

## De l'incertitude à la précaution : le rôle de la métrologie

Beaucoup de décisions se prennent à partir de résultats de mesures. Ces résultats de mesures sont assortis d'une incertitude. Pour asseoir la pertinence de la décision, il est indispensable de maîtriser les incertitudes, qui restent un excellent moyen d'accéder à une interprétation intelligente des résultats de mesures. Il est essentiel que tout utilisateur de résultats de mesures ait une appréciation de la fiabilité et de la qualité de l'information qu'il va utiliser. La maîtrise des incertitudes est un des deux enjeux essentiels de la métrologie, avec la mise à disposition de références fiables et stables. C'est ce qui explique le choix des thèmes traités dans cet article. Nous avons fait le choix de retenir une approche large de la façon dont la science de la mesure (la métrologie) permet à un industriel ou à la société de maîtriser le processus de mesure.

L'accès à une connaissance passe bien souvent par la détermination d'un nombre, et la mesure qui fournit ce nombre ne peut se concevoir sans unité, étalon et instrument de mesure. Ceci est la raison d'être de la métrologie qui n'est pas seulement une discipline particulière des sciences physiques et chimiques, mais le socle de nos activités quotidiennes. À l'instar de Monsieur Jourdain qui faisait de la prose sans le savoir, nous utilisons tous la métrologie sans en avoir réellement conscience.

par Jean-Luc LAURENT\* et Benoît GAUMONT\*\*

### La maîtrise des incertitudes ?

Quelques citations en introduction...

« Le doute est un état mental désagréable, mais la certitude est ridicule » (Voltaire, 1740).

« Si vous pouvez mesurer ce dont vous parlez, et l'exprimer par un nombre, alors vous connaissez quelque chose de votre sujet. Si vous ne le pouvez, votre connaissance est d'une bien pauvre espèce et bien incertaine ». (Lord Kelvin, physicien britannique, 1900).

« La quantophrénie est l'illusion qui consiste à croire que la réalité peut être comprise et maîtrisée à condition de pouvoir la mesurer » (Pitirim Sorokin, sociologue américain, 1950).

### Le concept d'incertitude en matière de mesure

#### Mesurer c'est quoi ?

Mesurer, c'est compter ; c'est donc exprimer sous la forme d'une valeur numérique, la grandeur physique qui caractérise l'état du système que l'on cherche à définir. Plus

précisément, mesurer, c'est comparer, à l'aide d'un instrument, une grandeur inconnue à une référence dont la traçabilité est établie. C'est exprimer le résultat de cette comparaison à l'aide d'une valeur numérique, associée à une unité qui est celle de la référence. Cette valeur est toujours assortie d'une incertitude qui dépend à la fois des qualités de l'expérience effectuée et de la connaissance que l'on a de la référence et de ses conditions d'utilisation.

#### La notion de « mesurande »

Pour effectuer une mesure, il est important de savoir exactement quelle grandeur on souhaite mesurer. Dans de très nombreuses situations la grandeur effectivement mesurée est différente de celle que l'on cherche à quantifier.

Un exemple classique est celui de la mesure des températures : soit un thermocouple plongé dans un liquide ; après un temps infini, le liquide et l'élément sensible du thermocouple présentent une température identique, mais, dans la réalité, le phénomène d'inertie thermique fait qu'il existe une différence. Cette différence peut être fondamentale si on cherche une détermination précise à un instant donné.

La notion de « mesurande », c'est définir exactement la grandeur que l'on souhaite mesurer, c'est aussi prendre conscience que la mesure obtenue va être légèrement différente de la réalité et donc tenter d'estimer le biais systématique qui va affecter notre mesure.

La spécification d'un « mesurande » nécessite la connaissance de la nature de grandeur ainsi que la description de l'état du phénomène, du corps ou de la substance dont la grandeur est une propriété, en tenant compte de tout constituant pertinent et des entités chimiques en jeu.

Il se peut que le « mesurage », notion qui englobe le système de mesure adopté et les conditions dans lesquelles le « mesurage » est effectué, modifie le phénomène, le corps ou la substance, de sorte que la grandeur mesurée peut différer du « mesurande ». Dans ce cas, l'apport d'une correction appropriée est nécessaire.

Exemple 1 : la différence de potentiel entre les bornes d'une batterie peut diminuer lorsqu'on la mesure en employant un voltmètre ayant une conductance interne importante. La différence de potentiel en circuit ouvert peut alors être calculée à partir des résistances internes de la batterie et du voltmètre.

Exemple 2 : la longueur d'une tige en équilibre avec une température ambiante de 23°C sera différente de celle mesurée à la température spécifiée de 20°C, qui est le « mesurande » (1). Dans ce cas, une correction sera nécessaire.

### L'incertitude

Caractériser la qualité du résultat d'un « mesurage », c'est évaluer et exprimer son incertitude. Ce terme à connotation plutôt négative montre notre degré d'ignorance et de doute sur le résultat, mais c'est en fait un précieux outil pour caractériser la qualité des résultats de mesures et, plus généralement, de l'information apportée par ces résultats.

De nombreuses causes d'erreur viennent, en effet, affecter le résultat brut d'un « mesurage » : la grandeur mesurée peut parfois être elle-même mal définie. Elle varie dans le temps ou dans l'espace, elle peut être affectée par le procédé de mesure. Les capteurs et instruments utilisés peuvent également présenter des défauts. Le mode opératoire utilisé produit lui aussi des erreurs. De nombreuses « grandeurs d'influence », se rapportant, en particulier, aux conditions d'ambiance, influent sur le résultat... Nous devons donc introduire des corrections pour compenser ces erreurs. Le résultat obtenu n'est pas une valeur certaine : il est la résultante de mesures présentant une certaine dispersion. De plus, il existe une certaine méconnaissance de la valeur de chaque correction apportée individuellement, et donc de la correction totale. En effet, le résultat de mesures est un ensemble de valeurs numériques ne présentant pas toutes la même probabilité. Une fois prises en compte toutes ces causes d'erreur, on appelle « incertitude de mesure » le paramètre associé au résultat qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au « mesurande ».

