

# Dossier de presse

>

**Des mesures de plus en plus précises  
pour la science, l'industrie, le commerce, la santé et la sécurité**

## **La France réorganise sa métrologie et en confie la responsabilité au LNE**

>

**14 février 2005**

**Grand Hôtel Intercontinental  
Paris**

**Laboratoire national de métrologie et d'essais**

Établissement public à caractère industriel et commercial • Siège social : 1, rue Gaston Boissier - 75724 Paris Cedex 15 • Tél. : 01 40 43 37 00  
Fax : 01 40 43 37 37 • E-mail : [info@lne.fr](mailto:info@lne.fr) • Internet : [www.lne.fr](http://www.lne.fr) • Siret : 313 320 244 00012 • NAF : 743 B • TVA : FR 92 313 320 244  
Barclays Paris Centrale IBAN : FR76 3058 8600 0149 7267 4010 170 BIC : BARCFRPP

# Sommaire

---

- › La mesure est omniprésente, de plus en plus précise
- › Le contexte des mesures : Un système international d'unités et des chaînes d'étalonnage
- › La métrologie française se réorganise pour passer la vitesse supérieure

## Annexes

- › Les acteurs de la métrologie
- › La métrologie en chiffres
- › Six exemples de travaux de recherche métrologique
  - Métrologie électrique et constantes de la physique : vers une nouvelle définition du kilogramme ?
  - Temps et espace : mesures d'intervalles de temps et étalons de fréquences optiques
  - La métrologie des rayonnements ionisants au service de la santé
  - Pollution atmosphérique : mesures de l'ozone
  - L'infiniment petit : mesurer les dimensions à l'échelle nanométrique et utiliser les nanostructures en métrologie électrique
  - La thermométrie haute température
- › Le LNE en bref

## **La mesure est omniprésente, de plus en plus précise**

---

Les chercheurs utilisent la mesure pour observer des phénomènes, concevoir et qualifier les instruments des observations, établir si les résultats obtenus sont significatifs. Ainsi, la datation des roches, la caractérisation des champs gravitationnels, la détermination de constantes en physique et en chimie, relèvent d'activités de mesure. La mesure est ainsi une donnée essentielle pour toutes les activités humaines en général, et pour l'économie en particulier.

- Ø L'industrie, pour s'assurer de la qualité et de la conformité de ses produits, doit mettre en œuvre des moyens de mesure lui permettant de contrôler ses processus de fabrication ; elle doit également pouvoir s'assurer que ses fournisseurs en composants ou matériaux ont pratiqué la même démarche de contrôle qualité.
- Ø Dans le domaine commercial, les pouvoirs publics doivent pouvoir garantir aux consommateurs qu'ils ne paieront que la quantité ou le volume exact de ce qu'ils ont acheté ou consommé (produits alimentaires, essence, énergie, gaz, distance parcourue en taxi...).
- Ø Dans les technologies de l'information, du positionnement, des télécommunications, les systèmes de navigation par satellites et les liaisons horaires par comparaison de temps permettent de localiser des points avec exactitude. Ils sont indispensables au fonctionnement des réseaux informatiques mondiaux, et permettent aussi aux avions d'atterrir dans des conditions de faible visibilité.
- Ø Dans le secteur de la santé, le dosage des médicaments, la mesure des rayonnements en radiothérapie, sont indispensables, tout comme le contrôle de la fiabilité des appareils utilisés dans les salles d'opération.
- Ø Dans la sécurité publique, les appareils de contrôle de vitesse ou du taux d'alcoolémie doivent fournir des résultats fiables ; il en est de même pour la surveillance des polluants atmosphériques, en particulier pour ceux pour lesquels il existe des seuils de déclenchement d'alerte visant à protéger la population.

Parallèlement, l'essor des nouvelles technologies et le progrès des connaissances scientifiques rendent nécessaire une évolution permanente des mesures, des instruments avec lesquelles celles-ci sont effectuées, ainsi que de l'exactitude avec laquelle elles sont effectuées.

A titre d'exemple, l'utilisation des lois de la physique quantique et les progrès technologiques rendent nécessaire pour de nombreuses industries (micro-electronique, biologie...) de s'approcher de mesures à l'échelle nanométrique et de développer des instruments qui soient capables d'effectuer ces mesures.

## **Le contexte des mesures : un système international d'unités et une chaîne permettant d'assurer la traçabilité des mesures**

---

Tous les pays utilisent depuis 1960 un système international fonctionnant avec sept unités de base : le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin (température), la candela (intensité de chaleur) et la mole (quantité de matière), et des unités dérivées qui complètent les unités de base (hertz, pascal, becquerel...).

Ces unités sont reliées entre elles pour former un système cohérent. Enfin, chaque grandeur peut avoir une vaste étendue de valeurs. Pour éviter d'utiliser des facteurs multiplicatifs ou des valeurs avec un grand nombre de zéros, on ajoute des préfixes qui vont permettre de couvrir une gamme allant de  $10^{-24}$  à  $10^{24}$  unités !

Les mesures ne s'effectuant que par comparaison à quelque chose, chacune de ses unités est représentée par une référence nationale ou internationale : l'étalon. Cet étalon primaire, de très haute exactitude, est décliné ensuite en étalons secondaires, dits de transfert, afin de permettre aux industriels et aux laboratoires d'effectuer leurs mesures sur leurs chaînes de fabrication en raccordant leurs instruments de contrôle à ces étalons primaires. Pour éviter toute dérive dans le temps, ces étalons secondaires sont eux-mêmes contrôlés périodiquement par rapport à l'étalon primaire. Par le biais de cette chaîne de mesures, on assure ainsi la traçabilité des mesures du produit final jusqu'à l'étalon primaire et au Système International d'Unités.

Il convient aussi de connaître la somme des incertitudes obtenue au bout de la chaîne d'étalonnage. A titre d'exemple, pour la chaîne d'étalonnage des mesures du polluant ozone, la réglementation européenne impose une incertitude globale inférieure à 15 %, incluant l'incertitude liée à l'échantillonnage qui en représente la plus grande part.

Au niveau international les instituts nationaux de métrologie font régulièrement des comparaisons entre leurs étalons primaires pour vérifier qu'ils obtiennent des résultats équivalents.

## **La métrologie française se réorganise pour passer à la vitesse supérieure**

---

La première structure nationale française, dénommée **Bureau National de Métrologie**, mise en place en 1969, fonctionnait avec une équipe d'une dizaine de personnes, chargée de coordonner et d'orienter, avec l'aide de deux instances extérieures (comité d'évaluation scientifique et comité d'orientation stratégique), les travaux des laboratoires qui étaient désignés pour développer les étalons et raccorder les instruments de l'industrie. Le BNM était également chargé d'assurer la représentation de la France auprès des instances internationales de la métrologie.

Le nouveau statut de Groupement d'intérêt public (GIP) décidé en 1994 donne plus de souplesse et permet au BNM d'avancer significativement dans de nombreux domaines : temps-fréquences, pression, températures, électricité, chimie, et de se lancer dans des grands projets tels que la nanométrie, l'expérience de la balance du watt, et les horloges optiques. Mais l'accélération des besoins métrologiques, et l'évolution induite par la mondialisation, conduisent l'Académie des Sciences, dans son rapport sur la métrologie du futur, à préconiser la solution d'un organisme d'envergure, à l'instar de ce qu'ont choisi les États-Unis et des grands pays européens.

