

Académie des technologies

Rapport du Groupe de travail sur la métrologie du futur

Animateurs

Christian Bordé et Jean Kovalevsky

Membres

Jean-Pierre Causse
Luc Érard (Bureau national de métrologie)
Jean Chavaudra (Institut Gustave Roussy)
Pierre Fillet
Marc Himbert (Conservatoire national des arts et métiers)
Pierre Perrier

Consultants et rédacteurs

S. Avrillier (Professeur à l'Université Paris XIII)
J. Bastie (BNM-INM, CNAM)
G. Bonnier (Professeur à l'Université Paris XIII)
B. Chauvenet (BNM-LNHB, CEA)
J. David (Enseignant ENSAM)
G. Genevès (Ingénieur au BNM-LNE/LAMA)
B. Grosswendt (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Allemagne)
A.-L. Himbert (Collège de France)
R. Husse (Laboratoire national d'essais)
M. Lecollinet (Maître de conférences au CNAM)
A. Mahfoudi (CEREP)
J.-F. Magana (Directeur du Bureau international de métrologie légale)
J.-M. Mermet (Directeur de recherches, Université Lyon 1)
L. Monnerie (ancien Professeur à l'ESPCI)
C. Pernelle (Professeur au CNAM)
C. Perruchet (Union technique de l'automobile, du motocycle et du cycle)
P. Pihet (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire)
F. Piquemal (Ingénieur au BNM-LNE/LAMA)
M. Priel (Laboratoire national d'essais)
A. Rannou (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire)
A. Vassault (Hôpital Necker-Enfants malades)

PLAN

Résumé	4
1-Introduction	5
2- Bases de la métrologie présente et future	6
2- Le mètre, unité SI de longueur et de distance	
3- La seconde, unité SI de temps et les horloges atomiques	
4- Le kilogramme, unité SI de masse et les balances modernes	
5- Le kelvin, unité SI de température et la thermométrie	
6- L'ampère, unité SI de courant électrique et les mesures électriques	
7- La mole, unité SI de quantité de matière et le nombre d'Avogadro	
8- La candela, unité SI d'intensité lumineuse et les mesures en photométrie et radiométrie	
9- Les unités dérivées	
10- Comment susciter les futurs développements instrumentaux et des retombées technologiques à partir de la métrologie fondamentale ?	
3- Métrologie et industrie	12
4- Métrologie en chimie	14
5- Métrologie et santé	17
• Métrologie des rayonnements ionisants	
• Métrologie pour les analyses de biologie médicale	
• Métrologie pour l'optique biomédicale	
• Conclusion	
6- Métrologie dans le domaine de l'environnement	22
7- Aspects légaux et juridiques de la métrologie	24
• Les bases juridiques	
• La responsabilité de l'État	
8- Impact économique de la métrologie	25
9-Coopération internationale	26
10- La formation en métrologie	27
• Des métrologues aux responsabilités très variées	

- Des compétences complémentaires associées à une spécialité de base
- Vers l'exigence d'une véritable culture métrologique

11- Recommandations.....30

Bibliographie.....33

Annexes

METR-1 : Le Bureau national de métrologie.....	34
METR-2 :La Convention du mètre.....	36
METR-3 : La nanométrie.....	38
METR-4 : Point sur les constructeurs de balances et de masses étalons en France.....	40
METR-5 : Métrologie quantique en électricité..... ;	42
METR-6 : Évolution de l'instrumentation dans le domaine de la mesure des rayonnements optiques.....	44
INDUS-1 : Assurance qualité.....	45
CHIMIE-1 : Métrologie et échantillonnage.....	48
SANTÉ-1 : Micro et nano-dosimétrie	50
SANTÉ-2 : Importance économique des analyses de biologie médicale.....	52
ENVIR-1 : Les gaz dans l'atmosphère.....	53
ÉCO-1 : Études de l'impact économique de la métrologie.....	55
ÉCO-2 : Rapport demandé par la Commission européenne.....	57
INTER-1 : Coopération internationale en Europe.....	60
INTER-2 : L'Arrangement de reconnaissance mutuelle.....	63

Résumé du rapport sur la métrologie du futur

En 1996, le rapport Académie des Sciences-CADAS intitulé “*Quelle place pour la métrologie en France à l'aube du XXIe siècle ?*” présentait l'état de la métrologie en France vers 1995. Mais depuis huit ans, la métrologie a ajouté à son utilité industrielle et commerciale une dimension sociétale nouvelle, ce qui justifie ce nouveau rapport.

On rappelle d'abord comment la métrologie garantit la qualité des mesures grâce à leur traçabilité vers des références nationales, dont l'équivalence internationale est assurée par des comparaisons avec le BIPM et les autres laboratoires nationaux de métrologie. Tout en étant toujours fondamentalement liée à l'industrie et au commerce, la métrologie doit aussi contribuer aussi, et de plus en plus, à satisfaire les besoins de la population, notamment dans les domaines de l'alimentation, de la sécurité, de la santé et de l'environnement. La métrologie, c'est donc aussi un effort ininterrompu, pour s'adapter aux besoins croissants d'exactitude et d'extension vers de nouveaux domaines d'application.

Dans un premier chapitre, on présente les unités de base du système international d'unités (SI). On indique à chaque fois ce qui est nouveau et quelle serait l'évolution prévisible dans le futur avec les applications attendues, impliquant généralement de grands efforts de R et D. Il apparaît comme étant particulièrement regrettable qu'à la qualité de la métrologie fondamentale en France ne corresponde ni un développement en aval des industries des appareils de mesure, ni une politique scientifique coordonnée en amont de la métrologie.

Puis, les diverses applications de la métrologie sont passées en revue en décrivant l'état actuel, les besoins présents et futurs et les travaux à entreprendre dès maintenant pour les satisfaire. Pour l'industrie, les nouvelles technologies, les sous-traitances, les normes de plus en plus sévères, l'obligation de qualité et l'établissement de la conformité des produits sont demandeurs de métrologie de plus en plus exacte. La chimie, où la métrologie a été trop longtemps négligée, a ses difficultés propres liées aux prélèvements, à la diversité des éléments, à l'insuffisance des matériaux de référence certifiés et, surtout, au manque d'esprit métrologique de la profession. Dans le domaine de la santé, qu'il s'agisse des effets des rayonnements ionisants ou des analyses biologiques, le gros problème est que même les exactitudes en métrologie primaire et la qualité ultime des matériaux de référence atteignent à peine les besoins courants de la thérapie ou de la sécurité. Enfin, pour l'environnement, les domaines à considérer sont très variés et, relevant essentiellement de la chimie, souffrent des mêmes difficultés.

Les chapitres suivants traitent des bases légales de la métrologie et de la responsabilité de l'État, de l'impact très positif de la métrologie sur l'économie, de la coopération internationale, notamment en matière de commerce international grâce à l'Arrangement de reconnaissance mutuelle et, enfin, de la formation en métrologie.

Les recommandations sont nombreuses parce que, les applications de la métrologie étant très diversifiées, il a fallu mettre en évidence des problèmes spécifiques à chacun des domaines, en plus des recommandations générales sur la politique à mener en France pour la métrologie fondamentale, primaire et appliquée.

Quinze annexes développent des points importants rencontrés dans le cours du rapport ou présentent des cas exemplaires destinés à illustrer le propos général.

RAPPORT SUR LA MÉTROLOGIE DU FUTUR

Avant-propos

En 1996, le rapport Académie des Sciences-CADAS intitulé “*Quelle place pour la métrologie en France à l'aube du XXIe siècle ?*” présentait l'état de la métrologie en France vers 1995. Les conclusions de ce rapport ont été partiellement reprises par le Ministre chargé de l'industrie et certains défauts marquants ont pu être partiellement corrigés. Toutefois, huit ans après, d'une manière difficilement prévisible, la métrologie mondiale a subi ce qu'on peut appeler une révolution.

Celle-ci est due avant tout à la prise de conscience de l'importance de la traçabilité et de l'équivalence des mesures dans les domaines de la chimie et des biotechnologies avec des applications directes à la sécurité, la santé, l'environnement, les produits agroalimentaires, la pharmacologie, la lutte contre les fraudes et le dopage, la réduction des risques naturels ou anthropiques, etc... Par ailleurs, de nouvelles applications industrielles sont apparues, notamment en micro- et nanotechnologies, dans l'analyse des échantillons biologiques, dans le domaine des très basses températures et en soutien de la caractérisation des matériaux nouveaux. Ces circonstances n'ont pas pour autant diminué les besoins métrologiques des domaines plus classiques décrits dans le rapport de 1996 pour lesquels les besoins d'exactitude sont de plus en plus exigeants. De plus, les progrès foudroyants de la science a bouleversé le paysage de la métrologie, ce qui justifie aussi ce nouveau rapport.

En résumé, depuis huit ans, la métrologie a ajouté à son utilité industrielle et commerciale croissante une dimension sociétale nouvelle.

Par ailleurs, il y a eu une évolution de la métrologie au niveau mondial à la suite de la signature par plus de cinquante Pays ou entités économiques d'un “*Arrangement de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie*” . La métrologie s'est mondialisée et, parallèlement, les régions (cinq dans le monde) se sont organisées et prennent en charge l'approbation des comparaisons et les déclarations d'équivalence des laboratoires.

Ainsi, faut-il considérer ce nouveau rapport non pas comme un suivi des actions générées par le rapport de 1996, mais comme étant son extension pour les dix années à venir afin de tenir compte des nombreux besoins nouveaux qui sont apparus ces dernières années. **Il s'adresse d'abord aux décideurs ministériels qui décident des moyens destinés à la recherche et aux activités métrologiques, ce qui est de la responsabilité de l'État (voir chapitre 7). Mais il s'adresse aussi à tous les partenaires et utilisateurs de la métrologie en France : établissements de recherche, industriels, services de santé et de sécurité, etc...**

Pour faciliter la lecture du rapport, on a essayé de bien séparer les recommandations d'ordre politique ou structurel et les considérations générales qui les justifient placés dans le texte principal, des éléments plus techniques, parfois plus ingrates, mises dans les annexes.

1- Introduction

La métrologie est une base invisible, mais néanmoins essentielle, des activités humaines, car la mesure est ce qui nous permet de comprendre et d'appréhender le monde, d'agir dans tous les domaines où la technique intervient. Elle garantit la **qualité de la mesure** et, par suite, engendre la confiance en celle-ci. Mais il faut aussi communiquer les résultats des mesures de telle manière qu'ils soient compris et utilisables correctement et sans ambiguïté par tous. Pour cela, il est nécessaire que ces mesures se rapportent aux **mêmes références** et cela, par suite de la mondialisation, quels que soient les Pays. De plus, le résultat brut d'une mesure n'a de sens que s'il est accompagné d'une indication sur la fourchette dans laquelle il y a une probabilité importante que se trouve la vraie valeur (96%, ce qui correspond à deux écarts types). Dans le langage de la métrologie, cela s'appelle **l'incertitude**. Cette notion semble, au premier abord, simple, mais sa mise en œuvre est délicate, et il faudrait faire un effort important d'enseignement auprès des ingénieurs et techniciens dans toutes les branches d'activité. Le document de base est le *“Guide to the Expression of Uncertainty in measurement”*. Le livre de C. Perruchet et M. Priel, *“Estimer l'incertitude”*, présente la pratique de cette activité.

L'équivalence des références est assurée dans la métrologie moderne par les laboratoires nationaux de métrologie. En France, ce rôle est assuré par le Bureau national de métrologie, BNM, qui va, en 2005, être absorbé par le Laboratoire National d'Essais (voir annexe METR-1). Ces laboratoires sont reliés au réseau d'équivalences internationales établi sous l'égide du Bureau international des poids et mesures (BIPM) et des organisations régionales de métrologie (en Europe, EUROMET, annexe INTER-2) grâce aux nombreuses comparaisons internationales d'étalons et de matériaux de référence. Il faut aussi permettre à tout utilisateur de certifier que ses mesures sont effectuées dans les mêmes conditions que partout ailleurs. Cela est assuré par les chaînes d'étalonnage qui relient, par les laboratoires accrédités (en France par le Comité français d'accréditation, COFRAC) la traçabilité des mesures vers les laboratoires nationaux de métrologie. Cette chaîne est décrite dans le rapport de 1996. Aussi cet aspect ne sera pas traité dans le présent texte.

Présente partout, la métrologie doit aussi être un effort ininterrompu, pour s'adapter aux services qu'on attend d'elle. Tout en étant toujours fondamentalement liée à l'industrie et au commerce, c'est-à-dire à l'économie d'un pays, la métrologie doit aussi contribuer aussi, et de plus en plus, à satisfaire les besoins de la population, notamment dans les domaines de l'alimentation, de la sécurité, de la santé et de l'environnement. En cela elle constitue un **service fondamental à la société en général**. Mais ces applications sont souvent nouvelles. Aussi, pour pouvoir jouer ce rôle, il est indispensable que ses méthodes, que ses instruments et ses étalons évoluent et que de nouveaux soient créés. Tout cela implique un effort important et soutenu de recherche et développement (Recommandation 1).

En effet, la métrologie est conduite à appliquer les résultats scientifiques les plus récents et dans des domaines les plus divers, afin d'atteindre les exactitudes des mesures les meilleures dans tous les domaines. C'est pourquoi, tout programme national dans le domaine de la métrologie doit comprendre une part importante de recherche fondamentale et appliquée avec des objectifs bien ciblés vers la conception et la réalisation de nouveaux étalons et de nouvelles méthodes de mesure. C'est ce que nous présentons dans le chapitre 2.

En France, le BNM est au sommet du dispositif national de métrologie, ce qui devrait impliquer une pérennité que ne lui assure pas son statut actuel. L'annexe METR-1 présente les désavantages de cette situation. Les conditions nécessaires à un fonctionnement souhaitable dans son nouvel environnement sont données dans la recommandation 10.

2 – Bases de la métrologie présente et future

La métrologie est, d'après la définition du “*Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie*”, la **science de la mesure**. Qui dit mesure, dit comparaison avec des réalisations d'unités. Afin de s'assurer que les mesures sont effectuées de façon comparable dans le monde entier, il faut que les mêmes unités soient utilisées partout. C'est avec cet objectif qu'a été signée, en 1875, la **Convention du Mètre** présentée dans l'annexe METR-2. C'est en 1961, après d'autres initiatives, que la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a établi un système cohérent appelé **Système international d'unités** (SI) qui comprend sept unités de base qui sont détaillées ci-dessous. Il comprend aussi un grand nombre d'unités dérivées qui sont reliées entre elles et avec les unités de base par leurs définitions. Elles ont généralement des noms spéciaux tels que le hertz ($\text{Hz}=\text{s}^{-1}$) pour la fréquence ou le newton ($\text{N}=\text{m kg s}^{-2}$) pour la force. On trouvera dans le fascicule “*Étalons et unités de mesure*” édité par le BNM, les définitions et les procédures de réalisation des unités de base et dérivées par le BNM.

Si la structure du SI n'a pas changé, il n'en est pas de même des définitions des unités de base qui subissent le contrecoup de l'évolution rapide des découvertes de la physique et des avancées technologiques. Inversement la mise en pratique de nouvelles définitions suscite le développement d'une instrumentation d'avant garde. Il en sera de même dans l'avenir prévisible et probablement proche.

Dans l'expression “Science de la mesure”, il y a le mot **Science**. Aussi, dans le cadre de la convention du mètre, la France se doit de contribuer à la recherche et aux développements concernant les nouveaux étalons. La France s'acquitte plutôt bien de ce devoir en particulier grâce au BNM, aux grands Établissements et au CNRS, mais ce potentiel n'est généralement pas transformé dans notre pays en une instrumentation commerciale et accessible au plus grand nombre. Nous allons montrer sur quelques exemples que la très haute technologie est bien développée en France pour ce domaine dans les laboratoires universitaires ou dans quelques laboratoires nationaux de métrologie mais n'est pas correctement transférée dans l'industrie. Nous présentons ces réflexions en suivant le cadre logique et structuré des unités de base du SI et identifierons les technologies émergentes pour la métrologie du futur afin d'aider à définir une stratégie de développement de l'instrumentation de pointe.

1- Le mètre, unité SI de longueur et les mesures de longueur et de distance

Le lien direct entre la définition d'une unité de base, sa mise en œuvre pratique et une découverte scientifique majeure, est bien illustré dans le cas du mètre et de sa redéfinition à partir des progrès technologiques des sources laser. C'est l'archétype d'une démarche qui servira vraisemblablement de modèle à une redéfinition des autres unités.

Le mètre est la première unité pour laquelle une nouvelle définition s'est imposée à partir d'une constante fondamentale et des progrès de la physique dans la deuxième moitié du XXe

siècle. La mesure des longueurs par interférométrie et la définition du mètre à partir d'une longueur d'onde étalon (auparavant fournie par la lampe à Krypton) ont basculé dans cette direction avec la découverte des lasers en 1959. C'est surtout l'apparition des méthodes de spectroscopie sous-Doppler et en particulier la spectroscopie d'absorption saturée en 1969 qui ont fait des lasers des sources de fréquence optique stable et reproductible. L'autre révolution a été la technique des diodes MIM qui a permis d'en faire la mesure directe à partir de l'horloge à césum. Partant de là, la vitesse de la lumière a pu être mesurée avec une incertitude suffisamment faible et la CGPM en a fixé la valeur, rattachant ainsi le mètre à la seconde. Ceci implique toute une procédure de mise en pratique de la définition à partir de longueurs d'ondes de lasers asservis sur des raies atomiques et moléculaires recommandées. La France a été un berceau du développement des lasers stabilisés en fréquence. Ce potentiel n'a pas été repris sur le plan industriel et aujourd'hui nous devons importer nos sources pour les applications industrielles.

Nous n'avons pas davantage développé l'instrumentation pour les mesures de dimensions intermédiaires c'est-à-dire à l'échelle d'une habitation ou d'un véhicule. La télémétrie a été longtemps développée en France dans le domaine militaire, mais n'a pas su déboucher sur le civil, alors que de nombreux senseurs optiques ou acoustiques sont vendus par des firmes étrangères. La mesure des très grandes distances (Terre-Lune, poursuite de satellites) est l'apanage de l'Observatoire de la côte d'azur grâce à une grande maîtrise de la datation des impulsions laser que l'on retrouve dans les transferts de temps par lien optique (T2L2). Cette technologie trouvera peut-être une application à la navigation interplanétaire dans l'avenir. À l'autre extrémité de l'échelle, alors que la nanotechnologie est en plein essor et constitue un des domaines les plus actifs du développement industriel (Voir le rapport "Nanosciences, nanotechnologies"), la nanométrie est encore embryonnaire et reste à développer dans notre pays, même au niveau de la recherche (voir annexe METR-3 et la recommandation 6).

À l'avenir, les horloges optiques (voir le paragraphe suivant) devraient peu à peu supplanter les lasers asservis par absorption saturée de l'iode ou d'autres molécules pour délivrer une longueur d'onde contrôlée. Il est aussi possible que le mètre soit obtenu localement par asservissement de fréquence d'un laser sur une référence temporelle obtenue par transfert de temps à partir d'horloges primaires sur Terre ou dans l'espace, d'une transmission par fibres ou à partir de satellites et de peignes lasers femtosecondes. De nouveaux rendez-vous technologiques entre recherche, développement et industrie sont donc à prévoir dans ce domaine.

La seconde, unité SI de temps et les horloges atomiques

La mesure du temps est à la pointe de la métrologie: l'exactitude des horloges atomiques gagne un facteur n tous les dix ans. Grâce à ce très haut niveau d'exactitude, elle tire vers le haut toutes les autres mesures qui se ramènent le plus souvent à une mesure de temps ou de fréquence. Elle s'enracine dans la physique atomique la plus avancée (atomes froids) mais a aussi des applications au quotidien et en particulier à la navigation (GPS), enfin les implications philosophiques liées à la notion de temps participent également aux motivations pour cette course en avant. Les équipes françaises du BNM-SYRTE à l'Observatoire de Paris et du Laboratoire Kastler-Brossel ont fait œuvre de pionnier dans l'utilisation des atomes froids pour la réalisation d'horloges sous forme de fontaines atomiques. Avec une avance de deux ans sur les équipes américaines, elles ont réussi à réaliser une horloge spatiale à atomes froids (PHARAO) dans le cadre d'un projet de l'Agence spatiale européenne sur la station

internationale (ACES). Signalons aussi l'importance des résonateurs cryogéniques australiens pour la stabilité à court terme des futures horloges.

