

Unités, références, incertitudes pour les mesures

Marc Himbert,

Chaire de métrologie, Conservatoire National des Arts et Métiers ¹

RÉSUMÉ. Mesurer, c'est comparer une grandeur inconnue à une grandeur prise comme référence à l'aide d'une chaîne instrumentale, et exprimer le résultat de cette comparaison en ayant effectué l'estimation de l'incertitude attachée à l'obtention du résultat. Seuls l'établissement non ambigu de la traçabilité du résultat et l'évaluation convenable de son incertitude peuvent inspirer une confiance suffisante pour utiliser effectivement la donnée de sortie de la démarche expérimentale engagée, afin de prendre des décisions, sur le plan scientifique, technique, environnemental, réglementaire, diagnostique, thérapeutique, sportif, etc. La « traçabilité » suppose l'existence d'un système de références reconnues sans ambiguïté par les divers partenaires concernés par le résultat. À l'échelle aujourd'hui mondiale, il s'agit du Système international d'unités, aux définitions et aux actions bien plus vivantes qu'on ne le pense habituellement. L'évaluation convenable de l'incertitude requiert la poursuite d'une démarche à la fois analytique (analyse des causes d'erreur survenant dans le processus de mesure, essai, analyse) et expérimentale englobant une approche statistique de la mesure. Garantir la pertinence de ces deux éléments fondamentaux du résultat que sont l'incertitude et l'unité constitue l'objet de la métrologie.

Introduction

Qu'ils soient à vocation scientifique ou industrielle, qu'ils puissent être insérés dans une chaîne instrumentale plus complexe ou qu'ils aient été développés en vue de satisfaire une exigence particulière, les capteurs et instruments ont pour vocation d'aider à traduire la valeur d'une grandeur en une donnée numérique, parfois très simplifiée, qui pourra être utilisée afin de tirer des conclusions ou prendre des décisions, c'est-à-dire en une donnée numérique digne de confiance.

Les méthodes et conventions qui régissent la définition, l'évaluation et l'expression des résultats de mesure et les propriétés des instruments sont partie intégrante du langage à vocation universelle de la métrologie, *science* ou *art* de la mesure [1]. C'est en particulier grâce à une estimation convenable de l'incertitude attachée à un résultat que ce dernier pourra, paradoxalement, inspirer une confiance maîtrisée, et être reconnu sans équivoque par plusieurs partenaires. Comment, en effet, comparer entre eux des résultats de façon fiable ? Comment confronter une donnée à une tolérance, en l'absence de caractérisation de l'incertitude ?

La traçabilité des résultats de mesure

Des domaines d'application très variés

L'opération de mesure

Mesurer, c'est compter, comme on le fait depuis l'origine des échanges commerciaux, avant même que soit formalisé, en Mésopotamie ancienne, le système de numération : c'est exprimer, sous forme d'une valeur numérique, la grandeur physique caractérisant l'état d'un système, ou le résultat d'une succession d'actes élémentaires rassemblés en un protocole d'essai. Plus précisément, mesurer, c'est

¹ Bnm-Inm, <http://www.cnam/instituts/inm>
292, rue Saint-Martin, 75003 Paris, France
himbert@cnam.fr

comparer une grandeur physique inconnue avec une grandeur de même nature prise comme référence, à l'aide d'une chaîne instrumentale comportant un ou plusieurs capteurs. C'est exprimer le résultat de cette comparaison à l'aide d'une valeur numérique, associée à une unité qui rappelle la nature de la référence, et assortie d'une incertitude qui dépend à la fois des qualités de l'expérience effectuée, des outils employés et de la connaissance que l'on a de la référence et de ses conditions d'utilisation [2].

Pour comparer, il faut choisir un principe de mesure, choisir ou développer les capteurs adaptés à la grandeur concernée, concevoir, construire, caractériser l'instrument optimal compte tenu des contraintes existantes, traiter enfin le signal délivré par la chaîne de mesure pour en extraire toute l'information disponible, en s'affranchissant autant que nécessaire des fluctuations indésirables qui nuisent à la lisibilité de l'information recherchée, en éliminant donc ce qu'on appelle le bruit. La démarche de caractérisation des outils et instruments, et l'appréciation critique de la qualité d'un résultat de mesure, doivent être poursuivies jusqu'à leur terme pour garantir l'exactitude d'un résultat [3], quel que soit le niveau d'exigence *a priori* souhaité.

