



Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech (FSSM)
Département de Chimie
Laboratoire de Chimie Organique Appliquée
Équipe Analyse et Contrôle de Qualité

Cours magistral :

Métrieologie

CHAPITRE I :

Notions de base

Mohammed EL KAHLAOUI
Docteur en Chimie
Novembre 2012

1 Introduction

1.1 La métrologie à quoi ça sert ?

La métrologie au sens étymologique du terme se traduit par « science de la mesure ».

La métrologie s'intéresse traditionnellement à la détermination de caractéristiques (appelées grandeurs) qui peuvent être fondamentales comme par exemple une longueur, une masse, un temps, ou dérivées des grandeurs fondamentales comme par exemple une surface, une vitesse.

Cependant, dans les domaines courants des essais, il existe de nombreuses caractéristiques n'ayant qu'une relation indirecte avec ces grandeurs. C'est le cas, par exemple, de la dureté, de la viscosité, qui peuvent poser des problèmes dans l'interprétation.

Mesurer une grandeur physique consiste à lui attribuer une valeur quantitative en prenant pour référence une grandeur de même nature appelée unité.

Dans le langage courant des «métrologues», on entend souvent dire **mesurer c'est comparer**.

Les résultats des mesures servent à prendre des décisions dans de nombreux domaines, tels que:

- ✓ acceptation d'un produit (mesure de caractéristiques, de performances, conformité à une exigence),
- ✓ réglage d'un instrument de mesure, validation d'un procédé,
- ✓ réglage d'un paramètre dans le cadre d'un contrôle d'un procédé de fabrication
- ✓ validation d'une hypothèse scientifique,
- ✓ protection de l'environnement,
- ✓ définition des conditions de sécurité d'un produit ou d'un système.

L'ensemble de ces décisions concourt à la qualité des produits ou des services: on peut qualifier quantitativement la qualité d'un résultat de mesure grâce à son incertitude.

En effet sans incertitude les résultats de mesure ne peuvent plus être comparés:

- soit entre eux (essais croisés),
- soit par rapport à des valeurs de référence spécifiés dans une norme ou une spécification (conformité d'un produit).

1.2 Métrologie et société, une perspective historique

1.2.1 Naissance de la métrologie

Le commerce extérieur devient une composante structurelle des sociétés antiques. Pour faire fonctionner ce commerce, se développent l'écriture, la comptabilité, l'école, les tribunaux et, bien

entendu, la métrologie qui joue un rôle central désormais dans l'organisation économique et sociale.

La métrologie et son usage, nécessairement collectif, supposent un ensemble d'actes cognitifs, techniques et sociaux complexe. Un pacte métrologique règle, à partir d'un contrat de confiance mutuelle, les conditions de l'échange dans l'espace commun. La mesure y est un outil de médiation pour l'échange d'objets ou de quantités de matière. Elle est aussi médiatrice entre des individus ou des groupes qui s'organisent pour créer une même réalité métrique en se mettant d'accord sur des pratiques, en choisissant des étalons et en organisant des dispositifs de contrôle réciproque.



Poids olive



Poids en pierre non marqués



Petits poids canard

Les plus vieux poids retrouvés en Mésopotamie sont en pierre polie. Les fouilles des différents trésors montrent une caractéristique surprenante: l'anonymat des poids et celle des monnaies. Ce fait démontre de solides relations de confiance entre les hommes et entre les groupes.

Il semble encore nécessaire pour avoir confiance dans les échanges, de se mettre d'accord sur un étalon et la manière de s'en servir et donc de partager une culture métrologique commune au sein d'un espace métrologique commun.

1.2.2 La référence commune: l'étalon

Les anciens étalons sont gardés précieusement dans de hauts lieux symboliques. Les poids mésopotamiens sont retrouvés dans d'anciens temples et palais. À Athènes, une compagnie de quinze officiers prend soin des mesures originales et de l'inspection de l'étalonnage. Chez les Romains, les étalons sont conservés au Capitole, dans le temple de Jupiter. Charlemagne les conserve dans son palais. En Europe chrétienne, ils sont scellés sur les halles de marché et sur les murs extérieurs des églises. Aujourd'hui encore et ce pour un temps seulement, l'étalon de masse, dernier étalon matériel, est gardé précieusement sous trois cloches au Bureau International des Poids et Mesures.

La référence commune, l'étalon, base de toute négociation réciproque et juste, a nécessité de tout temps un arbitrage entre plusieurs groupes de pression, marchands, acheteurs, paysans, classes dirigeantes, seigneurs fieffés, abbayes, pouvoir royal... Régulièrement, les marchands

et la classe dirigeante cherchent, sous des formes diverses et renouvelées, à modifier les étalons pour servir leurs intérêts, ce qui va souvent de pair avec l'ignorance d'une part de la population des choses de la métrologie. En contre partie, à travers le temps, un phénomène tout aussi régulier apparaît, celui d'une tentative d'unification qui s'accompagne naturellement d'actions éducatives. Des tablettes montrent que des écoles transmettent le savoir et les usages métrologiques en Mésopotamie et en Egypte. Charlemagne unifie les mesures et développe le système scolaire. A la Révolution française, la commission du mètre est confiée au Comité d'Instruction publique.

1.2.3 Diversité des mesures

Depuis l'Antiquité, ce ne sont pas sept *unités fondamentales* du Système International, mais des milliers de mesures différentes, réinventées ou reconfigurées siècle après siècle qui vivent et s'éteignent. Tillet et Abeille présentent les Observations de la Société royale d'agriculture sur l'uniformité des Poids et mesures, réalisées par Villeneuve, à l'Assemblée nationale le 6 février

1790. Ils constatent: *C'est un fait notoire que non seulement on se sert en France de quantité de poids différents qui portent tous le nom de livre, mais encore une multitude de boisseaux, d'aunes, de verges, de cannes, de toises, de pintes ; et que ces mesures diffèrent entre elles, quoiqu'on les désigne par le même nom ; que ces différences sont très considérables, non pas d'une province à une autre, ou d'une ville à une autre, mais dans la même ville, dans le même bourg, dans le même village.*

Les révolutionnaires ne sont pas les premiers à percevoir les inconvénients du foisonnement métrologique. En France, les tentatives pour y remédier commencent avant l'an mille. En 744, Childéric III, voulut unifier les mesures. Les capitulaires de Charlemagne en 789, 803 et 806 ordonnent que les mesures soient égales et les poids justes : *Aequales mensuras et rectas, pondera justa.*

Enfin, la métrologie est nommée en 1780 par Paucton dans son ouvrage *Métrologie ou traité des Mesures, Poids et Monnaies des Anciens peuples et des Modernes*. Dans les Cahiers de doléances, les trois ordres demandent en substance et pour des raisons diverses qu'il n'y ait plus en France *qu'un roi, une loi, un poids et une mesure.*

La métrologie est alors confiée aux savants. Ceux-ci sont aussi philosophes, hommes de sciences et acteurs politiques de l'époque. Le premier système cohérent de métrologie, le système métrique décimal est considéré comme un triomphe de l'esprit humain. Il sera le vecteur d'une égalité entre les citoyens, de fraternité entre les peuples et celui de la libération des hommes. Cette transformation de tous les repères subjectifs et sociaux est largement plébiscitée.

La métrologie, dorénavant confiée aux scientifiques et aux ingénieurs, va subir des transformations scientifiques, techniques et organisationnelles de très grande ampleur.

Maintenant, avec le développement technique que nous connaissons, la métrologie du quotidien charpente et coordonne nos actes journaliers. Le bon fonctionnement de nos infrastructures urbaines, la localisation par satellites, les normes alimentaires, les diagnostics médicaux, les règles d'échanges de biens internationaux, notre montre bracelet ou le thermomètre familial, reposent sur une organisation internationale de la métrologie.

1.3 La mesure d'une grandeur physique

On appelle **grandeur physique** toute propriété de la nature qui peut être quantifiée par la mesure ou le calcul, et dont les différentes valeurs possibles s'expriment à l'aide d'un nombre généralement accompagné d'une unité de mesure.

Ainsi par exemple, la masse et la longueur sont des grandeurs qui s'expriment respectivement en kilogramme et en mètre (ou en multiples de ces unités de base), alors que l'indice de réfraction d'un milieu s'exprime à l'aide d'un nombre sans unité et constitue une grandeur sans dimension.