Parmi les révolutions récentes citons les horloges optiques qui, associées aux peignes lasers femtosecondes, permettront de compter mieux et plus vite et ont de bonnes chances de supplanter les horloges micro-ondes à l'avenir. Ces systèmes de comptage femtosecondes permettant de comparer directement les fréquences optiques et micro-ondes existent en deux exemplaires dans les laboratoires français, mais sont déjà commercialisés par les allemands. La France a les meilleures équipes de recherche dans ce domaine, mais nous n'avons pas été en mesure de commercialiser la moindre horloge atomique même pour les applications défense et aujourd'hui nous n'avons pas d'horloge pour le projet Galileo.

Les futures redéfinitions possibles de la seconde constituent un débat ouvert : le rubidium a des avantages sur le césum; l'hydrogène séduit beaucoup de physiciens métrologues; la constante de Rydberg et la masse de l'électron permettront peut-être un jour de rattacher la seconde à une constante fondamentale si la théorie fait assez de progrès. Y aura-t-il pour la seconde comme pour le mètre une définition universelle assortie d'une mise en pratique et de réalisations secondaires ? La compétition reste acharnée entre les atomes neutres (en vol libre ou confinés dans un réseau de lumière pour bénéficier de l'effet Lamb-Dicke) et les ions piégés. La France est notoirement presque totalement absente de la technologie des horloges à ions piégés réservée aux Américains et aux Allemands. Finalement quel sera le rôle du spatial pour comparer les horloges et distribuer le temps ? Serons-nous capables de transformer l'essai que constitue PHARAO/ACES en une réussite industrielle ? Qui seront les maîtres du temps dans l'avenir ?

Le kilogramme, unité SI de masse et les balances modernes

Tout le monde s'accorde aujourd'hui pour accepter l'idée que la masse du kilogramme étalon, invariable par définition, a en fait dérivé de plusieurs dizaines de microgrammes (c'est-à-dire quelque 10^{-8} en valeur relative) et pour dire que tous les efforts doivent être menés pour le remplacer dans son rôle de définition (recommandation de la CGPM). Plusieurs voies ont été explorées. Les deux plus sérieuses consistent en une mesure de h/M par des mesures de fréquence ou de temps. Pour la première, fondée sur l'interférométrie atomique, M est une masse atomique M_{at} . Il faut donc ensuite faire le lien avec l'échelle macroscopique : réalisation d'un objet dont le nombre d'atomes est connu et dont la masse peut être comparée à celle du kilogramme étalon (ceci revient à déterminer le nombre d'Avogadro, voir plus loin). Cette deuxième étape est pour l'instant la plus délicate et est plafonnée au niveau de 10^{-6} . Elle a de plus l'inconvénient majeur de ne pas permettre une mise en pratique commode et universelle de la nouvelle définition.

La deuxième voie, qui semble aujourd'hui la plus prometteuse, est celle du kilogramme "électrique" pour laquelle M est directement la masse du kilogramme étalon M_K . Le kilogramme "électrique" est né avec la balance du watt, suggérée par Kibble en 1975, qui, en une (version BIPM) ou deux étapes, réalise la comparaison directe entre un watt mécanique, réalisé par le déplacement d'une masse dans un champ gravitationnel (celui de la Terre) ou un champ d'inertie et un watt électrique, réalisé par la combinaison des effets Josephson et Hall quantique. Cette méthode mise en œuvre il y a plus de 20 ans aux U.S.A. et en Angleterre a démontré qu'elle était capable d'atteindre un niveau d'incertitude compatible avec celui du kilogramme actuel à savoir quelque 10^{-8} . Deux nouvelles réalisations sont en cours de montage et d'évaluation, l'une en Suisse, l'autre encore plus récente en France. D'autres

programmes suivront très probablement. Selon toute vraisemblance cet effort débouchera dans peu d'années sur la possibilité de suivre l'évolution du kilogramme actuel et dans un deuxième temps sur la redéfinition de ce kilogramme en fixant la constante de Planck. Cette évolution probable est aussi la plus souhaitable sur le plan conceptuel et théorique. Nous ne pouvons que l'encourager très fortement. De plus, les futures balances ont toutes les chances d'être des versions simplifiées de la balance du watt. En ce qui concerne la situation présente et dans un proche avenir, voir l'annexe METR-4.

Le kelvin, unité SI de température et la thermométrie

La mesure de la température thermodynamique requiert un instrument absolu qui est très difficile à mettre en œuvre, c'est pourquoi l'échelle internationale de température EIT90 utilise un ensemble de points fixes et des instruments d'interpolation. Ce domaine est très bien maîtrisé au BNM-INM. Un champ de recherche actif est celui des très basses et des très hautes températures. Dans le premier cas, l'équipe du BNM-INM a réalisé un thermomètre cryoacoustique unique au monde utilisant le deuxième son dans l'hélium liquide et dans le deuxième cas le développement de points fixes utilisant des eutectiques est en bonne voie.

Ici encore la définition actuelle de l'unité, fondée sur le point triple de l'eau, pourrait évoluer si la constante de Boltzmann pouvait être déterminée avec une exactitude suffisante. Plusieurs méthodes sont en cours d'évaluation (puissance de bruit électrique, mesure d'une largeur Doppler, radiométrie du corps noir) et pourraient déboucher sur de nouvelles technologies de thermométrie absolue.

L'ampère, unité SI de courant électrique et les mesures électriques

Les unités électriques ont déjà connu deux révolutions quantiques à la fin du siècle dernier avec l'effet Josephson (EJ) et l'effet Hall quantique (EHQ). Elles sont en train d'en connaître une troisième avec l'effet tunnel à un électron (Single electron tunnelling, SET), ce qui permet d'ores et déjà de fermer le triangle métrologique (vérification de la cohérence des réalisations quantiques par application de la loi d'Ohm) au niveau de quelques 10^{-7} . On s'accorde à penser que la fermeture de ce triangle au niveau de 10^{-8} donnera un niveau de confiance qui fera basculer le système vers une redéfinition des unités électriques à partir des constantes fondamentales. En attendant ces unités ne sont plus rattachées au SI que par des valeurs conventionnelles des constantes K_J et R_K . Dans la pratique, la reproductibilité de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique est à un niveau tel (10^{-9}) que les mesures électriques utilisent aujourd'hui ces effets sans autre raccordement à la définition de l'ampère. La fermeture du triangle métrologique avec cette précision, permettra de corriger éventuellement ces constantes pour les rendre cohérentes et vérifier les théories qui les relient aux constantes fondamentales de la physique. L'équipe française du BNM-LNE/LAMA maîtrise bien la réalisation des résistances à effet Hall ainsi que celle des comparateurs cryogéniques à courant continu (4C) mais les jonctions Josephson nous viennent de la PTB (Allemagne) ou du NIST (Etats-Unis). L'annexe METR-5 décrit la situation actuelle en France et dans le monde pour ces domaines.

La métrologie électrique est donc en pleine révolution. Dans l'avenir, elle occupera une position clé pour tout le reste de la métrologie (voir le kilogramme "électrique"). Un couplage serré avec, à la fois, la recherche amont et l'industrie (y compris l'EDF) est à organiser.

La mole, unité SI de quantité de matière et le nombre d'Avogadro

La mole est une quantité d'objets microscopiques définie comme un nombre conventionnel d'entités identiques (en principe matérielles mais le concept est parfois étendu à des entités non matérielles comme les photons). Ce nombre pur est pris égal au nombre d'Avogadro défini à partir de la définition actuelle du kilogramme rapporté à la masse d'un atome de carbone (^{12}C) ce qui permet de passer de l'échelle atomique à une échelle macroscopique. Son utilisation est commode pour établir le bilan macroscopique d'une réaction de transmutation quelconque entre entités élémentaires, mais elle n'est certainement pas essentielle dans un système d'unités de base puisque redondante avec l'existence d'une unité de masse macroscopique, le kilogramme, que d'ailleurs beaucoup d'utilisateurs lui préfèrent.

Il existe un programme international pour la détermination du nombre d'Avogadro à partir de la connaissance d'une sphère de silicium sous tous ses « angles » (caractéristiques physiques de dimension, masse, volume de la maille, composition isotopique, état de surface, etc.). Ce programme a rencontré et déjà surmonté de nombreuses difficultés et pourrait un jour réussir à obtenir une détermination du nombre d'Avogadro avec une exactitude compatible avec une redéfinition du kilogramme (cf. plus haut). Celui-ci serait alors défini en fixant le nombre d'Avogadro à partir de la masse d'une particule élémentaire, de préférence celle de l'électron. Il est dommage que la France ne participe pas à ce programme dont les chances de succès ne sont pas négligeables et qui pousse dans leurs retranchements nombre de technologies avancées, portant notamment sur la connaissance des propriétés d'une sphère de silicium. D'autres méthodes de réalisation d'une masse macroscopique à partir du comptage de particules individuelles (ions d'or par exemple) sont moins avancées mais néanmoins intéressantes.

La candela, unité SI d'intensité lumineuse et les mesures en photométrie et radiométrie

La candela est parfois qualifiée d'unité physiologique et, hormis une courbe de sensibilité de l'œil humain, plus ou moins universelle, elle se ramène à un flux d'énergie. Photométrie et radiométrie n'en sont pas moins des champs importants de la métrologie pour les applications industrielles et dans le domaine de l'environnement (voir annexe METR-6). Radiomètres cryogéniques et détecteurs pièges sont deux des grandes nouveautés technologiques dans ce domaine.

Les unités dérivées

Les unités dérivées, elles aussi, nous poussent chacune dans une direction privilégiée par de nouvelles techniques de mesure. Prenons simplement un exemple où la mécanique quantique est mise au service d'applications concrètes: la mesure des champs gravito-inertIELS par interférométrie atomique, qui vient de naître, a un grand nombre d'applications très fondamentales mais elle permet déjà aussi de faire de la prospective minière à partir d'un hélicoptère ou de faire naviguer un satellite ou un sous-marin. Un prototype de gyromètre est développé à l'Observatoire de Paris, mais des versions transportables de gradiomètres atomiques utilisables en géophysique ne sont développées qu'aux Etats-Unis et en Italie.

Comment susciter les futurs développements instrumentaux et des retombées technologiques à partir de la métrologie fondamentale ?

La recherche universitaire française est au plus haut niveau dans nombre de domaines associés à la métrologie fondamentale. Hélas le transfert se fait très mal ou pas du tout vers une industrie de l'instrumentation qui n'existe pratiquement plus en France probablement faute de marchés estimés ou d'une ambition internationale.

Nous achetons à l'étranger nos lasers, nos balances, nos horloges, nos voltmètres, nos corps noirs, alors que nos laboratoires de recherche étaient ou sont encore les leaders dans le savoir-faire amont. Il faudrait que, d'une façon ou d'une autre, des mécanismes de relais se mettent en place pour que nos industriels apprennent à puiser dans le trésor de technologies nouvelles qui existent dans nos laboratoires de recherche. Comme le NIST, le NPL ou la PTB, le futur BNM pourrait jouer un rôle plus important dans la valorisation du savoir faire acquis dans ses laboratoires. Cela concerne, bien entendu, l'instrumentation, mais aussi les activités de mesure et de leur interprétation qui contribuent à la qualité de la production (Recommandation 2).

La métrologie est une discipline duale pour laquelle beaucoup de recherches et de développements concernant des instruments de pointe sont aussi poursuivis par la DGA : senseurs de toute nature, instruments de navigation, sources laser, optiques de précision, ... Ici encore une coordination, aujourd'hui inexistante, est souhaitable pour optimiser les retombées civiles et militaires de toutes ces recherches. La même recommandation s'applique au domaine spatial ou au nucléaire qui soutiennent une bonne partie de l'instrumentation de pointe pour leurs propres missions.

Une autre carence dans notre pays est l'absence d'une politique scientifique coordonnée entre le BNM et les organismes étatiques de recherche publique en matière de métrologie fondamentale. La réflexion amont et à long terme est menée de façon isolée. Elle n'est pas assez poussée et ne pilote pas la recherche dans ce domaine. Les collaborations et échanges nécessaires entre laboratoires du BNM et laboratoires universitaires ou du CNRS n'existent qu'au coup par coup sur des initiatives personnelles et parfois sont absents. Une solution à tous ces problèmes serait évidemment la création d'un grand institut scientifique français de métrologie comparable au NIST ou à la PTB avec un double pilotage scientifique et technologique au plus haut niveau (Recommandation 3).

La métrologie fondamentale est en pleine mutation vers une métrologie quantique où les phénomènes d'interférences quantiques jouent un rôle essentiel non seulement pour le passage du microscopique au macroscopique mais aussi pour toute la future nanométrie. Tout laisse entrevoir que cette future métrologie sera radicalement différente de celle que nous connaissons aujourd'hui. Un groupe de travail a été créé sur ce sujet à l'Académie des Sciences qui doit rédiger un rapport RST pour 2005. Le risque de rester en arrière sur le plan de l'instrumentation est considérable. Le BNM doit se doter des outils de prospective et des collaborateurs scientifiques qui lui permettront d'acquérir une vision à long terme pour anticiper cette évolution.

3 – Métrologie et industrie

Jusqu'il y a une dizaine d'années, mises à part les activités relatives aux rayonnements ionisants qui relèvent pour beaucoup de la sécurité, la métrologie était concernée essentiellement par les besoins de l'industrie et du commerce. Ainsi, les progrès de la métrologie depuis 1950 et jusqu'il y a quelques années, ont-ils été conditionnés par les

progrès des techniques industrielles. La métrologie s'est vu contrainte de s'adapter à des domaines technologiques nouveaux (techniques spatiales, ordinateurs, énergie atomique, etc...) ou totalement renouvelés (aéronautique, télécommunications, matières plastiques, etc...). Cela a conduit à améliorer à un rythme accéléré l'exactitude des étalonnages et, par suite, a engendré des progrès considérables de la métrologie. Ainsi, au cours des années 1960-90, les besoins en exactitude des industriels se sont accrus d'un facteur 100 tous les 10 à 15 ans dans le domaine des mesures dimensionnelles, du temps, et d'un facteur 10 dans le domaine des mesures électriques ou de l'étalonnage des masses. Même dans des domaines aussi classiques que la construction automobile, une étude du NIST aux Etats-Unis a montré que les tolérances dimensionnelles des pièces mécaniques sont divisées par deux tous les dix ans. Donnons trois exemples concrets :

- On constate que les incertitudes d'étalonnage des masses qui ont atteint 10^{-7} et que les industriels demandent au LNE des incertitudes de cet ordre de grandeur (étalonnage de masses E1 par exemple pour la pharmacie). De même, les progrès des pesées ont permis des progrès dans l'analyse des gaz d'échappement (pesée de filtres de particules).
- Dans le domaine de la métrologie des forces : en 20 ans, on est passé de 10^{-3} à 10^{-4} . Les mesures de poussée de réacteurs étant plus fines, il est devenu possible pour les ingénieurs des motoristes sur bancs d'essais de voir l'évolution de cette poussée en fonction de différents paramètres dont le vieillissement.
- Aux Etats-Unis, dans les années 1970, les automobiles japonaises ont dangereusement concurrencé la production américaine. Les clients reprochaient aux véhicules américains d'être trop bruyants, notamment lors de la fermeture des portes. La raison était que les incertitudes sur les mesures de la carrosserie laissaient un jeu mécanique, alors qu'au Japon, les exigences métrologiques étaient beaucoup plus sévères.

Cette évolution a eu pour conséquence un essor parallèle de la métrologie (changement des définitions et des réalisations des unités, nouvelles techniques de mesure, etc...).

Par ailleurs, la métrologie favorise le développement technologique et scientifique. Cette affirmation est vérifiée par de multiples exemples dans l'histoire récente. Ainsi, par exemple, les progrès en temps-fréquence ont permis le développement du GPS et des télécommunications à grand débit. De même, le développement des techniques des lasers a révolutionné la métrologie des longueurs. Il y a ainsi une fertilisation réciproque entre la science de la mesure et les réalisations techniques. On peut donc espérer que d'autres verrous technologiques pourraient être résolus. Nous pensons particulièrement à la micro- et à la nano- technologie et aux biotechnologies.

On peut se poser la question : “*Cette tendance va-t-elle se poursuivre au cours des années qui viennent ?*”. Il est évident que cette question dépasse le cadre de la métrologie, mais est une interrogation générale sur les progrès futurs de la technologie et, plus généralement, sur l'avenir de la Société. Nous pouvons constater les progrès, mais qu'il nous est difficile de les prévoir, car, par nature, nous n'avons pas la connaissance pour imaginer ce qui est rendu possible par les progrès de la métrologie. La seule réponse qu'on peut raisonnablement y donner est que la tendance actuelle va se poursuivre. C'est celle que nous faisons. Il y a des raisons pour le faire. Donnons quelques exemples :

- Pour la microélectronique, les méthodes actuelles de fabrication, si on les poursuivait, conduiraient à une impossibilité de miniaturisation au-delà de 15 nm. En effet, après avoir utilisé l'insolation des masques par de la lumière visible, puis UV (aujourd'hui 193 nm, 157 nm d'ici 2 à 3 ans avec des problèmes technologiques de fabrication de lentilles), il serait nécessaire d'employer des rayonnements X de plus en plus durs. Le programme "PREUVE" a pour objet de permettre de poursuivre dans cette voie jusqu'en 2017 en substituant les lentilles par des miroirs qui peuvent réfléchir les rayons X durs. Ceci aura pour conséquence une évolution de plus en plus exigeante des moyens de nanométrie et de la métrologie des rayons X.
- Dès aujourd'hui, les recherches s'orientent vers l'utilisation de la biologie et des phénomènes quantiques pour remplacer les transistors des microprocesseurs d'une part, et vers la technologie des nanotubes (utilisation d'un effet tunnel) avec actuellement la recherche sur les méthodes de fabrication (diamètres de 1 à 50 nm) d'autre part. C'est donc à une évolution continue et à une recherche diversifiée auxquelles on assiste, qui s'accompagnent de besoins en moyens et méthodes de mesure.
- Les très hautes températures sont déjà (mais vont le devenir encore plus) nécessaires dans les installations nucléaires, dans l'industrie des céramiques ou encore pour les lanceurs et les engins spatiaux. Les très basses températures, atteintes en laboratoire notamment dans la technologie des fluides cryogéniques, vont certainement trouver des applications industrielles d'ici peu. La métrologie dans ces domaines a donc un avenir important devant elle.
- Les exigences de plus en plus contraignantes dans le domaine de la sécurité et de l'environnement, marquées par des normes et des seuils de plus en plus sévères, vont conduire à développer la métrologie en chimie vers de meilleures exactitudes et des méthodes de mesures améliorées.

La conclusion la plus raisonnable que l'on peut tirer de ceci est que l'évolution constatée va se poursuivre. Il faut maintenir une R et D sur les sujets anciens et poursuivre, en parallèle, un effort de recherche en vue des applications futures.

Un autre aspect de la métrologie dans l'industrie se rapporte à la qualité des produits. Le consommateur, au vu de la concurrence, est devenu plus exigeant en termes de qualité et de sécurité d'emploi. De plus, la concurrence internationale a conduit les industriels à se conformer strictement aux normes ISO et répondre également aux prescriptions des diverses directives européennes. La réponse à ces exigences est **l'assurance qualité**. L'annexe INDUS-1 décrit les procédures qui assurent la qualité des produits tout en optimisant le coût. Cette notion, qui permet de conférer à un produit l'aptitude de satisfaire les besoins exprimés ou implicites des clients, relie très étroitement les procédures industrielles à la métrologie. Souvent considérée comme une contrainte, elle permet, en définitive, à l'industriel de promouvoir sa fabrication et en tirer avantage.

La présence de la métrologie dans les activités industrielles est aussi fondamentale dans l'établissement de la conformité des produits et dans toutes procédures de contrôle et d'essais conduisant à la certification. Dans cette optique, le rôle de l'accréditation est central, tant pour les laboratoires d'étalonnage que pour les laboratoires d'essais car, pour être agréé, il faut en général être accrédité (sauf dans quelques domaines comme les hôpitaux où il existe un

système parallèle). Les accréditations sont accordées en France par le COFRAC après un audit détaillé de l'établissement.

Notons enfin, bien qu'on s'éloigne ici de la métrologie, que les services sont aussi astreints à la certification par des organismes accrédités. Ceci procède toujours de l'exigence croissante du public vis-à-vis de la qualité

4 – Métrologie en chimie

La métrologie chimique est une discipline neuve. C'est pourquoi il a paru nécessaire de la présenter de façon détaillée.