Quelques domaines d'application

La société s'appuie sur une infrastructure qui n'est pas mais pourrait être familière, souvent invisible, de services, de denrées, de réseaux de transport et de communication dont le bon fonctionnement est essentiel à la vie quotidienne. Par exemple :

- pour la fabrication et les échanges de produits, aujourd'hui à l'échelle mondiale ;
- pour garantir le fonctionnement des systèmes à technologie avancée ;
- pour l'analyse des phénomènes physiques et chimiques ;
- pour le diagnostic médical, pour la thérapie ;
- pour assurer de hauts débits de communication fiables ;
- pour les systèmes de repérage à longue distance, à usage civil ou militaire ;
- pour l'alimentation, de la production à la protection, au transport, à la distribution des produits agricoles ;
- pour la définition et le contrôle des règles de sécurité ;
- pour l'analyse des performances, même sportives ;
- pour l'expertise judiciaire, en tous domaines ;
- pour valider les avancées de la recherche scientifique ; etc. [4].

C'est par la métrologie qu'on peut assurer que les volumes des marchandises qui font l'objet de transactions commerciales sont mesurés de façon correcte, comme le pétrole brut, le gaz naturel, l'eau, dans une vaste étendue de mesure. C'est grâce à des mesures exactes qu'on peut fabriquer de façon efficace les composants d'objets aussi variés que les lecteurs de disques numériques, les véhicules à design accrocheur et performances élevées, pour lesquels la fiabilité dépend de tolérances de fabrication contraignantes. De même les systèmes de télécommunications ne fonctionnent avec des rythmes de transmission élevés que grâce à la coordination des échelles de temps, à environ une microseconde près, au travers de l'UTC, l'échelle internationale construite à partir des horloges atomiques. Cette échelle est également utilisée par les systèmes de navigation à couverture globale, tel le GPS. Demain pour le système Galileo.

La pratique de la médecine fait appel à des mesures délicates, tant pour les diagnostics qu'en thérapie, qu'il s'agisse d'analyses chimiques, de mesure des doses de rayonnement, d'interprétation d'images. En agriculture, le suivi des produits alimentaires et la protection de l'environnement nécessitent des mesures, qui permettent le contrôle ou l'anticipation de dispositions réglementaires. Plus généralement, l'expertise judiciaire s'appuie sur des résultats de mesure, du simple contrôle de vitesse, de poids par essieu de camion, d'alcoolémie ou d'imprégnation de stupéfiants, aux investigations les plus poussées en matière, par exemple, de résistance des matériaux. Enfin, qu'on songe un instant aux impératifs d'exactitude des instruments de mesure qu'impose, dans le sport, la comparaison des performances effectuées en des moments, dans des lieux et avec des équipements différents.

Garantir la traçabilité des résultats au Système international d'unités

Le raccordement des références

Asseoir les résultats de mesure sur des bases reconnues sans équivoque par plusieurs partenaires, que ce soit à des fins scientifiques, commerciales ou d'expertise légale, nécessite l'existence de références dont les caractéristiques sont bien établies : référence de travail d'un établissement, étalonnée avec une périodicité maîtrisée et contrôlée, par comparaison à une référence d'incertitude plus faible, située à un niveau plus élevé dans *la hiérarchie d'une chaîne d'étalonnage*, dont le stade ultime est la matérialisation dite « primaire » des unités permettant d'accéder à la grandeur, issue de la définition elle-même de celle-ci, s'il s'agit d'une unité de base du système employé, ou par combinaison de matérialisations des unités associées aux grandeurs composantes lorsqu'il s'agit de ce qu'on appelle une unité dérivée. Il appartient au Comité français d'accréditation (COFRAC) de prononcer et de garantir la capacité des acteurs industriels et économiques à procéder, en pratique, à ces raccordements.

