandeurs d'entrée du modèle) ;
- établissement d'un modèle reliant le mesurande et les grandeurs d'entrée (indications, corrections d'étalonnage, correction des conditions d'environnement...) ;
- utilisation de la loi de propagation des variances (GUM analytique) [2] ou de la propagation des distributions (Simulation de Monte Carlo) ([6] [7]) ;

L'approche « modèle statistique » est composée de :

- définition du mesurande ;
- analyse des facteurs d'influence ;
- établissement d'un modèle global (statistique) reliant le mesurande et des caractéristiques de performance de la méthode (NF ISO 5725 [8] et NF ISO 21748 [9]) et/ou des données d'essais d'aptitude (NF ISO/CEI 17043 [10] et NF ISO 13528 [11]).

La figure 3 ci-dessous résume ces différentes approches :

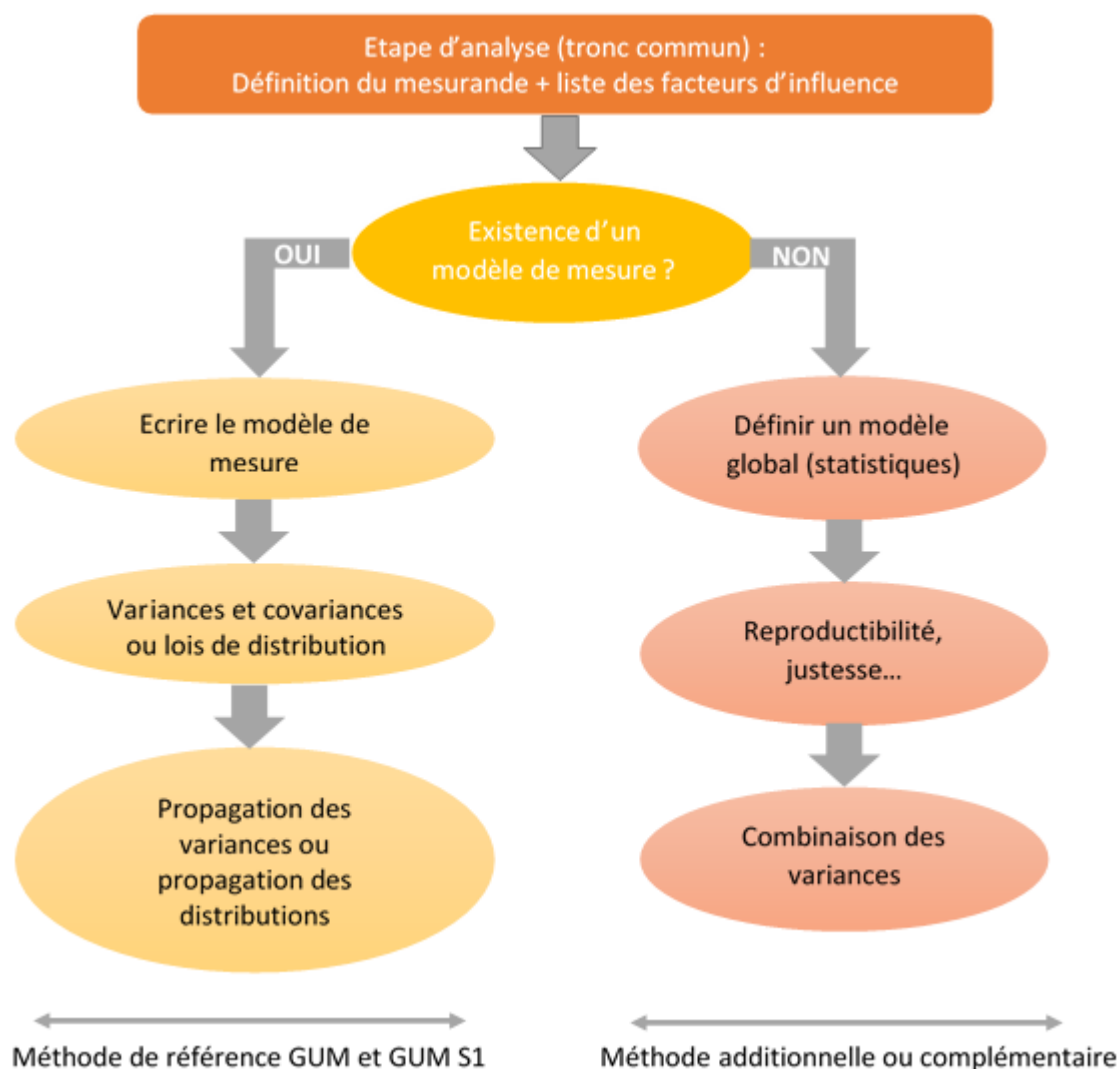


Figure 3 - Typologie des méthodes d'évaluation des incertitudes de mesure

4. QUELLES JUSTIFICATIONS À L'UTILISATION DE MÉTHODES ADDITIONNELLES OU ALTERNATIVES

Pour des raisons économiques ou techniques il est parfois impossible d'établir un modèle de mesure, il faut donc avoir recours à des méthodes additionnelles ou alternatives fondées sur l'expérimentation.

La norme NF EN ISO/CEI 17025 [12] « Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais » ouvre très explicitement des pistes pour le recours à des méthodes alternatives d'évaluation des incertitudes des résultats de mesure et d'essais : [...].7.6.3 *Un laboratoire procédant à des essais doit évaluer l'incertitude de mesure. Lorsque la méthode d'essai ne permet pas une évaluation rigoureuse de l'incertitude de mesure, il faut faire une estimation sur la base d'une connaissance scientifique des principes théoriques ou d'une expérience pratique de la performance de la méthode. [...]*

L'ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) qui est l'organisation qui regroupe les organismes d'accréditation au niveau international a publié un document ILAC G17 : 2002 « Introducing the concept of uncertainty in testing in association with the application of the standard ISO/CEI 17025 » [13] qui fixe de manière assez précise les exigences en matière d'évaluation des incertitudes.

[...] *The basis for the estimation of uncertainty of measurement is to use existing knowledge. Existing experimental data should be used (quality control chart, validation, round robin test, PT, handbooks etc. [...]*