La métrologie a été longtemps négligée dans le domaine de la chimie parce qu'elle n'était pas obligatoire. Elle l'est devenue progressivement, au fur et à mesure que des normes ont été imposées pour limiter la présence de composés divers, plus ou moins nocifs dans des produits de consommation. Ce même besoin de métrologie s'applique maintenant à des domaines aussi divers que la pollution des milieux naturels (air, eau, sols), l'agroalimentaire, l'analyse biomédicale, la recherche des fraudes, etc... Les applications de la métrologie en chimie se diversifient continuellement et l'on peut d'ores et déjà dire que l'ampleur de son domaine dépasse celui de l'ensemble de la métrologie appliquée à des grandeurs physiques, celle qui constitue la "métrologie classique".

Si quelques méthodes de la métrologie en chimie s'apparentent à des méthodes physiques comme la détermination du pH ou la conductivité électrique, la spécificité de la métrologie en chimie concerne essentiellement le domaine de la **chimie analytique**. La chimie analytique est une discipline permettant d'établir la présence d'une molécule ou d'un élément dans un composé (analyse qualitative), d'en mesurer sa concentration associée à une incertitude (analyse quantitative) et d'identifier sa structure chimique (analyse structurale et spécification). Ce processus analytique, comprend de nombreuses étapes complexes. On part d'une population totale, à laquelle il va falloir faire subir un échantillonnage afin d'effectuer des mesures élémentaires sur chacun de ces échantillons. Ces mesures vont permettre d'inférer des informations plus globales sur la population initiale. Il faut aussi s'assurer que si la mesure avait été effectuée ailleurs, même avec des méthodes différentes, on aurait obtenu des résultats comparables. La récente mise en œuvre généralisée de la norme NF EN ISO/CEI 17025 soulève de vastes difficultés pratiques: l'application directe à la chimie, aux analyses et aux essais laisse souvent les acteurs démunis pour ce qui concerne les exigences de traçabilité.

En contraste avec les méthodes physiques, le processus analytique comprend plusieurs étapes complexes. Au cours de ces étapes, les chimistes sont confrontés à deux grands problèmes en termes de métrologie : le prélèvement et l'échantillonnage d'une part, les mesures élémentaires d'autre part.

Le prélèvement est l'action de prélever une quantité de matière en vue de son analyse alors que l'échantillonnage est l'organisation de multiples prélèvements sur une population afin d'en déduire des informations plus globales. Un bon prélèvement est un prélèvement juste et reproductible et représentatif. L'annexe CHIMIE-1 est consacrée à cette activité cruciale dont dépend la qualité du résultat final.

Les mesures de concentrations se caractérisent souvent par l'absence d'étalons et de matériaux de référence disponibles et peu coûteux. Or, il s'agit d'assurer la comparabilité des mesures élémentaires à d'autres, du même type, qui sont effectuées ailleurs. Ceci implique que la traçabilité doit remonter au Système International d'Unités, en l'occurrence à l'unité de quantité de matière, la mole. Le raccord à cette unité se fait de façon non tangible, les chimistes parlant en masse et non en quantité de matière. On appelle "**méthode primaire**" les méthodes qui permettent d'y accéder directement. Seule la méthode de dilution isotopique est considérée comme primaire. La dilution isotopique permet une mesure absolue de la concentration d'un élément. Il est nécessaire que l'élément à déterminer possède au moins deux isotopes, isotopes dont on connaît parfaitement les abondances et donc les rapports isotopiques. Pour déterminer la concentration inconnue de cet élément en solution, on ajoute à celui-ci une concentration connue du même élément avec des rapports isotopiques modifiés et parfaitement connus par ajout d'un des isotopes. Expérimentalement, le rapport naturel des isotopes va être modifié en proportion des concentrations initiale et ajoutée de l'élément. Il est alors facile d'en déduire la concentration initiale. Mais c'est une méthode lourde et coûteuse, dont on ne dispose que dans quelques grands laboratoires dont, en particulier, les laboratoires nationaux de métrologie. Aussi, la traçabilité est-elle assurée par des matériaux de référence.

Un matériau est dit "**de référence**" lorsque les concentrations sont établies par une procédure qui assure leur raccordement au Système international d'unités (la mole ou encore la masse par volume) et pour laquelle chaque valeur est accompagnée d'une incertitude au niveau de confiance indiqué. On distingue trois types de matériaux de référence :

- Les matériaux de référence primaires sont certifiés par un laboratoire national de métrologie à l'aide d'une méthode primaire.
- Les matériaux de référence certifiés (CRM) sont produits par des organismes nationaux et validés au travers des circuits inter laboratoires (Europe) ou bien en utilisant plusieurs méthodes analytiques (États-Unis).
- D'autres matériaux de référence sont produits par des organismes accrédités dont les méthodes ont été contrôlées et agréées par un organisme d'accréditation (en France, le COFRAC).

On ne mesure usuellement que des valeurs relatives de concentrations. Il y a donc un fort besoin en étalons de travail diversifiés et en matériaux de référence certifiés

Les besoins en matériaux de références sont infinis (nombre de molécules infini en chimie organique, diversité des matrices en chimie inorganique). Les matériaux sont coûteux car les procédures de fabrication, de certification et d'évaluation des incertitudes sont longues. Par ailleurs, leur coût est élevé. Aussi ne sont-ils développés que lorsqu'un intérêt économique important le justifie. Ils ne seront généralement utilisés que pour valider les méthodes analytiques propres au laboratoire.

Comme toute métrologie, la métrologie en chimie n'a de sens que si une incertitude accompagne les résultats de mesure. On peut citer comme exemple le contrôle d'un joueur de football qui a révélé une concentration en nandrolone trop élevée; le laboratoire ne pouvant évaluer l'incertitude sur la mesure de ce taux "hors normes", le joueur a été relaxé.

L'évaluation de l'incertitude (qu'il ne faut pas confondre avec répétitivité des mesures) est une opération difficile, compte tenu de la complexité de la chaîne analytique et devrait (ce qui n'est pas toujours le cas) inclure les incertitudes liées à l'échantillonnage et à d'éventuelles contaminations. Il s'agit, après avoir établi les relations entre le résultat et les différents paramètres et étapes, d'identifier les sources d'incertitudes et leurs corrélations, estimer les plus importantes, puis de combiner les écarts types.

Comme l'ont montré les comparaisons entre des laboratoires, il faut noter que les incertitudes sont, dans une grande proportion, sous-estimées, et souvent très largement. En fait, la culture métrologique est loin d'avoir pénétré les laboratoires de chimie ou les donneurs d'ordre industriels. On se contente trop souvent de notions plus vagues comme celle de seuil. La même remarque s'applique à de nombreuses normes, dont certaines sont décidées en ignorant l'importance des incertitudes des mesures destinées à les mettre en œuvre.

Dans la pratique, il existe une alternative aux raccordements par les matériaux de référence : les circuits de comparaisons inter laboratoires. Cependant, cela nécessite de travailler dans un domaine où d'autres laboratoires existent et pratiquent des méthodes analogues. L'organisation de tels circuits est gérée par différents organismes (IMEP en Europe, Aglaé ou Bipea dans le domaine des eaux en France), mais le type de dépouillement et l'anonymat rendent souvent le résultat binaire, débouchant ou non sur l'accréditation. Il n'y a aucun retour d'expérience sérieux sur les erreurs constatées et aucune évaluation globale de l'incertitude n'est donnée aux organismes non participants.

Une unité internationale de la métrologie en chimie est nécessaire : les préoccupations de "qualité", y compris pour les aspects portant sur les considérations techniques, ont été prises en compte depuis longtemps en chimie à travers différents organismes (IUPAC, EPA, ASTM, FDA, DIN, AFNOR, EURACHEM, ...). Un problème majeur réside dans le manque de coordination entre les définitions et procédures de ces différents acteurs.

En conclusion, trois vœux s'imposent pour l'avenir qui verra une extension croissante de la métrologie en chimie dans l'industrie (cosmétiques, pharmacie, agroalimentaire, etc...), les services de santé et de protection de l'environnement.

1- L'établissement et la diffusion de guides pratiques pour l'évaluation des principales causes d'incertitude,

2- La sensibilisation des acteurs de l'analyse chimique, par la formation et l'enseignement, que la métrologie n'est pas une contrainte, mais un supplément de qualité,

3- L'amélioration de la disponibilité des matériaux de référence certifiés et réduction de leur coût dans le cadre de priorités à définir au niveau international pour éviter des redondances.

Ces points sont repris dans la recommandation 4.

5 – Métrologie et santé

« Longtemps, on a pensé que les phénomènes biologiques ou humains se prêtaient mal à la mesure et à l'observation, et qu'il était impossible de les analyser avec les méthodes scientifiques usuelles. Ces blocages psychologiques n'ont pu être franchis que devant les succès remportés dans d'autres disciplines » (M. Tubiana, *Le refus du réel*).

Aujourd’hui, la Métrologie est effectivement l’un des outils principaux permettant d'accéder à la connaissance des mécanismes à l’origine de la vie et à son utilisation pratique. De nombreuses spécialités, justifiées par la complexité des phénomènes concernés, mettent en œuvre une grande diversité de techniques et d'appareillages pour quantifier un nombre considérable de paramètres.

De la qualité des études quantitatives dépendent :

- L’efficacité des méthodes de diagnostic (passage du normal au pathologique),
- L’efficacité des traitements (relations effet-dose),
- La validité des résultats des recherches,
- L’établissement et le respect de recommandations et de normes destinées à préserver la santé.

La pratique de cette Métrologie ne peut s’effectuer dans de bonnes conditions sans un support structurel accrédité de haut niveau, offrant à la fois le **développement des références métrologiques** indispensables et leur mise à disposition dans des conditions assurant aux résultats un minimum de garanties :

- Être exprimés à l'aide de grandeurs et d'unités reconnues (Système International), et pouvant être directement utilisés, à la fois dans le cadre de recherches et dans la pratique quotidienne,
- Être comparables d'une source de données à l'autre et au cours du temps, conditions indispensables à la coopération pratiquée à l'échelle nationale ou internationale, par exemple dans le cadre d'essais thérapeutiques, et aux suivis au long cours,
- Être accompagnés d'une indication claire du niveau d'incertitude associé, dépendant au premier degré de la qualité des références métrologiques disponibles dans les Laboratoires de métrologie agréés.

Malheureusement, tous les besoins de la biologie et de la médecine ne sont pas encore satisfaits, avec des conséquences pour certaines disciplines, qu'il s'agisse d'insuffisances au niveau des **références primaires** ou au niveau des **étalonnages** pour la pratique quotidienne et les programmes d'assurance qualité (voir annexe INDUS-1). Nous donnons trois exemples caractéristiques des problèmes rencontrés et de leurs conséquences sur la santé. Il ne s'agit, évidemment que d'un échantillon restreint des domaines dans lesquels de tels problèmes se posent.

1- Métrologie des rayonnements ionisants :

L’effet initial des rayonnements ionisants dans les milieux biologiques est essentiellement l’ionisation de l’eau, produisant des radicaux (H et OH en particulier) qui altèrent l’ADN et les protéines des cellules. Au niveau de ces cellules, des processus de réparation sont mis en œuvre, aboutissant soit à une réparation complète (survie normale de la cellule), soit à une

opération fautive, permettant cependant une survie de la cellule avec un comportement plus ou moins modifié (mutations), soit à un défaut de réparation entraînant la mort de la cellule.

Les conséquences au niveau des tissus, des organes ou de l'organisme peuvent être diverses, selon l'importance des volumes irradiés et la quantité de rayonnement (dose), et peuvent être mises à profit pour le traitement des cancers (Radiothérapie) ou prises en compte pour le choix des modalités diagnostiques ou l'exposition des humains à des rayonnements ionisants dans leurs différentes activités (Radioprotection).

La prévision des effets d'une exposition à des rayonnements implique la détermination, par la mesure ou le calcul, de la dose absorbée dans les milieux biologiques, opération délicate nécessitant le passage par des milieux de mesure intermédiaires et l'introduction de facteurs de correction multiples. Cela implique bien sûr la disposition de **références métrologiques aussi proches que possible de la dose absorbée dans les milieux biologiques, et dans des conditions d'irradiation les plus proches que possibles que celles de toutes les utilisations** concernées par l'exposition des humains. Dans le cas où les mesures ne seraient pas possibles, il est nécessaire de disposer des données physiques de base concernant les interactions élémentaires, les émissions de sources radioactives, etc...

Aujourd'hui, bien que la position de la France dans ce domaine soit honorable et comparable à celle de certains pays étrangers, la situation est encore inconfortable dans certains domaines comme la radiothérapie, pour laquelle les références n'offrent pas une exactitude suffisante. Par exemple, il faudrait étalonner les sources à mieux que 1% près, ce qui est à peine la précision des meilleures références métrologiques, ne laissant pas de marges pour le transfert vers les utilisateurs pour la radiothérapie externe et la curiethérapie. Des insuffisances existent encore également dans le domaine de la radioprotection. Une amélioration par un facteur 3 à 10 des exactitudes est nécessaire, d'autant plus que les contraintes sur la précision ne peuvent que croître avec les nouvelles techniques de traitement ou d'examen, et la recherche d'une meilleure radioprotection du patient (Recommandation 5).

La difficulté de la métrologie précise dans ce domaine explique, entre autres, les retards des laboratoires pour la satisfaction des besoins, et justifie le soutien des travaux effectués sous l'égide du BNM ; l'expérience récente a montré l'importance de travaux effectués en parallèle par plusieurs laboratoires nationaux, conduisant par exemple à une correction de l'ordre de 1% des références au niveau des laboratoires primaires.

De plus, on peut prévoir que des évolutions des grandeurs utilisées devront être considérées de manière à mieux prédire quantitativement les effets des irradiations dans des conditions complexes (en particulier à partir des notions de micro-nano dosimétrie) et, dans le domaine de recherches concerné, la collaboration étroite entre les utilisateurs et les spécialistes du BNM s'avèrent essentielles (voir annexe SANTÉ-1).

2- Métrologie pour les analyses de biologie médicale

Les analyses de Biologie Médicale concourent au diagnostic, au traitement ou à la prévention des maladies. Leur importance dans la prise en charge et le soin des patients ne cesse d'augmenter, et elles représentent environ 2 % des dépenses de Santé en France.

Ces analyses concernent des domaines très divers, notamment la biochimie, la microbiologie, l'hématologie, l'immunologie, et concernent plus de 5000 Laboratoires en France.

La Métrologie intervient au cours des diverses étapes des analyses, en particulier les prélèvements, l'exécution proprement dite des analyses, la validation des résultats, leur interprétation et leur confrontation aux données cliniques. Malheureusement, on observe une dépendance (qui peut être considérable) des résultats des analyses vis-à-vis de la méthode de mesure. Par exemple, un contrôle en France de la mesure par divers laboratoires des marqueurs cardiaques effectué en 2000 révèle des différences considérables entre les moyennes obtenues pour la concentration en Troponine I (marqueur dont la concentration s'élève dans les premières heures de la constitution d'un infarctus du myocarde) d'un échantillon donné selon le système d'analyse utilisé (typiquement un facteur de l'ordre de 50, avec un écart type de l'ordre de 10 % pour un système donné). On réalise donc les difficultés rencontrées pour établir des valeurs « normales » et leurs limites acceptables.

Il est donc fondamental d'assurer la traçabilité des mesures par un programme d'assurance qualité (ISO DIS 15189) en déterminant :

- **Des valeurs cibles**, moyennes obtenues pour un groupe de laboratoires utilisant des techniques identiques ou différentes, en particulier la moyenne des valeurs obtenues avec une **technique de référence** dans **un ou plusieurs laboratoires de référence**, ou une **technique définie** dans un ou plusieurs laboratoires,
- **Des limites acceptables** établies pour chaque analyse, chaque critère (exactitude, reproductibilité), pour différents niveaux de concentration, et tenant compte de l'état de l'art et des variations intra/inter-individuelles.

Ceci implique des moyens métrologiques, malheureusement encore insatisfaits ou nécessitant des améliorations, concernant en particulier :

- La définition d'une terminologie plus précise et d'un système commun d'unités (les grandeurs utilisées ne respectent pas toujours le Système International),
- La mise à disposition de matériaux de référence certifiés,
- L'établissement de réseaux de laboratoires de référence, définissant des méthodes et techniques de mesure spécifiques (volumes, masses, températures, temps, absorbance, radioactivité, luminescence, fluorescence, électrochimie...).

Les insuffisances de support métrologique dans ce domaine, et les conséquences d'une maîtrise insuffisante de la précision des résultats sont également illustrées dans l'annexe SANTÉ 2 qui rapporte des résultats d'enquêtes effectuées aux Etats-Unis et les gains économiques que la métrologie en analyses de biologie médicale permettent de réaliser.

3- Métrologie pour l'optique biomédicale

L'objectif de l'optique biomédicale est d'accéder, par des mesures de propriétés optiques des tissus humains, à des grandeurs biochimiques pouvant être corrélées avec l'état fonctionnel d'un patient, afin de développer des méthodes d'analyse non invasives, *in vivo*, et de faible coût.

Son application exige au préalable la définition non ambiguë des propriétés optiques des tissus biologiques examinés. Ils sont considérés comme homogènes sur le plan macroscopique, ce qui signifie que le physicien s'intéresse à des observations moyennant un grand nombre d'effets survenant à l'échelle microscopique ou à l'échelle moléculaire pour la diffusion de la lumière. Les paramètres étudiés sont le coefficient de diffusion, le coefficient d'absorption, l'angle de diffusion vers l'avant.

À partir de ces paramètres, on peut déduire, par exemple, les concentrations en hémoglobine dans certains tissus, mais on peut aussi chercher à relier les valeurs obtenues à d'autres caractéristiques comme la fibrosité des tissus (qui intervient pour prévoir et prévenir les rejets d'organes), la taille des structures diffusantes et leur nombre (qui traduit l'efficacité des mécanismes de prolifération cellulaire), l'existence de différences d'indices optiques (souvent associée à la présence de glucose). De la même façon, des études d'oxymétrie sur les muscles sont effectuées. Le muscle a cependant une structure plus complexe, plus difficile à modéliser.

Une des difficultés majeures de l'optique biomédicale résulte de l'établissement du modèle physique adapté. Comprendre comment les mesures optiques seront modifiées par tel ou tel facteur est déjà une tâche difficile (moyenne sur un grand nombre d'événements, utilisation des lois usuelles de la physique), mais savoir quelle grandeur considérer pour analyser les mesures optiques (résoudre le problème inverse) est encore plus compliqué.

La Métrologie est presque inexistante en optique biomédicale. À ce stade, la notion d'incertitude ne peut être approchée qu'en termes de reproductibilité.

Deux axes sont à privilégier :

- Il est nécessaire d'identifier les grandeurs, mais surtout de mieux formuler la méthodologie, c'est-à-dire ce qui permet de corrélérer la grandeur mesurée à la grandeur à identifier,
- Il faudrait également disposer de **Systèmes de référence proches des tissus** biologiques étudiés. Aujourd'hui, des « fantômes » de billes en latex en suspension dans une solution colorante, ou des ensembles silice-silicone-colorant jouent ce rôle. Cependant, ils ne constituent pas de réelles références pérennes pouvant être caractérisées soigneusement.

Les médecins sont très intéressés par le développement de telles études qui seraient de véritables outils de diagnostic. Cependant, **de telles études sont aujourd'hui véritablement limitées par leur manque d'exactitude.** Pour définir des situations normales, les médecins ont besoin de recenser un très grand nombre de résultats, et surtout de diminuer la dispersion observée. À terme, ils souhaiteraient pouvoir procéder à un classement fiable des patients les uns par rapport aux autres au regard de ces données.

4- Conclusion

L'évolution des connaissances biologiques et médicales, et leur mise en application, repose donc de manière déterminante sur des études quantitatives. Les progrès ont été d'autant plus sensibles que l'on a su mesurer des paramètres de plus en plus nombreux, avec une exactitude de plus en plus grande. Cela permet en particulier l'identification des paramètres intervenant

de manière significative dans les processus biologiques, et l'établissement des relations quantitatives indispensables pour le diagnostic (notion de valeurs normales et anormales), le traitement (relations effet-dose) et le maintien de conditions d'environnement acceptables pour la santé publique (établissement de normes et de réglementations). L'examen de la situation actuelle dans ces différents domaines révèle des insuffisances dans la disponibilité de méthodes de mesure et des références répondant à tous les besoins, avec des conséquences inévitables pour les domaines concernés, à la fois sur le plan de la santé proprement dite, et sur son coût. On constate également, comme pour la chimie dont c'est un cas particulier, un besoin général de formation à la pratique métrologique de la mesure (Recommandation 4).

