



J. Kovalevsky

Que penser de l'avenir de la métrologie ?

What about the future of metrology ?

Jean Kovalevsky

Membre de l'Institut, Président du BNM de 1994 à 2005

À l'heure où les Instituts nationaux de métrologie des grands pays industriels fêtaient le centenaire de leur existence (PTB en Allemagne, NIST aux États-Unis, NPL au Royaume-Uni), la France en était encore à la deuxième phase de la coordination de ses programmes métrologiques exécutés par plusieurs laboratoires appartenant à des établissements différents et dépendant eux-mêmes de Ministères différents. Le Groupement d'intérêt public (GIP) « Bureau national de métrologie » qui venait d'être créé constituait cependant un progrès par rapport à la situation antérieure. L'organisme responsable de la métrologie avait désormais la personnalité civile et était maître de la répartition du budget entre les laboratoires. Et surtout, les principaux acteurs de la métrologie avaient pris conscience de leur appartenance commune à une formation reconnue, le BNM. Cela a permis de rationaliser certaines activités et de faire travailler ensemble sur un même projet des équipes de laboratoires différents.

Mais ce GIP avait un grand défaut : celui de n'être pas pérenne. Institué pour quelques années avec des renouvellements qui n'allaient pas de soi, la situation était tout à fait incompatible avec ses responsabilités continues au service de l'industrie, du commerce, de la santé et de l'environnement. En effet, les activités métrologiques ne doivent jamais s'arrêter et le service rendu à la société ne saurait s'interrompre. Les difficultés rencontrées lors du renouvellement du GIP en 2001 ont montré tous les dangers d'une telle structure *ad hoc*. Aussi la décision a été prise par l'Etat de confier les activités du GIP BNM à un Établissement public à caractère industriel et commercial, le LNE, renommé pour la circonstance Laboratoire national de métrologie

et d'essais (LNE) dont l'existence n'est pas sensée être remise en cause. De plus, le LNE exécute déjà plus du tiers du programme métrologique français, ce qui est une indication importante de compétence. En revanche, cela a introduit une dissymétrie avec les autres laboratoires nationaux et il faudra agir de façon à ne pas défaire ce que le GIP a permis de réaliser : la conscience de toutes les équipes, quelles que soient leurs appartenances, de faire partie d'un ensemble unique constituant la métrologie française. C'est un défi qu'il faudra rapidement relever de manière à rester unis face aux mutations qui secouent le monde métrologique.

En effet, la métrologie subit, dans le monde actuel, une évolution d'une amplitude sans précédent. Certes, le BNM a réagi positivement et a pris certaines orientations nouvelles, mais le plus dur reste à faire. Il faudra trouver des solutions efficaces, adaptées à notre pays, pour résoudre les nombreux problèmes qui vont se poser à plus ou moins longue échéance. Ce sont certains de ceux-ci que je vais présenter dans ce qui suit. L'attitude à adopter vis-à-vis de chacun d'entre eux ne sera pas facile à imaginer, aussi faudrait-il commencer à y réfléchir. Le LNE aura obligatoirement un rôle très important à jouer dans la restructuration qui en résultera de la métrologie française.

1. Deux mutations du monde moderne

Que le monde change de manière accélérée dans la plupart des activités humaines est une évidence et ce n'est pas le propos de cet article de les décrire. Il y a pourtant deux aspects qui ont eu et qui continueront à avoir une influence majeure sur la métrologie.

1.1. La mondialisation

La forte diminution du coût des transports et l'émergence de nouveaux pays producteurs ou consommateurs ont conduit à une globalisation sans précédent du commerce. Il est désormais impératif de disposer dans le monde entier de mesures équivalentes, traçables à des références équivalentes et dont l'exactitude annoncée soit reconnue par tous les acteurs. C'est éminemment le rôle de la métrologie d'établir la crédibilité des résultats de mesure où qu'elles soient exécutées.