L'addition et la soustraction de nombres n'est possible que s'ils sont relatifs à la même grandeur. En revanche, il est possible de multiplier ou de diviser des grandeurs différentes, auquel cas on obtient une nouvelle grandeur dérivée des deux autres. Par exemple, la vitesse est issue de la division de la longueur par le temps. Il existe donc théoriquement une infinité de grandeurs, mais seul un certain nombre d'entre elles sont utilisées dans la pratique. Le domaine de la physique qui traite des relations entre les grandeurs est l'analyse dimensionnelle.

On écrira le résultat d'une mesure d'une grandeur sous la forme:

$$X = \{X\} \cdot [X]$$

Où X est le nom de la grandeur physique, [X] représente l'unité et {X} est la valeur numérique de la grandeur exprimée dans l'unité choisie.

Toute grandeur physique est invariante, c'est-à-dire quelle ne dépend pas de l'unité dans laquelle on l'exprime. Par exemple: longueur d'une règle = 30,48 cm, 0,3048 m, 12 pouces, $1,646 \cdot 10^{-4}$ mille marin.

On remarque que la valeur numérique dépend de l'unité choisie. En conséquence, celle-ci doit toujours être précisée.

1.4 Un peu de vocabulaire

Dans le vocabulaire officiel – voir l'**annexe A** - des normes de métrologie, cette opération communément appelée mesure est appelée **mesurage** (en anglais *measurement*).

De même, la grandeur physique soumise à l'opération de mesurage est appelée **mesurande** (en anglais *measurand*).

Attention aux faux amis, l'opération d'**étalonnage** (en anglais *calibration*) doit être distinguée de celle appelée **calibrage** (en anglais *gauging*).

Il ne faut pas utiliser le terme précision mais le terme **incertitude** (en anglais *uncertainty*).

2 Système international d'unités

Le **Système International d'unités** (abrégé en **SI**), inspiré du **système métrique**, est le système d'unités le plus largement employé du monde. Il s'agit d'un système d'unités décimal (on passe d'une unité à ses multiples ou sous-multiples à l'aide de puissances de 10).

C'est la Conférence générale des poids et mesures, rassemblant des délégués des états membres de la Convention du Mètre, qui décide de son évolution, tous les quatre ans, à Paris.

L'abréviation de « Système International » est SI, quelle que soit la langue utilisée.

La norme internationale **ISO 1000 (ICS 01 060)** décrit les unités du Système International et les recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités.

2.1 Unités de base

Les définitions des unités de base du système international utilisent des phénomènes physiques reproductibles.

Seul le kilogramme est encore défini par rapport à un objet matériel susceptible de s'altérer.

Actuellement, des recherches ont donc lieu pour remplacer cette définition par une autre, utilisant cette fois un phénomène physique.

À l'issue de ces recherches, le kilogramme pourrait perdre son statut d'unité de base au profit d'une autre unité: c'est en effet seul le nombre d'unités fondamentales qui est imposé, puisqu'elles doivent permettre, par combinaison, de mesurer toute grandeur physique connue sans définition redondante, mais le choix précis des unités fondamentales comme les unités de masse, longueur, temps, courant électrique, température, intensité lumineuse et quantité de matière est purement **arbitraire**.

Certaines unités fondamentales utilisent d'autres unités fondamentales dans leur définition, parfois *via* des unités dérivées (la définition de la seconde utilise par exemple celle du kelvin).

Les unités fondamentales ne sont donc pas strictement indépendantes les unes des autres, mais

Telles sont les grandeurs physiques qu'elles permettent de mesurer qui le sont.

2.2 Unités supplémentaires

A côté de ces unités de base et des unités dérivées, il existe des unités supplémentaires, au nombre de deux:

- l'unité d'angle plan: le **radian** (symbole: rad) ; le radian est l'angle plan compris entre deux rayons qui, sur la circonférence d'un cercle, interceptent un arc de longueur égale à celle du rayon,
- l'unité d'angle solide: le **stéradian** (symbole: sr) ; le stéradian est l'angle solide qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté le rayon de la sphère.

Les grandeurs «angle plan» et «angle solide» doivent être considérées comme des unités sans dimension qui peuvent être utilisées ou non dans les expressions des unités dérivées.

DEFINITIONS DES UNITES DE BASE DU SYSTEME INTERNATIONAL :

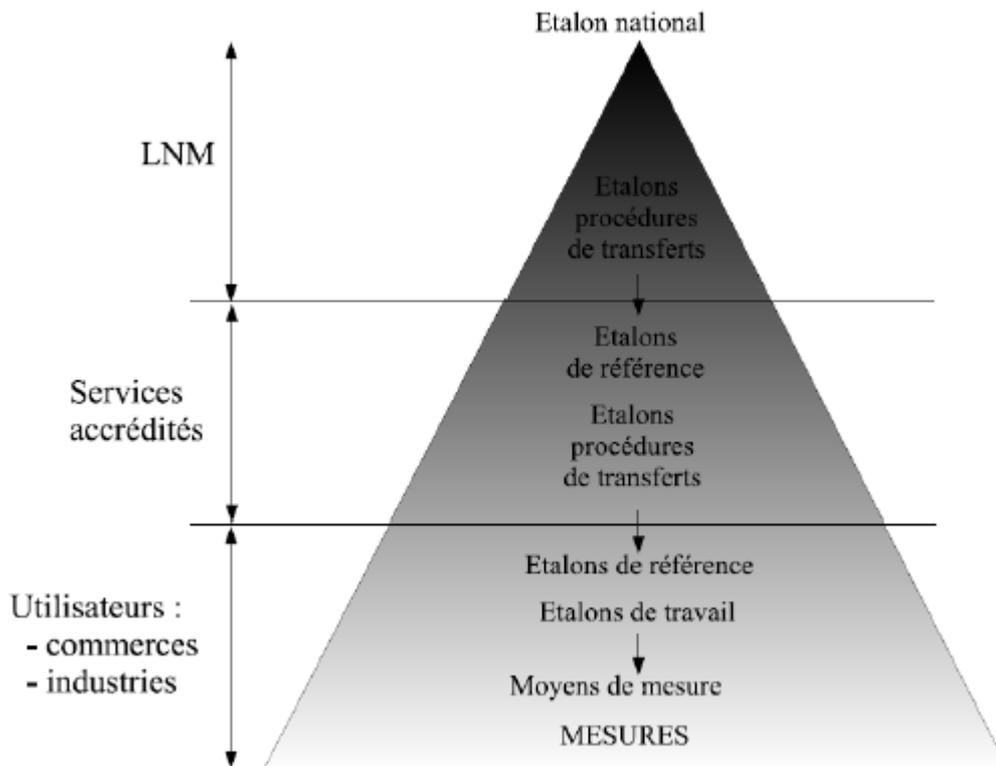
Symbole	Définition
m	Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458^{\text{ème}}$ de seconde (1983, 17 ^{ème} CGPM, résolution 1).
kg	Le kilogramme est égal à la masse du prototype international du kilogramme (1889, 1 ^{ère} CGPM, pp. 34-38 et 1901, 3 ^{ème} CGPM, p. 70).
s	La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 (1967, 13 ^{ème} CGPM, résolution 1).
A	L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur (1948, 9 ^{ème} CGPM, résolution 2).
K	Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273.16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau (1967, 13 ^{ème} CGPM).
mol	1. La mole est la quantité de matière d'un système comportant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0.012 kilogramme de carbone 12. 2. Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupes spécifiés de telles particules (1971, 14 ^{ème} CGPM, résolution 3).
Cd	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.1012 Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de $1/683^{\text{ème}}$ de watt par stéradian (1979, 16 ^{ème} CGPM, résolution 3).

2.4 Traçabilité des mesurages

La traçabilité est la propriété du résultat d'un mesurage 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.

Son organisation est pyramidale (figure ici-bas), c'est-à-dire de la référence nationale (et donc internationale) vers l'utilisateur.

Les LNM (Laboratoire Nationaux de Métrologie) détiennent les références nationales et les diffusent vers l'utilisateur.



3 Systèmes de mesure

La mesure est un acte quotidien et des mesures comme celles de la température, de l'heure ou du poids sont des choses de la vie courante pour lesquelles peu d'attention est portée sur les instruments de mesure utilisés et sur l'exactitude des résultats obtenus. Cependant, pour des équipements plus importants comme on peut en trouver dans les installations industrielles, ces questions deviennent essentielles afin de garantir la qualité de l'ensemble du processus de mesure.