***Le pilotage de la métrologie est confié au LNE  
avec l'appui d'un comité de la métrologie***

Un décret conjoint des ministères de l'Industrie et de la Recherche vient d'acter le transfert de la mission de pilotage de la métrologie au LNE. Deux éléments majeurs ont guidé ce choix :

- Le LNE était devenu, ces cinq dernières années, l'acteur le plus important du BNM, avec l'intégration successive d'activités dans le domaine de la métrologie légale en 1999, puis en métrologie électrique fondamentale en 2001 et, enfin, en prestations de raccordement dans le domaine électrique en 2004. Dans le même temps, le LNE avait sensiblement intensifié son effort de R&D et ses investissements en nouveaux laboratoires, en particulier dans le domaine de la mesure.
- Le statut d'Établissement Public à caractère Industriel et Commercial est apparu approprié au pilotage d'activités de métrologie, pour concilier des activités de recherche et des prestations de raccordement à l'industrie.

A cette occasion, le nom du LNE évolue en « Laboratoire national de métrologie et d'essais », tout en gardant le sigle bien connu LNE. Les équipes du BNM, dissous par le même décret, sont intégrées au LNE pour assurer le pilotage de la métrologie au niveau national et sa représentation aux niveaux européen et international.

Le LNE devient ainsi à part entière l'homologue des principaux instituts nationaux de métrologie dans le monde, en particulier les instituts allemand (PTB), anglais (NPL) et américain (NIST), avec lesquels il a développé de nombreux partenariats.

Le LNE fédère par ailleurs, au niveau national, un réseau d'organismes spécialisés complétant la gamme des étalons détenus par le LNE : 3 laboratoires nationaux (le CEA/LNHB, le CNAM/INM et l'Observatoire de Paris/SYRTE), ainsi que 6 laboratoires associés (*cf. annexe Les acteurs de la métrologie*) qui poursuivront leurs travaux dans leurs champs de compétence respectifs, mais dans le cadre d'une organisation optimisée. En particulier, des unités mixtes ou laboratoires communs de recherche pourraient être créés entre certains d'entre eux et le LNE, permettant de faire travailler, sur un même lieu, des équipes de scientifiques des différents établissements, s'appuyant sur des équipements de référence mis en commun.

Il est par ailleurs prévu un renforcement des coopérations des laboratoires avec l'industrie, et une participation plus large dans les réseaux d'excellence aux niveaux européen (EUROMET) et international.

Comme précisé dans le décret, le LNE assurera ce pilotage avec l'aide d'un comité de quatorze personnes, constitué de sept personnalités qualifiées – scientifiques et industrielles – couvrant le plus largement possible les différents domaines de la métrologie, et de sept représentants d'organismes, respectivement du LNE et des trois autres laboratoires nationaux (CEA, CNAM et Observatoire de Paris); du CNRS, et des ministères de la Recherche et de l'Industrie.

Ce comité examinera les propositions des différents acteurs de la métrologie française pour définir des priorités, évaluer la pertinence des projets et suivre les résultats obtenus. Il fera par ailleurs des propositions en matière de programmation à moyen terme des travaux. Le secrétariat du comité sera assuré par la Direction de la Recherche Scientifique et Technologique du LNE. Le comité adressera ses avis et propositions à la direction du LNE qui sera chargée de leur mise en œuvre, en concertation avec l'ensemble des partenaires impliqués.

Les domaines de recherche jugés prioritaires pour les années à venir concernent l'amélioration des mesures dans les domaines de la santé, du développement durable, des télécommunications, des nanotechnologies, du spatial.

# Annexes

## Les acteurs de la métrologie française

Le **Laboratoire national de métrologie et d'essais** (LNE) est désigné par les pouvoirs publics comme organisme national de référence en métrologie. Il regroupe en son sein d'importants moyens scientifiques et techniques couvrant une part importante des besoins en étalons du Système International d'unités (SI) : l'électricité et le magnétisme, les longueurs, les masses et grandeurs apparentées (pression, force, couple, acoustique, accélérométrie), la quantité de matière (chimie), la radiométrie-photométrie (optique), la température... Il comprend ainsi plus de 200 ingénieurs et techniciens en métrologie, dont près de la moitié sont affectés aux activités de recherche scientifique et technologique.

Néanmoins, pour certains domaines de mesure, le LNE s'appuie, pour mener à bien sa mission, sur d'autres organismes scientifiques de renom qui, dans leur domaine d'excellence, sont les mieux placés pour assurer le développement des étalons. Le LNE fédère ainsi **trois laboratoires nationaux de métrologie** :

- **L'Observatoire de Paris** qui, au travers de son laboratoire SYRTE, établit et diffuse les références nationales de temps et de fréquences.
- **Le Laboratoire National Henri Becquerel** (LNHB), dépendant du Commissariat à l'Énergie Atomique, qui est chargé de la réalisation des références dans le domaine des rayonnement ionisants.
- **Le Conservatoire National des Arts et Métiers** (INM), qui intervient comme organisme de recherche et d'enseignement supérieur en métrologie dans les principaux domaines de la physique.

Le LNE s'appuie par ailleurs sur **6 laboratoires associés** intervenant sur des domaines très ciblés :

- **L'Observatoire de Besançon** qui assure le transfert vers les utilisateurs dans le domaine du temps (réalisation des comparaisons de temps par satellites, de mesures de fréquences, de stabilité et de dérive de fréquence).
- **Le Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs** (LPMO) qui assure le transfert de densité spectrale des fluctuations de phase et également des mesures de fréquences.
- **Le Laboratoire Associé de Débitmétrie Gazeuse** (LADG).
- **L'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire** (IRSN) en dosimétrie des neutrons.
- **Le Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques** (CETIAT) pour les domaines de l'hygrométrie, de la débitmétrie liquide et de l'anémométrie.
- **L'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers** (ENSAM) en pression dynamique.

Enfin, le LNE développe de nombreux partenariats avec des laboratoires universitaires ou du CNRS, pour tirer parti des meilleures équipes scientifiques à même d'aider à la réalisation des projets de métrologie.

## La métrologie en chiffres

L'activité de mesure revêt une très grande importance dans presque tous les domaines de l'activité humaine, et on a évalué, selon une étude rapportée par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), que, dans les pays industrialisés, les opérations liées aux mesures comptent **pour 4 % à 6 % du produit intérieur brut**. Cela correspond à plusieurs centaines de milliards d'euros pour l'Union européenne seule.

Les instituts nationaux de métrologie et leurs laboratoires associés constituent l'infrastructure indispensable à la maîtrise de la mesure par les acteurs économiques. Il y en a, en général, un par pays. Leur fonctionnement relève de la responsabilité des États. Ils sont fédérés au plan international par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), institution internationale basée en France, à Sèvres. Ils représentent **plus de 5 000 scientifiques dans le monde et près de 1 milliard d'euros**.

L'ensemble du réseau piloté par le LNE représente **plus de 250 chercheurs** et un budget de l'ordre de **35 M€ par an**. Il se situe au troisième rang en Europe, loin derrière l'Allemagne (PTB : **830 chercheurs et 130 M€**) et le Royaume-Uni (NPL : **300 chercheurs et 70 M€**). D'importants efforts d'investissement (environ **40 M€**) ont été faits ces dernières années en France pour de nouveaux laboratoires de métrologie, notamment au LNE à Trappes (pour l'électricité), au CEA à Saclay (pour les rayonnements ionisants) et, en cours, au CNAM à Saint-Denis.

Au-delà du réseau fédéré par le LNE pour le développement des étalons, il existe en France de nombreux laboratoires pour étalonner les instruments de mesure de l'industrie. On en compte **plus de 250 pour un effectif de près de 2 000 personnes**. Leur accréditation par le Comité Français d'Accréditation (COFRAC) assure leur propre raccordement aux étalons nationaux.

Au plan mondial, on compte plus de **5 000 laboratoires d'étalonnage**, qui travaillent eux-même pour près de **500 000 entreprises industrielles**, en particulier celles qui sont certifiées selon l'ISO 9001 et qui ont, dans ce cadre, l'obligation de désigner un responsable métrologie pour le raccordement de leurs instruments de mesure.

Enfin, on peut noter que les besoins des entreprises en matière d'étalonnage sont, par ordre décroissant, dans les domaines des températures, puis de l'électricité, du dimensionnel et des pressions.