Au niveau le plus élevé de ces chaînes, seules des comparaisons effectuées entre des montages indépendants – et donc *a priori* mis en place dans différents pays – permettent de préciser l'*exactitude* de ces réalisations. Le *Bureau National de Métrologie* est en France le garant de la traçabilité des mesures. Les comparaisons internationales permettent d'apprécier le degré d'équivalence de ses références avec celles des homologues étrangers et d'assurer officiellement la reconnaissance mutuelle des opérations effectuées par les organismes accrédités des divers pays. Aujourd'hui, un arrangement de reconnaissance mutuelle, signé en 1999 entre les grandes nations technologiques, et les autres, vient lever *a priori* les derniers obstacles aux échanges relatifs aux raccordements. En ligne, accessible à tous, sur le site Internet du Bureau international des poids et mesures (www.bipm.org), chacun peut disposer de l'ensemble des résultats des plus récentes comparaisons internationales d'étalons et donc du degré d'équivalence des références employées, au plus haut niveau d'exactitude, dans les divers pays.

Le Système international d'unités [5]

- généralités

C'est dans le cadre du Système International d'Unités (SI) que sont élaborées les références correspondant à l'ensemble des mesures. Issu d'un traité international toujours vivant signé en 1875, « la Convention du mètre », lui-même inspiré par l'époque révolutionnaire française [2], et en particulier la première loi à vocation universelle relative aux poids et mesures, celle du 18 germinal an III, ce système d'unités cohérent et rationalisé couvre l'ensemble du champ disciplinaire des mesures physiques, en mécanique, électrodynamique, et plus récemment thermodynamique, physico-chimie, chimie, photométrie.

Il repose sur sept grandeurs de base, pour lesquelles les définitions des unités correspondantes ont été précisées : le mètre, la seconde, le kilogramme, l'ampère, les quatre premières bien connues des physiciens. Bien entendu, certains théoriciens, non sans raison, estiment que les modèles récents de la physique permettraient de faire l'économie de certaines d'entre elles, en s'appuyant sur les approches théoriques non démenties aujourd'hui et les constantes de couplage entre les interactions. La Convention du mètre reste à ce stade sur une approche plus pragmatique, liée à l'appréhension du réel par l'homme, qui dans les faits distingue sous l'acception la plus commune et sans ambiguïté, nonobstant la théorie relativiste, la notion de longueur et celle de durée...

Pire, pour certains, le système international définit trois autres unités pour d'autres grandeurs : la température thermodynamique, grandeur mesurable au sens de la définition possible du rapport de deux températures thermodynamiques (le kelvin), la quantité de matière (la mole), l'intensité lumineuse (la candela). En un mot, disons que, pour les deux premières, - les physiciens et chimistes en sont bien conscients - il s'agit, dans le premier cas, de quantifier l'agitation thermique (au sens large) des constituants fondamentaux d'un système et, dans le second cas, de dénombrer, dans l'état

actuel de nos connaissances, les éléments chimiques ou structuraux à l'échelle moléculaire d'un système macroscopique : ces unités permettent en quelque sorte de donner un cadre à des grandeurs qui traduisent sur le plan macroscopique des effets quantifiables autrement à l'échelle moléculaire, effets dont on n'observe cependant, à l'échelle macroscopique et « humaine » (voir supra les utilisations des résultats de mesure) que des moyennes statistiques. Dans le dernier cas (intensité lumineuse et candela), le système international, pour des raisons historiques, intègre l'évaluation des rayonnements vus au travers d'un instrument de mesure particulier qui est l'œil humain moyen en vision diurne (dite photopique), permettant de traiter tout le domaine de la photométrie (lux, lumen, candela), par opposition au domaine de la radiométrie qui est celui de l'évaluation énergétique des propriétés des rayonnements. Ainsi, la vision est le seul « sens » de l'être humain réellement intégré au Système international, avec en fait l'ouïe, le modèle de comportement logarithmique de la sensation auditive en matière d'intensité acoustique en fonction de la pression acoustique étant bien adapté.