L'examen de ces deux textes montre très clairement que l'on peut s'appuyer sur des données existantes et les données citées sont : des données de validation de méthode, des données issues de contrôles qualité telles que les cartes de contrôle, des résultats de comparaisons inter laboratoires (ISO 5725 et essais d'aptitude). Ces deux textes justifient pleinement le développement de méthodes complémentaires à la méthode de référence décrite dans le GUM.

5. PRESENTATION DETAILLEE DES METHODES D'EVALUATION DES INCERTITUDES DE MESURE

5.1 UN TRONC COMMUN IMPORTANT

Quelle que soit la méthode d'évaluation utilisée il est toujours essentiel :

- De définir clairement et sans ambiguïté le mesurande [14] ou la caractéristique à mesurer ou à analyser. Lorsque des phases d'échantillonnage interviennent dans le processus de mesure, il est alors important de préciser le mesurande et d'inclure cette composante dans l'incertitude. Par exemple, recherche-t-on une information sur l'échantillon qui a été transmis au laboratoire ou bien cherche-t-on à estimer un paramètre représentatif du lot d'où est extrait l'échantillon ? Il est évident que dans les deux cas l'incertitude sera différente.
- De définir une méthode de mesure appropriée qui consiste à mettre en place une succession logique d'opérations mises en œuvre lors de l'exécution d'un mesurage.
- D'analyser avec attention le processus de mesure ou d'essai de façon à identifier les sources importantes d'incertitude.
- D'être conscient que les deux opérations communes : définition précise du mesurande et analyse du processus de mesure, sont les plus délicates de toute méthode d'évaluation d'incertitude et que ces opérations requièrent un travail collaboratif et une grande compétence technique pour mener ces évaluations d'incertitude.

5.2 L'APPROCHE « MODELE DE MESURE » (GUM)

Cette procédure est décrite au chapitre 8 du GUM, elle repose sur l'hypothèse que l'on est en capacité d'établir le modèle mathématique qui traduit le processus de mesure, c'est à dire que l'on peut écrire la relation fonctionnelle f entre le mesurande Y et n grandeurs d'entrée X_1, X_2, \dots, X_N grâce à la fonction de mesure (1) :

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

Où X_1, X_2, \dots, X_N sont les informations utilisées pour calculer le résultat de mesure. Sur chacune des informations utilisées pour calculer ce résultat, il existe un doute ou une incertitude. Le

GUM propose deux familles de méthodes pour évaluer le doute sur chacune des grandeurs d'entrée. Ces méthodes sont désignées sous les noms d'évaluations de type A (lorsque l'on utilise des techniques statistiques) et d'évaluations de type B (lorsque l'on utilise des connaissances *a priori*). Souvent les deux approches sont associées pour calculer l'incertitude associée à une grandeur d'entrée donnée.