## Métrologie électrique et constantes de la physique : vers une nouvelle définition du kilogramme

Le système métrique, dont est inspiré le Système International d'unités (SI) utilisé de nos jours, a conduit, dès son origine, à matérialiser des étalons en se référant à des grandeurs descriptives de notre planète ou à des matériaux la constituant.

Du souci d'universalité qui a guidé les métrologues du XVIII<sup>ème</sup> et du XIX<sup>ème</sup> siècles, nous avons hérité deux représentations des unités de masse et de longueur : le kilogramme étalon et le mètre étalon constitués d'un alliage de platine et d'iridium.

Alors que cette définition du kilogramme est toujours en vigueur, celle du mètre a persisté jusqu'en 1960, date à laquelle il a tout d'abord été défini par rapport à une propriété particulière de l'atome de krypton pour évoluer en 1983 vers une définition basée sur la valeur fixée a priori d'une constante de la physique, invariable dans le temps: la vitesse de la lumière dans le vide.

Les constantes fondamentales ont aussi acquis une importance particulière en métrologie électrique grâce à la découverte, au cours des quatre dernières décennies, de plusieurs phénomènes macroscopiques d'origine quantique. Leur étude théorique montre que les grandeurs qu'ils permettent de générer s'expriment en fonction de la combinaison de deux d'entre elles : la charge de l'électron et la constante de Planck. Deux de ces effets (l'effet Josephson et l'effet Hall quantique) sont utilisés depuis 1990 par l'ensemble des laboratoires nationaux de métrologie pour assurer la conservation du volt et de l'ohm.

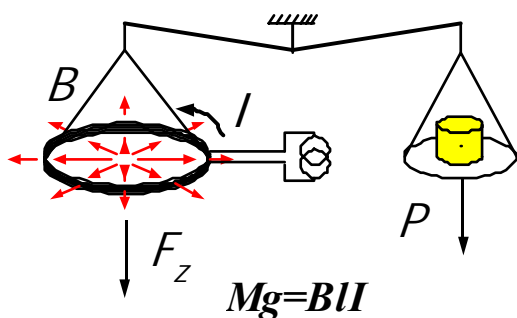
Au delà de leur simple utilisation, il convient de déterminer, en unités du SI, la valeur des constantes associées à chacun d'eux avec une exactitude toujours plus grande. Ce type de mesure constitue l'un des thèmes de recherche du Laboratoire national de métrologie et d'essais dont le but est une meilleure définition des unités auxquelles nous nous référons.

En regard du peu de connaissance de la stabilité dans le temps du prototype international du kilogramme –artefact matériel unique-, la définition de l'unité de masse est insatisfaisante. Il serait préférable de lui substituer, à terme, une définition basée sur une constante fondamentale. Une des voies les plus prometteuses est actuellement celle de la **balance du watt**.

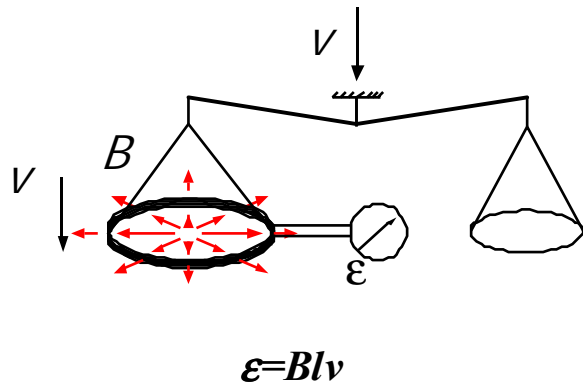


Son principe consiste à effectuer la comparaison d'une puissance mécanique à une puissance électromagnétique (d'où son nom). Elle résulte d'une mesure effectuée en deux étapes : une phase statique, au cours de laquelle la force de Laplace s'exerçant sur un conducteur de longueur  $l$  parcouru par un courant et placé dans un champ d'induction est comparée au poids d'une masse étalon, et une phase dynamique où l'on détermine la tension induite aux bornes du même conducteur lorsqu'il est déplacé dans le même champ d'induction à vitesse connue. La détermination des grandeurs électriques par comparaison à l'effet hall quantique et à l'effet Josephson permet alors de relier la masse à la constante de Planck.

### Phase statique : loi de Laplace



### Phase dynamique : loi de l'induction



Bien que le principe de l'expérience reste simple et direct, l'obtention d'une incertitude relative significative ( $1 \times 10^{-8}$ ) suppose la mise en œuvre, au meilleur niveau, de dispositifs relevant de divers champs de la physique. Le projet actuellement en cours conduira à l'installation d'un dispositif expérimental sur le site de Trappes d'ici deux ans. Il est le fruit de la collaboration de laboratoires parmi lesquels figurent, outre le LNE, l'Institut National de Métrologie (INM/CNAM), l'Observatoire de Paris (SYRTE/OP), l'Université de Versailles-Saint-Quentin (LIRIS-UVSQ), l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM Lille), l'École Supérieure d'Electricité (LGEP/ESE) et l'École Normale Supérieure de Cachan (Satie/ENS Cachan).

La mesure constitue dans le cadre actuel une détermination de la constante de Planck. Supposer son invariance dans le temps permettra dans un premier temps de caractériser la stabilité du prototype international du kilogramme. L'information fournie pourrait contribuer, à terme, et sur la base d'un consensus international, à l'élaboration d'une nouvelle définition de l'unité de masse afin que celle-ci ne dépende plus de la disponibilité d'un artefact matériel unique, mais d'une constante fondamentale de la physique, par nature impérissable.

# Temps et espace : mesure d'intervalles de temps et étalons de fréquences optiques

## Horloges et définition de la seconde

Depuis de nombreux millénaires, la graduation du temps a été découpée de multiples manières, mais cependant toujours en intervalles réguliers tout au long de notre histoire. Les premiers calendriers, qui ne servaient que de repères de temps, étaient basés généralement sur le cycle de la terre et des saisons.

Tout au long de l'histoire, l'homme a essayé de trouver le meilleur moyen de mesurer le temps (en fait des intervalles de temps) avec des instruments tels que les cadrans solaires, les clepsydres et les horloges mécaniques. Notons que les premiers pendules, (pendule de Shortt par exemple) pouvaient détecter le 100<sup>ème</sup> de seconde sur la journée.

Au XXe siècle, l'observation de certains phénomènes sur des cristaux parcourus par des intensités de courant, et l'évolution de l'électronique, vont permettre la réalisation des premiers oscillateurs à quartz. C'est le premier pas vers des horloges de grande exactitude, telles que les horloges atomiques micro-ondes au milieu du XXe siècle, et vers une nouvelle définition de la seconde.



*Cristal de quartz*

En 1967, compte tenu des progrès importants des horloges de laboratoires, la seconde est définie comme la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

A ce jour, l'horloge la plus exacte au monde a été développée et réalisée par le SYRTE, laboratoire national de métrologie pour le temps et la fréquence, situé à l'Observatoire de Paris. Cet étalon de fréquence (horloge à fonctionnement non continu), la fontaine atomique à atomes de césium, mesure la fréquence d'oscillation de l'horloge avec une exactitude de quelques  $10^{-16}$ , soit moins d'un millionième de milliardième. Cela permet d'effectuer des comparaisons d'intervalles de temps au niveau de la nanoseconde, l'incertitude étant limitée, principalement par les caractéristiques des instruments de comparaisons utilisés.



*Fontaine atomique à atomes de Cs*

## **Pourquoi et pour qui ?**

---

Plusieurs moyens ont été mis rapidement à disposition du public (et le sont toujours) pour avoir accès à l'heure légale française, en vigueur depuis 1891, comme l'horloge parlante par exemple.