Il est ainsi souvent nécessaire de respecter une norme ou de garantir la fiabilité d'un composant et on doit être assuré de la **qualité des mesures** que l'on effectue. Pour cela il est nécessaire d'apporter une grande attention au matériel utilisé durant la mesure ainsi qu'à la façon dont elle est effectuée.

3.1 Introduction

Un système de mesure est généralement constitué de quatre parties: le capteur qui traduit la valeur physique en un signal généralement de nature électrique, le conditionneur de signaux qui transforme le signal du capteur pour en modifier l'amplitude ou pour le filtrer, la sortie qui permet de lire la valeur mesurée et éventuellement un système de contrôle par feedback dans le cas où le système de mesure est inclus dans un contrôle de processus.

Le capteur utilise un phénomène physique réagissant à la valeur physique à mesurer et assure sa transformation en un signal électrique, optique ou mécanique plus facile à manipuler et à quantifier.

L'ensemble de l'équipement constitue une partie du processus de mesure. En effet, il doit être complété par une procédure de mesure qui définira l'ensemble des grandeurs à mesurer, les moyens techniques pour y parvenir et qui déterminera aussi l'ensemble des traitements à effectuer sur les valeurs mesurées pour parvenir à l'objectif final.

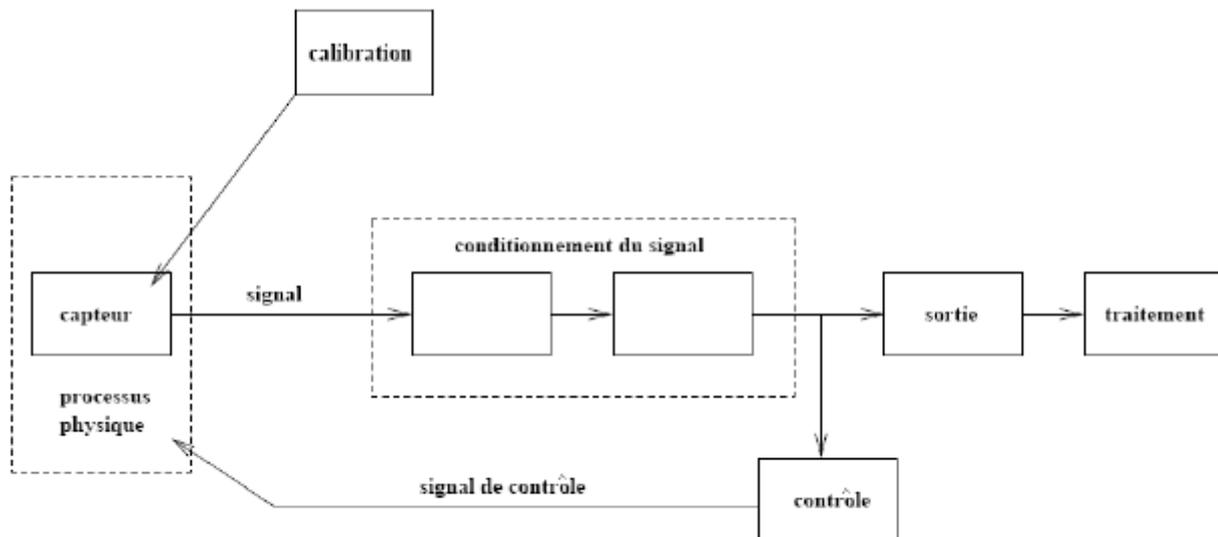
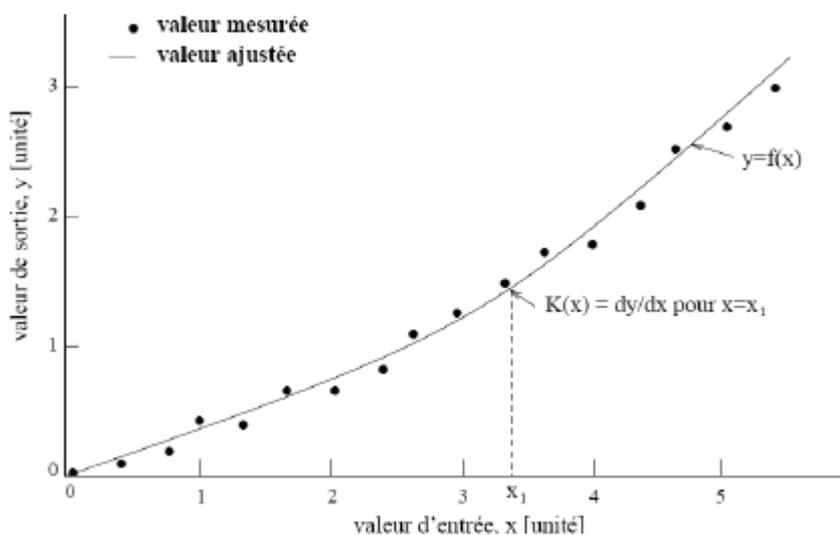


Schéma général d'un système de mesure

3.2 Etalonnage

Pour les capteurs instruments de mesure, l'étalonnage est un réglage ou une caractérisation de la réponse de l'appareil. Pour cela, généralement on utilise des grandeurs de référence ou étalons. L'étalonnage d'un instrument consiste à appliquer une valeur connue en entrée du système de mesure afin de vérifier que la sortie correspond bien à la valeur attendue.



En entrant différentes valeurs connues on peut obtenir en sortie la courbe d'étalonnage $y = f(x)$ de l'instrument qui permet de relier la valeur lue en sortie notée y à la vraie valeur de la grandeur physique à mesurer notée x (voir figure ci-dessus).

C'est particulièrement utile lorsque la réponse de l'instrument est non linéaire.

La méthode générale consiste à utiliser l'appareil de mesure sur un étalon, et à vérifier que la mesure produite correspond bien à la valeur attendue ; si ce n'est pas le cas, on corrige le réglage de l'appareil. Par exemple, on pèse une masse étalon, et on corrige la position de l'aiguille pour que celle-ci indique la valeur correcte. C'est l'étalonnage dit *à un point*.

Cependant, cela ne suffit pas toujours. L'appareil peut présenter :

- Une dérive systématique: il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une quantité fixe ;
- Une dérive de sensibilité: il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une proportion (d'un pourcentage) donné.

Chaque mesure étant entachée d'erreur, y compris la mesure des étalons, on effectue en général plusieurs mesure du même étalon, ou bien on utilise plus d'étalons que nécessaire et l'on détermine la courbe d'étalonnage par régression (méthode des moindres carrés).

L'étalonnage est généralement effectué par le fabricant de l'appareil de mesure. De manière générale, un appareil de mesure transforme un paramètre physique en une donnée analogique (lecture sur un cadran, tracé d'un feutre sur un papier) ou un signal électrique, qui peut ensuite être converti en données numériques.

De plus en plus sur les appareils modernes la correction suite à l'étalonnage n'est pas réglée sur l'instrument mais est fournie dans un fichier numérique. Cette correction est de fait effectuée numériquement par un microcontrôleur ou par l'ordinateur relié à l'instrument.

L'opération d'étalonnage permet aussi de déduire la **justesse** de l'instrument. La justesse est l'aptitude de l'instrument à fournir la vraie valeur de la grandeur physique. En entrant une valeur connue, on peut mesurer l'erreur due à l'instrument et définir la justesse par

$$e_{\%} = 1 - \frac{| \text{vraie valeur} - \text{valeur mesurée} |}{| \text{vraie valeur} |} \cdot 100$$

L'étalonnage peut être simple ou multiple suivant que la valeur de sortie dépend d'une ou de plusieurs grandeurs physiques d'entrée.

3.3 Sensibilité

Connaissant la courbe d'étalonnage, on peut définir la sensibilité de l'instrument au voisinage d'une valeur d'entrée x_1 par la relation :

$$K(x_1) = \frac{\partial y}{\partial x_1}$$

Cette grandeur permet de mesurer l'influence d'un changement de la valeur d'entrée sur la valeur de sortie. Un bon instrument devra avoir une assez grande sensibilité. Lorsque la sensibilité est constante la réponse de l'instrument est linéaire. Ce type d'instrument sera particulièrement recherché en raison de sa facilité d'utilisation.