Notons cependant que ce n'est pas un problème spécifique à la France: les mêmes difficultés existent dans tous les pays car il s'agit de limitations physiques qu'on ne sait pas actuellement surmonter. Il faut accentuer fortement les efforts de recherche. Par ailleurs, il n'est pas évident que les autorités médicales soient toujours bien conscientes des pratiques métrologiques fondamentales.

6 – Métrologie dans le domaine de l'environnement

La protection de l'environnement passe avant tout par la mesure des paramètres qui en définissent la qualité. Or, la notion d'environnement couvre des domaines très vastes et très différents (composants de l'air et de l'eau, pollution des sols, radioactivité, présence de pesticides, rejets industriels, nuisances acoustiques et lumineuses parfois dangereuses, etc...). Bien entendu aussi, le contrôle de l'évolution globale de la composition et de la température de l'atmosphère et des océans est un moyen majeur pour assurer le suivi de leur évolution en rapport avec l'effet de serre et le réchauffement de notre planète (Rapport 31 de l'Académie des Sciences).

Il s'ensuit qu'il y aura autant de techniques différentes qu'il y a de types de paramètres à mesurer. De plus, dans beaucoup de cas, on s'intéresse à des propriétés globales sur un large territoire, les problèmes de la stratégie du prélèvement et de l'échantillonnage représentatif sont quasiment insolubles. Il existe quelques mesures *in situ* mais uniquement pour des polluants très spéciaux. Enfin, de nombreuses normes sont imposées par les règlements et les directives européennes. Souvent, les normes évoluent vers des exigences plus strictes au fur et à mesure que les méthodes de mesure deviennent plus précises. Parfois celles-ci, se basant sur le principe de précaution, sont telles qu'on ne sait même pas détecter le seuil exigé. Dans certains textes, on peut craindre que le législateur ne considère les seuils de détection ou de discrimination comme étant des mesures. Cependant, les pays se doivent d'en tenir compte et c'est un défi très difficile pour la métrologie (Recommandation 7). À titre d'exemple, on trouvera dans l'annexe ENVIR-1 quelques indications sur les nombreuses applications du suivi de la composition de l'air.

Mais la surveillance et, éventuellement, le contrôle, des conditions physiques et chimiques dans lesquelles l'homme vit est une tâche considérable qui est à peine entamée. Il faudra probablement des décennies avant que l'on ait tous les outils nécessaires pour suivre les variations de ces conditions afin d'y remédier ou pour protéger l'homme contre leur action. La raison en est la multiplicité des pollutions ou des agressions possibles. Dans chaque cas particulier, la métrologie devra jouer un rôle essentiel pour assurer la cohérence des mesures et l'efficacité des moyens employés pour les combattre. Donnons quelques exemples.

- L'eau est probablement un des éléments de notre environnement le plus suivi et contrôlé. De nombreux paramètres physiques (turbidité, pH,...), chimiques (produits toxiques, ions métalliques, nitrates, phosphates, hydrocarbures, produits détergents, gaz dissous, pesticides,...) et biologiques (matière organique en décomposition, bactéries, ...) sont mesurés ou analysés. Les eaux à usage domestique, les eaux de baignades sont particulièrement suivies et des mesures de précaution sont prises lors des alertes à la pollution. Toutes ces analyses sont ou devraient être soutenues par une traçabilité reconnue vers des matériaux de référence certifiés ou des laboratoires accrédités.
- On devrait s'intéresser de plus en plus aux sols qui sont contaminés par les excès d'engrais et par la présence des diverses déchetteries, apportés par les eaux de ruissellement ou provenant de nappes souterraines. Les méthodes liées à la métrologie sont à développer, ce qui sera particulièrement difficile par suite de la diversité des polluants possibles et de l'hétérogénéité du milieu. Les enjeux sont pourtant importants, notamment dans les cas de dégradation des sols agricoles.
- Les agressions lumineuses, en particulier par les rayonnements ultraviolets, font courir des risques de maladies de peau (dont le cancer) ou de troubles oculaires. La métrologie relative à ces rayonnements (voir annexe METR-6) est très importante, notamment pour la conception des pommades et des verres protecteurs et pour les études des problèmes relatifs à l'ultraviolet solaire et l'ozone atmosphérique (Rapports 30 et 41 de l'Académie des sciences).
- La pollution sonore est souvent mal ressentie par les habitants des villes. Les mesures d'intensité sonore en fonction de la fréquence sont traçables aux laboratoires nationaux qui possèdent des installations de mesure dans des chambres anéchoïques.
- On a beaucoup parlé des risques qui seraient encourus lorsqu'on est soumis à des rayonnements électromagnétiques intenses au voisinage des émetteurs de téléphonie mobiles ou par les téléphones mobiles eux-mêmes. Les mesures métrologiques précises de ces rayonnements sont effectuées. Mais le problème de leur éventuel effet sur l'organisme n'est pas du domaine de la métrologie.
- Les rayonnements ionisants naturels (massifs granitiques, radon dans les habitations) ou liés à l'exploitation de l'énergie atomique rejets des centrales, usines de retraitement, déchets radioactifs) font depuis longtemps l'objet de mesures précises. La métrologie s'intéressera de plus en plus au taux d'irradiation faible (voir annexe SANTÉ-1).

Pour la plupart des besoins ci-dessus, comme d'ailleurs pour les besoins liés à l'agroalimentaire, les matériaux de référence jouent un rôle primordial. Les laboratoires de métrologie produisent, outre les références «pures», des échantillons de référence les plus proches des besoins des utilisateurs.

Notons toutefois que l'évaluation des risques pour la santé n'est pas du domaine de la métrologie dont le rôle est de fournir des mesures fiables et traçables à des références certifiées.

De façon générale, la métrologie des composantes de l'environnement apporte une quantification des paramètres en jeu. Mais elle n'a pas qualité à reconnaître leur impact ou

leur nocivité. Leur exploitation est du domaine des spécialistes, qu'il s'agisse de santé, de climat, d'agronomie, de nutrition, etc...

En conclusion, de très nombreuses techniques métrologiques différentes sont à la base du suivi des paramètres de l'environnement. Certaines existent et sont opérationnelles. Mais l'immensité du champ couvert et la grande variété des milieux à considérer sont tels que de grands progrès restent à faire au cours des années prochaines si bien qu'un effort important devra être demandé aux laboratoires nationaux de métrologie.

7 – Aspects légaux et juridiques de la métrologie

1 – Les bases juridiques

Le texte de base sur la métrologie est la loi de 1837, qui stipule que le système métrique est obligatoire. Il faut, bien entendu, entendre système SI au lieu de système métrique. Cet article de loi peut être interprété de deux façons.

L'interprétation restrictive qui est l'interprétation actuelle des services de l'État est que les résultats de mesure doivent être exprimés dans les unités du système SI.

Une interprétation plus extensive, mais qui peut être défendue de façon valable, est que toute mesure doit être raccordée au système SI, avec des incertitudes qui ne sont pas spécifiées par la loi. Dans ce cas, il appartient aux autorités, le cas échéant, de préciser les incertitudes lorsque cela est nécessaire. En l'absence d'incertitudes spécifiées, il appartient à la justice lorsqu'elle est saisie d'un litige, d'apprécier l'incertitude appropriée en fonction des usages et des bonnes pratiques reconnues. Il est par exemple clair qu'une mesure de longueur courante ne devrait pas être acceptable si elle est fausse de 10%. Il reste que la justice ne peut être saisie que lorsqu'il y a préjudice (pas d'intérêt, pas d'action). Mais cela est sans doute la meilleure façon de définir le champ d'application pratique de cette obligation de traçabilité. Toute mesure doit être traçable au SI avec des incertitudes appropriées dès lors que les erreurs sur cette mesure sont de nature à induire un préjudice pour une personne physique ou morale.

On peut donc plaider dans tous les cas, que le caractère obligatoire du système SI est une obligation de traçabilité et non une simple obligation d'écriture de valeurs de grandeurs.

Un second texte essentiel est le code de la consommation, en particulier ses dispositions relatives aux informations de nature à induire le consommateur en erreur (publicité mensongère dans une acceptation étendue). Toute caractéristique annoncée d'un produit ou d'un service doit pouvoir être étayée par des justifications de la part de son auteur. Justifier des caractéristiques annoncées exige en particulier la traçabilité des mesures, avec des incertitudes appropriées.

Les services de l'État habilités à investiguer, à demander de telles justifications et à déclencher l'action publique sont nombreux, principalement les agents de la DGCCRF (Répression des fraudes), mais aussi en particulier les agents de la métrologie légale.

2 – La responsabilité de l'État

Le système SI étant obligatoire, le premier devoir de l'État est que chaque personne physique ou morale doit avoir accès à la traçabilité au système SI, avec des incertitudes appropriées. Un particulier ou une entreprise doit pouvoir trouver une réponse à la question: *"J'effectue telle mesure, comment m'assurer ou assurer que cette mesure est traçable au système SI avec des incertitudes appropriées ?"*

Si cette question ne trouve pas de réponse, il y a carence de l'État et l'État peut sans doute être tenu pour coresponsable de tout préjudice occasionné par la mesure en question. On imagine bien que ceci peut, notamment dans les domaines de la santé, de l'environnement ou de la sécurité des personnes, ouvrir le champ à des affaires de grande ampleur et d'une gravité extrême.

L'État est en outre plus directement responsable d'éventuels "sinistres métrologiques" dans les domaines où il a réglementé et accepté (homologations, agréments, etc.), des équipements dont le bon fonctionnement ou le bon usage requièrent des précautions métrologiques qui n'auraient pas été prises en compte dans les procédures imposées par l'État. Un matériel médical défaillant, un matériel de sécurité défaillant, peuvent amener à mettre en cause la responsabilité de l'État et la responsabilité pénale des responsables de l'État jusqu'au plus haut niveau. Ceci est arrivé lorsqu'un camion, dont les freins étaient défaillants, a occasionné un accident mortel. Les responsables des services de l'État qui avaient effectué le contrôle technique du camion ont été mis en examen. Le motif était que le contrôle avait été effectué avec des moyens métrologiquement inadaptés. Des risques de bien plus grande ampleur peuvent être envisagés.

Enfin, l'État est très directement responsable de préjudices ou de dommages occasionnés par des mesures défectueuses effectuées par les services de l'État ou par des Établissements publics (hôpitaux par exemple) ou par l'absence de mesures appropriées. Une alerte à la pollution qui n'aurait pas été donnée à temps, une fuite radioactive non détectée, des tests défectueux sur des produits alimentaires, etc., sont des "horror stories" dont les services compétents de l'État sont très conscients, mais pour lesquelles les différents services ont des compétences métrologiques très inégales.

8 - Impact économique de la métrologie

Les gouvernements étant responsables de la définition des unités légales (le Système international d'unités), ainsi que de la définition, de la réalisation et de la dissémination des étalons nationaux de mesure, il est compréhensible qu'il faille apporter la preuve de la valeur ajoutée de ces programmes, financés par les gouvernements, pour l'économie et le bien public. Ainsi, la question de l'impact économique et social de ces activités se pose à juste titre.

Le système national de mesure est considéré comme un service public ou d'intérêt général relevant de l'infrastructure nationale, au service de nombreux aspects cruciaux de la société. Aussi, il est très difficile, par définition, de déterminer et de quantifier les bénéfices économiques et sociaux des programmes métrologiques avec des chiffres directement utilisables par les autorités, ce qui permettrait de justifier les investissements nécessaires dans le domaine de la métrologie.

Cependant, un certain nombre d'études ont été effectuées à l'étranger et aussi pour la Commission Européenne pour essayer de quantifier ces bénéfices. À notre connaissance, les quatre études les plus importantes sont celles qui sont commandées par la Communauté européenne (Union européenne), le DTI (Department of Trade and Industry, Royaume-Uni), le NIST (National Institute for Science and Technology, États-Unis) et le NRC (National Research Council, Canada). Ces études sont fondées sur différentes approches économiques et ont été menées par des économistes ou avec leur aide, ou encore par des sociétés de conseil privées et non pas –il faut le souligner- par les laboratoires de métrologie eux-mêmes

L'annexe ÉCO-1 présente un résumé des résultats obtenus aux Etats-Unis, au Royaume-Uni et au Canada. L'annexe ÉCO-2 présente l'étude menée pour le compte de l'Union Européenne. On peut certes contester les nombres qui sont donnés, mais qualitativement, il apparaît un consensus sur les conclusions suivantes :

- Les investissements publics dans les systèmes nationaux de mesure mis en œuvre et conservés par les laboratoires nationaux de métrologie sont clairement justifiés.
- Les laboratoires nationaux de métrologie apportent en retour des bénéfices considérables en termes de compétitivité internationale et d'innovation commerciale, ainsi qu'une aide au secteur industriel.
- Les laboratoires nationaux de métrologie génèrent d'importants bénéfices de nature non-économique, sous forme d'améliorations à de nombreux aspects liés à la qualité de la vie, comme la santé et la sécurité, l'environnement et la protection du consommateur.
- Les laboratoires nationaux de métrologie ont un impact sur l'économie en maintenant l'infrastructure nationale de mesure, en apportant des aides à l'innovation, en permettant une représentation du pays et une compétition équitable et sûre.

Il faudra accorder plus d'attention et donc de moyens aux technologies émergentes, comme la métrologie appliquée à la nanotechnologie, aux mesures quantiques, à l'industrie du logiciel, à la chimie et à la biotechnologie. Il faudra en outre développer étalonnages et les comparaisons faites par les moyens de communication modernes dont l'Internet

Même si ces évaluations ne concernent pas spécifiquement le cas de la France, l'approche et les conclusions générales obtenues par ces études restent néanmoins valables, dans la mesure où notre développement économique et industriel est comparable. On peut donc affirmer que les investissements gouvernementaux sont très rentables, bien justifiés et une augmentation de ceux-ci serait tout aussi rentable et justifiée (Recommandation 8).

9 – Coopération internationale

Les besoins considérables de développement de la métrologie concernent toutes les Nations, même les plus puissantes. Il n'est ni raisonnable, ni faisable de réaliser tous les travaux nécessaires au sein d'un seul Pays. Il est fondamental de développer ou, le cas échéant, d'initier des coopérations internationales dans le domaine de la métrologie, qu'elle soit fondamentale ou appliquée (Recommandation 9). Par ailleurs, il faut en profiter pour

consolider la SI en agissant en faveur d'une équivalence de plus en plus stricte entre les étalons nationaux. Plusieurs organisations ont été d'ores et déjà mises en place.

L'organisation la plus ancienne dédiée à ces tâches est la Convention du mètre dont le Bureau international des poids et mesures est l'établissement exécutif (voir annexe METR-2). Grâce aux comparaisons organisées par le BIPM, les étalons de nombreux laboratoires nationaux de métrologie sont traçables au BIPM, c'est-à-dire qu'on peut affecter une incertitude à la valeur trouvée par rapport à l'étalon du BIPM. Les grands pays ont leurs propres réalisations primaires (en France, le BNM) et seul le kilogramme est traçable au BIPM. Mais les autres étalons font l'objet de nombreuses comparaisons avec ceux du BIPM et des laboratoires nationaux de métrologie qui possèdent les mêmes étalons primaires. En aval, les chaînes d'étalonnage constituées par les laboratoires accrédités permettent à tout usager d'avoir des appareils de mesure traçables au BIPM (ou mieux, au SI).

Cependant, ce système très centralisé s'est avéré à la longue trop contraignant pour les échanges internationaux. La nécessité d'une certaine transversalité se faisait de plus en plus sentir. Ceci a conduit à la création d'organismes régionaux de métrologie (en Europe : EUROMET (voir annexe INTER-1) qui regroupent les laboratoires nationaux de métrologie. Ces organisations ne remplacent pas le BIPM, mais ils assurent la coordination des travaux et des comparaisons au sein de la région, que les pays fassent ou ne fassent pas partie de la Convention du mètre. Cela permet d'étendre la traçabilité au SI par l'intermédiaire de ces comparaisons interlaboratoires.

Une autre difficulté du système était que, lors des transactions internationales, l'importateur était obligé de faire effectuer un étalonnage dans son pays, même si ces mesures avaient été faites par le laboratoire national de métrologie du fournisseur qui garantissait la traçabilité au SI avec une certaine incertitude. Le CIPM, en concertation avec les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie, a mis au point une procédure pour assurer et faire reconnaître une équivalence mondiale des résultats de mesure. C'est "**l'Arrangement de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage délivrés par les laboratoires nationaux de métrologie du CIPM**", signé par plus de cinquante laboratoires nationaux de métrologie (voir annexe INTER-2).

Grâce à cet arrangement, tout exportateur qui aura fait étalonner ou vérifier son produit par le Laboratoire national de métrologie ou ses laboratoires associés, n'a plus besoin de refaire étalonner ou vérifier ses produits dans les pays importateurs, ce qui génère d'importantes économies. C'est aussi une façon d'abolir un des nombreux obstacles techniques au commerce de nature non tarifaire, un des objectifs de l'Organisation mondiale du commerce (OMC). D'après une étude effectuée pour le BIPM par une société privée canadienne indépendante (KPMG Consulting), même si cet arrangement ne faisait qu'augmenter de 0,1% le bénéfice net d'un industriel, cela ferait au total plusieurs milliards d'euros.

10 - La formation en métrologie

Dans la plupart des domaines évoqués précédemment, le développement des activités de métrologie ne peut pas satisfaire les besoins s'il n'est pas accompagné d'une intégration complète de la démarche associée par les acteurs du domaine considéré (de celui qui a effectué la mesure à celui qui utilise le résultat). Prise de conscience des nécessités et des

enjeux, apprentissage méthodologique et pratique sont donc des clefs du succès. Ces éléments constituent l'effort de formation à mener.

Des métrologues aux responsabilités très variées

Une première voie d'analyse des besoins de formation consiste à identifier les métiers (nouveaux ou existants) relatifs à la métrologie dans l'entreprise et, plus généralement, dans la société. Résolument inscrites dans les fonctions d'appui à la direction « assurance-qualité » dans la plupart des groupes industriels, les professions liées à la métrologie s'ordonnent autour des découpages usuels en niveaux de qualification :

1°) Cadres et ingénieurs-métrologues, responsables de la fonction « métrologie », et appelés à arbitrer dans la conception des chaînes de mesure ;

2°) Techniciens, en général dits “techniciens supérieurs”, chargés de la caractérisation ou de la mise en œuvre transverse des dispositions de suivi des instruments ou des lignes de mesure dans leur secteur professionnel ;

3°) Opérateurs engagés au quotidien dans les tâches pratiques d'obtention de résultats expérimentaux.

On pourrait ajouter, pour un effectif nécessairement réduit, les ingénieurs et chercheurs “professionnels” de la métrologie travaillant au dispositif de mise en place des références au plus haut niveau d'exactitude et d'assurance de la traçabilité…

Le développement rapide, notamment dans les secteurs de l'industrie mécanique, spatiale, et de transformation, d'une infrastructure métrologique propre à l'entreprise, liée en particulier aux besoins de reconnaissance que confère l'accréditation, a conduit à accroître les besoins au niveau intermédiaire des techniciens (très) supérieurs ou des cadres de premier niveau ; il s'agit aujourd'hui d'agents dont l'activité est principalement tournée vers la métrologie au sens large. Initialement assurée presque exclusivement, dans le cadre de la formation continuée tout au long de la vie, par le Conservatoire national des arts et métiers, l'offre de formation s'est diversifiée dans les dix dernières années, de façon cohérente, autour de lycées professionnels, d'années complémentaires d'IUT ou de quelques licences professionnelles. Les écoles d'ingénieurs de Douai, du Mans, ... et bien évidemment le CNAM (ce dernier sur tout le territoire national) dispensent les formations spécialisées aux futurs ingénieurs. Poursuivre et amplifier cet effort, en formation initiale et continue, est évidemment nécessaire pour accompagner, dans les divers domaines, la croissance des besoins.