Les progrès de la science et de la technologie ont permis à notre société de développer des produits qui améliorent sans cesse notre qualité de vie. Les techniques de l'information et de la communication sont une des avancées les plus spectaculaires du siècle dernier et le resteront certainement pour une grande partie du XXI<sup>e</sup> siècle.

La navigation maritime, aérienne, les télécommunications, les programmes spatiaux, l'astronomie, la géodésie, sont des domaines qui nécessitent des besoins en synchronisation et en positionnement avec des incertitudes toujours de plus en plus faibles. La métrologie du temps et des fréquences est donc très sollicitée, et des références de très grande qualité sont indispensables pour répondre à ces besoins.

Par exemple, qui ne connaît pas, au moins de nom, le GPS (Global Positioning System). Selon les récepteurs et systèmes utilisés, la constellation des satellites GPS (plus d'une vingtaine) permet d'obtenir des informations très précises sur le positionnement d'objets, les mouvements terrestres... Ce positionnement peut être précis de quelques mètres à quelques centimètres selon le cas. Pour avoir de telles performances, des horloges de grande exactitude sont utilisées.



*Satellite pour comparaisons de temps*

L'essor des techniques engendre l'utilisation de nouveaux instruments dont il faut prévenir les besoins. La recherche de nouvelles horloges encore plus exactes permettra, nous l'espérons de satisfaire cette demande.

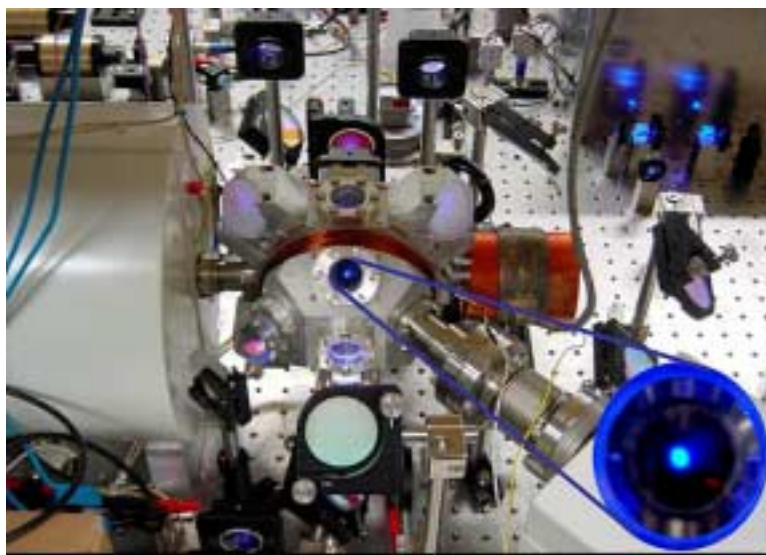
## Étalons de fréquence optique

Les horloges mécaniques du début du XXe siècle avaient des fréquences d'oscillation voisines du hertz. Puis avec l'apparition des oscillateurs à quartz, les physiciens ont travaillé sur des systèmes avec des fréquences beaucoup plus élevées, du kilohertz (kHz) au mégahertz (mHz). Les horloges atomiques actuelles à atomes de césium oscillent à des fréquences de 9 gigahertz environ.

Il est donc apparu qu'en augmentant la fréquence d'oscillation, l'exactitude des horloges pouvait être améliorée notablement. Ces progrès ont aussi été possibles grâce aux évolutions conséquentes en micro-électronique, ce qui a permis la « lecture » de ces horloges fonctionnant dans le domaine des micro-ondes.

L'objectif est donc d'essayer de réaliser une horloge dans le domaine des fréquences optiques (c'est-à-dire pour des fréquences d'oscillation de l'ordre de quelques centaines de térahertz), gamme de fréquence de l'UV à l'IR proche. De plus, des nouveaux systèmes apparus récemment, intégrant des lasers femtosecondes, devraient permettre de « lire » ces nouvelles horloges, ce qui n'est pas envisageable avec des systèmes électroniques à l'heure actuelle.

Plusieurs projets ont débuté au sein des laboratoires nationaux de métrologie français sur ces sujets : étalons de fréquence à atomes neutres d'argent (661 nm) à l'INM au Conservatoire national des arts et métiers, de strontium (698 nm) et de mercure (265 nm), au SYRTE à l'Observatoire de Paris.



*Étalon de fréquence à atomes de strontium - En loupe, les atomes piégés.*

Ces étalons de fréquence devraient permettre d'obtenir des exactitudes inférieures à  $10^{-16}$ , ce qui serait une nouvelle étape dans la mesure du temps.

Le principe consiste à confiner un ensemble d'atomes neutres à l'aide de lasers, dans un piège magnéto-optique, opération appelée le refroidissement ; ces atomes seront ensuite interrogés (toujours à l'aide de lasers) sur une transition bien déterminée, qui sera la transition d'horloge. Bien évidemment, pour réaliser de telles expériences, de nombreuses instrumentations doivent être conçues et développées avec des caractéristiques spécifiques à chaque expérience.

# La métrologie des rayonnements ionisants au service de la santé

## Quelle définition pour les rayonnements ionisants ?

---

L'utilisation des effets biologiques des rayonnements ionisants en médecine remonte à la découverte des rayons X (par Röntgen en 1895) et de la radioactivité (par Becquerel en 1896). En effet, dès 1896 des premières tentatives thérapeutiques des rayons X pour des cancers et affections diverses ont été pratiquées, et vers 1901, les premières tentatives de curiethérapie des cancers.

Donc dès le début du XXe siècle, les développements ont été simultanés pour l'imagerie radiologique, la radiothérapie externe, la curiethérapie et les moyens de radioprotection. Toutefois, la quantification des expositions aux rayonnements et la méconnaissance des processus biologiques va ralentir l'utilisation de ces moyens en médecine.

Des unités ont été définies comme « unités SI dérivées ayant des noms spéciaux admis pour la sauvegarde de la santé humaine ». Ces unités sont :

- le becquerel (Bq), pour la mesure de l'activité d'une source radioactive en nombre moyen de transition nucléaire spontanée par seconde ;
- le gray (Gy), pour la dose absorbée dans une masse de matière (en kg) à laquelle les rayonnements communiquent en moyenne une énergie (en joule - J) ;
- le sievert (Sv), utilisé pour les grandeurs « équivalents de dose » et spécifique à la protection radiologique.

Depuis la nuit des temps, l'homme est soumis à différents rayonnements telluriques et/ou cosmiques. Pour fixer les idées, l'ordre de grandeur se situe en moyenne autour de 2 à 5 mSv par an pour la radioactivité naturelle en France. Les examens d'imagerie diagnostique (radiographie, par exemple) peuvent délivrer un équivalent de dose inférieur à quelques mSv.

## Pourquoi et pour qui ?

---

A l'heure actuelle, les rayonnements ionisants sont utilisés couramment dans le domaine de la santé publique. Or les tissus biologiques réagissent, à énergie égale, très différemment selon le patient, la sensibilité propre, le type de rayonnement utilisé et les fonctions des cellules touchées. A cela s'ajoute la diversité des conditions de mesure.

Les applications dans le domaine de la santé sont donc parmi celles qui demandent la plus grande précision de mesure : radiothérapie, médecine nucléaire, radiodiagnostic, radioprotection. Pourtant, l'écart en précision entre les meilleures réalisations métrologiques et les besoins des utilisateurs pour ces applications est souvent faible (moins d'un ordre de grandeur). C'est une des spécificités de ce domaine de la métrologie.

Pour minimiser les incertitudes au niveau des utilisateurs, le LNHB (Laboratoire National Henri Becquerel) au CEA est donc conduit :

- à raccorder métrologiquement directement les instruments ou les sources de rayonnement des utilisateurs, comme par exemple les dosimètres utilisés en radiothérapie par les médecins médicaux ou les sources et instruments (activimètres) utilisés en médecine nucléaire ;
- à disposer de sources de rayonnements de référence les plus proches possible de celles des utilisateurs.