En l'absence de données d'incertitude, la comparaison des résultats entre eux perd toute pertinence, voire se révèle

le impossible. Comment savoir, sans connaître l'incertitude, si une grandeur a évolué, si telle pièce peut ou non s'imbriquer avec telle autre (fabriquée à l'autre bout du continent), si tel procédé de mesure conduit au même résultat, ou si la différence éventuellement observée ne tient qu'à des phénomènes aléatoires mal maîtrisés dont l'origine peut être intrinsèquement liée à la grandeur elle-même ? Comment, dans des conditions analogues, comparer un résultat à des valeurs de référence spécifiées, par exemple, par une norme, dans un texte réglementaire ou un contrat, et donc comment garantir la conformité du produit ou du système ainsi caractérisé ?

A notre époque de développement mondial du commerce, il est impératif que la méthode d'évaluation et d'expression des incertitudes soit uniforme à l'échelle mondiale, de manière à pouvoir comparer facilement des « mesurages » effectués dans des pays différents. C'est donc tout naturellement que le guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM, NF ENV 13005) est devenu le document universel de référence en la matière.

### Mesure ou « mesurage » ?

Le mot « mesure » a plusieurs significations dans la langue française courante. C'est la raison pour laquelle le mot « mesurage » a été introduit afin de pouvoir qualifier l'action de mesurer. Suivant en cela l'usage courant, le mot « mesure » intervient cependant à de nombreuses reprises pour former des termes sans ambiguïté. On peut citer, par exemple : instrument de mesure, appareil de mesure, unité de mesure, méthode de mesure. Cela ne signifie pas pour autant que l'utilisation pour ces termes du mot « mesurage » au lieu de celui de « mesure » ne soit pas admissible dès lors que l'on y trouve quelque avantage.

### Qu'est-ce que la traçabilité ?

Dans la définition de la mesure donnée précédemment, on voit apparaître les notions de référence et de traçabilité.

Mesurer a aussi pour finalité d'asseoir les résultats de mesures sur des bases reconnues sans équivoque par plusieurs partenaires, que ce soit à des fins scientifiques, commerciales ou d'expertise légale. Il est donc essentiel de disposer de références. Si ces références sont communes et partagées, alors on pourra comparer les résultats de mesures obtenus par différents laboratoires, dans des pays ou continents différents. Si les références restent stables dans le temps, les mesures du passé pourront être comparées à celles opérées dans le futur. Sans références les mesures perdent leur sens. Cette référence pour une organisation donnée peut constituer la référence de travail, qui sera périodiquement étalonnée par comparaison (à nouveau !) à une référence d'incertitude plus faible, c'est-à-dire située à un niveau plus élevé dans ce qu'on appelle la hiérarchie d'une chaîne d'étalonnage.

A mesure que l'on progresse dans cette hiérarchie, les comparaisons sont réalisées selon des méthodes et des procédures de plus en plus élaborées et contraignantes. Le

stade ultime de la hiérarchie nationale est la matérialisation, dite primaire, des unités les plus fondamentales permettant d'accéder à la grandeur. On ne parle plus alors d'étalonnage, mais de mise en pratique de la définition de l'unité.

Seules des intercomparaisons effectuées entre des montages indépendants réalisés par différents laboratoires nationaux de métrologie permettent alors de préciser l'incertitude, qualifiée « d'exactitude de réalisation ».

### **La science de la mesure**

La métrologie est l'ensemble des techniques et des savoir-faire qui permettent d'effectuer des mesures et d'avoir une confiance suffisante dans les résultats obtenus. La mesure est nécessaire à la connaissance, à la prise de décision et à l'action. La logique de toute activité est « observer/mesurer, comprendre, prévoir/agir, mesurer/vérifier » : on ne progresse que si l'on mesure.

#### *La naissance du concept d'étalons naturels*

Jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle, pour vérifier une mesure (de longueur), on l'introduisait entre les talons (de l'« étalon »), ce qui en usait lentement les faces internes. Il en résultait un allongement progressif de la distance séparant ces faces, et par voie de conséquence, une modification de l'« étalon » (de mesure) lui-même. Cette constatation a incité les savants à chercher dans la Nature un étalon, dont on pourrait retrouver en permanence et sans difficulté la valeur.

A la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, le méridien terrestre et l'eau ont été choisis comme bases naturelles du système de mesure, devenant ainsi les premières références « universelles », et donc acceptables par tous.

C'est la loi du 18 germinal an III « relative aux poids et mesures » qui instaure en France l'usage du Système métrique et de la division décimale des nombres.

De récentes découvertes intervenues en physique quantique permettent d'envisager à moyen terme une redéfinition assez profonde des unités du système international de mesure, basée sur des constantes fondamentales de la physique (comme c'est déjà le cas pour le mètre, défini par référence à la vitesse de la lumière, voir l'annexe en page 90).

#### *La naissance de la convention internationale du mètre*

Il fallut près de cinquante ans pour que s'impose dans le tissu agricole, artisanal et préindustriel français l'usage des nouvelles unités de mesure. De 1800 à 1840, il régna en France une grande confusion entre « les anciens systèmes de mesure » et le Système métrique. C'est au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle que commença à se manifester le besoin de disposer d'un système décimal de poids et mesures. Les Expositions universelles de Londres (1851 puis 1862) et de Paris (1855 et 1867), où se confrontèrent des produits originaires de nombreux pays, confirmèrent et amplifièrent ce besoin.

En 1867, un « Comité des poids et mesures et des monnaies » se constitua et adopta, parmi d'autres, la proposition suivante : « le Système métrique est parfaitement propre à être universellement adopté, en raison des principes scientifiques sur lesquels il est établi, de l'homogénéité qui règne dans toutes ses parties, de sa simplicité et de la facilité de ses applications dans les sciences, dans les arts, dans l'industrie et le commerce. »

Les Nations reconnaissaient ainsi, tacitement, au Système métrique le caractère d'un système universel de poids et mesures, dont les unités de longueur et de masse avaient été matérialisées par le Mètre et le Kilogramme des Archives de France.