Des compétences complémentaires associées à une spécialité de base

Une approche complémentaire, initiée par les établissements cités ci-dessus et les clubs professionnels, peut être envisagée. Dans le domaine professionnel, les personnes engagées dans les opérations de mesure ou utilisant les résultats de celles-ci doivent avoir confiance dans leurs actes et dans les décisions qu'ils prennent à partir des résultats, et être susceptibles d'inspirer confiance aux autres partenaires : les besoins doivent donc être analysés plutôt en termes de

Qualification (pour exercer une action donnée)

Compétence (pour insérer leur travail dans la logique d'une vision métrologique des résultats de mesure) ;

Spécialisation (s'ils deviennent responsables de la mise en place d'une partie de la fonction métrologie » dans leur secteur professionnel) ;

Ces qualifications, ces compétences, cette spécialisation nécessitent des éléments de formation spécifiques, venant se greffer sur les compétences associées à un métier de base qui peut être très divers (chimie industrielle, électricité automobile, etc.). Elles doivent faire l'objet d'une reconnaissance non ambiguë et donc d'une validation. À titre d'illustration extrême, on pourrait dire que la pratique d'un médecin, lors d'une investigation diagnostique chiffrée, doit faire l'objet d'une qualification spécifique, implicite la plupart du temps. De manière analogue, l'exercice des contrôles réglementaires relatifs à la pollution chimique des gaz ou des effluents exige pour ceux qui les pratiquent une compétence particulière reconnue, et une habilitation à pratiquer...

Les besoins à satisfaire pour la formation à la métrologie revêtent donc les aspects suivants : ils concernent des domaines d'activité professionnelle extrêmement variés, se situent à des niveaux d'implication croissante dans l'organisation du suivi métrologique, et constituent, en tout état de cause, des éléments de **compétence supplémentaire** venant se greffer sur des spécialités de base, notamment en termes de méthodologie commune.

Des expériences ont été effectuées, dans le cadre de programmes encouragés par la puissance publique (SQALPI, au ministère de l'industrie) ou l'Union européenne (programmes Leonardo), pour concevoir et expérimenter, en plus de l'offre existante, des formations ayant une vocation qualifiante dans ce domaine. Elles doivent être amplifiées et encouragées, en mettant à profit les nouvelles opportunités offertes par l'évolution très récente du droit à la formation continuée tout au long de la vie pour les salariés, dans tout domaine d'activité, et par la montée en puissance du dispositif de validation de l'expérience qui peut accompagner, dans le cas particulier de la métrologie, l'accès à un niveau de certification plus élevé.

Les acteurs publics aujourd'hui les plus engagés dans la formation en métrologie ont vocation à constituer, comme ils l'ont fait au cours des dernières années, le pivot de réflexion, ou même de certification, des nouvelles offres à développer en partenariat étroit avec le monde professionnel.

Vers l'émergence d'une véritable *culture métrologique*.

Plus généralement, pour préparer le futur professionnel à intégrer ces qualifications et ces compétences indispensables pour exercer efficacement son activité, ou tout simplement pour donner au futur citoyen la capacité d'analyse utile afin de faire le tri dans la quantité très élevée de données chiffrées qu'on lui propose aujourd'hui pour étayer sa réflexion dans tous les domaines, le développement d'une véritable culture métrologique doit être encouragé. Malgré des tentatives récentes de retour à une approche plus expérimentale, l'enseignement initial des sciences, dans les classes secondaires, conserve une vocation plus dogmatique que véritablement modélisatrice : même parmi les futurs enseignants, même aux concours d'agrégation, on fait davantage confiance à la loi qu'au résultat expérimental, dont d'ailleurs on considère l'évaluation de l'incertitude au mieux comme une contrainte nécessaire pour laquelle on veut appliquer des recettes.

La diffusion de cette **culture métrologique**, dans laquelle on trouve historiquement les bases de l'éveil du sens critique, passe par l'intégration résolue, dans les programmes scientifiques même les plus élémentaires, des notions illustrées de base de la métrologie, non pas introduites à part, comme une "couche" de complément, mais intimement liées à l'apprentissage de chacune des sciences. Mesures, références, incertitude, quelques rudiments d'expression statistique des résultats devraient être intégrés comme les éléments incontournables d'une méthodologie expérimentale.

C'est sans doute dans ce dernier domaine que l'effort à entreprendre est le plus important et le plus difficile. On constate cependant que certains pays d'Europe, comme la Suisse, ont déjà pu assurer les premiers éléments de diffusion d'une telle **culture métrologique**.

11 - Recommandations

Recommandation 1

Que ce soit pour le bénéfice de l'industrie en général ou des activités liées à l'environnement, la sécurité ou la santé, dans tous les cas, les besoins de métrologie plus précise et plus diversifiée ne pourront que croître, souvent sous la pression des normes ou des directives européennes. Il est donc nécessaire que la métrologie française poursuive fermement sa politique d'amélioration et de diversification des étalons, des matériaux de référence et des moyens de mesure.

Recommandation 2

On constate que, alors que le BNM et certains laboratoires de recherche ont un savoir faire en instrumentation de tout premier plan, mais les transferts permettant aux industriels de puiser dans les techniques nouvelles développées dans ces laboratoires sont insuffisants. Il est crucial :

1°) De coordonner les politiques scientifiques du BNM et de son successeur avec ceux des organismes de recherche publique en matière de métrologie et de valoriser les résultats obtenus en termes d'application et de conception de nouveaux appareils de mesure et de contrôle;

2°) Que le BNM s'attache à favoriser le transfert vers les domaines industriels, spatiaux, militaires ou hospitaliers les compétences ainsi valorisées.

Recommandation 3

Au cours des années à venir, on verra se poursuivre et même s'accélérer des mutations technologiques (par exemple l'électricité quantique, les nanotechnologies et les biotechnologies) qui conduiront nécessairement vers une nouvelle métrologie, radicalement différente de celle que nous connaissons aujourd'hui. Les acteurs de la métrologie en France se doivent de se doter des outils de prospective et s'assurer de la collaboration de scientifiques et d'ingénieurs de haut niveau afin de faire face à ces défis qu'il est seul à assumer. Ils doivent aussi poursuivre les recherches et développements dans le domaine de la métrologie fondamentale, conformément aux recommandations de la Conférence générale des poids et mesures de 2003, notamment pour la balance du watt et l'électricité quantique. Il est essentiel

que, en parallèle, le Ministère de la Recherche s'implique davantage dans ces recherches à caractère fondamental.

Recommandation 4

La métrologie en chimie, biochimie et biologie va continuer à se développer et à se diversifier et, en parallèle, des normes de plus en plus nombreuses vont être édictées. Les industriels et les laboratoires d'analyse seront contraints de se plier aux exigences qui en résulteront en matière d'exactitude de mesures. Il faut donc sensibiliser les acteurs de l'analyse à la métrologie, en particulier:

- 1- En établissant et en diffusant des guides pratiques pour l'évaluation des principales contributions à l'incertitude;
- 2- En organisant des stages et des cours de formation destinés aux spécialistes effectuant des analyses;
- 3- En introduisant dans l'enseignement de la chimie et de la biochimie les principes de la métrologie chimique.

Recommandation 5

La mesure des doses des rayonnements ionisants pour les applications médicales a, actuellement, une précision insuffisante. En particulier, pour la radiothérapie, où les contraintes sont les plus grandes, la combinaison des incertitudes dans toutes les étapes conduisant à la dose délivrée au patient est encore une limitation à l'optimisation et à la sécurité des traitements. Une marge de sécurité d'un facteur 3 à 10 dans l'exactitude des études dosimétriques doit être envisagée, mais implique un effort considérable de recherche, en France, et dans le cadre de coopérations internationales, portant à la fois sur les méthodes et appareillages de mesure et sur les références primaires. Cet effort est d'autant plus justifié que l'évolution des connaissances biologiques et médicales et la mise en œuvre de nouvelles techniques peut faire espérer une meilleure efficacité thérapeutique, pourvu qu'elle soit associée à une dosimétrie rigoureuse. Il doit être une des priorités des recherches liées à la santé publique.

Recommandation 6

En accompagnement de l'intense développement prévu des nanotechnologies, il faut développer la nanométrie, en particulier, faire un gros effort de recherche et de développement pour la conception d'appareils de mesure et de contrôle.

Recommandation 7

Il faut donner à la métrologie les moyens de développer des méthodes de mesure pour permettre d'appliquer rapidement les règlements et directives européennes impliquant des mesures ou des contrôles, notamment dans les domaines de l'environnement, de l'agroalimentaire et de la sécurité. Inversement, il serait nécessaire qu'une étude métrologique soit effectuée avant la promulgation des textes légaux pour éviter d'y insérer des valeurs numériques correspondant à des mesures imprécises, voire impossibles.

Recommandation 8

Les activités en métrologie engendrent de très importantes plus-values en termes de retours industriels ou dans le domaine de la santé. L'argent dépensé pour la métrologie constitue donc un facteur d'enrichissement pour le pays. Il est recommandé que le Gouvernement en tienne largement compte lors des affectations budgétaires pour le BNM

Recommandation 9

Quels que soient les moyens mis à la disposition de la métrologie nationale, il ne sera pas possible de faire tout ce qui serait nécessaire. D'une part, une métrologie de proximité est indispensable lorsqu'il y a beaucoup d'utilisateurs. Ceci implique que le successeur du BNM devra être très actif dans ces domaines. Mais, d'autre part, s'il n'est pas utile que tous les pays possèdent des étalons ou des matériaux de référence pour toutes les quantités, une certaine duplication des réalisations est nécessaire pour effectuer des comparaisons destinées à éviter les biais systématiques.

Il faut qu'une entente s'établisse entre les laboratoires nationaux de métrologie pour que, globalement, à l'échelle de l'Europe, toutes les fonctions métrologiques soient réalisées avec une certaine duplication. Pour cela, il est urgent que, par exemple dans le cadre d'EUROMET, le BNM et les directeurs des laboratoires nationaux de métrologie se concertent pour coordonner leurs activités.

Recommandation 10

La métrologie est organisée en France autour du Bureau national de métrologie (BNM), actuellement un groupement d'intérêt public (GIP), structure temporaire qui ne correspond pas aux besoins à long terme. Un nouveau statut est élaboré par les autorités de tutelle. Cette nouvelle structure, au sein du Laboratoire national d'essais (qui deviendrait Laboratoire national de métrologie et d'essais, LNME), donnera à cette activité d'intérêt national la pérennité nécessaire.

Il faut aussi s'assurer que la mise en œuvre de cette réforme donne à la métrologie française l'efficacité et les moyens nécessaires, pour soutenir la comparaison avec ce qui se fait dans les autres grands pays industriels.

En ce qui concerne son fonctionnement, il est recommandé que la nouvelle structure :

1. Soit dirigée par une instance autonome, composée, à côté des responsables des laboratoires nationaux de métrologie, de représentants des ministères concernés et de personnalités extérieures, dont des représentants en nombre suffisant de la communauté scientifique,
2. Soit donc largement indépendante des laboratoires nationaux de métrologie auxquels elle confie des travaux de recherche,
3. Assure la coordination entre les différents laboratoires nationaux et autres organismes,
4. Instruise et prépare les programmes annuels et pluriannuels et les fasse exécuter.

BIBLIOGRAPHIE

Académie des sciences, (1993), “Ozone et propriétés oxydantes de l’atmosphère ”, Rapport N°30, Éditions Tec et Doc, Paris

Académie des sciences, (1994), “L’effet de serre”, Rapport N°31, Éditions Tec et Doc, Paris

Académie des sciences, (1994), “L’ozone stratosphérique”, Rapport N°41, Éditions Tec et Doc, Paris

Académie des sciences et Académie des technologies (2004), “Nanosciences et nanotechnologies”, Rapport commun sous presse

Académie des sciences et CADAS, (1996), “Quelle place pour la métrologie en France à l’aube du XXI^e siècle”, Rapport commun N°5, Éditions Tec et Doc, Paris

BNM, (1996), “Étalons et unités de mesure”, éditions du Bureau national de métrologie, Paris

CIPM, (avril 2003), Évolution des besoins dans le domaine de la métrologie pour le commerce, l’industrie et la société et le rôle du BIPM, éditions du BIPM.

Gy, Pierre, (1996), “L’échantillonnage des lots de matière en vue de leur analyse”, Masson, Paris

IPCC, (2001), Climate change 2001, The scientific basis, WMO-IPCC, Cambridge University Press, 881 pages

ISO, (1993), “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, International Organization for Standardization, Genève

MRA, (1999), “Arrangement de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d’étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie”, éditions du BIPM

Perruchet, C. et Priel, M., (2000), “Estimer l’incertitude”, Editions AFNOR, Paris

Union Européenne (décembre1998), “In vitro Diagnostic Medical Devices”, Directive 98/79/EC du Parlement européen et du Conseil du 27 octobre 1998

Williams, G., (juillet 2002), “The assesment of the economic role of measurements and testing in modern society ”, University of Oxford, European Measurement Project dans le cadre du programme GROWTH de la Commission européenne.

ANNEXE METR-1

Le Bureau national de métrologie

En France, l'établissement chargé de la métrologie primaire est actuellement le Bureau national de métrologie (BNM). Bien qu'il joue le même rôle en France que les grands laboratoires de métrologie étrangers comme la PTB en Allemagne ou la NPL au Royaume-Uni, il s'en distingue par une structure atomisée comprenant quatre laboratoires du BNM :

- 1- Le BNM-INM (Institut national de métrologie), au Conservatoire national des arts et métiers ;
- 2- Le BNM-LNE, au Laboratoire national d'essais et, dans le même établissement, le BNM-LNE/LAMA (Laboratoire André Marie Ampère) ;
- 3- Le BNM-LNHB (Laboratoire national Henri Becquerel), au Commissariat à l'énergie atomique ;
- 4- Le BNM-SYRTE (Systèmes de référence temps-espace), à l'Observatoire de Paris.

Ces laboratoires assurent la mise en œuvre des unités de base et la plupart des unités dérivées du Système international d'unités (SI). Cependant, ils ne sont pas équipés pour certaines grandeurs et le BNM s'est adjoint sept laboratoires associés, travaillant sous contrat. Ce sont :

- Le CEA-CESTA (Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine) pour l'accélérométrie ;
- Le CETIAT (Centre technique des industries aérauliques et thermiques) pour l'hygrométrie, l'anémométrie et la débimétrie liquide ;
- L'ENSA (Ecole nationale supérieure d'arts et métiers de Paris) pour la pression dynamique ;
- L'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) pour la dosimétrie des neutrons ;
- Le LADG (Laboratoire associé de débimétrie gazeuse) pour la débimétrie gazeuse ;
- Le LPMO (Laboratoire de physique et métrologie des oscillateurs) pour les fréquences ;
- L'Observatoire de Besançon pour le temps et les fréquences.

Les travaux de tous ces laboratoires sont suivis et coordonnés par un Secrétariat permanent d'une dizaine de personnes qui gère un budget total de près de 16 millions d'euros. Cela représente un peu plus de la moitié des dépenses totales pour la métrologie en France, le reste étant assuré par les établissements abritant les laboratoires du BNM et le Ministère de la recherche.

Regroupant au total environ 200 chercheurs, ingénieurs et techniciens, le BNM se place, sur le plan mondial dans un groupe comprenant les instituts nationaux du Japon, de la Russie, de l'Italie et de l'Australie (par ordre d'importance décroissante), loin derrière le NIST aux Etats-Unis, la PTB en Allemagne et le NPL au Royaume-Uni. Cette situation n'a guère évolué depuis 1995, aussi nous renvoyons au rapport Académie des Sciences-CADAS "*Quelle place pour la métrologie en France à l'aube du XXIe siècle ?*" pour des éléments chiffrés relatifs à ces Instituts nationaux.

La structure administrative est, depuis 1994, celle d'un Groupement d'intérêt public (GIP) de durée limitée. Mais, dès mai 2005, il va changer de statut car les ministères concernés (Industrie, Recherche et Budget) sont opposés au renouvellement sous forme de GIP. Le grand inconvénient de la situation actuelle est son caractère provisoire, alors que la métrologie est une activité qui doit être pérenne pour être efficace et se préparer aux enjeux de l'avenir. L'autre objection au statut actuel, souligné par la Cour des Comptes, est que l'Assemblée générale du GIP qui prend les décisions financières, comprend les Établissements que le BNM finance.

Un décret est en préparation au ministère de l'industrie qui devrait répondre à ces objections. Le rôle joué actuellement par le BNM serait confié au Laboratoire National d'Essais (LNE), établissement public à caractère industriel et commercial qui deviendrait Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNME). Il serait aussi institué un Conseil national de la métrologie qui établirait les orientations stratégiques pluriannuelles en matière de métrologie scientifique et appliquée. Il aurait aussi un rôle consultatif pour proposer les partenariats et les priorités de financement des activités métrologiques et assurerait le suivi d'exécution des programmes.

Que ce soit ce statut ou un autre qui sera retenu, certaines conditions devraient être respectées. Celles-ci ont été énoncées par le Comité stratégique du BNM présidé par un membre de l'Académie des technologies (actuellement J.-P. Causse) et composé de personnalités de l'industrie, de la recherche ou des ministères, toutes indépendantes du BNM :

- Autonomie des décisions scientifiques et de gestion du BNM vis-à-vis de la structure de rattachement et indépendance vis-à-vis des laboratoires auxquels il confie des travaux de recherche,
- Assurer la croissance et la pérennité du BNM dans des directions définies en liaison avec les ministères de la recherche et de l'industrie,
- Assurer la coordination entre les laboratoires nationaux et les autres organismes,
- Séparation du budget du BNM au niveau ministériel du budget de la structure d'accueil,
- Autorité sur l'exécution des programmes.

Ceci fait l'objet de la résolution 10.

ANNEXE METR-2

La Convention du mètre

Les pères fondateurs du système métrique avaient pour objectif de mettre fin au chaos qui régnait en France dans le domaine de la mesure. La diversité locale des unités était une des principales doléances transmises lors de la préparation des Etats généraux. Ce qui était vrai au niveau d'un pays était devenu une nécessité dès la moitié du 19^{ème} siècle, lorsque, avec l'apparition de l'ère industrielle, les échanges internationaux devinrent importants. Cela conduisit 17 pays à signer, en 1875, la **Convention du mètre** qui comprend maintenant 51 pays membres, une douzaine d'autres Pays ou entités économiques étant partiellement associés à la Convention.

Les organes de la Convention du mètre sont :

- **La Conférence générale des poids et mesures** (CGPM), constituée par les délégués des États membres, décide du financement et des travaux à effectuer dans le cadre de la mission de la Convention qui est d'assurer l'unification mondiale des mesures.
- **Le Comité international des poids et mesures** (CIPM), élu par la CGPM, constitue l'instance directrice entre deux réunions de la CGPM. Il est aidé en cela par onze Comités consultatifs couvrant l'ensemble des domaines de la métrologie.
- **Le Bureau international des poids et mesures** (BIPM) est un laboratoire chargé de conserver les étalons internationaux, d'effectuer les comparaisons avec les étalons nationaux et, de façon générale, d'œuvrer au développement des nouvelles méthodes de mesure, en conduisant notamment des recherches pouvant contribuer à l'amélioration de l'exactitude des étalons ou de leurs mises en pratique.

Le BIPM, installé au Pavillon de Breteuil à Sèvres, comporte essentiellement un laboratoire d'une cinquantaine de chercheurs, ingénieurs et techniciens travaillant dans six sections : longueurs, masses, temps, électricité, rayonnements ionisants et chimie. Une septième section, photométrie et radiométrie, vient d'être supprimée pour des raisons d'économie budgétaire. L'instrument principal de son rôle de coordination et de développement de la métrologie mondiale est son site Web (<http://www.bipm.org>) qui offre :

- Un moteur de recherche sur la métrologie, les liens vers les sites des laboratoires nationaux de métrologie et des principales organisations internationales,
- Des rapports sur les travaux du CIPM et du BIPM et, surtout,
- Une base de données sur les comparaisons internationales (dites comparaisons clés) et les déclarations de possibilités des laboratoires nationaux de métrologie en matière de mesures et d'étalonnages (Calibration and Measurement Capabilities, CMC) réalisées dans le cadre de l'arrangement de reconnaissance mutuelle (voir annexe INTER-2).

Le BIPM est, de plus, responsable de la publication de “*Metrologia*”, la seule revue internationale de haut niveau en métrologie. Enfin, il assure la coordination des activités des organisations régionales de métrologie (EUROMET pour l’Europe) au sein du Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM (JCRB).

Malgré la présence du BIPM en France (à Sèvres), Notre Pays n’a aucun droit particulier à l’intérieur de la Convention du mètre sauf d’avoir obligatoirement un représentant au CIPM. Par ailleurs, la CGPM se réunit obligatoirement en France sous la présidence du Président de l’Académie des sciences. Notons aussi que la cotisation de la France au BIPM, qui suit les mêmes règles que les autres membres de la Convention du mètre, est versée par le Ministère des affaires étrangères au titre des organisations internationales et non par le BNM.