Pour calculer l'incertitude sur le résultat, le GUM propose d'utiliser la loi de propagation de l'incertitude (2)

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

Cette équation se fonde sur un développement de Taylor au 1^{er} ordre où :

- $u_c^2(y)$: variance du résultat de mesure
- $\frac{\partial f}{\partial x_i}$: dérivée partielle par rapport à une grandeur d'entrée du modèle
- $u(x_i, x_j)$: covariance entre x_i et x_j

Il est important de considérer que la méthode proposée par le GUM repose aussi sur l'hypothèse que l'on a corrigé tous les effets systématiques que l'on avait identifiés. Ceci se faisant généralement par l'introduction de termes correctifs dans le modèle mathématique. Par exemple une erreur de justesse relevée au cours d'un étalonnage sera corrigée en appliquant une correction de justesse.

Pour exprimer le résultat final toutes corrections apportées, connaissant l'incertitude-type, on la multipliera par un facteur d'élargissement k (généralement égal à 2) pour calculer l'incertitude élargie. L'incertitude s'exprimera avec 2 chiffres significatifs et le résultat final de mesure sera arrondi, selon le principe suivant : le dernier chiffre à retenir est celui qui a la même position que le deuxième chiffre significatif dans l'expression de l'incertitude.

5.3 L'APPROCHE « MODELE STATISTIQUE »

L'approche « modèle statistique » est utilisée lorsque l'on ne sait pas ou que l'on ne peut pas établir un modèle de mesure. L'approche « modèle statistique » consiste à établir un modèle global simplifié du processus de mesure (équation 3) en exprimant le résultat en fonction de la valeur vraie (inconnue) de la correction de justesse des effets des différents facteurs d'influence et d'une erreur résiduelle puis d'appliquer à ce modèle la loi de propagation des variances. Le modèle ci-après s'inspire de celui décrit dans la norme NF ISO 21748 : Lignes directrices relatives à l'utilisation d'estimations de la répétabilité, de la reproductibilité et de la justesse dans l'évaluation de l'incertitude [15].

$$y = m + b + \sum_i c_i z_i + e \quad (3)$$

Où :

- y : résultat de mesure, calculé à partir d'une fonction appropriée, définie après
- m : (inconnu) valeur vraie
- b : correction de justesse, inverse du biais
- $c_i z_i$: effets de facteurs d'influence, avec leurs coefficients de sensibilité
- e : erreur aléatoire dans des conditions de répétabilité

La fonction appropriée pour calculer le résultat de mesure est la suivante :

$$y = \bar{l} + b + \sum_i c_i z_i \quad (4)$$

Où :

\bar{l} : moyenne des lectures

B : correction de justesse, inverse du biais

$c_i z_i$: effets de facteurs d'influence, avec leurs coefficients de sensibilité

Les différents termes de l'équation (3) sont supposés non-corrélés. L'estimation de la variance du résultat de mesure s'obtient en appliquant la loi de propagation des variances :

$$u^2(y) = u^2(b) + \sum_i c_i^2 u^2(z_i) + s_r^2 \quad (5)$$

Où :

$u(b)$: incertitude due à la justesse

$u(z_i)$: incertitude due au facteur d'influence z_i

s_r : estimation de l'écart-type de e (répétabilité)

Parfois, on utilise la reproductibilité qui regroupe les deux derniers termes.

Voir les articles issus des techniques de l'ingénieur suivant :

- Validation externe des méthodes d'analyses [15]
- Caractérisation d'une méthode de mesure : étape clé dans le processus de validation [16]

$$S_R^2 = \sum_i c_i^2 u^2(z_i) + s_r^2 \quad (6)$$

Ce qui donne

$$u^2(y) = u^2(b) + S_R^2 \quad (7)$$

Pour évaluer l'incertitude, il sera nécessaire, d'utiliser toutes les informations disponibles : les principales sources de variabilité peuvent souvent être évaluées par des études interlaboratoires ou intralaboratoire. Pour les études interlaboratoires, la norme NF ISO 5725 : *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et des méthodes de mesure* propose des méthodes permettant d'évaluer des estimateurs de la fidélité (écart-type de répétabilité et écart-type de reproductibilité). Parfois, la justesse de la méthode peut être évaluée à partir d'un écart à une valeur de référence connue.