*Références dosimétriques pour la radiothérapie externe auprès d'accélérateurs médicaux*

Par exemple, en dosimétrie pour la radiothérapie, l'étalonnage de certains faisceaux à des points de référence dans les hôpitaux sont effectués avec des incertitudes de l'ordre de 1,5 % à 2 %, et les références dans les laboratoires nationaux de métrologie (tel que le LNHB), permettent de qualifier ces faisceaux avec une incertitude de 0,4 % à 1 % selon le rayonnement. L'écart entre la référence l'instrument de l'utilisateur reste faible, et selon les conditions de travail les précisions ne sont pas suffisantes.

## **Quels moyens et quelle recherche**

Le rôle essentiel du laboratoire (LNHB au CEA) est de mettre à la disposition des utilisateurs de rayonnements ionisants les références métrologiques dont ils ont besoin, dans le cadre d'une traçabilité rigoureusement établie.



*Références dosimétriques pour la cobalthérapie*

**En dosimétrie**, le laboratoire est donc équipé, entre autres, des sources de rayonnement de référence telles que des sources de cobalthérapie caractérisées en dose absorbée dans l'eau et en kerma dans l'air, un accélérateur linéaire de type médical produisant des faisceaux de photons X et des faisceaux d'électrons en dose absorbée dans l'eau, des générateurs X pulsés pour la mammographie et le radiodiagnostic, caractérisés en kerma dans l'air, des sources de curiethérapie, caractérisées en kerma dans l'air de référence (sources HDR (High Dose Rate) d'iridium 192), des sources de photons gamma du cobalt 60 et césium 137 et des sources de rayonnement bêta pour la radioprotection.

Pour établir ces références, le laboratoire utilise et développe différentes techniques de mesure comme la calorimétrie, l'ionométrie, la dosimétrie chimique, la dosimétrie par thermoluminescence, et la dosimétrie par résonance paramagnétique électronique.

**En métrologie de la radioactivité**, le laboratoire est amené entre autres à établir des étalons pour les radionucléides à usage médical (technétium 99m, phosphore 32, iode 131, iode 125, etc...). Dans ce but, il développe et dispose d'un certain nombre de techniques de mesure, absolues ou relatives (méthodes de coïncidences, scintillation liquide, spectrométrie de photons, chambres d'ionisation à puits, calorimétrie).

Le laboratoire a également une activité de mesure et d'évaluation de données nucléaires et atomiques associées à la désintégration des radionucléides (périodes radioactives, intensités d'émission des différents rayonnements émis,...).

Le laboratoire propose un programme annuel de tests inter laboratoires (PTI), dont l'un est consacré spécialement à la médecine nucléaire.

Parmi les développements en cours, on peut notamment citer des études en vue de développer des références pour les sources de curiethérapie utilisées sous forme d'implants prostatiques (iode 125, palladium 103).

Le LNHB est aussi sollicité pour participer à des groupes de travail mis en place par l'AFSSAPS dans le cadre de l'établissement de contrôles qualité réglementaires pour les équipements médicaux utilisant les rayonnements ionisants (radiothérapie externe, mammographie numérique). La mise en place de ces contrôles résulte de la traduction au niveau national de la directive européenne 97/43 sur la radioprotection du patient.



*Références dosimétriques pour le radiodiagnostic et la mammographie*

## **Quelques chiffres pour la France**

---

- Nombre de centres de radiothérapie : 180
- Nombre d'accélérateurs : 290
- Nombre de télécobalts : 70
- Nombre de services de curiethérapie : 124
- Nombre de services de médecine nucléaire : 190
- Nombre d'appareils de radiodiagnostic : 52000 (dont 34000 pour les examens dentaires)

# Pollution atmosphérique : mesures de l'ozone

## Origine de l'ozone et ses effets sur la santé

La France, comme la plupart des pays européens, connaît souvent pendant la période estivale des épisodes de pollution par l'ozone touchant une très large partie du territoire.

L'ozone est un indicateur de la pollution photo-oxydante. Il résulte de réactions chimiques, sous l'effet de la lumière solaire, entre plusieurs polluants précurseurs. Ce sont principalement les oxydes d'azote et des produits variés appelés « composés organiques volatils non méthaniques » (hydrocarbures, solvants,...).



*Banc d'analyse des précurseurs de l'ozone*

Les sources identifiées d'émissions d'oxydes d'azote ont pour origine les combustions d'énergie fossile : parmi ces sources, la circulation routière est responsable de 50 % des émissions et l'industrie et la production d'énergie de 23 %.

Les « composés organiques volatils » sont émis à 23 % par les véhicules à moteur, à 29 % par l'utilisation de solvants ou de peintures, et par des sources agricoles ou naturelles (arbres, végétation...).

Le monoxyde de carbone (résultant de la combustion incomplète de combustibles et carburants), le méthane et les aérosols, en particulier l'aérosol urbain (mélange d'eau et de composés organiques et minéraux divers) participent également aux phénomènes de pollution photo-oxydante.

L'ozone étant un polluant de formation indirecte, il est souvent qualifié de polluant « secondaire », par opposition aux polluants précurseurs qui sont dits « primaires ».

Les enfants, les personnes âgées, les asthmatiques et les insuffisants respiratoires sont particulièrement sensibles à la pollution par l'ozone. Les conséquences pour la santé varient selon le niveau d'exposition, le volume d'air inhalé et la durée de l'exposition. Plusieurs manifestations sont possibles : toux, inconfort thoracique, gêne douloureuse en cas d'inspiration profonde, mais aussi essoufflement, irritation nasale, oculaire et de la gorge.

## **Les valeurs réglementaires**

---

Les valeurs réglementaires pour l'ozone sont fixées par la directive européenne 2002/3/CE du 12 février 2002 relative à l'ozone dans l'air ambiant.

Le seuil d'information, « niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine des groupes particulièrement sensibles de la population et à partir duquel des informations actualisées sont nécessaires », est de  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne horaire.

Il est à noter que ce seuil d'information est fréquemment dépassé en France.

Le seuil d'alerte, « niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de toute la population et à partir duquel les Etats membres prennent immédiatement des mesures appropriées », est de  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne horaire.

Par conséquent, lorsque ce seuil est atteint ou risque de l'être, les Pouvoirs Publics en informent immédiatement le public et prennent les mesures propres à diminuer l'ampleur et les effets de la pointe de pollution sur la population.

## **Organisation de la surveillance de la Qualité de l'Air en France**

---

Au niveau national, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) sont chargés d'organiser la surveillance de la Qualité de l'Air en France en s'appuyant sur les compétences techniques du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) qui rassemble trois entités (l'Ecole des Mines de Douai, l'Institut National de l'Environnement et des Risques et le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais).

Au niveau local, les concentrations en ozone dans l'air ambiant sont mesurées tous les quart d'heure par 40 Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA).

Plus de 300 capteurs d'ozone sont aujourd'hui présents sur le territoire national.

## **Mise en place d'une chaîne nationale d'étalonnage pour l'ozone**

Pour s'assurer de la traçabilité des mesures, il a été décidé de raccorder les mesures d'ozone effectuées par les AASQA à l'étalon de référence national en mettant en place une chaîne nationale d'étalonnage.

De plus, cette chaîne d'étalonnage permet aux AASQA de maîtriser les moyens de mesure utilisés et de connaître les incertitudes de mesure intervenant à chaque étape.

### **• ETALON NATIONAL DE RÉFÉRENCE**

La première étape de la mise en place de la chaîne nationale d'étalonnage pour l'ozone a consisté à définir un étalon de référence national.

#### ***Description***

Cet étalon de référence national pour l'ozone est un photomètre de référence développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST) aux Etats-Unis.

Une trentaine d'instruments similaires sont utilisés comme étalon de référence dans les autres pays.