1.1.1. Le commerce

L'outil permettant cette confiance dans le domaine du commerce a été établi par le BIPM en 1999. Il s'agit d'un document appelé « Arrangement de reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage émis par les laboratoires nationaux de métrologie », mieux connu sous son sigle simplifié en anglais, MRA (*Mutual Recognition Arrangement*). Il est maintenant signé par les laboratoires nationaux de plus de 60 pays. Il est largement reconnu comme fournissant l'infrastructure métrologique des accords commerciaux. Il est à noter que le MRA peut non seulement s'appliquer au commerce des produits industriels mais aussi à celui des produits alimentaires ou médicaux. Il suffit pour cela que les laboratoires nationaux de métrologie déclarent leurs possibilités d'étalonnage et de mesures dans ces domaines.

Le BNM est évidemment partie prenante de cet accord, mais pour cela, il a fallu effectuer un énorme travail. Pour faire reconnaître les performances de ses étalonnages, il a dû participer à un très grand nombre de comparaisons internationales pour chaque type d'étalon (multiples et sous-multiples d'unités de base ou dérivées). De plus, chaque laboratoire a dû établir et mettre en place un système qualité (norme ISO 17025) et le faire approuver par Euromet.

Ainsi les bases de la participation française au MRA sont-elles maintenant bien établies. Mais il faudra poursuivre les efforts. En effet, les comparaisons devront être périodiquement répétées et de nouveaux étalons ou possibilités d'étalonnage et de mesures devront compléter une liste déjà longue en fonction des nouveaux besoins, de nouvelles possibilités des laboratoires ou de nouvelles réglementations. Enfin, les systèmes qualité seront à remettre à jour périodiquement.

1.1.2. Les normes

Les conséquences de la mondialisation ne concernent pas seulement le commerce. De nouvelles normes ou réglementations sont édictées par divers organismes internationaux : Organisation mondiale de la santé

(OMS), Organisation internationale de normalisation (ISO), Organisation mondiale du commerce (OMC), etc., sans oublier les directives européennes.

Certaines de ces normes peuvent avoir des conséquences importantes pour la métrologie. Considérons par exemple la directive européenne sur le diagnostic *in vitro*. Elle exige que toute instrumentation destinée à effectuer des mesures dans les hôpitaux ou les laboratoires d'analyses biologiques soit traçable à des étalons de rang hiérarchique supérieur. La conséquence est qu'il faudra créer des chaînes d'étalonnage spécifiques qui aboutiront aux laboratoires nationaux de métrologie. Comme la directive ne concerne pas seulement le matériel construit en Europe, mais aussi le matériel importé, cela concerne aussi les Etats-Unis et le Japon, grands exportateurs vers l'Europe d'instrumentation médicale. Ces pays se préparent activement à ces contraintes. Réciproquement, il faut s'attendre à ce que d'autres chaînes d'étalonnage devront être mises en place à la suite de décisions prises par des pays non européens. Des conséquences analogues découlent de certaines normes ISO. À chaque fois, ce sera de la responsabilité de la métrologie française de mettre en œuvre les moyens d'étalonnage et d'essais correspondants.

1.1.3. Le climat

La mondialisation, c'est aussi le protocole de Kyoto qui vient d'entrer en vigueur. Le réchauffement de la planète est désormais prouvé, ainsi que l'augmentation considérable de la concentration dans l'air des gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, composés oxygénés de l'azote). On peut discuter sur la proportion de réchauffement qui serait dû à l'augmentation de l'effet de serre produit par ces gaz et à d'autres causes naturelles éventuelles. Ce qui est certain, en revanche, c'est que le réchauffement va se poursuivre. Si les prédictions de cette variation restent en discussion (entre 1,5 °C et 5 °C pour le 21^e siècle), toute réduction importante des émissions de ces gaz ne pourra être que bénéfique en diminuant son amplitude.