- la définition des unités de base

C'est la Conférence générale des poids et mesures (Cgpm), organisme diplomatique réuni tous les quatre ans, qui promulgue la définition des unités et émet des recommandations, sur proposition du Comité international des poids et mesures (Cipm) - assemblée d'éminents scientifiques réunie annuellement - comité qui lui-même s'appuie sur de nombreux groupes de travail internationaux faisant intervenir les laboratoires de métrologie des divers pays.

La structure s'appuie sur un laboratoire pérenne, le Bureau international des poids et mesures, installé à proximité de Paris, aux alentours du Petit Trianon de Saint-cloud (pavillon de Breteuil), dont le rôle scientifique est de contribuer aux efforts pour l'amélioration des références, d'orienter les travaux des laboratoires et de coordonner les comparaisons internationales, notamment.

Depuis plusieurs décennies, il apparaît clairement que l'évolution du Système international tente de mettre à profit les avancées les plus récentes de la science pour permettre aux scientifiques et à tous les utilisateurs industriels de disposer des outils les plus exacts, au sommet des chaînes d'étalonnage.

Les définitions retenues ont pour objectif d'assurer la pérennité (invariance dans le temps), l'uniformité (invariance suivant le lieu de matérialisation de l'unité, de réalisation d'un étalon), l'accessibilité (capacité à utiliser l'unité au plus proche de sa définition) et la plus grande exactitude possible des références ; elles sont de type très varié. A cet égard l'exemple du mètre, qui a connu en deux siècles quatre définitions successives, est intéressant pour appréhender ces évolutions.

- l'exemple du mètre

Le mètre, en Germinal an III, est d'abord lié à un système supposé invariable, la longueur du quart nord du méridien terrestre ; après le travail remarquable de Delambre et Méchain, qui raccordent un objet matériel à la fraction de méridien comprise entre Dunkerque et Barcelone par triangulation, cette définition n'est plus que rarement utilisée et les utilisateurs se contentent du prototype de fait alors étalonné (un étalon à bouts en Platine) conservé aux archives de France ; peu à peu, on prend en compte le caractère non pérenne du mètre « méridien » et, après la signature de la Convention du Mètre, il est décidé de donner acte de ces défauts en changeant la définition : le mètre devient en 1889 associé au prototype international, un étalon matériel particulier en platine iridié sur lequel sont gravés deux traits distants par définition de « un » mètre ; les progrès de la spectroscopie et de la physique quantique conduisent à retenir comme définition, en 1960 seulement, un multiple de la longueur d'onde d'une radiation résonnante sur une transition visible dans l'atome de krypton, comme J.C.Maxwell l'appelait de ses vœux dès la fin du XIX^e siècle. En 1983, la définition du mètre change une dernière fois : il est désormais établi à partir du phénomène de propagation de la lumière dans le vide : la définition traduit l'existence d'une loi physique fondamentale et impose le gel de la valeur numérique d'une constante physique fondamentale, la vitesse de propagation de la lumière c , dont la valeur numérique vaut désormais exactement, en unités du système international, $299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$. Étalon macroscopique terrestre, prototype, étalon atomique, expression d'une loi physique fixant la valeur numérique en SI d'une constante fondamentale, ces quatre définitions successives montrent que

ce système d'unités évolue de façon pragmatique dans le sens de la prise en compte de toujours davantage de science et de lois fondamentales.

- les autres unités de base

Les autres unités de base du SI traduisent cette variété de définitions :

La seconde est aujourd'hui réalisée avec une exactitude relative supérieure à 10^{-14} , à l'aide d'une horloge atomique, matérialisant la période d'une transition dans le domaine des radiofréquences, dans l'atome de césium ; ces horloges sont aujourd'hui, pour les plus performantes, établies à partir d'atomes refroidis par laser, presque immobiles isolés au repos, comme le postulerait un manuel de physique... Elle servent à l'établissement des références de temps. Bientôt installées en orbite, ces horloges serviront aux réseaux de positionnement.

Le kilogramme reste depuis 1889 défini par le biais d'un prototype en alliage de platine et d'iridium, dont les copies peuvent être étalonnées à quelques 10^{-9} près, et dont la stabilité globale, en termes de dispersion au moins, s'établit à moins d'un microgramme par an, à condition de bien définir et de contrôler l'état de surface des prototypes avant mesurage.