Le principe de la mesure est basé sur l'absorption de la lumière par l'ozone dans le domaine de l'ultraviolet.

La mesure d'atténuation de la lumière provoquée par l'ozone est effectuée à la longueur d'onde où le spectre d'absorption de l'ozone est maximum, à savoir la raie d'émission du mercure (253,7 nm).

La détermination de la concentration en ozone est régie par la loi de Beer-Lambert.

Le photomètre de référence SRP-24 peut être utilisé :

- soit pour générer des mélanges gazeux de concentrations connues et stables en ozone dans l'air,
- soit pour mesurer la concentration en ozone d'un mélange gazeux délivré par un générateur d'ozone externe.

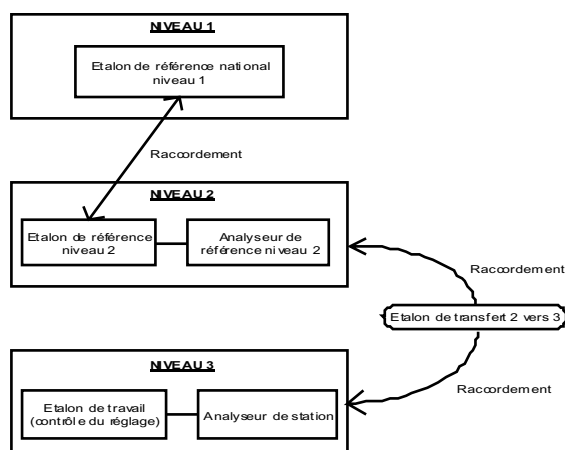
#### ***Validation***

Le National Physical Laboratory (NPL) et le Laboratoire National d'Essais (LNE) ont comparé leurs étalons de référence « ozone » lors d'une comparaison européenne en juin 2000 et lors d'une comparaison bilatérale en novembre 2002.

Les 2 comparaisons menées entre les photomètres de référence « ozone » du NPL et du LNE en 2000 et 2002 ont conduit à des résultats qui ne sont pas significativement différents, ce qui a permis de valider le photomètre de référence « ozone » du LNE.

- **STRUCTURE DE LA CHAÎNE NATIONALE D'ÉTALONNAGE**

Depuis 1996, une chaîne nationale d'étalonnage à 3 niveaux a été mise en place pour l'ozone. Sa structure est schématisée sur la figure 1 ci-après.



*Figure 1* : Structure de la chaîne nationale d'étalonnage pour l'ozone

Dans la structure de la chaîne d'étalonnage,

- **Le niveau 1** est le LNE, Laboratoire National de Métrologie et d'Essais.  
L'étalon de référence de niveau 2 est un générateur d'ozone qui délivre des mélanges gazeux d'ozone à différentes concentrations.  
Le rôle du LNE est d'étalonner tous les 3 mois les étalons de référence du niveau 2 en déterminant la concentration vraie de chaque mélange gazeux d'ozone généré à partir de son étalon de référence (Photomètre NIST).
- **Les niveaux 2** sont des laboratoires d'étalonnage inter-régionaux au nombre de 7 implantés dans des réseaux de mesure (cf. points rouges sur la figure 2 ci-après).  
Les étalons de transfert 2-3 des niveaux 3 sont des générateurs d'ozone portables délivrant des mélanges gazeux d'ozone à différentes concentrations.  
Le rôle du niveau 2 est de raccorder ces étalons de transfert 2-3 en déterminant la concentration vraie de chaque mélange gazeux d'ozone généré à partir de son étalon de référence du niveau 2 et ceci, tous les 3 mois.
- **Les niveaux 3** gèrent les stations de mesure (cf. points rouges et bleus sur la figure 2 ci-après).  
Leur rôle est d'une part, de régler tous les 3 mois les analyseurs de station avec les étalons de transfert 2-3 étalonnés par le niveau 2.  
D'autre part, après réglage des analyseurs de station, leur rôle est de déterminer la concentration des étalons de contrôle des stations, qui seront ensuite injectés périodiquement (fréquence comprise entre 1 et 15 jours selon les niveaux 3) afin de vérifier qu'aucun dysfonctionnement des analyseurs ne s'est produit depuis le dernier réglage.



## **Conclusion**

---

Ces dernières années, la surveillance de la qualité de l'air a connu un fort développement en France.

Dans le cadre du LCSQA, le LNE a pu contribuer au renforcement de la qualité des mesures d'ozone effectuées par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air :

- en s'équipant d'un étalon de référence national, à savoir un photomètre de référence (NIST),
- en mettant en place une chaîne nationale d'étalonnage pour assurer la traçabilité des mesures réalisées par les réseaux.

# L'infiniment petit

## MESURER LES DIMENSIONS À L'ÉCHELLE NANOMÉTRIQUE

### Contexte et définition

---

On définit les **nanotechnologies** comme étant la création et l'utilisation de matériaux, d'instruments et de systèmes portant sur des structures de dimensions de l'ordre **de 1 à quelques centaines de nanomètres**.

L'industrie s'approprie rapidement ces technologies, avec pour résultats des produits de haute technicité, aux performances améliorées et aux fonctionnalités totalement innovantes par rapport aux produits d'ancienne génération. Tous les domaines de notre vie quotidienne sont et seront concernés : transport, environnement, santé, télécommunications, habillement, loisirs, sécurité...) et les marchés visés sont mondiaux.

### Deux stratégies de production accompagnent cet essor des nanotechnologies :

- La première consiste à **miniaturiser** les objets qui assurent les fonctions au sein du composant, par exemple le transistor au cœur des puces électroniques. Il s'agit de l'approche utilisée encore aujourd'hui par la microélectronique et pilotée par la célèbre loi de Moore, qui prévoit une évolution des performances des microprocesseurs à partir du doublement du nombre de transistors dans les circuits tous les 18 mois (42 millions sur le pentium IV) . Dans les nouvelles unités de fabrication, la microélectronique utilise la technologie 90 nm sur les tranches de silicium (wafers) de 300 mm.
- La seconde approche consiste à **créer des briques fonctionnelles élémentaires** par **assemblage d'atomes ou de molécules**, ces différentes briques pouvant à nouveau être assemblées et ainsi de suite jusqu'à réaliser la fonction souhaitée. La nanoélectronique ou électronique moléculaire expérimente déjà différentes solutions technologiques à partir de nanotubes de quelques nanomètres de diamètre ou molécules organiques pour fonctionnaliser des transistors et des mémoires. La nanobiotechnologie construit des Lègos biomoléculaires à partir de brins d'ADN pour créer des dispositifs électroniques élémentaires, ainsi que d'autres objets qui constituent autant de micro-laboratoires d'analyse médicale intégrés par centaines sur une puce.

### Les nouveaux besoins de mesure et de raccordement

---

Dans un cas comme dans l'autre, **la production de ces nouveaux objets** à une échelle industrielle **pose d'importants et de nombreux problèmes technologiques**, notamment lors de la mise au point des processus d'élaboration, ainsi que lors du suivi des différentes étapes de fabrication.

Pour contribuer à lever les verrous technologiques, les **micro et nanotechnologies** utilisent et intègrent à tous les niveaux de la chaîne d'élaboration de nombreux **instruments de mesure de très haute technologie** tels que le **microscope électronique à transmission**, l'ellipsomètre, et surtout les **microscopes dits à champ proche** (effet tunnel et force atomique, principalement) qui ont vu le jour au milieu des années 1980 et font figure d'outil de mesure révolutionnaire, pour tout ce qui touche au besoin d'imagerie tridimensionnelle des surfaces avec une résolution atomique.

Aujourd'hui, pour assurer un fonctionnement optimal du dispositif, les produits les plus complexes exigent, sur certains éléments qui les composent, des **tolérances de fabrication de quelques nanomètres**. Le contrôle de ces tolérances passe par des mesures (dimensionnelles, électriques) à l'échelle nanométrique.