Il s’ensuit que le BNM n’a pas de relation privilégiée avec le BIPM et ce dernier ne contribue pas (et même n’a pas le droit de contribuer) au système métrologique français. Il ne peut qu’associer le BNM, comme tous les autres laboratoires nationaux, aux comparaisons des étalons et aux travaux des Comités consultatifs et groupes de travail.

ANNEXE METR-3

La nanométrie

Les nanotechnologies sont d'ores et déjà présentes dans un très grand nombre de domaines d'activité. On se réfèrera au rapport “*Nanosciences, nanotechnologies*” conjoint de l'Académie des technologies et de l'Académie des sciences sur ce sujet. Dans l'application de toute technologie, on a besoin d'effectuer des mesures et les nanotechnologies ne font pas exception. Il faut en effet assurer

- La répétitivité des propriétés et donc de la qualité du produit,
- La cohérence des composants destinés à être mis en place dans un ensemble plus vaste,
- La compatibilité des composants produits en divers endroits, ce qui implique la traçabilité vers des étalons communs.

En se limitant au dimensionnel, on utilise aujourd’hui, et on va utiliser à grande échelle dans les années à venir, des instruments de production et de contrôle dimensionnel de très haute précision comme les microscopes à force atomique, les microscopes à balayage électroniques ou à effet tunnel, des microscopes optiques à fente ou avec des systèmes de vision CCD, ou encore la nanotomographie en rayons X. De façon générale, les progrès des réalisations en nanotechnologie ont été si rapides, que les appareils de mesure n'ont pas suivi et qu'il y a un retard considérable à rattraper (même aux Etats-Unis qui, pourtant, y consacrent de gros moyens).

Actuellement, les étalons dimensionnels sont des grilles constituées de structures cristallines monoatomiques parallèles dont l'intervalle dépend des propriétés des atomes utilisés.

Les laboratoires nationaux de métrologie, en particulier le BNM, ont un rôle important à jouer, notamment en créant des capacités de mesure d'étalons de référence avec des conditions de garantie métrologique et en ayant les outils et les compétences nécessaires pour offrir des services en certification d'étalons secondaires, et pour caractériser des produits. En effet, même si les industriels peuvent agir avec leurs propres références, il y a lieu de garantir leur cohérence entre les mesures effectuées par d'autres acteurs en France ou à l'étranger. Ceci ne peut se faire qu'en assurant la traçabilité vers le BNM, lui-même travaillant en coordination avec ses homologues étrangers. Cela implique donc que le BNM développe une expertise technique ciblée vers les problèmes métrologiques spécifiques aux nanostructures.

Donnons quelques exemples où la nanométrie est ou devrait être présente.

- Les semi-conducteurs en microélectronique sont produits avec une technologie à 0,18 µm et des laboratoires comme le LETI ont déjà entrepris un programme de recherche pour atteindre 0,12 µm. Les prévisions américaines envisagent 0,035 µm dans douze ans. Or, la réalisation d'un circuit intégré en 0,18 µm nécessite aujourd'hui l'utilisation de 20 à 30

photo-masques dont les tolérances dimensionnelles peuvent descendre jusqu'à 12 nm et la contrainte limite de la superposition des motifs est de 65 nm. Les besoins en étalons parfaitement cohérents et des moyens d'étalonnage de très haut niveau sont indispensables, si on sait que ces photo-masques proviennent habituellement de différents fabricants.

- Les chimistes et les biologistes sont demandeurs d'informations à l'échelle du nanomètre, sinon du dixième de nanomètre pour l'analyse des échantillons biologiques (chromosomes, ADN, bactéries), pour l'analyse de la structure des molécules, pour les techniques de construction de ces molécules atome par atome, pour la caractérisation des nanostructures des matériaux, pour la cartographie en temps réel des processus chimiques, pour la forme et la rugosité des matériaux, etc... Pour ces applications, il y aura lieu de considérer aussi la micrométrie des masses
- Les exigences de plus en plus sévères, concernant la présence de polluants dans l'atmosphère ou l'eau, conduisent à pratiquer des analyses à un niveau inférieur à un ppb (un milliardième en valeur relative). C'est, par exemple, le cas des dioxines ou de l'ozone. Les mêmes exigences de sensibilité des mesures se retrouvent en radioprotection et en utilisation des rayonnements ionisants à des fins médicales.
- La fabrication d'une grande variété de micro-systèmes exige des contrôles à un niveau sub-micrométrique sinon nanométrique. Parmi ces micro-systèmes, on peut citer les têtes d'imprimante à jet d'encre, les têtes de lecture des disques, les micro-capteurs de pression, les micro-accéléromètres, les biopuces, les couches minces, les divers micro-assemblages, les faces des fibres optiques, etc... Pour certaines de ces applications, en plus de la nanométrie dimensionnelle, il est nécessaire de recourir aussi à la mesure des nanoforces (jusqu'à 10^{-9} N).
- La mesure de la masse de macromolécules (biologie moléculaire) ou de force atomique (microscope à force atomique). Des voies à suivre sont données dans l'annexe METR-4.
- La nanodosimétrie dans le domaine des rayonnements ionisants doit se développer à la suite des seuils de protection de plus en plus sévères qui sont imposés par les autorités (voir annexe SANTÉ-1).
- On voit ainsi que le champ d'application de la nanométrie est considérable et ne se limite pas à la métrologie dimensionnelle, même si celle-ci est, à présent, la plus directement sollicitée. C'est aux laboratoires nationaux de métrologie (en France le BNM) de prendre conscience de l'importance de ces nouvelles orientations et d'être les points focaux de son développement et du transfert aux industriels. Il faut noter à ce sujet l'avance considérable prise par le NIST dans ce domaine en associant étroitement les recherches en nanotechnologies et en développant simultanément les moyens de mesure correspondants. D'autres pays comme l'Allemagne, le Royaume-Uni ou le Japon y consacrent aussi des moyens très importants.

ANNEXE METR-4

Point sur les constructeurs de balances et de masses étalons en France

Situation actuelle en France :

Une grande majorité des utilisateurs de balances et d'étalons de masse travaillent en masse conventionnelle et la plupart d'entre eux l'ignorent (généralement sans incidence par rapport à l'incertitude recherchée pour les pesées courantes).

Le marché national des comparateurs de masses et des étalons de masse de haute exactitude est limité aux laboratoires nationaux de métrologie (BNM-INM et BNM-LNE) et aux laboratoires de recherche scientifique et industrielle.

En France, seul le BNM-INM possède le savoir-faire pour réaliser :

- Des kilogrammes de référence en platine iridié ou en d'autres alliages de haute qualité métrologique comme l'alacrite XSH avec une tolérance de l'ordre du milligramme (10^{-6} kg) ;
- Des comparateurs de kilogrammes ayant une répétitivité de l'ordre du microgramme (10^{-9} kg).

Parmi les fabricants de poids et masses étalons, il y a un seul fabricant français (Zwiebel) capable de réaliser des étalons de classe E (classe de précision la plus élevée selon la classification de l'OIML).

Le point faible en France est qu'il n'y a pas de balanciers français capables de fabriquer des comparateurs de masse et balances de haute exactitude utilisant les technologies actuelles (suspensions flexibles au lieu de l'association traditionnelle couteau-plan associées à un asservissement en position du fléau. Au plan international, il en existe deux en Europe : Sartorius (Allemagne) et Mettler-Toledo (Suisse).

Besoins :

Dans le domaine des nanotechnologies, il existe des nanobalances permettant de mesurer des masses de l'ordre du nanogramme (10^{-12} kg) mais le résultat de pesées obtenu à l'aide de telles balances n'est pas traçable. Leur étalonnage est en effet limité par l'utilisation d'étalons de masse de 1 milligramme (10^{-6} kg) qui sont raccordés avec une incertitude de quelques dixièmes de microgramme (quelque 10^{-10} kg).

Pour ce domaine des très faibles masses, il serait nécessaire de disposer d'étalons de référence de 1 milligramme dont la masse pourrait être déterminée à 10^{-6} près (ou mieux) en valeur relative à partir desquelles pourraient être raccordés des sous-multiples du milligramme. Ceci implique de définir l'unité de masse à partir d'une constante physique (par exemple une définition du type $m = A \times h$ où h est la constante de Planck dont la valeur sera fixée exactement), d'améliorer sa réalisation ou sa mise en pratique (par exemple, dans l'expérience

de balance du watt, il s'agira de déterminer A avec la meilleure exactitude possible) et de développer :

- Soit une nouvelle chaîne d'étalons matériels réalisés dans un matériau très homogène et de grande pureté, nécessairement conservés et raccordés sous vide ;
- Soit une expérience (nanobalance du watt par exemple) permettant le raccordement à 10^{-6} près d'une masse de 1 milligramme à la constante physique choisie pour raccorder l'unité de masse.

Bien qu'il s'agisse d'une réalisation à long terme (10 ans ou plus), il est possible dès maintenant de concevoir et de développer des nanocomparateurs de masses qui seront nécessaires, de manière générale, en nanotechnologie.

ANNEXE METR-5

Métrologie quantique en électricité

L'effet Hall quantique est un des points forts du BNM. En 1990, la fabrication d'un grand nombre (> 350) d'échantillons de très grande qualité métrologique a été entreprise par le LEP (Laboratoire d'Electronique Philips à Limeil Brévannes, aujourd'hui désigné sous le nom d'OMMIC) sous la responsabilité conjointe du BNM et du BIPM, suivie par la fourniture à plus d'une vingtaine de laboratoires nationaux. Pour ce projet, le BNM et le BIPM avaient également participé à la conception des échantillons et à leur validation. En 1995, un deuxième projet de grande envergure a été piloté par le seul BNM. Plus de 400 échantillons ont été fabriqués et fournis aux laboratoires étrangers. De façon globale, la qualité des échantillons s'avère passable.

Dans la même période, seulement quelques autres laboratoires développaient des échantillons de bonne qualité mais en nombre très limité: l'école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), la PTB, l'Université de Copenhague, le L2M (Laboratoire de microstructure et de microélectronique à Bagneux, aujourd'hui le LPN, Laboratoire de photonique et de nanostructure localisé à Marcoussis). Aujourd'hui, le CNRC (Canadian National Research Center) se lance dans la fabrication d'un grand nombre d'échantillons sur les mêmes bases que les deux précédents projets.

En ce qui concerne **les réseaux d'échantillons de Hall** (QHARS quantum Hall array standard), le BNM est encore leader et développe des réseaux depuis 1996. La fabrication était assurée jusqu'en 2000 par le LEP. Le LPN a repris aujourd'hui le flambeau. Le BNM-LNE/LAMA assure la conception et la caractérisation de ces réseaux qui permettent d'obtenir des valeurs de résistance allant de 100Ω à $1.29 M\Omega$ rattachées directement à R_K (un échantillon simple a une résistance quantifiée limitée à $R_K/2$ ou $R_K/4$ soit autour de $10 k\Omega$). La PTB a tenté de développer sans succès des réseaux de $1.29 M\Omega$ et il n'y a pas d'autres laboratoires sur ce créneau.

Quant à **l'effet Josephson**, aucun laboratoire français ne développe de réseaux de jonctions Josephson, qu'ils soient de type conventionnel (jonctions sous-amorties) ou de type programmable, binaire ou à commande impulsionnelle. Les principales sources de fabrication des réseaux de Jonctions de Josephson sont le NIST - Boulder (Etats-Unis) et la PTB (Allemagne). Trois autres laboratoires nationaux en développent: le VTT (Finlande), l'AIST (Japon) et le KRISS (Corée). Deux compagnies la commercialisent: HYPRES (licence NIST) et JENA (collaboration avec PTB). Enfin l'Université de Jülich développe aussi quelques réseaux.

Quant à l'application **de l'effet tunnel à un électron**, on distinguera :

1°) Les pompes à électrons que seuls le CEA Saclay (groupe quantronique), le NIST à Boulder et la PTB à Braunschweig ont été capables de développer. Aujourd'hui, seule la PTB nous en fournit. Une collaboration avec LPN vient juste de démarrer cette année avec comme premier objectif la réalisation de transistor SET et à terme le développement de pompes à électrons si cette action est soutenue par le BNM sur plusieurs années. Le groupe quantronique apporte son soutien scientifique à cette opération.

La PTB souhaite poursuivre la collaboration avec le BNM dans l'étude des dispositifs à paire de Cooper du fait que le BNM-LNE/LAMA est seul à disposer d'un amplificateur de courant (comparateur cryogénique 4C) susceptible de mesurer, avec une incertitude de quelques ppm, un courant de l'ordre de quelques pA délivré directement par le SET.

2°) Les dispositifs SETSAW (SAW: surface acoustic wave) développés initialement par l'Université de Cambridge le sont aujourd'hui par le NPL et la PTB dans le cadre d'un projet conjoint. Ces dispositifs pour lesquels la physique est moins "solide" que celle à l'origine des pompes à électrons génèrent des courants de valeur quantifiée supérieure à 400 pA. L'exactitude sur la quantification (écart entre I et e.f) est aujourd'hui de l'ordre de 100 ppm.

3°) Les transistors RF SET, dispositifs qui devaient permettre le comptage d'électrons avec une très grande exactitude. Cependant, les résultats actuels sont peu encourageants (Universités de Yale et de Chalmers).

Pour revenir sur l'état actuel de la fermeture du triangle métrologique, la plus faible incertitude totale atteinte jusqu'à maintenant est de l'ordre du ppm et cela par le NIST en chargeant une capacité cryogénique au moyen d'une pompe à électrons (7 jonctions) et par comptage d'électrons. Ce comptage est entaché d'une incertitude de type A de 0.1 ppm.

ANNEXE METR-6

Évolution de l'instrumentation dans le domaine de la mesure des rayonnements optiques.

Les références primaires dans le domaine des rayonnements optiques sont basées sur l'utilisation de radiomètres cryogéniques qui permettent d'obtenir une incertitude relative un peu meilleure que 10^{-4} pour des niveaux de flux de l'ordre la centaine de microwatts. Pour le moment rien n'indique, que dans un avenir proche, cette référence sera remise en question par l'apparition de méthodes nouvelles permettant de faire des mesures de rayonnements optiques basées sur des principes physiques différents. On peut donc éventuellement envisager quelques améliorations dans ce domaine qui seraient basées sur des raffinements technologiques de ce qui existe déjà.

Pour le transfert, les détecteurs pièges utilisant des photodiodes au silicium donnent actuellement satisfaction car leur étalonnage par rapport au radiomètre cryogénique peut se faire avec une assez faible augmentation de l'incertitude et ils ont une stabilité temporelle très satisfaisante. Dans ce domaine, les développements futurs envisageables sont l'apparition de nouveaux types de photodiodes utilisant de nouveaux matériaux et ayant les caractéristiques requises pour constituer des détecteurs pièges. Il serait donc possible d'augmenter le domaine spectral d'utilisation des détecteurs pièges et par là même d'améliorer le transfert des mesures dans les domaines proche ultraviolet et proche infrarouge qui, actuellement, n'est pas très satisfaisant.

Les besoins de mesures dans le domaine de la biologie connaissent actuellement un développement important. Ceci est également vrai pour la photobiologie. Les premières grandeurs photo biologiques à avoir été mesurées sont celles reliées à la vision humaine pour les besoins de l'éclairage. Ces mesures ont conduit au développement d'un système de grandeurs et d'unités ayant comme unité de base l'unité d'intensité lumineuse, la candela. Les principes et les méthodes utilisés pour les mesures lumineuses peuvent facilement être transposés à la mesure des autres grandeurs photo biologiques et conduire au développement de nombreux appareils de mesure comparable à des photomètres mais utilisant une fonction de pondération propre à la grandeur considérée. Ces dernières années la Commission Internationale de l'Eclairage a normalisé plusieurs de ces fonctions de pondération relatives à la photobiologie humaine et elle travaille encore à la normalisation de nouvelles fonctions aussi bien dans le domaine animal que dans le domaine végétal. Les appareils utilisés pour effectuer ces mesures sont essentiellement des radiomètres à filtre ayant une sensibilité spectrale aussi identique que possible à la fonction de pondération de l'effet photo biologique que l'on souhaite mesurer. La réalisation de tels radiomètres à filtre de haute performance n'est pas sans difficulté.

ANNEXE INDUS-1

Assurance qualité

Les exigences relatives à la qualité sont plus que jamais le souci des entreprises de toutes activités, pour affronter la concurrence et en particulier exporter, il faut définir et garantir le bon niveau de qualité et être sûr de le respecter.

La qualité correspond à “**L'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit ou service qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés, ou implicites**”. Les besoins sont habituellement traduits en propriétés et caractéristiques de critères spécifiés. Les besoins peuvent comporter des aspects d'aptitude à l'emploi, de sûreté, de disponibilité, de fiabilité et de maintenabilité.

Gérer la qualité, c'est-à-dire mettre en place un système d'assurance qualité pérenne et efficace, c'est faire en sorte que l'entreprise produise la qualité optimale correspondant au coût minimal, ce qui revient donc à éliminer la non-qualité, c'est-à-dire à la fois la sous-qualité et la sur-qualité qui conduisent à des dépenses inutiles.

La politique générale de qualité étant définie, il reste l'essentiel, construire et contrôler la qualité dans l'entreprise, pour cela il est nécessaire de mettre en œuvre les moyens de mesure et d'essais adaptés à la définition des caractéristiques du produit ainsi qu'à la mise au point du processus de fabrication et à la vérification de la conformité de la production. Les essais doivent être exécutés conformément à des procédures arrêtées conjointement par le client et le fournisseur lors de la rédaction du cahier des charges. Les procédures seront définies dans des documents normatifs, ou encore mis au point dans des laboratoires indépendants ayant éventuellement reçu l'agrément d'un organisme certificateur. Les essais constituent un élément essentiel de l'obtention de la qualité d'un produit ou d'un équipement car ils fournissent l'appréciation objective de cette qualité et permettent d'arbitrer les contentieux techniques.

Le souci de la qualité crée un besoin vital de données objectives, l'obtention, l'amélioration et la maîtrise de la qualité impose de savoir mesurer, et donc de développer au sein de toute entreprise une fonction métrologie non seulement chargée :

- 1- De superviser les tâches du laboratoire de métrologie (raccordements au Système international d'unités SI ou utilisation de matériaux de références certifiés, conservation des références de l'entreprise, définition des méthodes d'étalonnage) concernant le domaine des étalonnages,
- 2- Mais également de maîtriser la vérification de l'ensemble des appareils de mesure du parc de l'entreprise,
- 3- De s'assurer de l'adéquation de ses moyens de référence aux performances des nouveaux appareils mis sur le marché, de maintenir à niveau ses connaissances des performances ultimes en matière d'étalonnage
- 4- De définir la chaîne des raccordements internes, de mettre en place les procédures d'étalonnage, de vérification et de mesure, de s'assurer de la validité des instruments de mesure à tout moment, etc... (cf. NF X 07-001).

C'est à ce prix que l'entreprise pourra acquérir puis garantir le niveau de qualité qu'elle a défini, en démontrant sa maîtrise de la connaissance exacte des possibilités des moyens de mesure dont dépend l'ensemble de la qualité des opérations d'essais, et de contrôle, ainsi que la validité de leurs raccordements au SI.

La métrologie est, depuis des décennies, une des composantes incontournables de la qualité des produits, avec toutes les conséquences liées au commerce, l'emploi, la productivité, etc... quand elle n'est pas au niveau requis ou reconnue internationalement. Pour l'entreprise, la détection des défauts, la diminution des rebuts, la maîtrise des procédés de fabrication, nécessitent d'effectuer des mesures, répétables, exactes, avec une incertitude associée au résultat de mesure adaptée au besoin, et rattachées aux étalons nationaux afin de pouvoir être comparées à d'autres plans d'expérimentations nationaux ou internationaux. Les relations entre la métrologie et la qualité nous apparaissent aujourd'hui évidentes dans certaines phases d'élaboration, de réalisation et de suivi d'un produit.

Cependant, il est important de rappeler que c'est dès les premières phases de la conception que les responsables des services études doivent prendre en compte les aspects métrologiques : l'élaboration de spécifications, de caractéristiques, ne peut ni ne doit se concevoir sans qu'un examen des possibilités d'étalonnage, de contrôle, et de raccordement à un étalon national, n'ait été réalisé au préalable. En effet, définir une caractéristique qui n'est pas mesurable conduit invariablement à des difficultés au niveau des services, méthodes, fabrication et contrôles, c'est donc une source de litige et de perte de temps. Un dialogue permanent entre les services, étude, fabrication, métrologie et qualité doit s'établir pour permettre d'éviter la spécification de caractéristiques inutiles, illusoires et non fonctionnelles.