La sensibilité devra être aussi indépendante que possible de la fréquence de variation de la grandeur mesurée, du temps et d'autres grandeurs d'influence.

3.4 Précision

La précision d'une mesure est l'accord (ou la différence) entre le résultat d'une mesure et la vraie valeur du mesurande (la valeur du mesurande n'est en général pas exactement connue).

3.5 Répétabilité

Une mesure est répétable lorsque l'on vérifie la proximité de l'accord entre les résultats des mesures successives du même mesurande, effectuées dans les mêmes conditions de mesure:

- même procédé de mesure,
- même observateur,
- même instrument de mesure, utilisé dans les mêmes conditions
- même emplacement,
- répétition sur une courte période de temps.

La dispersion des résultats permet de quantifier la répétabilité.

3.6 Reproductibilité

Une mesure est reproductible lorsque l'on vérifie la proximité de l'accord entre les résultats des mesures du même mesurande, effectuées dans des conditions de mesure différentes – à définir au cas par cas.

4 Mesure, erreurs, incertitudes

Tout système de mesure est inéluctablement attaché d'erreurs. Un système de mesure n'est jamais parfait puisqu'il est en général plus ou moins sensible à l'environnement (température, pression, humidité...), il n'est pas fidèle et même les étalons servant à l'étalonnage de l'instrumentation ne sont qu'une matérialisation imparfaite de la définition de l'unité qu'ils sont chargés représenter, la mauvaise définition de la grandeur est elle-même une source d'erreur.

De manière générale, le but de la mesure est d'évaluer une variable physique appelée **variable mesurée** ou **mesurande**. Le but du système de mesure est donc la quantification de la variable mesurée, c'est l'opération de mesurage. Ce que l'on obtient en pratique est la valeur donnée par

l'instrument de mesure. L'exactitude de la mesure se définit à partir de la différence entre la valeur donnée par l'appareil de mesure et la valeur réelle de la grandeur mesurée.

Toute la difficulté consiste donc à avoir une valeur donnée par le processus de mesure qui soit la plus proche possible de la vraie valeur physique qui reste généralement inconnue. Il est cependant essentiel de pouvoir estimer l'**erreur probable** que l'on commet durant le processus de mesure afin de pouvoir garantir que la valeur donnée par l'appareil de mesure ne diffère pas de la vraie valeur d'une quantité supérieure à une grandeur fixée et connue.

4.1 Exemples de causes d'erreur

Très en général, les erreurs peuvent se classer en trois types:

1. Les erreurs d'étalonnage

- Erreur par rapport aux étalons primaires
- Erreur due à la technique d'étalonnage

2. Erreur d'acquisition de données

- Erreur due aux capteurs
- Erreur due à l'appareil de mesure
- Erreur due aux variables non contrôlées

3. Erreur due à l'analyse des données

- Erreurs dus au lissage (i.e. méthode des moindres carrés)
- Erreur de troncature

4.2 Définitions d'erreur et d'incertitude en métrologie

L'**erreur de mesure** est définie comme la **différence** entre la **valeur annoncée** et la **valeur vraie** qui reste inconnue. Cette valeur annoncée sera généralement obtenue par une opération de moyenne de plusieurs mesures.

L'**incertitude de mesure** décrit une région autour de la **valeur lue ou observée** (souvent elle-même une moyenne de plusieurs mesures individuelles) d'une quantité physique, dans laquelle **on estime** que se trouve la vraie valeur.

L'incertitude de mesure sera en général décrite par la notation suivante:

$$\text{Résultat de la mesure} = \text{Valeur annoncée} \pm \text{incertitude [unités]}$$

L'incertitude affichée peut être :

- **Incertitude absolue** U_x , qui a les mêmes unités que la grandeur X
- **Incertitude relative** $U_r = U_x/X$, qui est sans dimensions et souvent donné en %.

L'incertitude comprend, en général, les effets d'erreurs systématiques et aléatoires, et dépend de la précision et résolution de l'instrument.

Les **effets d'erreurs de type aléatoire** sont évalués à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurages et peuvent être caractérisées par des écart-types expérimentaux.

Les **effets d'erreurs de type systématique**, quand ils ne peuvent pas être corrigés, sont évalués en admettant des distributions de probabilité, d'après l'expérience acquise ou d'après d'autres informations.

4.3 Types d'erreurs

Il est toujours possible de décomposer le terme **erreurs** en une erreur systématique et une erreur aléatoire:

L'**erreur systématique** est la moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesurages du même mesurande, effectués dans des conditions de **répétabilité**, moins la valeur vraie du mesurande.

L'**erreur aléatoire** est défini comme le résultat d'un mesurage moins la moyenne d'un nombre infini de mesurages du même mesurande (grandeur physique) effectués dans des conditions de répétabilité (tout reste identique).

Comme on ne peut faire qu'un nombre limité (fini) de mesurages, il est seulement possible de déterminer une **estimation** de l'erreur aléatoire. Cela veut dire que l'erreur aléatoire a elle-même une incertitude associée à sa quantification.

A cela doivent s'ajouter les **erreurs grossières**, qui sont dues à des conditions anormales ou à des fautes techniques, et qui se manifesteront généralement par des valeurs mesurées considérablement différentes de toutes les autres erreurs.

5 Dispersion statistique

Si l'on mesure plusieurs fois le même phénomène avec un appareil suffisamment précis, on obtiendra chaque fois un résultat différent x_i . Ceci est dû à des phénomènes perturbateurs ou, pour les mesures extrêmement précises, à la nature aléatoire du phénomène (chaos, incertitude quantique).

Cette dispersion statistique des **erreurs aléatoires** peut être caractérisée par certaines paramètres, aussi appelées **positions**.

En mesure physique et en métrologie, on va en général au minimum calculer deux valeurs:

- la **moyenne**, qui représentera la **valeur annoncée** de la mesure, appelée aussi **espérance** en statistique;
- l'**écart type** qui (en général multiplié par un facteur approprié) permet d'estimer l'**incertitude de mesure**.

Plus en général, on va vouloir avoir une description plus fine de la **distribution** des valeurs, et donc calculer d'autres positions.

5.1 La moyenne

La **moyenne arithmétique** est la moyenne « ordinaire », c'est-à-dire la somme des valeurs numériques (de la série) divisée par leur nombre.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

5.2 Autres types de moyenne

La **moyenne géométrique** est définie de la manière suivante:

$$\bar{x} = \sqrt[N]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_N}$$

5.3 Variance et écart type

En probabilité, la **variance** d'une série de données est la moyenne des carrés des écarts à la moyenne:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}$$

Elle permet de caractériser la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne. Ainsi, une distribution avec une même espérance et une variance plus grande apparaîtra comme plus étalée.

Le fait que l'on prenne le carré de ces écarts à la moyenne évite que des écarts positifs et négatifs ne s'annulent. La variance σ^2 est toujours positive ou nulle. Ses dimensions sont le carré de celles de la variable mesurée.

Lorsque la variance est nulle, cela signifie que la variable aléatoire correspond à une constante (toutes les mesures sont identiques).

L'**écart type** est la racine carrée de la variance et donc mesure également la dispersion d'une série de valeurs autour de leur moyenne.

On distingue l'**écart type empirique**

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

de l'**écart type empirique corrigé** σ_c d'une série finie de n mesures:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

Pourquoi $(N - 1)$?

Le fait que l'estimateur de la variance doive être divisé par $(N - 1)$ - et donc dans un certain sens moins précis - pour être sans biais provient du fait que l'estimation de la variance implique l'estimation d'un paramètre en plus, la moyenne. Cette correction tient compte donc du fait que

l'estimation de la moyenne induit une incertitude de plus – voir aussi la section suivante. En effet si l'on suppose que la moyenne est parfaitement connue, le premier estimateur est sans biais.

5.4 Intervalle de confiance

En statistiques, et en particulier dans la théorie des sondages, lorsqu'on cherche à estimer la valeur d'un paramètre, on parle d'**intervalle** ou **niveau de confiance** lorsque l'on donne un intervalle qui contient, avec un certain degré de confiance, la valeur à estimer. Le **niveau de confiance** est en principe exprimé sous la forme d'une probabilité.

Ainsi, lorsqu'on effectue un sondage (tirage au hasard d'un sous-ensemble d'une population), l'estimation d'une quantité d'intérêt donnée est soumise au hasard et correspond rarement exactement à la valeur de la quantité que l'on cherche à estimer. En présentant pour l'estimation non pas une valeur mais un encadrement, on quantifie d'une certaine manière l'incertitude sur la valeur estimée.