#### *Une organisation internationale*

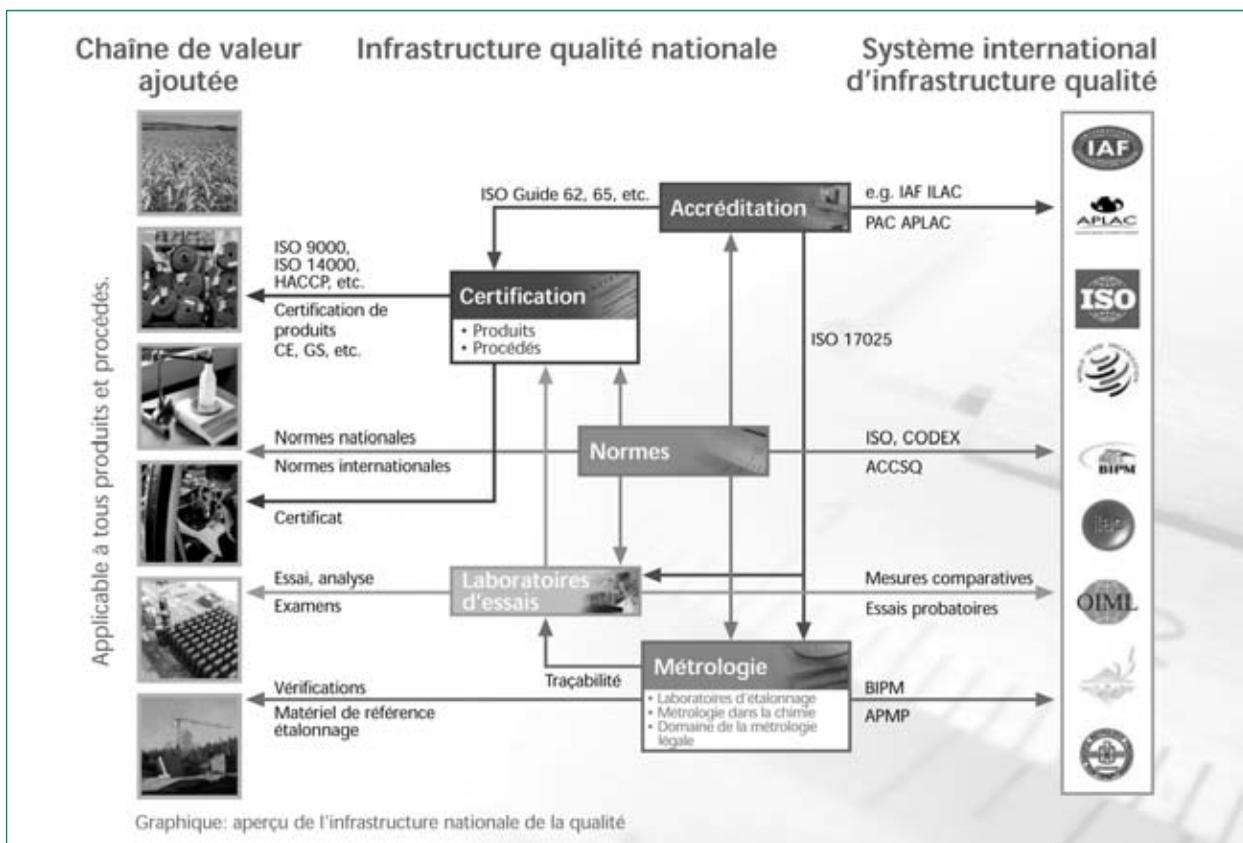
L'obligation de s'adresser à la France pour disposer de copies exactes des étalons risquait de compromettre l'unification souhaitée. Une Commission du Mètre fut donc créée en 1870, prélude à l'internationalisation du Système métrique.

Le 16 novembre 1869, le Gouvernement français envoyait aux États étrangers une invitation à se faire représenter au sein de cette Commission. Vingt-six pays acceptèrent cette invitation, dont dix appartenaient au continent américain (les États-Unis et des pays d'Amérique latine). Après deux années de travail, une quarantaine de résolutions furent adoptées, au rang desquelles figurent la confection des nouveaux prototypes métriques, leur comparaison aux étalons des Archives de France et la création d'un Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) ayant son siège au Pavillon de Breteuil à Sèvres (Département des Hauts-de-Seine). Une Convention du Mètre fut signée à Paris le 20 mai 1875 (signature par 17 États). Elle est toujours en vigueur, et les États membres (53 aujourd'hui) se réunissent au niveau diplomatique tous les 4 ans pour organiser la gestion du Système international d'unités (voir graphique 1).

### **Le réseau international de l'infrastructure qualité, support de la mondialisation**

Aujourd'hui, l'infrastructure qualité désigne l'ensemble des domaines d'activité couverts par les secteurs de la métrologie, de la normalisation et des essais, de la gestion de la qualité, de l'évaluation de la conformité, y compris la certification et l'accréditation. Cette appellation, formalisée par la PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt* – le laboratoire national de métrologie allemand), désigne un concept clef, indispensable pour comprendre le socle sur lequel repose le développement des échanges qui fondent la mondialisation.

L'infrastructure qualité œuvre en grande partie dans l'ombre. Les vis vont avec les boulons, les connexions des appareils électroménagers sont compatibles, les téléphones portables fonctionnent et le dosage des substances dans les médicaments est correct. L'infrastructure qualité tient le rôle du moteur, invisible mais indispensable, qui permet au monde économique de tourner. La métrologie est intime-



Graphique 1. Aperçu de l'infrastructure nationale de la qualité.

ment liée à toute activité humaine, qu'elle soit de nature scientifique, industrielle ou commerciale. Les échanges peuvent se faire grâce à elle, à l'échelle de la planète comme à l'échelle locale, dans une logique *plug and play*.

Chaque pays industrialisé dispose d'une infrastructure qualité plus ou moins pertinente, identifiée et coordonnée, au service des acteurs de la chaîne de valeur ajoutée du pays. L'État, en s'appuyant sur son infrastructure qualité, mène des politiques extérieures d'influence dans les pays en voie de développement, plus où moins définies, coordonnées et explicites, en vue de lui permettre de soutenir le développement de son industrie, d'étendre la zone d'influence de son commerce extérieur, et cela au service du développement durable de la planète.

En France, le Laboratoire national de métrologie et d'essais, le LNE, accompagne l'industrie française et se positionne actuellement dans certains pays comme la tête de réseaux des organismes et opérateurs de l'infrastructure qualité française, pour épauler ces pays dans la construction de leur propre infrastructure qualité, en vue de développer leur propre industrie.