La norme NF ISO 21748 : *Lignes directrices relatives à l'utilisation d'estimation de la répétabilité, de la reproductibilité et de la justesse dans l'évaluation de l'incertitude de mesure* précise dans son introduction

[...] La présente norme internationale fournit une méthodologie appropriée et économique d'estimation de l'incertitude associée aux résultats de ces méthodes en totale conformité avec les principes correspondant du GUM, tout en tenant compte des données de performance des méthodes obtenues par un essai interlaboratoires [...]

Composante du modèle statistique	Type d'évaluation possible
Reproductibilité, répétabilité	Carte de contrôle interne Essais interlaboratoires
Justesse	Matériaux de Référence Etalonnage Comparaison avec méthode de référence Essais d'aptitude avec valeur assignée métrologiquement traçable

6. EN BREF, QUE FAUT-IL RETENIR ?

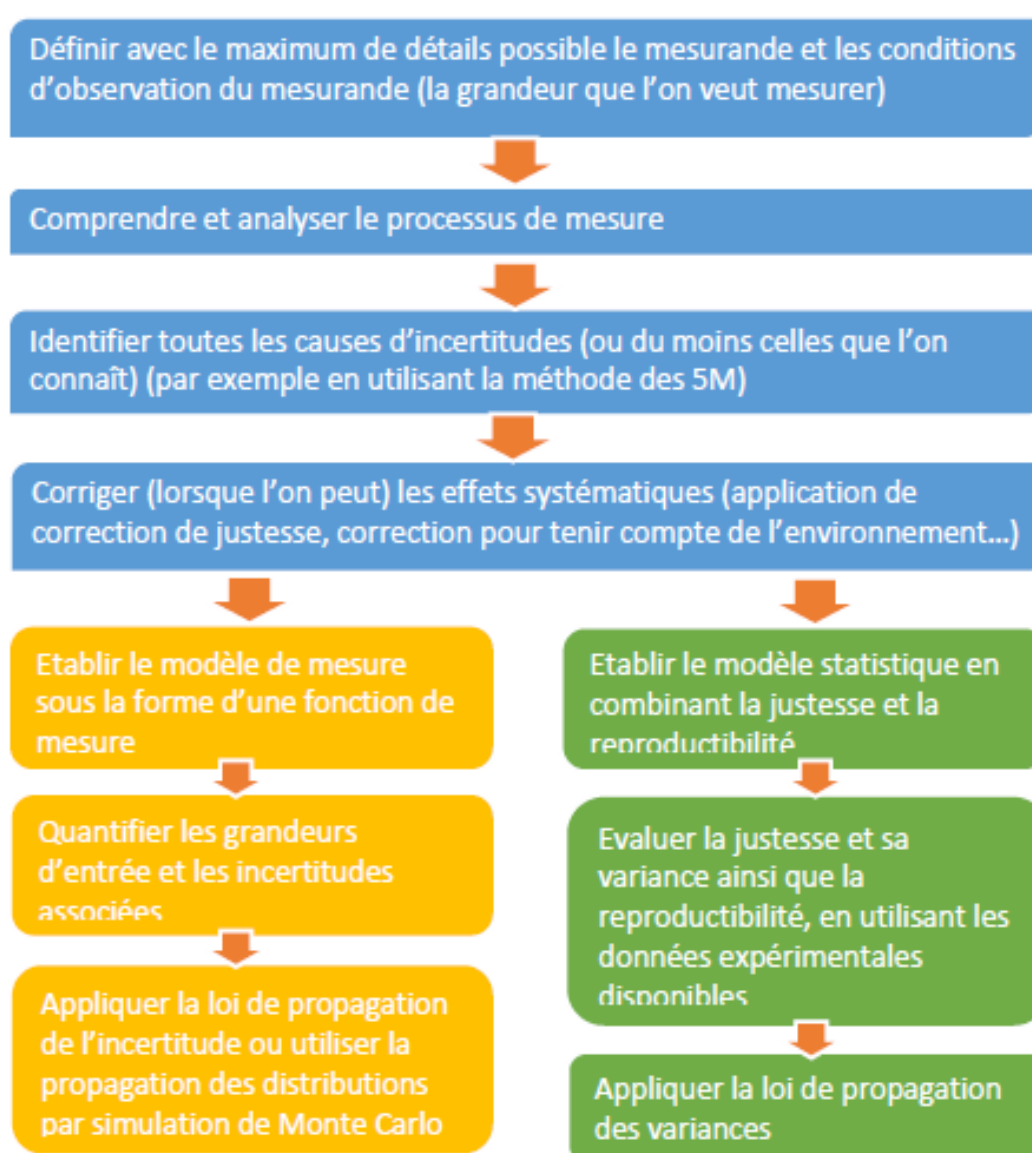


Figure 4 – Ce qu'il faut savoir sur les incertitudes de mesure

7. QUELLES PRÉCAUTIONS POUR L'ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE ?

- Définir avec soin le mesurande et ses conditions d'observation,
- Analyser le processus de mesure et corriger les effets systématiques,
- Exprimer en unités SI les grandeurs d'entrée du modèle de mesure ou de la fonction de mesure. Par exemple, les temps s'exprimeront en seconde et les angles en radian, cela évitera bien des erreurs de calcul,
- Intégrer autant que possible les covariances au modèle. Par exemple, lorsqu'un même appareil, comme une sonde de température, est utilisé plusieurs fois tout au long de la chaîne de traçabilité, l'incertitude évaluée suivant une méthode de type B présente une covariance évidente.
- Pour évaluer la répétabilité ou la reproductibilité, veiller à ce que toutes les sources d'incertitude aient l'occasion de se manifester. Par exemple, si plusieurs opérateurs peuvent intervenir lors de la mise en œuvre du processus de mesure, alors il sera nécessaire de faire des répétitions en faisant intervenir plusieurs opérateurs,
- Si on utilise des résultats provenant de comparaisons interlaboratoires réalisées sur le principe de « l'étalon voyageur », alors il faut veiller à ce que l'instrument, le matériau, l'étalon, l'objet circulant entre les laboratoires soit représentatif de mesurandes couramment mesurés,
- Intercomparaison : attention à la suppression des valeurs aberrantes, qui sont peut-être réalistes et porteuses d'informations importantes sur le processus de mesure,