C'est pourquoi, malgré ses insuffisances, le Protocole de Kyoto doit être mis en œuvre. Ceci implique qu'il faudra effectuer de très nombreuses mesures fiables et cohérentes pendant un grand nombre d'années partout dans le monde. Pour évaluer les évolutions lentes, il faut que les mesures se rapportent à des références stables sur plusieurs décennies. Pour cela, la référence au Système international d'unités (SI) s'impose. Les instituts nationaux de métrologie, notamment en France, auront un grand rôle à jouer pour assurer l'équivalence et la stabilité à long terme des mesures. Sur le plan local, il faudra évaluer la production du gaz carbonique et des autres gaz à effet de serre pour permettre

nique et des autres gaz à effet de serre pour permettre aux autorités de prendre, en fonction des résultats obtenus, des mesures à l'encontre des pollueurs. Mais ces dernières ne pourront être acceptées par les contrevenants que si les résultats des mesures sont indiscutables. La situation deviendra encore plus critique lorsqu'il s'agira d'évaluer des droits d'émission de gaz à effet de serre qui feront l'objet d'échanges commerciaux ou lorsqu'il faudra prouver que les critères de réduction des émissions sont remplis. Dans tous ce cas, la traçabilité vers des étalons nationaux ou internationaux des résultats des mesures est essentielle pour assurer l'acceptation des résultats.

1.2. Les aspects sociétaux de la métrologie

La métrologie est en train d'envahir un grand nombre de nouveaux domaines qui ne relèvent pas de l'industrie ou du commerce, mais qui touchent de près notre vie de chaque jour. Il est utile de décrire cette évolution car elle porte en elle le germe d'un bouleversement des conceptions classiques de la métrologie.



M. F. d'Aubert, Ministre délégué à la Recherche, lors de la Journée des métrologues du 5 avril 2005.

1.2.1. La santé

Jusque vers les années 1980, l'apport principal de la métrologie à la santé et à la sécurité des personnes était la mesure des intensités des rayonnements ionisants et de leur dose absorbée par l'homme. Certes, un certain nombre de mesures de sécurité avaient été prises et des normes limitant le rejet de certains éléments chimiques avaient été édictées : dioxine, plomb et mercure dans l'eau, monoxyde de carbone et oxyde sulfureux dans l'air, etc. Mais depuis, la tendance à exercer un contrôle sur tout ce qui touche de près ou de loin la santé de l'homme s'est accrue exponentiellement avec, en

France, l'application du principe de précaution. C'est devenu un aspect majeur des réglementations à tous les niveaux, national, européen ou mondial. Analysons la situation telle qu'elle est en train de se développer dans un certain nombre de domaines.

La présence de la métrologie dans diverses branches de la médecine et de la chirurgie s'accroît d'année en année. En radiothérapie des tumeurs cancéreuses, des erreurs de quelques pour cent sur la dose d'irradiation peuvent conduire soit à l'inefficacité du traitement, soit à des brûlures. Or, cette incertitude est presque à la limite de ce qui est actuellement possible. Un grand effort de recherche dans ce domaine est indispensable pour améliorer significativement les limites des méthodes actuelles. Il en est de même, avec des limites de tolérance diverses, des traitements à base de composés chimiques où il faut éviter les effets secondaires tout en assurant l'efficacité. Dans certains cas, comme pour le contrôle des instillations d'insuline chez les diabétiques, les mesures sont effectuées de façon continue.

La nécessité d'une qualité métrologique des mesures est tout aussi importante pour les diagnostics qui se basent sur des analyses biologiques. La directive européenne sur le diagnostic *in vitro* déjà mentionnée répond à ce besoin. Toutefois, le nombre de molécules à détecter et à en déterminer la concentration est en constante augmentation et il faut disposer de matériaux de référence de plus en plus nombreux. Vu la difficulté de les obtenir et souvent, comme pour les matériaux radioactifs, de les conserver, c'est un effort considérable qu'il faudrait prévoir rien que pour cet aspect du problème. En fait, on continuera à n'utiliser qu'un nombre restreint de matériaux de référence étalonnés par des méthodes primaires (spectromètres de masse, dilution isotopique) pour assurer l'étalonnage des appareils d'analyse. Ceux-ci seront utilisés en mode relatif en utilisant des matériaux de référence certifiés, eux-mêmes étalonnés par comparaison avec des matériaux de références primaires.