La définition de l'ampère exprime la loi de Laplace et permet d'établir au dixième de millionième près (aujourd'hui grâce au mètre et à la seconde) les principaux étalons du domaine électrique, à partir de condensateurs calculables de haute exactitude, les « condensateurs de Lampard ».

Le kelvin fait référence à la matérialisation du point triple de l'eau pure, réalisée en pratique au dixième de millikelvin près ; il convient également de mettre en place dans une étendue de mesure très vaste allant des températures cryogéniques (près de $-272,9^{\circ}\text{C}$) aux conditions exigeant des méthodes de pyrométrie près de 1300°C), l'échelle internationale de température (EIT-90) promulguée en 1990 et étendue en 2000 ; la France diffuse dans de nombreux pays un système de mini-cellules à multi-compartiments matérialisant divers points fixes de l'échelle de température, obtenus lors de l'équilibre entre phases de corps purs, à l'instar du mélange eau-glace couramment utilisé.

La mole relie, par l'intermédiaire de la masse de l'isotope 12 de l'atome de carbone, les grandeurs à l'échelle atomique aux grandeurs macroscopiques ; de sa définition résulte le fait que la constante d'Avogadro doit faire l'objet de mesures.

Enfin la candela assure, à quelques millièmes ou dix-millièmes près, le raccordement entre les grandeurs radiométriques et le domaine photométrique comme expliqué plus haut.

Le rôle croissant de la physique fondamentale

De nombreux travaux sont entrepris pour obtenir une exactitude plus grande, des références plus pérennes ou plus accessibles, ou encore pour élargir le champ d'application effectivement couvert. Ils portent principalement aujourd'hui, pour la partie physique, sur l'utilisation et la mise en œuvre de phénomènes de physique fondamentale. Dans le domaine électrique - mais les recouvrements de ce domaine avec les grandeurs énergétiques, et donc le kilogramme, sont nombreux - on cherche à mettre à profit les effets quantiques macroscopiques découverts au cours des quarante dernières années : l'effet Josephson, aujourd'hui pour la conservation du volt ; l'effet Hall quantique pour la conservation de l'ohm ; les effets mono-électroniques (pompe à électron, écluse...) dont la matérialisation pratique à un haut niveau d'exactitude permettrait de boucler le triangle de la métrologie quantique et d'introduire dans la détermination des constantes fondamentales h (constante de Planck) et e (charge de l'électron) la redondance nécessaire à l'estimation des incertitudes associées. De même les progrès en spectroscopie atomique, ceux accomplis dans l'évaluation des caractéristiques des systèmes microscopiques, permettent d'espérer de substantielles améliorations. Aujourd'hui, pour la seconde par exemple, la perspective d'obtenir et d'observer expérimentalement des systèmes composés d'atomes pratiquement immobiles, pratiquement isolés, et de construire à partir de ces atomes des horloges dans le domaine optique, devient peu à peu une réalité grâce aux méthodes de ralentissement et de refroidissement par laser. L'interférométrie atomique, dans laquelle on met à profit le comportement

ondulatoire de systèmes aussi lourds que des atomes ou des molécules (qui doivent être ralentis de façon drastique) permet d'utiliser ces atomes comme de très précises sondes locales et semble, par exemple, une technique de gravimétrie prometteuse. L'Échelle Internationale de Température promulguée en 1990, et qui fait appel à un instrument d'interpolation particulier (le thermomètre à résistance de platine) entre des points fixes de référence nombreux, peut être utilement complétée par la mise en oeuvre d'effets physiques nouveaux dans le domaine des très basses températures, comme l'étude de la propagation du son dans l'hélium liquide, ou la courbe de fusion de l'hélium 3. Des projets tendent à utiliser, en radiométrie et pyrométrie ou en spectroscopie, la constante de Boltzmann. Les mesures de rayonnement reposent désormais sur la radiométrie cryogénique à substitution électrique. Enfin d'importants efforts sont engagés pour obtenir, à terme, une définition de l'unité de masse qui ne fasse plus intervenir un prototype dont la pérennité n'est en aucun cas garantie : expériences de mesure de flux magnétique dans des systèmes en lévitation supraconductrice, de comparaison d'une puissance électrique à une puissance mécanique, de comptage et de pesage simultanés d'ions lourds (susceptibles de raccorder, par une détermination meilleure de la constante d'Avogadro, une masse atomique à une masse macroscopique au niveau d'exactitude requis)... Parmi les différents projets engagés, il convient d'accorder à la « balance du watt » une place toute particulière puisqu'elle conduirait sans doute à une évolution simultanée des références électriques : cette expérience revient à comparer, dans une balance de type Cotton utilisée en statique (on « pèse » la force de Laplace exercée par un champ sur un circuit) puis en dynamique (on mesure la f.é.m. induite par un déplacement contrôlé du même circuit dans le même champ), une puissance électrique obtenue à partir d'étalons quantiques et une puissance mécanique ; elle revient à mesurer h , ou à valider la stabilité du prototype du kilogramme...