La pertinence et la confiance attendues dans le processus de fabrication sont donc fortement liée aux mesures et par conséquent à la performance, à la fiabilité et à la maîtrise de l'instrument de mesure mis en œuvre.

**La maîtrise de la mesure à l'échelle nanométrique devient ainsi une fonction critique et un besoin de tout premier plan pour l'industrie des nanotechnologies.**

Au quotidien pour l'industrie des micro et nanotechnologies ceci implique de disposer de références de mesure, d'étalons utilisables industriellement, l'usage premier attendu étant de pouvoir étalonner rigoureusement les instruments de mesure. Qui plus est, ces étalons doivent être reconnus mondialement. En effet les micro et nanotechnologies intègrent elles aussi dans leur processus de fabrication des outils et composants élaborés par d'autres industriels et pour lesquels ils n'ont pas de maîtrise technique.

Pour répondre aux demandes de ces industries, les instituts nationaux de métrologie américain, japonais, anglais, allemand et français ont développé une activité de nanométrie.

## **Le développement d'équipements de référence**

**Le projet nanométrie en cours au LNE vise à :**

- offrir une capacité de mesure d'étalons de référence, traçables à l'étalon national de longueur,
- répondre aux besoins des industriels tant sur la diversité et la nature des étalons que sur le niveau des incertitudes associées à ces mesures,
- participer au développement des documents normatifs et des futurs étalons de référence adaptés aux besoins des industriels,
- offrir une capacité de mesure pour la caractérisation de produits avancés tridimensionnels à l'échelle submicrométrique.

Le premier équipement développé dans ce contexte est particulièrement innovant . Il associe un équipement de métrologie de référence, un microscope à force atomique utilisé pour mesurer la topographie de l'échantillon et une structure mécanique mobile d'une capacité de déplacement de 300 mm x 300 mm x 50  $\mu$ m.

Les incertitudes de mesure attendues sont de 30 nm pour un déplacement de 300 mm suivant x ou y, et 1 nm pour un déplacement de 50  $\mu\text{m}$  suivant z.



*Table nanométrique 300 mm x 300 mm associée à un microscope à force atomique*

# UTILISER LES NANOSTRUCTURES EN MÉTROLOGIE QUANTIQUE

## Contexte

---

La découverte de certains effets quantiques du transport des électrons a permis d'envisager la représentation des unités électriques en termes de constantes universelles de la physique. C'est une évolution majeure car les pays peuvent reproduire maintenant des unités électriques de façon identique, en disposant d'étalons stables, pérennes et indépendants du lieu où ils sont mis en oeuvre, et ce sans trop de difficultés.

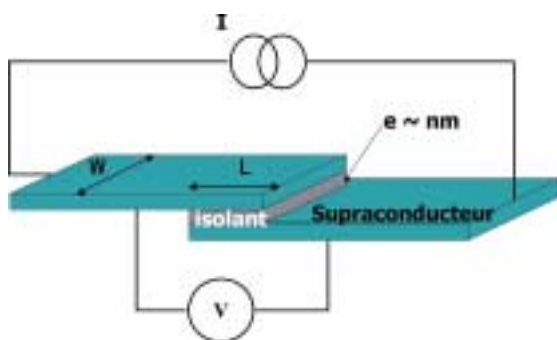
Depuis le début des années 1990, le CIPM (Comité International des Poids et Pesures) recommande l'utilisation de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique, pour réaliser les étalons électriques de tension et de résistance. Ces effets quantiques s'observent néanmoins dans des conditions expérimentales tout à fait spécifiques. La préservation des propriétés quantiques suppose en effet le découplage total des électrons de leur environnement. Cette condition est plus facilement réalisable, lorsque l'étalon de taille microscopique ou nanoscopique, est placé à très basse température dans un environnement exempt de toute perturbation électromagnétique. Le LNE s'est engagé comme dans d'autres instituts européens dans **la réalisation de ces étalons**.

## L'étalon quantique de tension

---

C'est à partir de l'effet Josephson, phénomène qui apparaît à très basse température (typiquement à  $-269\text{ °C}$ ) au sein d'une jonction de deux matériaux supraconducteurs séparés par une fine couche isolante et soumise à un rayonnement électromagnétique à haute fréquence (de l'ordre du GHz), que l'on reproduit aujourd'hui le volt. Une jonction unique ne génère qu'une tension de l'ordre du millivolt. Pour atteindre les tensions des dispositifs classiques de conservation du volt comme les références à diode Zener (10 V) et les piles Weston saturées (1,018 V), on intègre des milliers de jonctions, l'ensemble constituant un réseau de jonctions Josephson.

Le banc d'étalonnage développé par le LNE permet une comparaison directe des moyens de mesure des industriels aux réseaux de référence avec une incertitude de  $10^{-8}$ . Actuellement on prépare le développement d'une instrumentation de référence pour les mesures de tension alternative en utilisant des réseaux de jonctions programmables.



*La surface d'une jonction est de l'ordre de  $\mu\text{m}^2$  et l'épaisseur de quelques nanomètres*

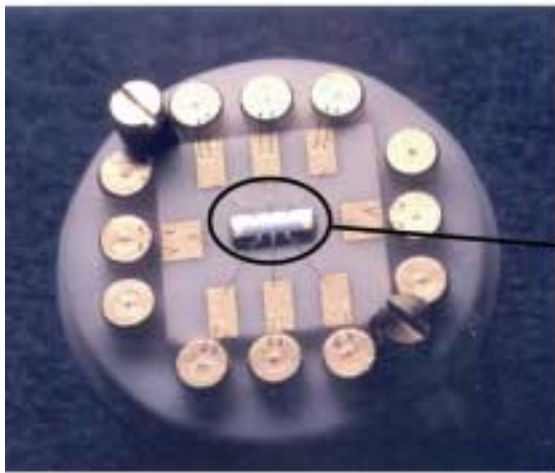


*Réseau 10V comportant 13 924 jonctions*

## L'étalon quantique de résistance

Les étalons de **résistance** développés par les instituts nationaux de métrologie utilisent l'effet Hall quantique pour assurer la conservation de l'ohm ; il résulte des propriétés des gaz bidimensionnels de porteurs de charges (électrons) observés dans des hétérojonctions de semiconducteurs, à très basse température (inférieure à  $-269\text{ °C}$ ) et sous forte densité de flux magnétique.

Lorsqu'un courant traverse un échantillon à effet Hall quantique (forme de barre croisée de plusieurs branches perpendiculaires), celui-ci présente une résistance de Hall, rapport entre la tension transverse au courant appliqué et l'intensité de celui-ci, qui peut prendre des valeurs parfaitement quantifiées en fonction de l'induction magnétique. Ces valeurs correspondent à une constante fondamentale divisée par un nombre entier.



Échantillon de Hall monté sur son support en céramique

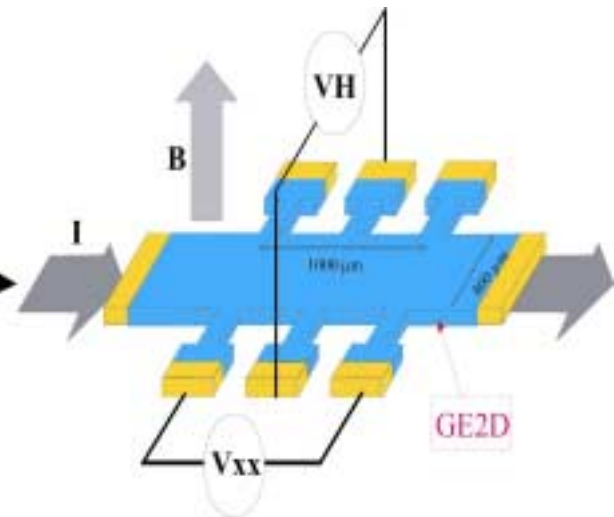
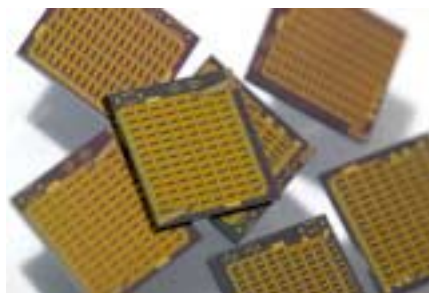


Schéma d'un gaz d'électrons bidimensionnel (GE2D) avec une géométrie de barre de Hall

**Le pont de comparaison de résistance développé par le LNE** basé sur un comparateur cryogénique de courant continu (4 C) permet d'étalonner des étalons de valeur nominale 1, 100 et 10 k  $\Omega$  avec une incertitude de quelques  $10^{-8}$ .