1.2.2. La métrologie d'État

Si la métrologie d'État « légale » est une très vieille activité concentrée surtout sur le contrôle des instruments de mesure utilisés à des transactions commerciales, d'autres tâches, de plus en plus nombreuses, incombent aussi à l'État. Citons, entre autres, la répression des fraudes, les contrôles douaniers, la lutte contre la drogue, l'alcool et la drogue au volant, le dopage, la sécurité routière, la médecine légale, etc. Toutes ces activités nécessitent d'effectuer des mesures fiables, comparables et même, dans certains cas, reconnues au niveau international. Les références pour toutes ces activités sont maintenant à rechercher auprès des instituts nationaux de métrologie.

D'autres applications qui concernent les pouvoirs publics sont prises en charge par les collectivités locales ou régionales pour leur mise en œuvre. En contraste avec les précédentes, elles se rapportent à la sécurité et au bien-être des personnes ou, si l'on veut, à la qualité de vie. C'est le cas, par exemple, du contrôle du niveau de bruit dans les agglomérations, aux abords des usines ou des aéroports ou produit par les véhicules, etc... Ce paramètre fait d'ailleurs partie de la métrologie acoustique classique. Il en est de même des vibrations produites par des installations mécaniques lourdes. La dangerosité supposée des émetteurs des réseaux de téléphonie mobile est un autre sujet sociétal dans lequel la métrologie comme la médecine ont leur rôle à jouer.

1.2.3. La pollution

Un autre sujet d'inquiétude, et souvent de désagrément, du public est la dégradation de l'environnement due en grande partie aux activités humaines, industrielles, agricoles ou dans le domaine des transports.

Dans l'air, les polluants principaux sont l'oxyde de carbone, les dérivés oxygénés de l'azote, le gaz sulfureux, les hydrocarbures, l'acide chlorhydrique, l'ozone, certains composés organiques volatils, etc., sans omettre les poussières organiques ou minérales. La mesure systématique de la concentration de ces constituants à partir de nombreux points de mesure a, entre autres, pour objectif de prévenir la population des dangers encourus et d'agir localement pour faire baisser la teneur en polluants. À plus long terme, on établira des normes d'émission pour chaque type de production. Ces normes devront être respectées par l'adjonction de filtres dans les cheminées, les échappements de véhicules, etc. et, bien entendu, c'est à des mesures métrologiques que l'on aura recours pour vérifier l'efficacité des décisions prises.

La pollution de l'eau par les effluents industriels ou ménagers, par les engrais, par des solutions métalliques ou encore par des composés organiques toxiques est à l'ordre du jour et tend à devenir vitale par suite de la diminution des réserves d'eau et leur fragilité vis-à-vis des atteintes extérieures. Ce problème majeur pour les décennies à venir va demander des moyens considérables pour purifier les eaux de consommation courante. Chaque cours d'eau, chaque nappe phréatique sont autant de cas particuliers à analyser. Ceci implique des mesures très fines et diversifiées, cohérentes dans le temps, d'une part pour déterminer la concentration des polluants et pour évaluer les résultats des méthodes de purification. Les chaînes métrologiques correspondantes devront, bien entendu, se référer aux laboratoires nationaux de métrologie.

La pollution des sols, à peine abordée actuellement est un autre domaine difficile, mais nécessaire car c'est

à travers les sols que les réservoirs phréatiques sont remplis. Il faudra donc tôt ou tard s'y engager.