- A l'issue d'une évaluation d'incertitude, examiner les composantes majeures notamment lorsque l'on souhaite améliorer le processus de mesure,
- Lorsque l'on utilise des feuilles de calcul, ne pas oublier de les valider, de les protéger et en particulier vérifier les arrondis.

REFERENCES

- [1] Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM) 3ème édition, JCGM 200:2012 (téléchargeable sur www.bipm.org)
- [2] Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (1995), International Organization of Standardization, NF ISO/CEI 98-3 ou JCGM 100 :2008 (téléchargeable sur www.bipm.org)
- [3] FD X07-022 (2004) Utilisation des incertitudes de mesures : présentation de quelques cas et pratiques usuelles
- [4] Michèle Désenfant, Marc Priel, (2006) Road map for measurement uncertainty evaluation, Measurement 39 (2006) 841 – 848.
- [5] EUROLAB Technical Report N° 1/2007 Measurement uncertainty revisited : Alternative approaches to uncertainty evaluation
- [6] Supplément 1 du GUM [2] le JCGM 101:2008 (téléchargeable sur www.bipm.org)
- [7] François Hennebelle – Université de Bourgogne / Le2i, Thierry Coorevits – Arts et Métiers ParisTech Lille / MSMP, Propagation des distributions – Détermination des incertitudes par la méthode Monte Carlo, référence R288, Techniques de l'ingénieur (10/09/2013)
- [8] NF ISO 5725 (décembre 1994) Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure
- [9] NF ISO 21748 Lignes directrices relatives à l'utilisation d'estimations de la répétabilité, de la reproductibilité et de la justesse dans l'évaluation de l'incertitude de mesure
- [10] NF ISO/CEI 17043 Evaluation de la conformité – Exigences générales concernant les essais d'aptitude

- [11] NF ISO 13528 (projet février 2014) Méthodes statistiques utilisées dans les essais d'aptitude par comparaison interlaboratoires
- [12] ISO/CEI 17025 Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais
- [13] ILAC G17:2002 Introducing the concept of uncertainty in measurement in testing in association with the application of the standard ISO/CEI 17025 (téléchargeable sur www.ilac.org)
- [14] Michèle Désenfant, Marc Priel (2005), Tout se joue dans la définition du mesurande quelles que soient les méthodes de quantification de l'incertitude, Actes du Congrès International de Métrologie, Lyon 2005.
- [15] Soraya Amarouche - LNE, Validation externe des méthodes d'analyses, référence SL1040, Techniques de l'ingénieur (10/06/2010)
- [16] Max Feinberg – INRA, Gérard Lamarque – CEA / CETAMA, Caractérisation d'une méthode de mesure : étape clé dans le processus de validation, référence P226, Techniques de l'ingénieur (10/12/2004)