Plus l'intervalle de confiance est de taille petite, plus l'incertitude sur la valeur estimée est petite. L'un des objectifs de la théorie des sondages consiste à trouver des méthodes permettant de donner des intervalles de confiance de taille raisonnable.

On désigne le niveau de confiance par $(1-\alpha)$. Le nombre α est le **risque** que l'on prend de se tromper en affirmant que toutes les mesures sont bien dans l'intervalle proposé.

Un niveau de confiance de, par exemple, $(1-\alpha) = 95.45\%$ signifie qu'une mesure va se trouver dans le domaine de deux écarts-type de part et d'autre de la valeur moyenne avec une probabilité de 95.45%.

Dans le cadre de la technique de mesure industrielle, on travaille la plupart du temps avec un niveau de confiance de 95% respectivement avec le domaine de confiance $\pm 1.96 \sigma$.

Mais dès que des vies humaines dépendent de la fiabilité des mesures, il est recommandé de travailler au minimum avec un niveau de confiance $(1-\alpha) = 99.73\%$ ce qui correspond à un domaine de confiance de $\pm 3 \sigma$.

5.5 Critères de normalité

La distribution de beaucoup de paramètres industriels correspond souvent à une loi normale. En effet le recours à une distribution gaussienne est si fréquent qu'il peut finir par être abusif. Il faut alors rechercher des **critères de normalité**.

La première méthode, la plus simple, consiste à tracer l'histogramme ou le diagramme en bâtons de la distribution et à vérifier si le diagramme est en forme de « cloche ». Ce critère est subjectif, il permet cependant d'éliminer une partie des distributions jugées alors non gaussiennes.

Cette comparaison est visuelle et même si elle peut être une première approche, elle ne constitue pas un critère de «normalité».

Un premier critère consiste à utiliser les plages de normalité ou intervalles de confiance.

Si une distribution est gaussienne:

1. 68% de la population est dans l'intervalle +/- 1 sigma
2. 95% de la population est dans l'intervalle +/- 2 sigma
3. 99,7% de la population est dans l'intervalle +/- 3 sigma

Lorsque ces pourcentages ne sont pas (plus ou moins bien) respectés, il est fort à parier que la distribution ne soit pas gaussienne.

5.6 Facteur d'élargissement

Si on a un grand nombre de mesures, et on peut considérer qu'on a une distribution gaussienne avec moyenne x et écart type empirique corrigé σ , l'**incertitude** due à la dispersion statistique est alors estimée par $u = k \cdot \sigma$

k est appelé **facteur d'élargissement** et est une constante dépendant du **niveau de confiance**, donc de l'erreur admissible.

En physique, on prend souvent $k = 3$, ce qui correspond à un intervalle de confiance de 99,73 %, ce qui implique que 99,73 % des valeurs x_i sont comprises entre $(x - u)$ et $(x + u)$ et 0,27 % seront hors de cet intervalle: ainsi sur 1 000 mesures, seules trois seront en dehors de l'intervalle.

Dans de nombreux cas en **métrologie industrielle**, on se contente de prendre $k = 2$, soit un niveau de confiance de 95 % (5 mesures hors intervalle pour cent mesures).

6 Bilan et calcul d'incertitude

Le bilan d'incertitude est le processus conduisant à estimer l'**incertitude de mesure**.

Ce processus tient compte de l'analyse complète du processus de mesure: évidemment des grandeurs mesurées, de la prise en compte des facteurs d'influence et des corrections apportées au résultat annoncé.

6.1 Approche GUM

La méthode GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) est une norme ISO décrivant des procédures générale pour le bilan et le calcul d'incertitude.

Cette approche est fondée sur le fait qu'il existe toujours un modèle explicite du processus de mesure. On rappelle que ce modèle est équivalent à une expression mathématique décrivant la façon dont sont utilisés toutes les informations dont disposent l'expérimentateur (série de

lectures de l'instrument, valeur d'une correction lue dans un certificat d'étalonnage, la mesure de l'estimation des effets d'une grandeur d'influence...).

La méthode GUM décrit une procédure générale pour l'estimation de l'incertitude qui devient plus ou moins complexe en fonction de la précision désirée et du nombre et type de variables influençant la mesure.

6.1.1 Expression finale du résultat de mesure

D'une façon générale, un résultat de mesure est constitué de 3 éléments:

- une valeur annoncée correspondant à la **valeur moyenne** du mesurande éventuellement corrigée si une erreur de justesse a été constatée,
- une **incertitude élargie** associée à un **intervalle de confiance**,
- une **unité de mesure** garantissant la traçabilité avec le Système International (S.I.) d'unités.

Le résultat de la mesure s'exprimera avec une incertitude qui sera associée au niveau de confiance demandé (souvent 95%), de la forme :

$y \pm U$ [unités] au niveau de confiance XX%

où y est la valeur (moyenne) annoncée et U est l'incertitude élargie $k \cdot u(y)$.

6.1.2 Arrondi de l'incertitude et du résultat final

L'incertitude élargie est habituellement donnée avec une (au maximum deux) chiffres significatifs. Le dernier chiffre significatif du résultat doit être à la même position décimale que l'incertitude.

L'arrondi des mesurandes et des incertitudes se fait en appliquant les règles usuelles d'arrondi: il n'y a pas de majoration des incertitudes. Il peut cependant être parfois approprié d'arrondir les incertitudes au chiffre supérieur plutôt qu'au chiffre le plus proche.

ANNEXE

Vocabulaire international de métrologie

Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)

JCGM 200:2008

1 Grandeurs et unités

1.1 (1.1) grandeur, f

Propriété d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, que l'on peut exprimer quantitativement sous forme d'un nombre et d'une référence

1.2 (1.1, Note 2) Nature de grandeur, f

Nature, f

Aspect commun à des **grandeurs** mutuellement comparables

1.3 (1.2) Système de grandeurs, m

Ensemble de **grandeurs** associé à un ensemble de relations non contradictoires entre ces grandeurs

1.4 (1.3) grandeur de base, f

Grandeur d'un sous-ensemble choisi par convention dans un **système de grandeurs** donné de façon qu'aucune grandeur du sous-ensemble ne puisse être exprimée en fonction des autres

1.5 (1.4) grandeur dérivée, f

Grandeur définie, dans un système de grandeurs, en fonction des **grandeurs de base** de ce système

1.6 Système international de grandeurs, m

ISQ, m

Système de grandeurs fondé sur les sept **grandeurs de base**: longueur, masse, temps, courant électrique, température thermodynamique, quantité de matière, intensité lumineuse

1.7 (1.5) dimension, f

Dimension d'une grandeur, f

expression de la dépendance d'une **grandeur** par rapport aux **grandeurs de base** d'un **système de grandeurs** sous la forme d'un produit de puissances de facteurs correspondant aux grandeurs de base, en omettant tout facteur numérique.

1.8 (1.6) grandeur sans dimension, f

Grandeur de dimension un, f

Grandeur pour laquelle tous les exposants des facteurs correspondant aux **grandeurs de base** dans sa **dimension** sont nuls

1.9 (1.7) unité de mesure, f

Unité, f

Grandeur scalaire réelle, définie et adoptée par convention, à laquelle on peut comparer toute autre grandeur de même **nature** pour exprimer le rapport des deux grandeurs sous la forme d'un nombre

1.10 (1.13) unité de base, f

Unité de mesure adoptée par convention pour une **grandeur de base**

1.11 (1.14) unité dérivée, f

Unité de mesure d'une **grandeur dérivée**

1.12 (1.10) unité dérivée cohérente, f

Unité dérivée qui, pour un **système de grandeurs** donné et pour un ensemble choisi d'**unités de base**, est un produit de puissances des unités de base sans autre facteur de proportionnalité que le nombre un

1.13 (1.9) système d'unités, m

Ensemble d'**unités de base** et d'**unités dérivées**, de leurs **multiples** et **sous-multiples**, définis conformément à des

règles données, pour un **système de grandeurs** donné

1.14 (1.11) système cohérent d'unités, m

Système d'unités, fondé sur un **système de grandeurs** donné, dans lequel l'**unité de mesure** de chaque **grandeur dérivée** est une **unité dérivée cohérente**