1.2.4. La sécurité alimentaire

La société actuelle est particulièrement sensible à ce domaine émergent. Quelques normes existent déjà, mais il y en aura beaucoup d'autres, et il faudra établir les chaînes métrologiques qui s'y rapportent pour en contrôler l'application. Qu'il s'agisse de la présence de produits nocifs, de bactéries ou de prions, de l'état de fraîcheur ou de la bonne conservation des produits, de nombreux laboratoires de référence ont été établis en Europe. Les procédures employées sont très variées et ne garantissent pas des résultats cohérents entre les laboratoires. Pour qu'il en soit ainsi, il faudrait que les instituts nationaux de métrologie soient présents dans le circuit et établissent des protocoles bien définis et internationalement acceptés, même si les mesures ne peuvent pas toujours être reliées au SI. Des procédures analogues pourraient aussi être prévues dans d'autres domaines comme l'activité biologique des médicaments, la recherche des OGM ou celle des prions, pour établir la traçabilité à des références communes.

2. Les extensions de la métrologie

On peut constater qu'il existe une forte tendance, de la part des organismes nationaux et internationaux, soit de s'approprier certaines actions de métrologie, soit de demander aux instituts nationaux de métrologie de les aider à organiser leurs activités. Ainsi, le BIPM, qui est le pilote mondial de la métrologie, a, au cours des quatre dernières années et en général à leur demande, établi des contacts étroits avec plusieurs de ces organisations, allant parfois jusqu'à la signature d'accords de partenariat. Il est intéressant de les citer. Ce sont l'OMS (Organisation mondiale de la santé), l'OMM (Organisation météorologique mondiale), l'IFCC (Fédération internationale de chimie clinique et de médecine de laboratoire) et les organismes analogues aux Etats-Unis et au Japon, l'OMC (Organisation mondiale du commerce), le Codex alimentaris, sans oublier ILAC et ISO avec lesquels des liens étroits sont établis depuis longtemps.

Il y a deux ans, un conflit a eu lieu entre le CIPM et ISO qui avait écrit dans une de ses résolutions que l'établissement de la conformité faisait partie de la métrologie. Ce n'était pas l'avis du CIPM. En fait, cet incident est symptomatique : il faut bien constater que le mot « métrologie » est maintenant largement utilisé pour désigner non seulement les chaînes de mesure et de traçabilité qui s'y rapportent, mais aussi les instruments et les méthodes qui permettent de faire des mesures précises. En recherche spatiale, on a pris l'habitude d'appeler « métrologie » la partie instrumentale des satellites

qui mesurent des paramètres instrumentaux comme les distances dont la connaissance doit être très précise. Notons que c'est conforme au vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de la métrologie (VIM) où l'on trouve comme définition de la métrologie, « Science de la mesure » et comme note explicative « la métrologie embrasse tous les aspects aussi bien théoriques que pratiques se rapportant aux mesurages, quelle que soit l'incertitude de ceux-ci, dans quelque domaine de la science et de la technologie que ce soit ».

Cette métrologie au sens large du terme se fera, que ce soit avec ou sans les métrologues de métier. Les besoins de mesures fiables et traçables sont devenus si généraux que les instituts nationaux de métrologie ne peuvent y faire face tandis que les autorités et les établissements responsables de ces secteurs vont s'engager,

s'ils ne l'ont pas déjà fait, dans la mise en place de chaînes métrologiques dans leur domaine. Seulement, ils n'ont pas l'expérience accumulée pendant des décennies par les instituts nationaux de métrologie. Il y a donc une fonction nouvelle qui se présente pour ces instituts : celle de conseil, de guide et d'assistance technique avec ces nouveaux responsables de chaînes métrologiques. Sans les inclure dans un cadre rigide intégrant toutes ces nouvelles métrologies, il s'agirait de s'assurer que les règles de base de la métrologie sont respectées : comparaisons avec des références nationales et internationales, chaînes continues de traçabilité, établissement des incertitudes à chaque niveau, conformité des instruments de mesure à des normes à établir et accréditation des laboratoires secondaires. C'est la politique qu'a choisie le BIPM. Il serait souhaitable qu'elle le soit aussi au niveau national. On y reviendra dans les conclusions.