L'approche statistique de la mesure

La dispersion des résultats de mesure lorsqu'on répète à l'identique un mode opératoire justifie l'adoption d'une démarche d'interprétation statistique de la mesure. Il convient néanmoins, dans chaque cas, de faire l'inventaire des causes d'erreur susceptibles de biaiser le résultat, d'effectuer les corrections nécessaires, d'évaluer, *a priori* ou par des mesures et des comparaisons complémentaires, l'incertitude associée à celles-ci, de composer ces termes avec la dispersion liée à la répétabilité du procédé de mesure et d'exprimer le résultat en termes d'intervalle de confiance.

En effet, de nombreuses causes d'erreur viennent affecter le résultat brut d'un mesurage, suite d'actes élémentaires permettant d'obtenir un résultat brut. Il faut introduire des corrections pour compenser ces erreurs, corrections qui sont elles-mêmes issues de mesures, donc incertaines...

Estimation de l'incertitude-type

On appelle *incertitude de mesure* un paramètre associé au résultat qui caractérise la dispersion des valeurs numériques qui peuvent être, raisonnablement, attribuées au mesurandé [6]. C'est l'approche statistique de la mesure qui permet d'évaluer l'incertitude-type, dont la dénomination traduit que la dispersion est exprimée par l'écart-type de la distribution des valeurs [7, 8].

Il faut donc estimer l'impact de toutes les causes de variabilité du résultat, une fois les corrections effectuées. Deux types de méthodes permettent l'évaluation des composantes de l'incertitude.

Les méthodes d'évaluation dites de type A concernent toutes les techniques d'évaluation basées sur un procédé statistique prenant en compte la dispersion observée lors de la répétition du procédé de mesure (analyse de variance, étude de répétabilité, de reproductibilité). Une telle évaluation ne peut être que globale. Des techniques d'ajustement par moindres carrés sont également fréquemment mises en oeuvre.

Les méthodes d'évaluation dites de type B concernent *a contrario* toute technique d'évaluation basée sur un procédé autre que statistique. Une telle évaluation s'appuie généralement sur un jugement

porté à la suite d'une analyse physique de la manipulation, utilisant toutes les informations disponibles. Il faut en particulier cerner la part d'incertitude qui est due à chacune des corrections associées aux causes d'erreur identifiées, même lorsqu'elles n'apportent pas *a priori* de dispersion directement discernable aux résultats. On applique le même formalisme que pour les méthodes de type A, à savoir évaluer l'incertitude sur la correction (correction qui peut être nulle !) par une valeur U qu'on peut traiter comme un écart-type. Cette valeur est déterminée à partir d'éléments variés : bibliographie sur les matériaux et capteurs, notices des fournisseurs et constructeurs, certificats d'étalonnage, rapport de comparaisons, ... mais aussi à partir des connaissances et du savoir-faire de l'analyste et de l'opérateur. Cette manière de procéder revient, dans certains cas, à postuler l'existence sous-jacente d'une loi de distribution statistique pour la correction considérée.

Pour obtenir l'incertitude sur la correction totale, on applique la loi quadratique de composition des variances, dans l'hypothèse où causes d'erreur et corrections sont non corrélées. On peut évidemment tenir compte de corrélations et adapter le formalisme au cas très général des mesures indirectes. L'incertitude-type du résultat est donnée par la racine carrée de cette variance.