## La réduction des incertitudes au service de l'industrie

### Les enjeux

Dans un contexte d'économie mondialisée, la métrologie est incontournable pour permettre le bon fonctionnement

de l'industrie. Pour garantir la fiabilité et la traçabilité des mesures, l'entreprise industrielle doit mettre en place une véritable gestion des moyens de mesure : il s'agit de la fonction métrologie. Lorsque cette fonction est bien réalisée, elle n'est pas « visible ». En revanche, l'exigence qu'elle requiert, dans la connaissance et la maîtrise des paramètres de conception influents, en fait un socle contribuant à la maîtrise du cœur de métier de l'entreprise industrielle.

Le champ d'utilisation de la métrologie dans l'industrie est très large puisque la plupart des secteurs y font appel. La métrologie industrielle s'est développée, pour l'essentiel, dans les laboratoires d'entreprises manufacturières ou au sein de grandes entreprises utilisatrices d'instruments de mesure. Elle s'est tout naturellement construite, dans un premier temps, autour des métiers de la physique (mécanique et électricité), afin d'y permettre une maîtrise des mesures réalisées dans les unités du Système International (SI) (et dans leurs multiples et sous multiples). Elle vise à fournir des moyens de mesure précis et fiables, qui permettent aux entreprises de mesurer et donc de contrôler leurs processus de fabrication.

Dans l'entreprise, la métrologie intervient tout au long de la vie d'un produit, de la recherche à la mise en service, en passant par la conception. C'est un outil indispensable dans les différentes phases d'élaboration du produit.

### L'expérience acquise

Aujourd'hui, la fonction métrologie est bien présente dans l'entreprise industrielle. Les notions de traçabilité

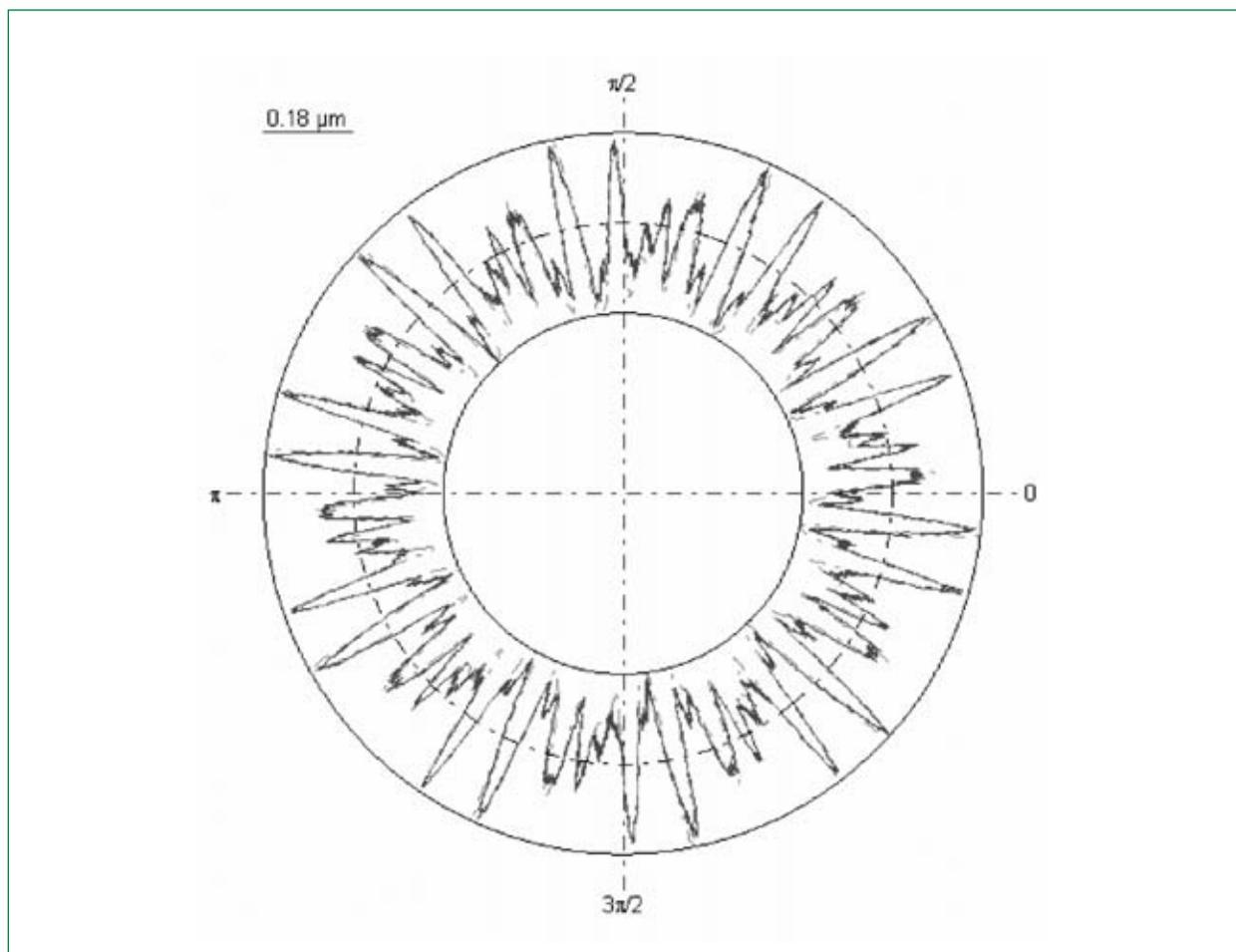


Figure 1. Relevé de profil sur étalon d'amplification à plusieurs motifs d'ondulation.

métrologique, de référence et d'incertitude  $\gamma$  sont établies. Les progrès réalisés dans les laboratoires nationaux de métrologie sont transférés aux entreprises et permettent d'aller toujours plus loin dans le développement des technologies de mesurage ou de maîtrise des incertitudes, qui seront ensuite mises à la disposition des utilisateurs. Ces progrès accompagnent l'évolution des technologies et participent à leur développement.