1.15 (1.15) unité hors système, f

Unité de mesure qui n'appartient pas à un **système d'unités** donné

1.16 (1.12) Système international d'unités, m

SI, m

système d'unités, fondé sur le **Système international de grandeurs**, comportant les noms et symboles des unités, une série de préfixes avec leurs noms et symboles, ainsi que des règles pour leur emploi, adopté par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM)

1.17 (1.16) multiple d'une unité, m

Unité de mesure obtenue en multipliant une unité de mesure donnée par un entier supérieur à un

1.18 (1.17) sous-multiple d'une unité, m

Unité de mesure obtenue en divisant une unité de mesure donnée par un entier supérieur à un

1.19 (1.18) valeur d'une grandeur, f

Valeur, f

Ensemble d'un nombre et d'une référence constituant l'expression quantitative d'une **grandeur**

1.20 (1.21) valeur numérique, f

Valeur numérique d'une grandeur, f

Nombre dans l'expression de la **valeur d'une grandeur**, autre qu'un nombre utilisé comme référence

1.21 Algèbre des grandeurs, f

Ensemble de règles et opérations mathématiques appliquées aux **grandeurs** autres que les **grandeurs ordinales**

1.22 Équation aux grandeurs, f

Relation d'égalité entre des **grandeurs** d'un **système de grandeurs** donné, indépendante des **unités de mesure**

1.23 Équation aux unités, f

Relation d'égalité entre des **unités de base**, des **unités dérivées cohérentes** ou d'autres **unités de mesure**

1.24 Facteur de conversion entre unités, m

Rapport de deux **unités de mesure** correspondant à des **grandeurs** de même **nature**

1.25 Équation aux valeurs numériques, f

Relation d'égalité entre des **valeurs numériques**, fondée sur une **équation aux grandeurs** donnée et des **unités de mesure** spécifiées

1.26 Grandeur ordinale, f

Grandeur repérable, f

Grandeur, définie par une **procédure de mesure**, adoptée par convention, qui peut être classée avec d'autres grandeurs de même **nature**, selon l'ordre croissant ou décroissant de leurs expressions quantitatives, mais pour laquelle aucune relation algébrique entre ces grandeurs n'existe

1.27 Échelle de valeurs, f

Échelle de mesure, f

Ensemble ordonné de **valeurs** de **grandeurs** d'une **nature** donnée, utilisé pour classer des grandeurs de cette nature en ordre croissant ou décroissant de leurs expressions quantitatives

1.28 (1.22) échelle ordinale, f

Échelle de repérage, f

Échelle de valeurs pour **grandeurs ordinales**

1.29 Échelle de référence conventionnelle, f

Échelle de valeurs définie par un accord officiel

1.30 Propriété qualitative, f

Attribut, m

Propriété d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, que l'on ne peut pas exprimer quantitativement

2 Mesurages**2.1 (2.1) mesurage, m****Mesure, f**

Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs **valeurs** que l'on peut raisonnablement attribuer à une **grandeur**

2.2 (2.2) métrologie, f

Science des **mesurages** et ses applications

2.3 (2.6) mesurande, m

Grandeur que l'on veut mesurer

2.4 (2.3) principe de mesure, m

Phénomène servant de base à un **mesurage**

2.5 (2.4) méthode de mesure, f

Description générique de l'organisation logique des opérations mises en œuvre dans un **mesurage**

2.6 (2.5) procédure de mesure, f**Procédure opératoire, f**

Description détaillée d'un **mesurage** conformément à un ou plusieurs **principes de mesure** et à une **méthode de mesure** donnée, fondée sur un **modèle de mesure** et incluant tout calcul destiné à obtenir un **résultat de mesure**

2.7 Procédure de mesure de référence, f**Procédure opératoire de référence, f**

procédure de mesure considérée comme fournissant des **résultats de mesure** adaptés à leur usage prévu pour l'évaluation de la **justesse** de **valeurs mesurées** obtenues à partir d'autres procédures de mesure pour des **grandeurs** de la même **nature**, pour un **étalonnage**,

ou pour la caractérisation de **matériaux de référence**

2.8 Procédure de mesure primaire, f**Procédure opératoire primaire, f**

Procédure de mesure de référence utilisée pour obtenir un **résultat de mesure** sans relation avec un **étalon** d'une **grandeur** de même **nature**

2.9 (3.1) résultat de mesure, m**Résultat d'un mesurage, m**

Ensemble de **valeurs** attribuées à un **mesurande** complété par toute autre information pertinente disponible

2.10 Valeur mesurée, f

Valeur d'une grandeur représentant un **résultat de mesure**

2.11 (2.19) valeur vraie, f**Valeur vraie d'une grandeur, f**

Valeur d'une grandeur compatible avec la définition de la **grandeur**

2.12 Valeur conventionnelle, m**Valeur conventionnelle d'une grandeur, m**

Valeur attribuée à une **grandeur** par un accord pour un usage donné

2.13 (3.5) exactitude de mesure, f**Exactitude, f**

Étroitesse de l'accord entre une **valeur mesurée** et une **valeur vraie** d'un **mesurande**

2.14 Justesse de mesure, f**Justesse, f**

Étroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre infini de **valeurs mesurées** répétées et une **valeur de référence**

2.15 Fidélité de mesure, f**Fidélité, f**

Étroitesse de l'accord entre les **indications** ou les **valeurs mesurées** obtenues par des **mesurages** répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées

2.16 (3.10) erreur de mesure, f

Erreur, f

Différence entre la **valeur mesurée** d'une **grandeur** et une **valeur de référence**

2.17 (3.14) erreur systématique, f

Composante de l'**erreur de mesure** qui, dans des **mesurages** répétés, demeure constante ou varie de façon prévisible

2.18 Biais de mesure, m

Biais, m

Erreur de justesse, f

Estimation d'une **erreur systématique**

2.19 (3.13) erreur aléatoire, f

Composante de l'**erreur de mesure** qui, dans des **mesurages** répétés, varie de façon imprévisible

2.20 (3.6, Notes 1 et 2) condition de répétabilité, f

condition de **mesurage**, dans un ensemble de conditions qui comprennent la même **procédure de mesure**, les mêmes opérateurs, le même **système de mesure**, les mêmes conditions de fonctionnement et le même lieu, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires pendant une courte période de temps

2.21 (3.6) répétabilité de mesure, f

répétabilité, f

Fidélité de mesure selon un ensemble de **conditions de répétabilité**

2.22 Condition de fidélité intermédiaire, f

Condition de **mesurage**, dans un ensemble de conditions qui comprennent la même **procédure de mesure**, le même lieu et des mesurages répétés sur le même objet ou

des objets similaires pendant une période de temps étendue, mais peuvent comprendre d'autres conditions que l'on fait varier

2.23 Fidélité intermédiaire de mesure, f

Fidélité intermédiaire, f

Fidélité de mesure selon un ensemble de **conditions de fidélité intermédiaire**

2.24 (3.7, Note 2) condition de reproductibilité, f

condition de **mesurage**, dans un ensemble de conditions qui comprennent des lieux, des opérateurs et des **systèmes de mesure** différents, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires

2.25 (3.7) reproductibilité de mesure, f

Reproductibilité, f

Fidélité de mesure selon un ensemble de **conditions de reproductibilité**

2.26 (3.9) incertitude de mesure, f

Incertitude, f

Paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des **valeurs** attribuées à un **mesurande**, à partir des informations utilisées

2.27 Incertitude définitionnelle, f

Composante de l'**incertitude de mesure** qui résulte de la quantité finie de détails dans la définition d'un **mesurande**

2.28 Évaluation de type A de l'incertitude, f

Évaluation de type A, f

Évaluation d'une composante de l'**incertitude de mesure** par une analyse statistique des **valeurs mesurées** obtenues dans des conditions définies de **mesurage**

2.29 Évaluation de type B de l'incertitude, f

Évaluation de type B, f

Évaluation d'une composante de l'**incertitude de mesure** par d'autres moyens qu'une **évaluation de type A de**

l'incertitude**2.30 Incertitude-type, f**

Incertitude de mesure exprimée sous la forme d'un écart-type

2.31 incertitude-type composée, f

incertitude-type obtenue en utilisant les **incertitudes-types** individuelles associées aux **grandeurs d'entrée dans un modèle de mesure**

2.32 incertitude-type relative, f

Quotient de l'**incertitude-type** par la valeur absolue de la **valeur mesurée**