Journée des métrologues du 5 avril 2005.

3. Métrologie fondamentale

Cette extension de la métrologie ne remplace aucunement la métrologie classique en physique et en chimie fondée sur le Système international d'unités (SI) et que j'appellerai pour la distinguer « métrologie fondamentale ». Bien au contraire, il faut agir pour que les nouveaux objectifs de la métrologie soient aussi compatibles que possible avec le SI. Il faut donc que ce

système, en tant que référence de base, soit maintenu et développé au sein des instituts nationaux de métrologie. Or, dans ce domaine, les choses bougent beaucoup. Ainsi, au cours des 10 à 15 dernières années, de très grandes évolutions scientifiques et technologiques ont eu un impact important sur la métrologie fondamentale et l'évolution commencée va encore se développer dans l'avenir. Il s'ensuit que la métrologie fondamentale reste une priorité majeure.

3.1. Les défis technologiques

C'est un truisme que de constater que, depuis 1950, les exigences d'exactitude des mesures industrielles dans les domaines des longueurs, de l'électricité et des fréquences ont été multipliés par 10 tous les dix à vingt ans. Prenons un exemple dans le domaine du dimensionnel. Les tolérances dans la fabrication des moteurs de voiture qui s'exprimaient en dixièmes de millimètre, sont actuellement de $7\ \mu\text{m}$, c'est-à-dire celles de l'horlogerie mécanique. Ceci a permis, par exemple, de supprimer depuis une vingtaine d'années le rodage des voitures neuves, d'économiser le carburant et de réduire la pollution par les imbrûlés. En électricité, la mise en œuvre des étalons quantiques du volt et de l'ohm ont permis d'accroître la cohérence des mesures électriques par un facteur au moins cent, même si leur liaison avec l'unité de base du SI, l'ampère, reste conventionnelle. Les progrès technologiques dans ce domaine comme dans celui des lasers ont été tels que les industriels disposent dans leurs chaînes de production des appareils de mesure plus précis que ne l'exigent les spécifications, ce qui allège grandement les procédures de recette et, en définitive, réduit les coûts.

Une autre raison de l'accroissement des exigences vis-à-vis de la métrologie est le fait que nombre de nouveaux produits sont issus des applications des découvertes scientifiques récentes. Les techniques de production qui s'appliquent exigent une précision bien plus grande que pour les produits anciens. Parmi elles, on trouve de nombreuses applications des micro- ou des nano-technologies. Ainsi, les semi-conducteurs en microélectronique sont produits avec une technologie à 180 nm ou 120 nm et la tolérance de positionnement des masques est inférieure à 60 nm. Des tolérances analogues se retrouvent dans la construction des têtes de lecture de disques ou des têtes d'imprimantes, la fabrication des biopuces et autres microsystèmes. La nanométrie qui doit soutenir ces activités est en plein développement qui devra se poursuivre les années qui viennent. En particulier, une métrologie des nanoforces serait importante pour ces applications.

Avec la mise en œuvre des grands réseaux de positionnement (GPS) et les programmes d'extension (Galileo), les exigences sur l'exactitude d'horloges embarquées ont tellement crû que les meilleures exactitudes obtenues il y a quinze ans dans les laboratoires de métrologie sont maintenant demandées pour la fabrication des horloges embarquées sur des satellites.

3.2. Sciences et métrologie

Tout autant que par l'industrie (et peut-être même plus), la métrologie est tirée en avant par les récents

acquis de la physique. Confrontée aux besoins croissants d'exactitude et de précision, la métrologie fondamentale est conduite à appliquer les résultats les plus récents de la science.