Les aléas (qu'ils soient naturels, liés à la production ou économiques) ont incité les décideurs à s'appuyer sur la réalisation d'essais, de mesures, d'expertises. Dans l'industrie lourde, on observe aujourd'hui une tendance de plus en plus marquée à s'appuyer sur des mesures reposant sur des modèles numériques (*montée en puissance des outils mathématiques, statistiques et de traitement du signal*). La prise en compte des incertitudes dans ces modèles devient une préoccupation globale, qui va bien au-delà des seules mesures physiques et touche à l'estimation de grandeurs, qui ne sont pas directement observables.

La maîtrise des outils de modélisation et de traitement des données devient un enjeu stratégique pour mener à bien, à moindre coût, des projets innovants dans les différents secteurs de l'industrie. La maîtrise des incertitudes, qui entrent en jeu dans ces modélisations, est déterminante pour hiérarchiser les variables d'influence

et, finalement, obtenir des critères de choix pertinents pour décider des actions à mener en vue d'atteindre les objectifs fixés.

A titre d'exemple, dans le monde automobile, la réduction de la consommation de carburant passe par une électronique de plus en plus élaborée, mais aussi et surtout par une maîtrise des jeux et des formes des pièces mobiles du moteur. Pour atteindre le niveau de performance fixé, le Laboratoire national de métrologie doit s'employer à réduire fortement les incertitudes pesant sur les étalons de transfert (en particulier, pour les étalons d'amplification destinés à étalonner les capteurs), et être capable d'apporter de nouvelles informations sur les étalons (étalons avec plusieurs longueurs d'onde *multi wave*), telles que l'analyse spectrale et le niveau d'amplitude d'un défaut pour une longueur d'onde donnée (demande typique de l'industrie dans les secteurs des roulements et de l'automobile) (voir figures 1 et 2).

Le Laboratoire national de métrologie doit également évaluer la qualité des algorithmes et des calculs, composants non négligeables de l'incertitude de mesure. Il doit mettre en place la structure et les outils d'aide à l'évaluation de ces logiciels, tout particulièrement à travers l'élaboration d'algorithmes, de logiciels de référence et de jeux de données étalon. Il utilise des jeux de données, appelés « *soft*

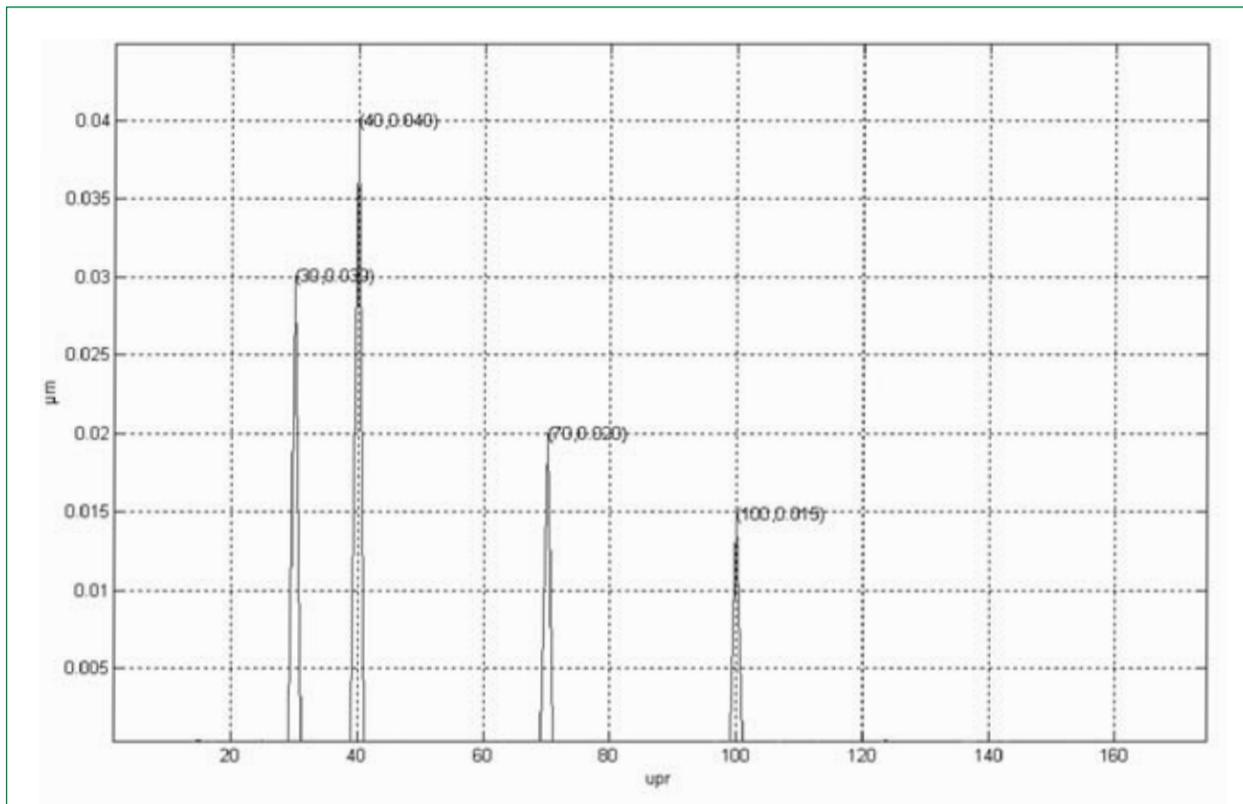


Figure 2. Amplitude des défauts constatés en fonction de la période spatiale.

gauge», qui sont, en quelque sorte, l'équivalent informatique des étalons matériels. Il doit bien sûr former les utilisateurs aux méthodes de vérification, à l'utilisation des logiciels et aux conditions de filtrage, ainsi qu'à la compréhension des normes...

### La réduction des incertitudes au service de la santé publique et de l'environnement

#### Les enjeux

L'un des objectifs principaux de la métrologie est d'apporter la confiance dans les résultats de mesures. Cette confiance s'établit en respectant et en mettant en œuvre deux concepts fondamentaux :

- ✓ la traçabilité métrologique ;
- ✓ et l'évaluation des incertitudes de mesure.

Comme nous l'avons déjà dit, mesurer, c'est comparer une grandeur inconnue à une référence dont la traçabilité est établie par rapport au système international d'unité.