Le développement des coopérations internationales entre un grand nombre d'entreprises européennes pour l'étude et la fabrication de certains équipements, telle la fabrication de l'Airbus dont le montage des sous-ensembles s'effectue dans les usines de l'Aérospatiale de Toulouse, de même que le développement des processus de fabrication automatisés, nécessite l'utilisation de moyens de mesure dont les caractéristiques conditionnent directement le succès de l'opération.

La métrologie intervient dans des domaines aussi différents que : la compétitivité, la sécurité des personnes, la santé, le commerce, l'exportation, la qualité des produits, la conception et la fabrication assistées par ordinateur CFAO, les programmes de coopération internationale, déjà cités. La validité de toutes mesures ne peut être garantie que si tous les appareils sont régulièrement vérifiés ou étalonnés à l'aide d'instruments raccordés périodiquement à une chaîne d'étalonnage fiable et cohérente, elle-même raccordée au SI par l'intermédiaire d'un système national, comparable à ses homologues européens.

Ce concept d'assurance qualité s'applique non seulement aux manufacturiers et à toutes sociétés ou organismes délivrant un service (y compris les services de santé) mais également aux laboratoires de métrologie dans leur périmètre le plus large : laboratoires nationaux de métrologie et services d'étalonnage. Il implique la reconnaissance de la compétence des laboratoires d'étalonnage, la production de résultats techniquement valables acceptés par toutes les parties intéressées dans le but de démontrer la traçabilité au Système international d'unités (SI).

La norme EN ISO/CEI 17 025 s'est imposée comme étant celle qui contient toutes les exigences requises permettant aux laboratoires d'apporter la preuve qu'ils gèrent correctement un système qualité, sont techniquement compétents et capables de produire des résultats techniquement valables. Cette norme inclut également toutes les exigences de l'ISO 9001 et de l'ISO 9002. L'évaluation de la conformité des laboratoires à ces normes est assurée généralement par des organismes d'accréditation qui ont pour mission d'attester que les organismes accrédités sont compétents et impartiaux. L'accréditation apporte des garanties sur la compétence technique qui s'exprime dans un système qualité bien organisé. Être accrédité selon la norme EN ISO/CEI 17 025 apporte également la preuve factuelle que les mesures sont raccordées au système international d'unités (SI) et donne les garanties suffisantes aux utilisateurs devant démontrer cette traçabilité. L'accréditation est également de plus en plus un pré requis pour l'agrément dans certains Ministères.

Ces concepts ont été récemment introduits formellement dans le fonctionnement des laboratoires nationaux de métrologie, par le biais de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM (voir annexe INTER-3), en basant la confiance mutuelle des résultats émis sur la mise en place, entre autres, d'un système qualité en conformité avec l'ISO/CEI 17 025. L'existence d'accords de reconnaissance entre organismes d'accréditation au niveau européen (EA) et international (ILAC) permet d'obtenir aux niveaux correspondants l'acceptation des prestations d'étalonnage et la reconnaissance des laboratoires accrédités. Ces accords favorisent les échanges entre pays tout en évitant la multiplicité des réétalonnages nationaux.

La métrologie et la qualité sont deux disciplines connexes, il est largement préférable d'exploiter leur complémentarité plutôt que d'essayer de faire de l'une l'annexe de l'autre. La métrologie est un point de passage obligatoire pour l'obtention de la qualité et pour l'assurance qualité. C'est aux points de passage que s'échangent les idées, qu'évoluent les concepts anciens et que se propagent les concepts nouveaux.

Des excès, constatés, font que certains ne voient dans la métrologie qu'un outil servant parmi d'autres au contrôle de la fabrication ou des services ; par ailleurs les mêmes excès font que d'autres ne voient dans la qualité que l'aspect formel s'arrêtant à l'organisation de la qualité, se satisfaisant plus en termes d'objectifs qu'en faits concrets, et produisant du papier aux fins de satisfaire le qualiticien du donneur d'ordres venu s'enquérir de l'organisation de l'entreprise. Ces deux points de vue sont très dommageables à l'industrie.

La qualité est demanderesse d'une métrologie de qualité et efficace : il est maintenant possible de satisfaire à ces exigences et d'apporter les éléments de jugements objectifs permettant la révision de certains points par trop utopiques. La métrologie à tous les niveaux, par la mise en place de systèmes qualité adaptés et la prise en compte de nouvelles techniques statistiques par exemple, doit continuer à être à la base de la qualité de produits et services.

ANNEXE CHIMIE-1

Métrologie et échantillonnage

La connaissance d'une grandeur ou la caractérisation d'une propriété chimique ou physique liée à un lot de produits ou de matériaux non individualisables comme l'air, l'eau, les sols et les matériaux en vrac n'est pas atteignable par des analyses exhaustives. Il faut obligatoirement pratiquer les analyses sur une portion de l'ensemble à la fois pour des raisons économiques évidentes mais également pour des raisons techniques lorsque l'essai est destructif.

L'estimation de cette caractéristique ou de ce mesurande va reposer alors sur 4 étapes :

- Définition claire et précise du mesurande ou de la caractéristique liée au lot complet, au milieu que l'on souhaite étudier.
- Réalisation d'un échantillon « représentatif » c'est-à-dire juste (sans biais) et reproductible (voir à ce propos, le livre de P. Gy, “*L'échantillonnage des lots de matière en vue de leur analyse*”).
- Analyse de l'échantillon et détermination de la valeur de la caractéristique pour l'échantillon.
- Inférence à partir des informations obtenues sur l'échantillon de la caractéristique liée au lot complet, au milieu étudié.

Suivant que l'on va s'intéresser à des objets individualisables (discrets) ou à des matériaux en vrac, eaux, sols, air, minéraux, les techniques d'échantillonnage et les difficultés seront très différentes. Pour les objets individualisables, la théorie statistique est bien établie, on peut réaliser des contrôles par mesures ou par attributs. La norme ISO 2859 « Règles d'échantillonnage pour les contrôles d'acceptation » fournit toutes les règles pratiques. Au contraire pour les matériaux en vrac, les milieux infinis, les techniques statistiques sont plus récentes, tout au moins quant à leur prise en compte par la normalisation (publication de la norme ISO 11648 Aspects statistiques de l'échantillonnage des matériaux en vrac en juillet 2003).

On constate ainsi que l'analyse est indissociable d'une opération préalable que l'on appelle l'échantillonnage. En réalité, derrière ce terme d'échantillonnage (sampling pour les Anglo-Saxons) se cachent deux opérations précises que l'on pourrait définir en français comme :

- Le prélèvement : Action de prélever une quantité de matière (en une seule fois) en vue de son analyse,
- L'échantillonnage : Organisation de multiples prélèvements en vue d'inférer une information à partir des mesures élémentaires.

L'obtention de l'information recherchée, caractéristique du lot (dans son ensemble) va conduire à mobiliser 3 types de compétences et d'intervenants :

- L'échantillonner : qui sera chargé de la stratégie d'échantillonnage et devra répondre aux deux questions fondamentales : où prélever et quelle quantité ? Ces compétences seront des connaissances générales en statistiques et plus particulièrement en théorie des sondages, planification d'expérience et en analyse de variance ;
- Le préleveur : qui sera chargé de réaliser les différents prélèvements, ses compétences seront liées à une connaissance approfondie du milieu, des techniques de prélèvement, de conditionnement, de conservation, de stockage et transport des prélèvements ;
- L'analyste : dont la mission sera de fournir une valeur de la grandeur liée à l'échantillon qui lui aura été transmis, ses compétences couvriront la chimie analytique et la métrologie.

La qualité de l'information obtenue par ce processus, qui débute par la définition du mesurande, et se poursuit avec la constitution d'un échantillon « représentatif », l'analyse puis l'inférence pour l'obtention d'une information globale sur le lot complet ou le milieu, est la résultante de la qualité des différentes étapes. En reprenant le langage des métrologues ou des statisticiens, nous pourrions dire que la variance (ou l'incertitude) sur la caractéristique « moyenne » représentant notre connaissance du lot complet ou du milieu est la composition des trois variances respectivement liées à l'échantillonnage, au prélèvement et à l'analyse. De même, le biais sur la caractéristique « moyenne » sera la somme des trois biais.

De ces deux considérations, on peut déduire la conclusion pratique suivante : il ne sert à rien d'améliorer les incertitudes des analyses si le même effort n'est pas fait pour les prélèvements et l'échantillonnage. Des exemples pratiques montrent très clairement que bien souvent dans la composition de l'incertitude finale liée à la connaissance de la caractéristique du lot complet ou du milieu, les incertitudes liées à l'échantillonnage et au prélèvement sont majoritaires.

Le constat qui peut également être fait, c'est que les normes générales apparaissent après la publication de normes spécifiques à tel ou tel secteur ; il en résulte un grand nombre de textes normatifs dont la cohérence en termes de concepts et de modèles statistiques est perfectible.

Sur la scène internationale, la France connaît un véritable retard, non pas sur la technique du prélèvement, mais au niveau de la recherche d'outils théoriques permettant d'améliorer les stratégies de prélèvement (mathématiques, statistique, planification d'expérience, évaluation des incertitudes, modélisation, ...). Ces faiblesses sont de nature théorique Il y a peu d'universitaires qui semblent se préoccuper de ces questions. Il faudrait une véritable interaction entre statisticiens et métrologues sur ces sujets, qui doivent être soutenus par le BNM et permettre ainsi de mieux structurer la représentation française dans les différentes instances internationales.

ANNEXE SANTÉ-1

Micro et nano-dosimétrie

L'utilisation de rayonnements ionisants aussi différents les uns des autres que des rayons gamma et des électrons ou des neutrons ou encore des ions et des rayonnements mixtes d'énergies variables en radiothérapie et la nécessaire prise en compte d'une large gamme de tels rayonnements en radioprotection imposent de pouvoir caractériser au mieux leurs interactions avec le milieu biologique pour comprendre et quantifier correctement les variations d'efficacité biologique observées d'un rayonnement à l'autre. Cette caractérisation physique des événements primaires survenant dans le milieu biologique fournit des informations indispensables, bien qu'encore relativement très éloignées des premiers effets biologiques observables. Elle est obtenue par la simulation de volumes microscopiques présumés représentatifs des sites biologiques critiques dans lesquels sont suivies les interactions successives (ou trace de particule) et évaluées les dépôts d'énergie stochastiques correspondants. Les distributions statistiques de ces dépôts sont déterminées pour le rayonnement considéré pour être corrélées aux données radiobiologiques disponibles. Cette approche *microdosimétrique* de la signature physique du rayonnement voit l'émergence de nouvelles études motivées par la diversité de nouvelles applications (radiothérapie par neutrons de capture ou par ions légers, brachythérapie et immunothérapie avec différents émetteurs radioactifs à faibles parcours, exposition aux rayonnements cosmiques, etc.). Ces applications conduisent à développer de nouvelles techniques de mesure et exploiter davantage les méthodes de calcul.

L'application de la microdosimétrie doit répondre à deux critères déjà reconnus, mais dont l'importance augmente avec ces nouveaux problèmes.

1°) D'une part, les données microdosimétriques doivent pouvoir être contrôlées et déterminées avec précision par comparaison avec des références bien établies. Les nouvelles techniques de détection en particulier doivent être bien comprises et comparées aux méthodes dosimétriques et microdosimétriques classiques. Les codes de calcul aujourd'hui indispensables doivent être vérifiés dans des configurations types et bien maîtrisés.

2°) D'autre part, la signature physique recherchée se doit en principe d'être aussi fidèle que possible de la réalité biologique à l'échelle des cibles des rayonnements ionisants. Pour répondre à ce critère, la détermination, théorique ou expérimentale, des données microdosimétriques est recherchée dans un milieu proche du milieu biologique ce qui conduit à devoir accepter des approximations. Pour le calcul, le milieu biologique est généralement simulé par l'eau liquide. Une quantité considérable de calculs a été réalisée dans ce milieu qui devient dès lors une référence. Au plan expérimental, les paramètres microdosimétriques sont mesurés dans des matériaux dits *équivalents-tissus* qui ne peuvent en réalité qu'approcher la composition des tissus biologiques pour répondre aux contraintes imposées par le bon fonctionnement des détecteurs. Il convient donc de s'assurer de l'acceptabilité des matériaux équivalents-tissus utilisés, solides et gazeux ou, tout au moins, d'évaluer de manière précise l'influence de leur composition réelle sur les résultats de la mesure en fonction du rayonnement étudié. L'association des méthodes théoriques et expérimentales est à cet égard précieuse pour comprendre les différences observées, tout autant que la comparaison des nouvelles techniques expérimentales avec des détecteurs de référence bien caractérisés.

À la relativement bonne simulation du milieu biologique s'ajoute une seconde condition difficile à remplir de manière simple. Celle-ci en effet consiste à pouvoir déterminer la

signature physique du rayonnement étudié dans des volumes simulant les cibles biologiques réelles. Cependant la taille de ces cibles n'est pas unique; elle varie de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres pour représenter la molécule d'ADN, ses formes condensées, le noyau cellulaire ou encore des amas de cellules. Au plan physique, une réponse pragmatique à ce problème est *a priori* de caractériser la signature physique du rayonnement dans des volumes couvrant le mieux possible la gamme des cibles biologiques potentielles. Ceci ne pose en général pas de difficulté au plan théorique, le progrès des méthodes de calcul ayant été rapide et indéniable. Au plan expérimental en revanche, le développement de méthodes de détection appropriées a été beaucoup plus laborieux.

Des systèmes de détection nanodosimétriques de traces associant différentes technique comme le flux de gaz dans des cavités virtuelles, la chambre à dérive, le compteur d'avalanche et le détecteur de position. Ces méthodes peuvent devenir des références pour des mesures nanodosimétriques validées par le calcul.

Le développement et la mise au point de ces méthodes d'évaluation microdosimétrique et nanodosimétrique a pour finalités de répondre à des applications pratiques en radiothérapie et en radioprotection et de fournir un support indispensable à la recherche en radiobiologie. Ces enjeux impliquent que les méthodes utilisées soient bien comprises, maîtrisées et validées entre elles ou par comparaison avec des références solides. Les laboratoires de recherche et ceux davantage orientés vers l'application ne peuvent en général pas répondre à ces exigences sur leurs ressources propres. Il apparaît dès lors primordial de pouvoir se tourner vers des laboratoires de métrologie standard pour appuyer ces efforts de développement et fournir les références appropriées.

ANNEXE SANTÉ-2

Importance économique des analyses de biologie médicale

Pour démontrer l'importance de l'exactitude des mesures dans le domaine de la santé, plusieurs études ont été effectuées aux Etats-Unis et il nous a paru utile d'en présenter quelques conclusions.

Ainsi, MAYO CLINIC a étudié les effets des mesures biaisées dans la prise de décision en médecine. En utilisant les résultats des mesures de cholestérol effectuées sur 20 000 patients, un modèle statistique a été mis au point qui montre qu'une erreur positive de 3 % produit un taux de 5 % de diagnostics positifs erronés, ayant pour conséquence de nouveaux examens ou une intervention médicale inutiles. Inversement, une erreur négative de 3 % produit un taux de presque 5 % de diagnostics négatifs erronés, ayant pour conséquence de retarder le traitement ou de ne pas le prescrire du tout. Ainsi des erreurs apparemment minimes produisent soit des dépenses inutiles et en pure perte, une souffrance qui pourrait être évitée, voire des conséquences plus tragiques. Le coût des erreurs de diagnostic pour les nombreux patients qui ont besoin d'un traitement mais qui, sur la base de résultats d'examens erronés, ne sont pas traités, est difficile à quantifier. Il pourrait cependant être supérieur aux coûts induits par des traitements inutiles résultant d'erreurs de mesures.

D'autres études effectuées par le National Institute for Science and Technology (NIST), montrent que le test de troponine-I cardiaque est un marqueur de diagnostic très spécifique de la crise cardiaque. Cependant, en raison d'un manque de traçabilité et d'équivalence des méthodes cliniques en médecine, un pourcentage encore trop élevé de patients sont victimes d'une erreur de diagnostic.

Lors d'un témoignage de W.E. May devant un comité du Sénat américain, une étude de 1999 de l'Institut de médecine de l'Académie des sciences avait été citée. Selon celle-ci, bien que les erreurs médicales ne soient pas dues pour la plupart à des mesures inexactes, une amélioration de l'exactitude des mesures permettrait de sauver des vies, d'économiser beaucoup de temps et d'argent, et d'améliorer la qualité de la vie.

En 2001 on estimait que les dépenses de santé aux États-Unis devraient excéder 1300 milliards de dollars par an, soit environ 14 % du PIB américain. On estime que 10 % à 15 % de ces dépenses sont liées aux mesures. Le Washington Post et le Medical Laboratory Observer ont rapporté que 25 % à 30 % des mesures liées à la santé sont effectuées pour des raisons autres que le diagnostic (répétition d'examens, prévention et détection des erreurs). Cela signifie que 10 à 30 milliards de dollars américains pourraient être économisés chaque année.

Enfin, le Comité sur la qualité de la santé aux États-Unis a publié en 1999 un rapport selon lequel **“les dollars dépensés pour répéter des examens en vue du diagnostic... sont des dollars dont nous ne disposons pas pour d'autres objectifs”**.

ANNEXE ENVIR-1

Les gaz dans l'atmosphère

On doit essentiellement considérer deux domaines où la mesure de la concentration des gaz est particulièrement importante et pour lesquels les références métrologiques sont fondamentales : l'effet de serre et la pollution atmosphérique.

L'effet de serre est un phénomène à échelle mondiale qui se manifeste par une augmentation de l'absorption par l'atmosphère des rayons infrarouges émis par la Terre chauffée par le Soleil. L'amplitude de cet effet dépend de la composition chimique de l'atmosphère. L'acteur principal est la vapeur d'eau, grâce à laquelle la température moyenne de la Terre est de 15° au lieu de -18° si elle n'existe pas. Grâce à l'équilibre qui existe entre les mers et l'atmosphère, cette composante de l'effet de serre est à peu près constante. En revanche, la proportion des autres gaz absorbants, dits gaz à effet de serre, change avec le temps, si bien que la température moyenne de l'atmosphère varie (voir le rapport N°31 de l'Académie des Sciences et celui de l'IPCC).

Les principaux gaz à effet de serre sont :

- Le dioxyde de carbone, CO_2 , dont la proportion a augmenté de 4% au 19^e siècle et de 25% au vingtième avec un accroissement qui a tendance à s'accélérer ;
- Le méthane, CH_4 , dont la proportion, après une augmentation de 5% au 19^e siècle, a presque doublé au cours du 20^e ;
- Le protoxyde d'azote, N_2O , qui a augmenté de 10% au cours du siècle dernier ;
- Trois autres catégories de gaz sont classées dans cette catégorie : les hydrofluorocarbones, les hydrocarbures perfluorés et l'hexafluorure de soufre, SF_6 .

Le rôle de la métrologie sera d'assurer la cohérence et la traçabilité vers des matériaux de référence certifiés des mesures de ces gaz. Ces mesures doivent être effectuées de façon comparable dans toutes les parties du monde et cela en un maximum de lieux choisis de telle façon que les résultats ne soient pas influencés par la pollution locale.

La pollution atmosphérique proprement dite est une modification locale et, en général, provisoire, ou du moins variable, de la teneur de l'air ambiant en gaz nocifs pour la santé : ozone, O_3 , oxyde de carbone, CO , les composés oxygénés de l'azote et du soufre, l'hydrogène sulfuré, SH_2 , la dioxine, etc... Des réglementations locales ou générales prescrivent des limites de concentration de ces gaz au-delà desquelles, des mesures restrictives sont prises (limitation de la circulation ou des vitesses limites par exemple). De nombreux senseurs sont installés dans les villes et il est nécessaire qu'ils soient étalonnés et vérifiés périodiquement pour s'assurer de leur exactitude.

De même, des lois limitent les émissions industrielles de gaz polluants et des analyseurs enregistreurs doivent être placés à la sortie des cheminées. Ces instruments doivent également subir des vérifications périodiques pour s'assurer de leur exactitude métrologique. Tous ces cas relèvent évidemment de la métrologie chimique.

En Europe, une politique cohérente de contrôle de la pollution industrielle a débouché sur l'introduction de la Directive de prévention et réduction intégrées de la pollution (Integrated Prevention of Pollution Control Directive, IPPC), du Registre européen des émissions de polluants (European Pollutant Emission Register, EPER) et d'autres Directives. Il y a un besoin évident d'améliorer l'équivalence et l'exactitude des mesures. Des techniques et méthodes améliorées sont aussi nécessaires pour mesurer de faibles niveaux de pollution.