L'exemple le plus caractéristique est celui du temps et des fréquences. Ainsi, il y a une dizaine d'années, le jet de césium dans les étalons de fréquence à césium a été remplacé par une fontaine d'atomes refroidis par des lasers. Cela a permis de gagner plus d'un ordre de grandeur dans l'exactitude et de nouveaux gains sont attendus dans un avenir proche, notamment à l'occasion de la mise en orbite d'une horloge à atomes froids. Une autre invention fondamentale a été celle des peignes lasers femtosecondes. Ces systèmes de comptage permettent de comparer directement les fréquences optiques et micro-ondes. Les divers types d'horloges optiques en étude dans plusieurs laboratoires de métrologie dans le monde, y compris en France, sont les précurseurs d'une nouvelle génération d'horloges.

C'est grâce à des découvertes importantes en physique quantique (qui ont valu aux auteurs des prix Nobel) que les jonctions de Josephson et de Hall ont révolutionné la métrologie électrique. Maintenant, avec l'effet tunnel et la possibilité de compter les électrons un à un, il reste à rendre cohérents les paramètres conventionnels de ces effets pour redéfinir l'unité électrique de base dans le SI. Cette fermeture de ce qu'il est convenu d'appeler le triangle métrologique sera une contribution essentielle à la métrologie fondamentale.

Les scientifiques se sont emparés des micro- et nano-techniques et ont ouvert de nouveaux champs de recherche. Le but est d'obtenir des descriptions de la matière à l'échelle du nanomètre. Citons la caractérisation des nanostructures et la manipulation une à une des molécules biologiques pour en construire de nouvelles. Si ces techniques pourraient conduire à des méthodes nouvelles de métrologie, pour le moment cette branche de la science est plutôt à la recherche de méthodes de mesure, donc de métrologie. Une métrologie des très petites masses serait également à développer pour ce domaine.

De très gros progrès ont été réalisés dans l'étude et la réalisation des très faibles températures, notamment dans le cadre des travaux sur les condensats de Bose-Einstein. Une des tâches urgentes de la métrologie est d'étendre l'échelle de températures thermodynamiques aussi près que possible du zéro absolu en utilisant les résultats de ces recherches.

Un autre problème qui devient critique pour la métrologie fondamentale est soulevé par l'instabilité des étalons de masse et, en particulier, le kilogramme international. Seule unité de base à être encore définie par un artéfact matériel, le kilogramme étalon dérive et,

lui, toutes les mesures de masse. Avec des exigences de plus en plus strictes de la part des utilisateurs, il devient urgent de changer radicalement de définition et de se rapporter, comme pour les autres unités, à un phénomène physique facilement reproductible et si possible rattaché à des constantes fondamentales de la physique. Parmi les solutions proposées, le « kilogramme électrique », réalisé par une balance du watt, apparaît actuellement comme étant la solution la plus prometteuse.

De façon plus générale, à la suite des programmes de la balance du watt et du triangle métrologique et, probablement plus tard, pour redéfinir l'échelle des températures à partir de la constante de Boltzmann, la tendance sera de définir les nouvelles unités du SI à partir des constantes fondamentales de la physique. En vue de cet objectif, une coordination entre les recherches en métrologie et en physique devra s'établir.

4. Les priorités en France

Au cours de cet exposé, on a vu que des priori-

tés se dégagent pour la métrologie, qu'il s'agisse de la métrologie fondamentale, des besoins engendrés par la mondialisation ou des applications sociétales. Mais il faut aussi admettre que, avec les moyens limités de la métrologie en France, tout ne pourra pas être pris en charge. Cela est d'autant plus vrai que les activités métrologiques qu'il est indispensable d'assurer dans le cadre du service public « métrologie » sont encore plus prioritaires et requièrent l'essentiel des moyens humains et financiers disponibles. Ces tâches de base sont la maintenance des très nombreux étalons destinés au service courant des utilisateurs, les comparaisons internationales, les étalonnages en faveur des laboratoires accrédités et les recherches liées à l'amélioration des moyens de mesure. Il faut maintenant y ajouter la poursuite des actions destinées à maintenir au niveau maximal les obligations vis-à-vis du MRA et, éventuellement, initier des activités engendrées par l'application de nouvelles normes.