La métrologie chimique et biologique est une science jeune, qui répond à la nécessité croissante d'effectuer des mesures de précision fiables et traçables dans des champs de plus en plus nombreux auxquels on ne songeait même pas il y a encore quelques années. Ces champs correspondent aux domaines prioritaires définis par l'État français ou l'Europe : principalement, les domaines de la santé et de l'environnement.

#### La transposition dans les domaines de la santé et de l'environnement

Si les concepts de traçabilité et d'incertitude sont déjà largement partagés et mis en œuvre dans les domaines de l'industrie et du commerce, ce n'est pas encore le cas dans les domaines de la santé et de l'environnement, où un travail de transposition est en cours dans les laboratoires nationaux de métrologie de la planète.

Dans le monde de la santé, le LNE travaille à l'amélioration de la qualité des mesures en vue de contribuer à un meilleur diagnostic médical et donc à une meilleure thérapie pour les patients, permettant ainsi de générer des économies pour la société.

En une période où les considérations économiques jouent un rôle primordial, la qualité des mesures redevient un facteur clef et constitue un vecteur de progrès sur lequel il est possible de s'appuyer pour progresser : le manque de confiance dans les résultats génère le développement de « faux positifs » (soigner un bien portant) ou de « faux négatifs » (ne pas soigner un malade), mais induit également la répétition d'analyses et rend difficile la comparaison des études cliniques et épidémiologiques, au plan national comme international.

Dans les domaines de l'environnement, la mise à disposition de références et la fiabilité dans le temps des mesures qu'apporte la métrologie, présentent un intérêt déterminant pour déceler les évolutions lentes de notre environnement.

On soulignera, en particulier, la nécessité de développer les techniques permettant aux différents pays de démontrer

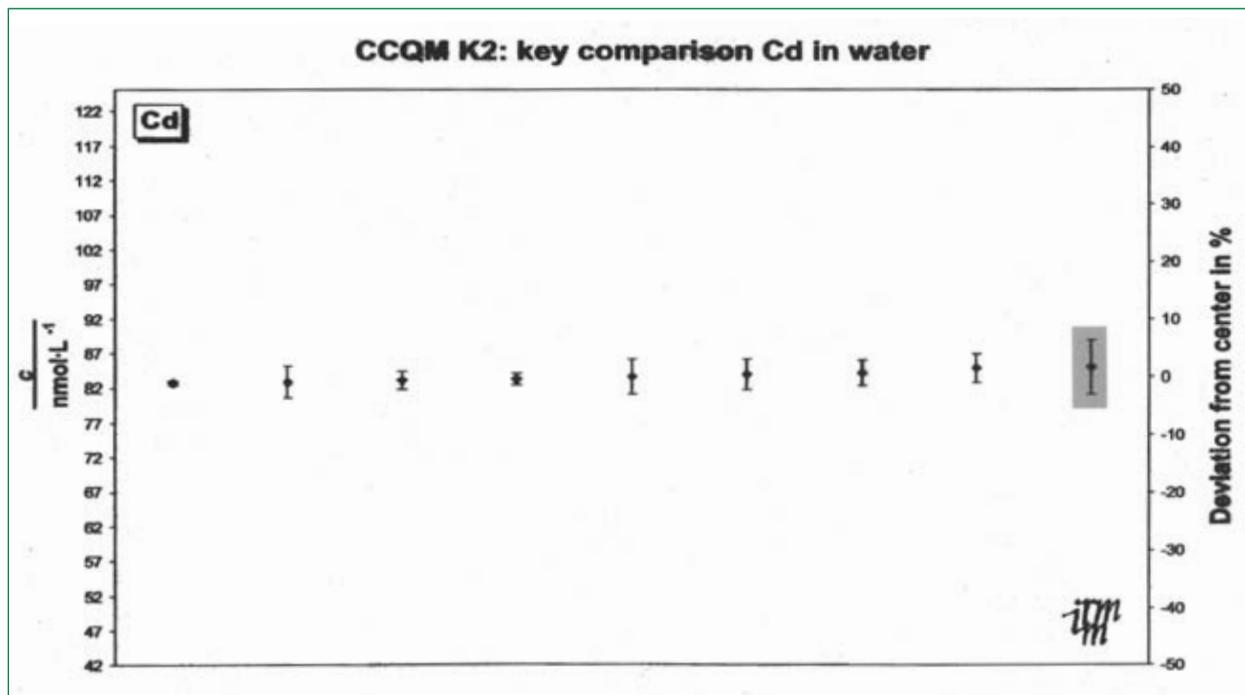


Figure 3. Le même travail a été réalisé pour environ 120 laboratoires de terrain, dans le cadre du programme IMEP (International Measurement Evaluation Program). Le résultat est restitué sur la figure 4 ci-contre.

la cohérence de leurs mesures avec celles effectuées dans les autres pays. Ce travail est indispensable pour accroître la pertinence des décisions politiques qui s'appuient sur ces différentes mesures pour répondre à des problématiques de santé et d'environnement qui, par nature, appellent un traitement à la fois global et local.

#### Quelques exemples dans le domaine de la santé publique.

Aujourd'hui, 60 à 70 % des décisions médicales sont prises sur la base du résultat d'un test de diagnostic *in vitro*. Les résultats des analyses en biologie médicale ne sont pas toujours traçables par rapport à des références reconnues au plan international. Les incertitudes de mesure ne sont pas toujours évaluées, ou *a contrario* s'avèrent trop élevées. En conséquence, les résultats sont souvent entachés d'un doute. D'un point de vue sanitaire, cette situation entraîne des prises de décisions médicales inappropriées. D'un point de vue économique, cette situation entraîne une multiplication des analyses, et donc des dépenses inutiles :

- ✓ Aux Etats-Unis, 25 à 30 % des dépenses de santé sont aujourd'hui dues à la répétition des analyses, à la prévention et à la détection des erreurs (15-30 milliards de dollars par an).
- ✓ En Allemagne, le coût de la répétition des analyses est de 1,5 milliard d'euros par an.

D'un point de vue scientifique, cette situation se traduit par un manque de données fiables pour permettre la réalisation d'études épidémiologiques et cliniques, et constitue donc un frein à la compréhension des pathologies.