2.33 Bilan d'incertitude, m

Formulation d'une **incertitude de mesure** et des composantes de cette incertitude, ainsi que de leur calcul et de leur combinaison

2.34 incertitude cible, f**Incertitude anticipée, f**

Incertitude de mesure spécifiée comme une limite supérieure et choisie d'après les usages prévus des **résultat de mesure**

2.35 Incertitude élargie, f

Produit d'une **incertitude-type composée** et d'un facteur supérieur au nombre un

2.36 Intervalle élargi, m

Intervalle contenant l'ensemble des **valeurs vraies** d'un **mesurande** avec une probabilité déterminée, fondés sur l'information disponible

2.37 Probabilité de couverture, f

Probabilité que l'ensemble des **valeurs vraies** d'un **mesurande** soit contenu dans un **intervalle élargi** spécifié

2.38 Facteur d'élargissement, m

Nombre supérieur à un par lequel on multiplie une

incertitude-type composée pour obtenir une **incertitude élargie**

2.39 (6.11) étalonnage, m

opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les **valeurs** et les **incertitudes de mesure** associées qui sont fournies par des **étalons** et les **indications** correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un **résultat de mesure** à partir d'une indication

2.40 Hiérarchie d'étalonnage, f

Suite d'**étalonnages** depuis une référence jusqu'au **système de mesure** final, dans laquelle le résultat de chaque étalonnage dépend de celui de l'étalonnage précédent

2.41 (6.10) traçabilité métrologique, f

propriété d'un **résultat de mesure** selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'**étalonnages** dont chacun contribue à l'**incertitude de mesure**

2.42 Chaîne de traçabilité métrologique, f**Chaîne de traçabilité, f**

Succession d'**étalons** et d'**étalonnages** qui est utilisée pour relier un **résultat de mesure** à une référence

2.43 traçabilité métrologique à une unité de mesure, f**Traçabilité métrologique à une unité, f**

Traçabilité métrologique où la référence est la définition d'une **unité de mesure** sous la forme de sa réalisation pratique.

2.44 Vérification, f

Fourniture de preuves tangibles qu'une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées

2.45 Validation, f

Vérification, où les exigences spécifiées sont adéquates pour un usage déterminé

2.46 Comparabilité métrologique, f

Comparabilité de **résultats de mesure**, pour des **grandeurs** d'une **nature** donnée, qui sont métrologiquement traçables à une même référence

2.47 Compatibilité de mesure, f

Compatibilité métrologique, f

propriété d'un ensemble de **résultats de mesure** correspondant à un **mesurande** spécifié, telle que la valeur absolue de la différence des **valeurs mesurées** pour toute paire de résultats de mesure est plus petite qu'un certain multiple choisi de l'**incertitude-type** de cette différence

2.48 Modèle de mesure, m

Modèle, m

Relation mathématique entre toutes les **grandeurs** qui interviennent dans un **mesurage**

2.49 Fonction de mesure, f

Fonction de **grandeurs**, dont la valeur, lorsqu'elle est calculée en utilisant des **valeurs** connues pour les **grandeurs d'entrée dans le modèle de mesure**, est une **valeur mesurée** de la **grandeur de sortie dans le modèle de mesure**

2.50 Grandeur d'entrée dans un modèle de mesure, f

Grandeur d'entrée, f

Grandeur qui doit être mesurée, ou grandeur dont la **valeur** peut être obtenue autrement, pour calculer une **valeur mesurée** d'un **mesurande**

2.51 Grandeur de sortie dans un modèle de mesure, f

Grandeur de sortie, f

Grandeur dont la **valeur mesurée** est calculée en utilisant les **valeurs** des **grandeurs d'entrée dans un modèle de mesure**

2.52 (2.7) grandeur d'influence, f

Grandeur qui, lors d'un **mesurage** direct, n'a pas d'effet sur la grandeur effectivement mesurée, mais a un effet sur la relation entre l'**indication** et le **résultat de mesure**

2.53 (3.15) (3.16) correction, f

Compensation d'un effet systématique connu

3 Dispositifs de mesure

3.1 (4.1) instrument de mesure, m

Appareil de mesure, m

Dispositif utilisé pour faire des **mesurages**, seul ou associé à un ou plusieurs dispositifs annexes

3.2 (4.5) système de mesure, m

ensemble d'un ou plusieurs **instruments de mesure** et souvent d'autres dispositifs, comprenant si nécessaire réactifs et alimentations, assemblés et adaptés pour fournir des informations destinées à obtenir des **valeurs mesurées** dans des intervalles spécifiés pour des **grandeurs de natures** spécifiées

3.3 (4.6) appareil de mesure indicateur, m

Appareil indicateur, m

Instrument de mesure qui fournit un signal de sortie porteur d'informations sur la **valeur** de la **grandeur** mesurée

3.4 (4.6) appareil de mesure afficheur, m

Appareil afficheur, m

Instrument de mesure indicateur dont le signal de sortie est présenté sous forme visuelle

3.5 (4.17) échelle d'un appareil de mesure afficheur, f

Échelle, f

Partie d'un **instrument de mesure afficheur**, constituée d'un ensemble ordonné de repères, associés éventuellement à des nombres ou des **valeurs de grandeurs**

3.6 (4.2) mesure matérialisée, f

Instrument de mesure qui reproduit ou fournit, d'une manière permanente pendant son emploi, des **grandeurs** d'une ou plusieurs **natures**, chacune avec une **valeur** assignée

3.7 (4.3) transducteur de mesure, m

Dispositif, employé en **mesurage**, qui fait correspondre à une **grandeur** d'entrée une grandeur de sortie selon une loi déterminée

3.8 (4.14) capteur, m

Élément d'un **système de mesure** qui est directement soumis à l'action du phénomène, du corps ou de la substance portant la **grandeur** à mesurer

3.9 (4.15) détecteur, m

Dispositif ou substance qui indique la présence d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance lorsqu'une **valeur** de seuil d'une **grandeur** associée est dépassée

3.10 (4.4) chaîne de mesure, f

Suite d'éléments d'un **système de mesure** qui constitue un seul chemin du signal depuis le **capteur** jusqu'à l'élément de sortie

3.11 (4.30) ajustage d'un système de mesure, m**Ajustage, m**

Ensemble d'opérations réalisées sur un **système de mesure** pour qu'il fournisse des **indications** prescrites correspondant à des **valeurs** données des **grandeurs** à mesurer

3.12 Réglage de zéro, m

Ajustage d'un système de mesure pour que le système fournisse une **indication** égale à zéro correspondant à une **valeur** égale à zéro de la **grandeur** à mesurer

4 Propriétés des dispositifs de mesure**4.1 (3.2) indication, f**

Valeur fournie par un **instrument de mesure** ou un **système de mesure**

4.2 Indication du blanc, f**Indication d'environnement, f**

Indication obtenue à partir d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance semblable au phénomène, au corps ou à la substance en cours d'étude, mais dont la **grandeur** d'intérêt est supposée ne pas être présente ou ne contribue pas à l'indication.

4.3 (4.19) intervalle des indications, m

Ensemble des **valeurs** comprises entre les deux **indications** extrêmes

4.4 (5.1) intervalle nominal des indications, m**Intervalle nominal, m****Calibre, m**

ensemble des **valeurs** comprises entre deux **indications** extrêmes arrondies ou approximatives, que l'on obtient pour une position particulière des commandes d'un **instrument de mesure** ou d'un **système de mesure** et qui sert à désigner cette position

4.5 (5.2) étendue de mesure, f**Étendue nominale, f**

Valeur absolue de la différence entre les valeurs extrêmes d'un **intervalle nominal des indications**

4.6 (5.3) valeur nominale, f

Valeur arrondie ou approximative d'une **grandeur** caractéristique d'un **instrument de mesure** ou d'un **système de mesure**, qui sert de guide pour son utilisation appropriée

4.7 (5.4) intervalle de mesure, m

Ensemble des **valeurs** de **grandeurs** d'une même **nature** qu'un **instrument de mesure** ou un **système de mesure** donné peut mesurer avec une **incertitude instrumentale** spécifiée, dans des conditions déterminées

4.8 Condition de régime établi, f**Condition de régime permanent, f**

condition de fonctionnement d'un **instrument de mesure** ou d'un **système de mesure** dans laquelle la relation établie par un **étalonnage** reste valable même pour un **mesurande** qui varie en fonction du temps.