De gauche à droite : Messieurs L. Erard, J. Kovalevsky, M.E. Himbert, B. Chauvenet, P. Tuckey et M. Mortureux, lors de la Journée des métrologues du 5 avril 2005.

C'est pourquoi, pour dégager les forces nécessaires à l'accomplissement des priorités, il faudra diminuer le poids total des activités de maintenance et d'étalonnage. Pour cela, il faudra identifier celles qui se rapportent à des besoins rares ou demandant des moyens très lourds. Il faudra coopérer avec d'autres pays européens pour ne pas dupliquer ces types de travaux et se résoudre à ce que certains moyens d'étalonnage soient com-

muns à plusieurs pays et pas obligatoirement situés en France. Il en sera de même pour certaines études, ce qui est d'ailleurs déjà le cas par le truchement d'Euromet.

Parmi les études importantes sélectionnées ci-dessus, la France devrait se concentrer d'abord sur celles qui ont pour objectif de modifier les définitions des unités du SI, d'autant plus qu'elle est très bien placée parmi

les laboratoires nationaux étrangers. Puis continuer à développer les secteurs où notre excellence est reconnue à l'étranger et, enfin, effectuer des recherches dans des domaines clés pour la santé. Ces critères permettent d'identifier en premier lieu les actions prioritaires suivantes :

- Terminer la construction et mettre en œuvre la balance du watt : il n'y a que cinq projets dans le monde, et la France a ainsi un rôle important à jouer dans la définition du futur kilogramme ;
- Poursuivre le programme du triangle métrologique, pour lequel la France a pris de l'avance sur la plupart des autres pays, et qui assurera notre présence dans la redéfinition de l'unité électrique de base ;
- Étendre les recherches pour mettre au point des techniques de métrologie aux très basses températures ;
- S'impliquer davantage dans la nanométrie en diversifiant les applications en collaboration avec les industriels et les chercheurs ;
- Entamer un effort considérable de recherche, à coordonner probablement sur le plan mondial, pour augmenter la précision des mesures de dose absorbée de rayonnements ionisants ;
- Consolider la position de « leader » dans le domaine des étalons de fréquence à fontaine d'atomes froids avec pour objectif d'améliorer encore l'exactitude des étalons à césium et de

faire des expériences préparant une éventuelle modification de la définition de la seconde fondée sur des horloges atomiques variées micro-ondes ou optiques.

Un domaine en croissance indéfinie est la métrologie en chimie. C'est d'ailleurs là que les principales nouvelles activités métrologiques ont leur place. Il faudra laisser aux organismes spécialisés, dont fait partie le LNE avec ses implications dans les domaines de la santé et de l'environnement, le soin de mettre en place un réseau métrologique. La proposition est de se concentrer sur les éléments les plus présents ou les plus dangereux dans les problèmes de pollution de l'air et des eaux, ainsi que sur les applications du protocole de Kyoto pour lesquelles l'État est particulièrement concerné.

En revanche, plutôt que de s'engager dans les domaines émergents de la métrologie, il serait plus utile de s'inspirer de la politique du BIPM en proposant aux organismes techniquement bien mieux placés, des collaborations limitées à une aide pour la mise en œuvre de chaînes métrologiques complètes, comprenant des comparaisons avec des références nationales et internationales, le calcul des incertitudes à chaque niveau de traçabilité, la conformité des instruments de mesure et l'accréditation des laboratoires secondaires. Ce faisant, le LNE aura un rôle de guide technique et de coordinateur qui assurera, en France, l'unité de la métrologie nouvelle et ancienne et, internationalement, une crédibilité basée sur le caractère rigoureux des procédures.