Afin de fiabiliser les analyses médicales, des travaux menés entre les hôpitaux et le LNE ont conduit à développer en commun une méthode d'évaluation des incertitudes pesant sur les résultats des analyses réalisées en biologie médicale (cette méthode a été reprise par le COFRAC et a fait l'objet d'une publication).

Mentionnons par ailleurs la fourniture de méthodes de référence et de matériaux de référence certifiés pour ce qui concerne des molécules d'intérêt biologique, comme le glucose et l'hémoglobine glyquée, en tant qu'indicateurs du diabète (de type II), ou la créatinine en tant que marqueur de l'insuffisance rénale.

En matière de fiabilisation des analyses microbiologiques, on peut citer par exemple :

- ✓ la mise au point d'une procédure de vérification de la température des thermocycleurs utilisés dans le cadre des analyses par PCR (*Polymerase Chain Reaction*) ;
- ✓ la validation métrologique d'un MRC (*Medical Research Council*) de légionelle ;
- ✓ la mise au point de méthodes de référence intéressant d'autres bactéries d'intérêt public.

#### Exemples dans le domaine de l'environnement.

##### Le cadmium dans l'eau :

Dans le cadre des travaux menés au BIPM, une comparaison internationale (comparaison clef), associant différents laboratoires nationaux de métrologie, a été réalisée, entre 1998 et 1999, pour déterminer la concentration du cadmium dans l'eau de rivière aux Etats-Unis (2). Il s'agit, bien sûr, de la mise en œuvre d'une méthode primaire. On observe sur le graphe une

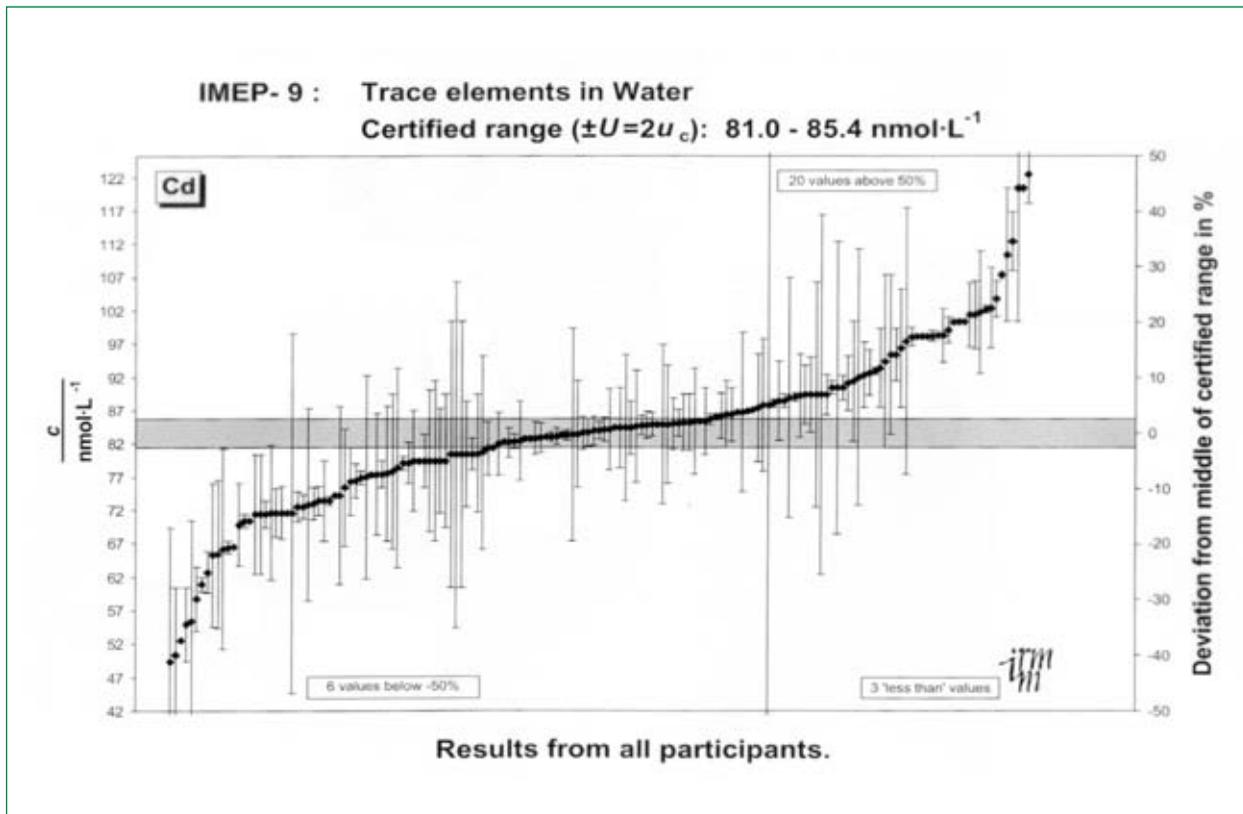


Figure 4. La zone grisée rappelle la répartition des valeurs des laboratoires de métrologie présentées dans la figure précédente.

Nous observons que 20 laboratoires obtiennent des valeurs supérieures de plus de 50 % et 6 laboratoires obtiennent des valeurs inférieures de plus de 50 %.

On voit clairement l'apport des valeurs de référence établies par les LNM pour donner du sens aux résultats de mesure, et les progrès à faire pour disposer de mesures fiables et, par voie de conséquence, accroître la confiance dans les résultats expérimentaux obtenus.

« justesse » établie à 1 ou 2 % près et une incertitude de mesure variant de 1 à 5 %.

Réajusté en 2008 dans la directive cadre Eau (DCE), le seuil de qualité environnemental pour le cadmium est de 0.1 µg/l. L'échantillon examiné ici correspond à une valeur de 10 µg/l, soit une très forte pollution (facteur 100) (voir figures 3 et 4).

#### Le nickel dans l'air :

Actuellement, la pollution des particules atmosphériques est suivie à travers quelques paramètres, dont les particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm. Nous présentons ici les résultats de mesures de particules d'origine urbaine comportant du nickel.