L'ensemble de ces besoins constitue une incitation très forte pour le développement de la métrologie chimique des gaz. Notons que ce qui vient d'être dit pour les gaz s'applique de la même manière aux pollutions des eaux, notamment celles qui sont destinées aux usages ménagers et à la consommation et, plus généralement à tout l'environnement.

ANNEXE ÉCO-1

Études de l'impact économique de la métrologie

Le NIST (États-Unis) a effectué des études sur l'impact économique de ses activités dans plusieurs domaines spécifiques et continue à le faire. La plupart de ces études sont rétrospectives et sont fondées sur la comparaison des coûts de fabrication d'un étalon de mesure ou matériau de référence certifié particulier et sur les économies estimées pour un groupe d'utilisateurs prédéfini. D'après ce modèle, il est, en principe, possible d'estimer les économies réalisées à l'échelle nationale, même si le NIST n'a pas toujours effectué une telle extrapolation. Il a toutefois établi quelques repères. Les études effectuées par le NIST permettent aussi de calculer au cas par cas des effets de levier.

Le DTI (Royaume-Uni) a une approche fondée sur des considérations macroéconomiques pour obtenir des chiffres globaux. De plus, des études tests ont été menées pour comparer les possibilités de mesure et d'étalonnage du National Physical Laboratory, NPL avec celles des autres laboratoires nationaux de métrologie.

L'étude effectuée au Canada pour le NRC est fondée sur une combinaison de plusieurs études de cas, d'entretiens et d'analyses statistiques. Les résultats des études de cas ont été extrapolés pour donner une indication à l'échelle nationale.

L'étude de l'Union européenne est fondée sur les résultats de six études de cas et sur les informations collectées auprès des Communautés européennes, des laboratoires nationaux de métrologie et de l'industrie des États membres de l'Union européenne, ainsi que sur des estimations économétriques. Nous donnons en annexe les principales conclusions de cette dernière étude.

Les études effectuées par le NIST calculent le retour sur investissement et la rentabilité pour la nation, dénommée rentabilité pour la société. Les résultats ont été publiés dans un certain nombre de *NIST Planning Reports*. Le retour sur investissement donne des indications sur les investissements que l'industrie devrait faire si le NIST ne faisait pas ce qu'il fait. La rentabilité pour la société est calculée sur une certaine durée en prenant en compte les investissements effectués par le NIST et les bénéfices qu'en retirent un certain nombre d'entreprises. Les économies réalisées par l'industrie comprennent des coûts de transactions moindres, des coûts inférieurs de mise en conformité avec les règlements, une économie d'énergie, une meilleure efficacité des activités de recherche et développement, une meilleure qualité des produits et la capacité de toucher de nouveaux marchés.

On constate que, selon les projets, la rentabilité pour la société est comprise entre 30 et 400% et le retour sur investissement est supérieur à 3 et atteint 13 et même 37 dans des cas particuliers. Le record appartient à la détection du soufre dans les combustibles fossiles, les nombres sont, respectivement 1056% et 113.

En ce qui concerne le domaine de la santé, on rend compte, dans l'annexe SANTÉ-2 des résultats d'une étude effectuée par Mayo Clinic aux États-Unis sur les effets des mesures biaisées dans la prise de décision en médecine.

Les études effectuées au Royaume-Uni ont été réalisées en se servant de mesures directes fondées sur un modèle économique préexistant “ Mapping Measurement Impact ”. D'autres études de cas ont été faites, assorties à des analyses économiques, par exemple l'analyse économétrique d'entrée-sortie, les échanges commerciaux et le facteur de productivité globale.

Ces études montrent que la métrologie en général au Royaume-Uni a un impact significatif sur l'économie équivalant à 0,8 % du PIB, soit 5.10^9 livres sterling par an en termes de facteur de productivité globale. Il semble que l'effet de levier de cet impact économique sur le budget annuel du NPL, qui est de 38 millions de livres sterling, est exceptionnellement élevé (facteur d'amplification de 130). Le Gouvernement britannique considère les investissements consacrés à l'infrastructure métrologique nationale comme un des meilleurs exemples de rentabilité des investissements gouvernementaux.

L'étude canadienne sur l'impact économique, effectuée au nom de l'Institut des étalons nationaux de mesure (IENM) du NRC, a examiné certaines fonctions fondamentales de l'IENM comme la conservation des étalons primaires, la recherche et le développement et les services de mesure et d'étalonnage. Par ailleurs, une étude a été faite sur l'impact économique potentiel associé aux quatre domaines stratégiques que sont la nanotechnologie, la biotechnologie, les produits nutraceutiques et les nutriments, et l'énergie. En plus des études théoriques ont été faites à partir de données sur la certification et l'accréditation. Globalement, l'étude estime que les investissements annuels actuels de 12 millions de dollars canadiens du gouvernement canadien pour l'IENM produisent un retour sur investissement d'environ 13 pour 1.

ANNEXE ÉCO-2

Rapport demandé par la Commission européenne

La direction générale de la recherche de la Commission européenne a commandé une “étude sur le rôle économique des mesures et des essais dans la société moderne”. Ce rapport présente quelques conclusions globales et examine six études de cas dans les secteurs suivants : nanotechnologie, industrie automobile, industrie pharmaceutique, secteur des gaz naturels en Europe, industrie des matériels pour le diagnostic *in vitro*, et contrôle des émissions et de la pollution dans l'environnement. Les études sont fondées sur des données économiques et des entretiens avec des responsables des secteurs industriels concernés. L'étude montre entre autres que :

- La Commission européenne dépense 83 milliards d'euros par an, soit presque 1 % du PIB de l'Union européenne, pour des activités de mesure (sommes investies dans les laboratoires nationaux de métrologie, dans les laboratoires d'étalonnage accrédités, coût de la certification dans l'industrie, coût des instruments, et dépenses de l'industrie consacrées aux mesures). Si l'on ajoute les dépenses sociales de santé, de la réglementation sur l'environnement, des essais liés à la sécurité, des projets anti-fraude et les activités de mesure au jour le jour, ce chiffre augmente considérablement.
- Par exemple, 13 milliards d'euros par an sont dépensés pour des mesures et des essais dans les services de santé européens et 5 milliards d'euros par an pour la sécurité et les inspections d'émissions de gaz automobiles dans l'Union européenne.
- Les estimations économétriques sur l'impact économique des activités de mesure montrent que ces dépenses engendrent presque 230 milliards d'euros de bénéfices directs estimés, d'après l'impact estimé sur la croissance technologique. C'est équivalent à 2,7 % du PIB de l'Union européenne. En d'autres termes, chaque euro consacré aux activités de mesure fait gagner presque trois euros ; il y a donc un retour sur investissement de trois contre un (sans prendre en compte les bénéfices très importants pour la société en termes de santé, de sécurité et d'environnement).
- La mesure est typique d'un bien public, et n'existerait pas sans les fonds publics.
- La construction d'une infrastructure de mesure européenne est essentielle pour le développement à venir d'un marché unique et pour la poursuite des efforts consacrés à la santé, à la sécurité, à la protection de l'environnement et à la lutte anti-fraude.
- Les programmes de recherche et développement montrent un retour sur investissement compris entre 5 et 111 avec une moyenne de 16, ce qui est comparable aux projets équivalents aux États-Unis.

- Les nanotechnologies sont perçues dans différents pays comme un secteur stratégique pour le commerce. Dans la production des circuits miniatures environ 35 % des coûts sont directement attribuables aux activités de mesure, soit environ 1,5 milliard d'euros par an. Il faut de toute évidence améliorer les mesures ; ceci aura une grande influence sur les innovations et les améliorations dans l'industrie des semi-conducteurs et donc sur l'économie et le commerce. Une intense coopération entre les laboratoires nationaux de métrologie, les unités de recherche, les universités et l'industrie est hautement souhaitable. Des investissements publics sont donc nécessaires.
- La métrologie joue un rôle essentiel et intégré dans l'industrie automobile. Le chiffre d'affaires de l'industrie automobile européenne est de 321 milliards d'euros. Des mesures exactes, comparables et traçables pour presque toutes les grandeurs physiques et plusieurs grandeurs chimiques (par exemple les gaz d'échappement) sont nécessaires pour construire des voitures innovantes, sûres, à économies d'énergie, à faible coût d'entretien et non polluantes, ce qui améliore aussi la position des fabricants dans un marché soumis à la compétition globale et internationale.
- Les produits pharmaceutiques représentent environ 12 % des dépenses de santé dans les pays développés. Les dépenses de santé représentent environ 8 % du PIB européen et 14 % du PIB des États-Unis. Les ventes mondiales de produits pharmaceutiques représentaient environ 270 milliards de dollars américains en 1997, soit environ 70 % des ventes globales de produits médicaux. Les mesures et essais de ce secteur sont extrêmement réglementés selon le code de « Good Manufacturing Practices ». L'industrie est favorable à un système différent pour les produits pharmaceutiques. Les formulaires paramétrés font partie intégrante du processus de fabrication aux points critiques de ce processus. L'industrie est intéressée par les études sur les bénéfices d'une coopération plus étroite avec les laboratoires nationaux de métrologie pour améliorer les activités dans les secteurs de l'analyse spectroscopique, des mesures chimiques, des capteurs et des matériaux de référence certifiés commutables etc.
- La consommation de gaz en Europe de l'Ouest en 2000 se situait juste en dessous de 390 milliards de mètres cubes, soit environ un cinquième de la demande énergétique totale. Il est aisément de voir qu'une erreur de mesure de 1 % équivaut à 4 milliards de mètres cubes ayant une valeur commerciale de 800 millions d'euros par an, revendus aux consommateurs au prix de 0,20 euro par mètre cube. Les erreurs de mesure de volume, ainsi que de température et de pression, peuvent facilement atteindre 4 % à 6 %. L'équivalence internationale des équipements d'étalonnage pour les mesures de hautes pressions, fondée sur la traçabilité réalisée dans les différents pays concernés, montre que les différences peuvent facilement être supérieures à la reproductibilité des appareils de mesure utilisés. La recherche fondamentale effectuée par les laboratoires nationaux de métrologie pour améliorer les techniques et méthodes de mesure est vraiment nécessaire, y compris sur les paramètres comme le pouvoir calorifique et la teneur énergétique.
- En ce qui concerne les produits pour le diagnostic in vitro, le marché mondial représentait, en 1998, environ 20 milliards d'euros. La Directive de l'Union européenne sur le diagnostic in vitro demande d'établir la traçabilité aux étalons de rang hiérarchique supérieur. L'impact économique de la traçabilité dans ce domaine présente différents aspects selon que l'on se place du point de vue de l'impact économique sur l'industrie, le

commerce ou la société. Bien que les coûts d'établissement de la traçabilité puissent être considérables, on espère que la Directive de l'Union européenne permettra d'obtenir des dispositifs plus fiables, des résultats de mesure meilleurs et comparables, et donc d'élargir le marché pour l'industrie. L'impact économique est considérable pour la société. Des résultats de mesure traçables et comparables servent directement les objectifs primaires en médecine de laboratoire, ils fournissent des informations utiles et fiables pour la prise de décision en médecine. La fiabilité des mesures réduit la nécessité de les répéter. Rien qu'en Allemagne, le coût de la répétition des mesures est d'environ 1,5 milliard d'euros par an.

ANNEXE INTER-1

Coopération internationale en Europe

En Europe, la coopération en métrologie est principalement organisée autour d'EUROMET qui est une organisation, officiellement créée en septembre 1987 à Madrid par la signature d'un "Memorandum of Understanding" amendé en août 1990 et juillet 1998. Elle comprenait initialement les laboratoires nationaux de métrologie des pays de l'Union européenne, de l'Association européenne de libre-échange et de la Commission des Communautés Européennes. Elle est maintenant également ouverte à tous les pays européens et comprend actuellement 27 membres. Elle a été mise en place afin de développer la coopération en métrologie entre les laboratoires nationaux de métrologie de l'Europe de l'Ouest et assurer une utilisation efficace des moyens disponibles en métrologie.

Les objectifs d'EUROMET, inscrits dans l'accord de collaboration (Memorandum of Understanding, MoU), sont :

- Développer entre les membres une collaboration plus étroite dans les travaux concernant les étalons, à l'intérieur de la structure métrologique décentralisée actuelle,
- Optimiser l'utilisation des ressources et des services dont disposent les Membres et accentuer leur orientation vers la satisfaction des besoins métrologiques décelés,
- Améliorer les services métrologiques offerts et les rendre accessibles à tous les Membres,
- S'assurer que les nouveaux bancs d'étalonnage réalisés dans le cadre d'EUROMET sont ouverts à tous les Membres.

Les missions spécifiques d'EUROMET sont :

- La coordination des études concernant les étalons,
- La coordination des investissements importants pour les moyens métrologiques,
- Le transfert de compétence entre les Membres dans le domaine des étalons primaires ou nationaux,
- L'établissement d'un cadre de collaboration entre les membres intéressés par un projet particulier,
- La mise à disposition d'informations sur les ressources et services,
- La coopération avec les organismes d'accréditation européens,
- La coopération avec les services de métrologie légale européens.

EUROMET n'a pas de fonds propres et fonctionne sur la base d'une participation volontaire. Les coûts des travaux de coopération et de recherche sont pris en charge par les laboratoires et membres participants, ces derniers conservant leur autonomie totale. Par contre, les financements extérieurs ne sont pas exclus, en particulier par la participation aux programmes de recherche de la Communauté Européenne.

Structure

Chaque membre (organisation nationale de métrologie) mandate un délégué, l'ensemble formant l'Assemblée générale d'EUROMET. Celui-ci se réunit au moins une fois par an afin de débattre des buts et objectifs d'EUROMET. Le président du comité est élu pour deux ans, mandat non renouvelable ; il met à disposition le secrétariat nécessaire. Le fonctionnement du secrétariat est financé par une cotisation de chacun des membres

Activités techniques

Elles sont divisées en onze domaines : **masse** (y compris force et pression) ; **électricité** ; **longueur** (y compris les mesures dimensionnelles) ; **temps et fréquence** ; **thermométrie** (y compris les propriétés thermiques et l'hygrométrie) ; **rayonnements ionisants et radioactivité** ; **photométrie et radiométrie** ; **débitmétrie** ; **acoustique, ultrasons et vibrations** ; **quantité de matière** ; **métrologie interdisciplinaire**.

Pour chacun d'eux, un président technique est élu par l'Assemblée générale (avec une durée de mandat de deux ans renouvelable une fois). Il a pour tâche principale la coordination des projets qui sont présentés par les "contact person", spécialiste du domaine concerné et désigné par son organisation nationale de métrologie. Chaque projet de collaboration, d'un domaine défini, est classé dans une des catégories suivantes :

- Réalisation d'études en commun ("cooperation in research"),
- Comparaisons interlaboratoires ("intercomparison of measurement standards"),
- Offre de services d'étalonnage ("traceability"),
- Réunions d'information et séminaires ("consultation on facilities").

Au 1er juillet 2003, 231 projets sont actifs et 315 ont été finalisés et donné lieu à un rapport final. Quatre à cinq participants en moyenne ont collaboré à ces projets. Comme on peut l'imaginer, les grands pays jouent un rôle important dans la métrologie européenne et sont ceux qui ont la plus importante participation dans les projets. Le nombre substantiel de projets est une preuve du succès d'EUROMET en termes de collaboration européenne et certains pays ont utilisé leur participation à EUROMET pour développer leur propre infrastructure métrologique. Les domaines pour lesquels les projets sont les plus nombreux sont l'électricité, la masse et la longueur, les moins nombreux temps-fréquence, acoustique et débitmétrie. Les domaines pour lesquels le nombre est élevé sont ceux qui présentent un intérêt important ou sont en développement. Pour ceux dont le nombre peut paraître faible, il existe souvent une collaboration en dehors d'EUROMET.

De la même manière, les différentes catégories de coopération sont inégalement réparties. La réalisation d'études en commun est le type de collaboration le plus appréciée, ceci indique la

volonté manifeste des métrologues à mettre en commun leurs travaux. Ensuite viennent les comparaisons interlaboratoires car elles sont utilisées à la démonstration de l'équivalence des réalisations d'étalons; elles permettent également la documentation de la traçabilité en Europe à l'usage des organismes d'accréditation.

Collaboration européenne

EUROMET maintient des liaisons étroites avec de nombreuses organisations européennes et internationales. Parmi elles, il faut citer EA (European cooperation for Accreditation) pour lequel EUROMET est le support technique et WELMEC, jumeau d'EUROMET pour la métrologie légale. EUROMET collabore également avec des organisations telles qu'EURACHEM, leur domaine technique commun étant la métrologie chimique liée aux analyses et mesures physico-chimiques.

En tant qu'organisation régionale, EUROMET a des liens avec les organisations similaires nationales et internationales. Le BIPM, l'OIML, et COOMET sont régulièrement invités aux réunions plénières du Comité d'EUROMET afin de contribuer à ces travaux et d'étendre les coopérations entre les différents organismes. Ces relations s'étendent maintenant aux organisations régionales telles que : APMP pour l'Asie du Sud Est et Pacifique Ouest et SIM pour les Amériques. EUROMET est particulièrement impliqué dans la mise en place de l'arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM et pilote la majorité des comparaisons interlaboratoires, l'examen des possibilités d'étalonnage et de mesure ainsi que l'examen des systèmes qualité des organisations de métrologie européenne.

ANNEXE INTER-2

L'Arrangement de reconnaissance mutuelle

L'Arrangement de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage délivrés par les laboratoires nationaux de métrologie, dit aussi MRA (Mutual Recognition Arrangement), est un accord signé par plus de 50 laboratoires nationaux de métrologie sous l'égide du BIPM. Il implique, pour chaque pays, non seulement le laboratoire national, mais aussi les laboratoires associés, chargés par le laboratoire national d'assurer les étalonnages dans des domaines pour lesquels il n'a pas de compétence ou de moyens (le BNM a sept laboratoires associés, voir annexe METR-1).

Chaque pays choisit librement les domaines pour lesquels il souhaite voir ses étalonnages reconnus par les clients des autres pays. Supposons, à titre d'exemple, que ce soit la masse, les mesures dimensionnelles et celles des flux de liquides. Le laboratoire national devra donc posséder des étalons de masse (le kilogramme et quelques multiples et sous-multiples), des étalons de longueur laser à iodé ou artefacts et calibres) et des appareils de mesure de flux (compteurs adaptés aux besoins). Ces étalons et les méthodes de mesure correspondantes devront être comparés à des étalons de même type dans d'autres pays qui seraient déjà traçables au BIPM lors de comparaisons organisées par le CIPM. Les organisations régionales de métrologie jouent un rôle majeur dans cette extension.

À l'issue de ces comparaisons, les étalons reçoivent un label appelé " degré d'équivalence" qui comporte deux nombres :

- L'écart entre la valeur trouvée pour l'étalon local et une valeur de référence déterminée par le BIPM après analyse des comparaisons effectuées sous son égide,
- L'incertitude avec laquelle cet écart aura été déterminé.

Ces nombres peuvent être grands. C'est au laboratoire concerné de vérifier si le degré d'équivalence est suffisant pour les besoins de son pays. Sinon, il devra acquérir de nouveaux étalons ou améliorer ceux qu'il possède.

Mais la partie la plus importante de l'Arrangement concerne les certificats d'étalonnage et de mesurage qui sont émis par le laboratoire. L'Arrangement de reconnaissance mutuelle stipule que ces certificats seront honorés par tous les pays signataires. Il s'agit donc bien de confiance mutuelle. Pour arriver à ce stade, le laboratoire devra d'abord mettre en place un système d'assurance qualité (tel que ISO 17025) attesté par un organisme d'accréditation ou une évaluation par des pairs. C'est un élément important pour établir ou consolider la confiance des partenaires étrangers. Puis le laboratoire déclarera ses possibilités en matière de mesure et d'étalonnage exprimées par une incertitude à deux écarts types. Celles-ci seront soumises à l'Organisation régionale de métrologie qui, avant de les accepter, imposera des comparaisons de certificats avec ceux d'autres laboratoires.

Toutes les déclarations, une fois acceptées et vérifiées, sont transmises au BIPM qui les entre dans une base de données accessible à tous les signataires de l'arrangement. Ceci permet à un pays de faire connaître la qualité de ses services métrologiques et d'avoir ainsi un statut

d'égalité avec les pays les plus actifs dans le domaine des échanges commerciaux et industriels et d'être reconnu comme tel.