4.9 (5.5) condition assignée de fonctionnement, f

Condition de fonctionnement qui doit être satisfaite pendant un **mesurage** pour qu'un **instrument de mesure** ou un **système de mesure** fonctionne conformément à sa conception

4.10 (5.6) condition limite de fonctionnement, f**Condition limite, f**

Condition de fonctionnement extrême qu'un **instrument de mesure** ou un **système de mesure** doit pouvoir supporter sans dommage et sans dégradation de propriétés métrologiques spécifiées, lorsqu'il est ensuite utilisé dans ses **conditions assignées de fonctionnement**

4.11 (5.7) condition de fonctionnement de référence, f**Condition de référence, f**

Condition de fonctionnement prescrite pour évaluer les performances d'un **instrument de mesure** ou d'un **système de mesure** ou pour comparer des **résultats de mesure**

4.12 (5.10) sensibilité, f

Quotient de la variation d'une **indication** d'un **système de mesure** par la variation correspondante de la **valeur** de la **grandeur** mesurée

4.13 Sélectivité, f

propriété d'un **système de mesure**, utilisant une **procédure de mesure** spécifiée, selon laquelle le système fournit des **valeurs mesurées** pour un ou plusieurs **mesurandes**, telles que les valeurs de chaque mesurande sont indépendantes des autres mesurandes ou d'autres **grandeurs** dans le phénomène, le corps ou la substance en cours d'examen

4.14 Résolution, f

Plus petite variation de la **grandeur** mesurée qui produit une variation perceptible de l'**indication** correspondante
NOTE La résolution peut dépendre, par exemple, du bruit (interne ou externe) ou du frottement. Elle peut aussi dépendre de la **valeur** de la grandeur mesurée.

4.15 (5.12) résolution d'un dispositif afficheur, f

Plus petite différence entre **indications** affichées qui peut être perçue de manière significative

4.16 (5.11) seuil de discrimination, m**Seuil de mobilité, m****Mobilité, f**

Variation la plus grande de la **valeur** d'une **grandeur** mesurée qui ne produit aucune variation détectable de l'**indication** correspondante

4.17 (5.13) zone morte, f

Intervalle maximal à l'intérieur duquel on peut faire varier la **valeur** de la **grandeur** mesurée dans les deux sens sans provoquer de variation détectable de l'**indication** correspondante

4.18 limite de détection, f

Valeur mesurée, obtenue par une **procédure de mesure** donnée, pour laquelle la probabilité de déclarer faussement l'absence d'un constituant dans un matériau est β , étant donnée la probabilité α de déclarer faussement sa présence

4.19 (5.14) stabilité, f**Constance, f**

Propriété d'un **instrument de mesure**, selon laquelle celui-ci conserve ses propriétés métrologiques constantes au cours du temps

4.20 (5.25) biais instrumental, m**Erreur de justesse d'un instrument, f**

Différence entre la moyenne d'**indications** répétées et une **valeur de référence**

4.21 (5.16) dérive instrumentale, f

Variation continue ou incrémentale dans le temps d'une **indication**, due à des variations des propriétés métrologiques d'un **instrument de mesure**

4.22 Variation due à une grandeur d'influence, f

Différence entre les **indications** qui correspondent à une même **valeur mesurée**, ou entre les **valeurs** fournies par une **mesure matérialisée**, lorsqu'une **grandeur d'influence** prend successivement deux valeurs différentes.

4.23 (5.17) temps de réponse à un échelon, m

Durée entre l'instant où une **valeur** d'entrée d'un **instrument de mesure** ou d'un **système de mesure** subit un changement brusque d'une valeur constante spécifiée à une autre et l'instant où l'**indication** correspondante se maintient entre deux limites spécifiées autour de sa valeur finale en régime établi

4.24 Incertitude instrumentale, f

Composante de l'**incertitude de mesure** qui provient de l'**instrument de mesure** ou du **système de mesure** utilisé

4.25 (5.19) classe d'exactitude, f

Classe d'**instruments de mesure** ou de **systèmes de mesure** qui satisfont à certaines exigences métrologiques destinées à maintenir les **erreurs de mesure** ou les **incertitudes instrumentales** entre des limites spécifiées dans des conditions de fonctionnement spécifiées

4.26 (5.21) erreur maximale tolérée, f**Limite d'erreur, f**

Valeur extrême de l'**erreur de mesure**, par rapport à une **valeur de référence** connue, qui est tolérée par les spécifications ou règlements pour un **mesurage**, un **instrument de mesure** ou un **système de mesure** donné

4.27 (5.22) erreur au point de contrôle, f

Erreur de mesure d'un instrument de mesure ou d'un **système de mesure** pour une **valeur mesurée** spécifiée

4.28 (5.23) erreur à zéro, f

Erreur au point de contrôle lorsque la **valeur mesurée** spécifiée est nulle

4.29 Incertitude de mesure à zéro, f

Incertitude de mesure lorsque la **valeur mesurée** spécifiée est nulle

4.30 Diagramme d'étalonnage, m

Expression graphique de la relation entre une **indication** et le **résultat de mesure** correspondant

4.31 Courbe d'étalonnage, f

Expression de la relation entre une **indication** et la **valeur mesurée** correspondante

5 Étalons**5.1 (6.1) étalon, m**

Réalisation de la définition d'une **grandeur** donnée, avec une **valeur** déterminée et une **incertitude de mesure** associée, utilisée comme référence

5.2 (6.2) étalon international, m

Étalon reconnu par les signataires d'un accord international pour une utilisation mondiale

5.3 (6.3) étalon national, m

Étalon reconnu par une autorité nationale pour servir, dans un état ou une économie, comme base à l'attribution de **valeurs** à d'autres étalons de **grandeurs** de la même nature.

5.4 (6.4) étalon primaire, m

Étalon établi à l'aide d'une **procédure de mesure primaire**, ou créé comme objet choisi par convention

5.5 (6.5) étalon secondaire, m

Étalon établi par l'intermédiaire d'un **étalonnage** par rapport à un **étalon primaire** d'une **grandeur** de même **nature**

5.6 (6.6) étalon de référence, m

Étalon conçu pour l'**étalonnage** d'autres étalons de **grandeurs** de même **nature** dans une organisation donnée ou en un lieu donné.

5.7 (6.7) étalon de travail, m

Étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des **instruments de mesure** ou des **systèmes de mesure**

5.8 (6.9) étalon voyageur, m

Étalon, parfois de construction spéciale, destiné au transport en des lieux différents

5.9 (6.8) dispositif de transfert, m

Dispositif utilisé comme intermédiaire pour comparer entre eux des **étalons**

5.10 Étalon intrinsèque, m

Étalon fondé sur une propriété intrinsèque et reproductible d'un phénomène ou d'une substance

5.11 (6.12) conservation d'un étalon, f

Maintenance d'un étalon, f

Ensemble des opérations nécessaires à la préservation des propriétés métrologiques d'un **étalon** dans des limites déterminées

5.12.Étalon utilisé pour des étalonnages

5.13 (6.13) matériau de référence, m

RM

Matériau suffisamment homogène et stable en ce qui concerne des propriétés spécifiées, qui a été préparé pour être adapté à son utilisation prévue pour un **mesurage** ou pour l'examen de **propriétés qualitatives**

5.14 (6.14) matériau de référence certifié, m

MRC

Matériau de référence, accompagné d'une documentation délivrée par un organisme faisant autorité et fournissant une ou plusieurs valeurs de propriétés spécifiées avec les incertitudes et les traçabilités associées, en utilisant des procédures valables

5.15 commutabilité d'un matériau de référence, f

propriété d'un **matériau de référence**, exprimée par l'étroitesse de l'accord entre, d'une part, la relation entre les **résultats de mesure** obtenus pour une **grandeur** déterminée de ce matériau en utilisant deux **procédures de mesure** données et, d'autre part, la relation entre les résultats de mesure pour d'autres matériaux spécifiés

5.16 donnée de référence, f

Donnée liée à une propriété d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, ou à un système de constituants de composition ou de structure connue, obtenue à partir d'une source identifiée, évaluée de façon critique et vérifiée en exactitude

5.17 donnée de référence normalisée, f

Donnée de référence provenant d'une autorité reconnue

5.18 Valeur de référence, f

Valeur d'une grandeur servant de base de comparaison pour les valeurs de **grandeurs** de même **nature**