Intervalle de confiance

Pour quantifier la probabilité que l'on a de trouver les résultats dans un intervalle donné, pour prononcer la conformité à une spécification, il faut connaître davantage que l'incertitude-type. En général, on fait l'hypothèse que les différentes valeurs pouvant être obtenues pour la mesure d'une grandeur physique donnée suivent une distribution gaussienne ; on peut alors évaluer le risque encouru lorsqu'on donne pour la valeur de la grandeur un intervalle de confiance, de "certitude maîtrisée" [3]. En limitant cet intervalle à plus ou moins un écart-type autour de la valeur estimée, le risque est de 68 % ; deux écarts-types, le risque est inférieur à 5 % ; trois écarts-types, on approche les 100 %.

Il est essentiel d'adopter cette composition quadratique, cohérente avec la donnée d'un intervalle de certitude maîtrisée, quelles que soient les prétentions des partenaires à disposer d'un intervalle d'erreur maximale ou une tolérance qui ne sont que des intervalles de certitude absolue illusoire et scientifiquement sans fondement. Mais dans des cas particuliers, une connaissance accrue de la distribution des résultats permet de fixer des limites plus contraignantes pour l'acceptation d'un produit ou pour définir la capabilité d'un équipement. De nombreuses normes proposent un cadre de référence pour de telles conventions entre un « fournisseur » de résultat et son « client » [9].

Conclusion

Ainsi, « mesurer », c'est comparer une grandeur physique inconnue à une référence dont la traçabilité est établie dans le cadre du Système international d'unités et évaluer l'incertitude associée, aussi élevée soit-elle, par une approche statistique de la mesure permettant d'apprécier la justesse du résultat, la fidélité des instruments,... Adopter ce langage naturel de la métrologie, qui repose sur des règles scientifiquement justifiées pour l'évaluation et l'expression ou la matérialisation de ces paramètres, est un des moyens les plus efficaces afin que puissent être utilisés de façon pertinente et confiante, dans les domaines scientifiques, techniques ou de vie courante, les résultats de mesure.

Quelques références

[1] GIACOMO P., « Mesure et métrologie » *Bulletin du Bureau National de Métrologie* vol. 101, 1995, page 1, Chiron, Paris.

- [2] HIMBERT M., « Le mètre : l'aventure continue... » *Bulletin du Bureau National de Métrologie* vol. 93, 1993, page 1, Chiron, Paris.
- [3] HIMBERT M., « Métrologie : un langage universel pour les sciences et techniques », *Récents Progrès en Génie des Procédés*, vol. 12, page 15, 1997.
- [4] QUINN T.J., HIMBERT M., « Mesurer : unités et incertitudes », *La Mesure*, Entretiens de la Villette vol. 7, page 107, Éditions Cndp, Paris, (1996).
- [5] « Le système international d'unités », BIPM, 1998 & 2000, Gauthier-Villars, Paris.
- [6] « Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie » 1993, ISO ed., Version française NF X 07 001, 1993, AFNOR ed., Paris.
- [7] « Guide to the expression of uncertainty in measurement » 1993, ISO ed., Version française 1995, AFNOR ed., Paris.
- [8] RANSON C., « Introduction à la lecture du Guide pour l'expression des incertitudes de mesure, *Bulletin du Bureau National de Métrologie* vol. 103, 1996, Chiron, Paris.
- [9] PERRUCHET C., PRIEL M., *Estimation de l'incertitude de mesure* 2000, AFNOR ed., Paris.
- HIMBERT M., PINOT P., « The unit of mass : new trends for the future » Proc. VIIIth Int. Metrology Cong., Besançon, 1997, Mfq-Bnm-Ofmet, Paris.
- HIMBERT M., « Métrologie Scientifique : de nouvelles pistes pour la matérialisation des unités » Proc. VIIth Int. Metrology Cong., Nîmes, 1995, Mfq-Bnm, Paris.
- « Special issue on physical units » *Metrologia*, vol. 31, 1995, pages 403-541, Bipm éditeur, Sèvres.