Une comparaison a eu lieu à l'initiative du Laboratoire central de la qualité de l'air (3) en 2007 en vue d'harmoniser les pratiques analytiques des AASQA (Associations agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air). Nous avons comparé une solution étalon préparée par le LNE (résultant de la minéralisation de filtres impactés par des particules atmosphériques urbaines PM10) aux valeurs des différents laboratoires AASQA. Les valeurs de référence LNE ont été

obtenues par la méthode primaire de dilution isotopique et ICP/MS (voir figure 5).

Il est intéressant de comparer ces données aux exigences réglementaires qui évoluent clairement dans le sens d'un abaissement des seuils.

Ainsi pour l'ensemble des particules mesurées par la méthode des PM10 en milieu industriel, la directive 1999/30/CE du 22 avril 1999 fixe les moyennes annuelles limites à 40 µg/m<sup>3</sup> en 2005. Ce seuil (4) sera abaissé à 20 µg/m<sup>3</sup> en 2010.

Pour le nickel, la valeur cible définie dans la directive précitée est de 20 ng/m<sup>3</sup>.

Les valeurs en milieu industriel sont 10 fois supérieures aux valeurs observées dans le milieu urbain de notre étude. On peut donc extrapoler une valeur cible du nickel en milieu urbain de l'ordre de 2 ng/m<sup>3</sup>.

L'évolution à la baisse des seuils réglementaires nécessite un gros travail d'amélioration de la qualité des résultats de mesure. En effet, si demain le seuil pour le nickel passait à 1 ng/m<sup>3</sup>, on perçoit tout de suite, par cet exemple, l'intérêt pour un décideur de disposer de mesures fiables.

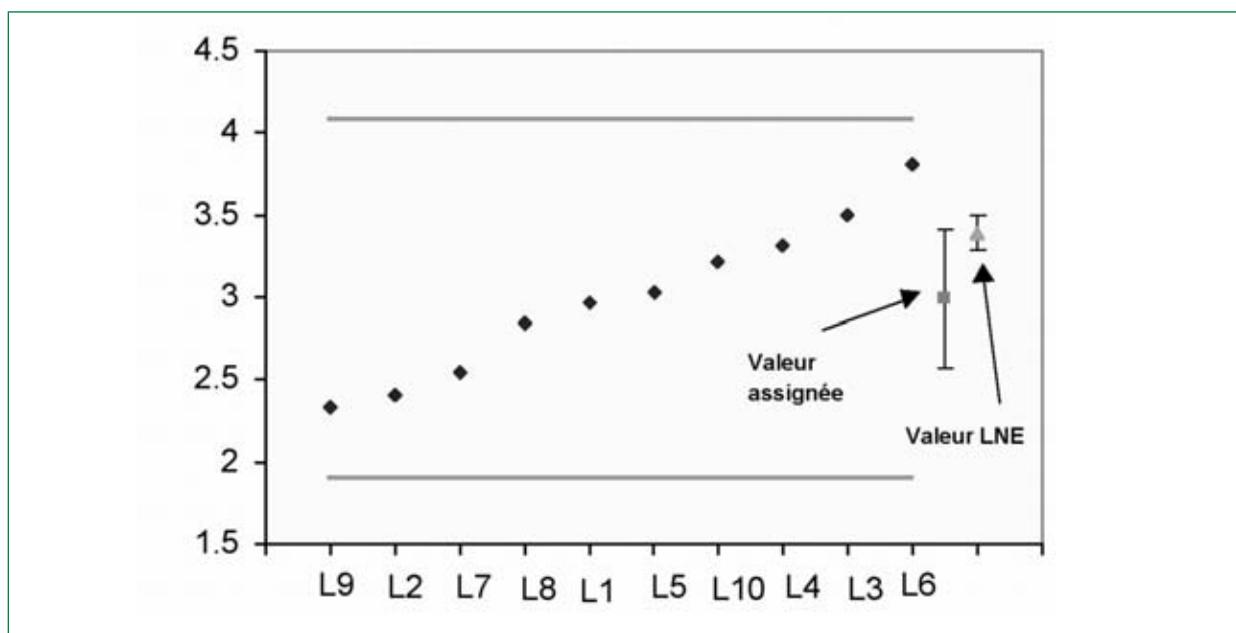


Figure 5. Particules atmosphériques LCSQA.

**7 unités de base :**

<b>Mètre</b>	<b>m</b>	Longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant 1/299 792 458 de seconde.
<b>Kilogramme</b>	<b>kg</b>	Masse du prototype en platine iridié qui a été sanctionné par la Conférence Générale des Poids et Mesures tenue à Paris en 1889 et qui est déposé au Bureau International des Poids et Mesures.
<b>Seconde</b>	<b>s</b>	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.
<b>Ampère</b>	<b>A</b>	Intensité d'un courant électrique 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 dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force de $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur.
<b>Kelvin</b>	<b>K</b>	Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.
<b>Mole</b>	<b>mol</b>	Quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12.
<b>Candela</b>	<b>cd</b>	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

Tableau 1. Le système SI d'unités de mesure en 2009.

Toutes les autres unités habituellement employées sont des unités dérivées résultant de la composition des unités de base.

**Annexe : le SI, rappel**

Le système international (SI) est un système d'unités fondé sur le Système international de grandeurs, qui comporte les noms et symboles des unités, une série de préfixes

avec leurs noms et symboles, ainsi que des règles pour leur emploi. Il a été adopté par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM).

Le SI est fondé sur les sept grandeurs de base. Les noms et les symboles des unités de base sont mentionnés dans le tableau 1 ci-dessus.

**Notes**

\* Directeur général du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

\*\* Directeur stratégique de la métrologie scientifique et industrielle au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

(1) Pour pouvoir comparer des mesures réalisées en différents lieux, il faut préciser la température du corps mesuré. La température de 20°C

est, dans ce cas, la température de référence retenue par convention pour réaliser la comparaison.

(2) Une comparaison analogue est actuellement en cours pour l'Europe.

(3) Qui regroupe l'INERIS, le LNE et l'Ecole nationale supérieure des techniques industrielles et des Mines de Douai.

(4) Ces seuils sont assortis d'une incertitude calculée en % de la valeur limite (indique une marge de dépassement). Cette tolérance décroît de manière linéaire chaque année à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2001 jusqu'au 1<sup>er</sup> janvier 2010.