Le LNE est également **leader** pour la réalisation d'une **nouvelle génération d'étalons quantiques (QHARS)** mettant en jeu l'intégration de nombreuses barres de Hall élémentaires connectées entre elles sur un seul échantillon.

Ceci permettra d'étalonner des étalons de résistance entre 100  $\Omega$  et 1 M $\Omega$



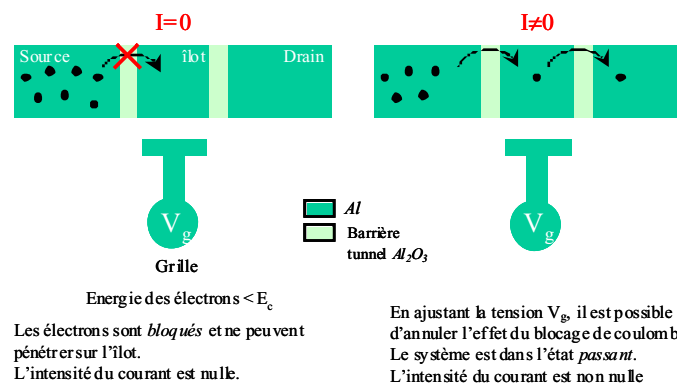
Étalons QHARS 129 composés de 100 barres de Hall connectées en parallèle

## L'étalon quantique de courant

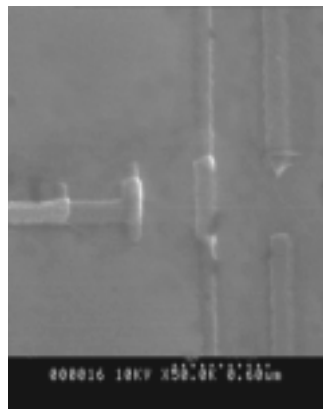
L'étalon de **courant** est aujourd'hui développé en s'appuyant sur l'**effet tunnel mono-électronique**.

Il s'agit de **dispositifs** mono-électroniques **capables de contrôler le passage d'un courant électron par électron**.

Ces dispositifs (SET-Single Electron Tunelling) reposent sur le principe du blocage de Coulomb., phénomène qui apparaît lorsque un morceau de conducteur (appelé **ilôt** ) est isolé du reste du circuit électrique par deux jonctions tunnel Dans ces conditions une énergie d'origine électrostatique apparaît appelée énergie de Coulomb.



Le LNE fabrique depuis cette année en collaboration avec un laboratoire du CNRS le LPN, ses propres dispositifs SET.



L'amplification du très faible courant délivré par le dispositif SET est faite au moyen du comparateur cryogénique de courant continu , qui joue le rôle d'un transformateur supraconducteur au gain d'amplification extrêmement précis.

## Les partenariats

---

Pour ces trois développements le LNE a développé des partenariats avec d'autres organismes homologues .

**Dans le domaine des tensions:** participation aux côtés de cinq autres laboratoires (Pays bas, Royaume Uni, Allemagne, Slovénie, Suède) au **programme JAWS** visant les tensions de faible niveau 10 mV pour des fréquences de 1 HZ à 10 kHz

Dans le domaine de la **résistance**, des coopérations avec le LPN/CNRS, l'université de Montpellier II groupe de physique des semi-conducteurs et le LEP/OMMIC

Dans le domaine du **courant** :

- fabrication des dispositifs SET en collaboration avec le laboratoire photonique et nanostructures (CNRS/LPN) et l'équipe quantronique du CEA,
- participation au projet européen COUNT mesure des très faibles courants qui s'est achevé en 2003.

# Thermométrie

Des évolutions technologiques amènent à étendre le champ de compétences vers les très basses et très hautes températures et à améliorer les incertitudes de mesure.

Ces domaines sont couverts par des pôles de compétence de haut niveau scientifique du CNAM/ INM et du LNE.

## L'Échelle Internationale de Température

---

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1990, l'Échelle Internationale de Température EIT-90 concerne les températures supérieures à 0,65 K. Elle est définie par 17 points fixes. Ces points fixes correspondent à des transitions de phases de corps purs : point de congélation, point de fusion, point triple ou état d'équilibre liquide/vapeur. Des instruments ont été spécifiés afin d'accéder à toutes les températures intermédiaires à l'aide de formule d'interpolation. Parmi les instruments spécifiés : le thermomètre à résistance de platine jusqu'à 961,78 °C et les pyromètres optiques pour toutes les températures supérieures sans limitation.

## Les très basses températures

---

Dès 1994, le Comité consultatif Thermométrie du CIPM a recommandé l'étude de nouvelles références au dessous de 0,65 K. Le CNAM/INM a participé aux recherches, et dès 1996, grâce à un nouveau réfrigérateur à dilution, a développé une référence permettant d'atteindre la température de 20 mK.

Le thermomètre qu'il a choisi de développer utilise les propriétés acoustiques de mélanges très dilués d'hélium-3 dans l'hélium-4 superfluide. Il fournit la température en fonction de la vitesse de propagation du son dans le mélange en utilisant un modèle théorique.

De son côté, le PTB (laboratoire national de métrologie allemand), a choisi une technique plus conventionnelle et a développé un thermomètre à pression de fusion de l'hélium-3.

Le CNAM/INM a ensuite utilisé le nouveau réfrigérateur à dilution pour comparer les deux thermomètres, dans le cadre du projet européen « Ultra Low Temperature ». Ces travaux ont permis d'aboutir, en 2000, à la définition d'une échelle provisoire pour les basses températures : EPBT-2000.

L'étape suivante, financée en partie par le projet « Ultra Low Dissemination Temperature », a consisté à évaluer les performances du thermomètre acoustique jusqu'à 3 mK, en l'installant dans le réfrigérateur de l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay.



*Thermomètre acoustique et thermomètre à pression de fusion de l'hélium-3 montés sur une platine du réfrigérateur à dilution*

## **Les très hautes températures**

---

De plus en plus d'industries ont besoin de maîtriser la mesure de hautes températures, par exemple :

- **Nucléaire** : le retraitement des combustibles nucléaires nécessite des opérations de traitement thermique réalisés dans des fours portés à 1 750 °C.
- **Défense – aérospatial** : la température externe des véhicules rentrant dans l'atmosphère terrestre peut dépasser les 1 700 °C. Des capteurs sont appliqués sur leur bouclier pour en contrôler la température.
- **Recherche** : des programmes d'expérimentations dans la station spatiale internationale portent sur le comportement des matériaux en fusion en microgravité. Un volet de ces expérimentations porte sur le domaine de température 1 500 °C – 2 000 °C.

Ces besoins rendent nécessaire le développement de références et d'instruments de mesure.

Le LNE participe à ces recherches :

- **En thermométrie de contact** : en développant des références basées sur les couples thermo-électriques de type tungstène-rhénium, platine-palladium, qu'il a mis en oeuvre dans un four pouvant aller jusqu'à 2 000 °C. Ces références permettent aux industriels de corriger les erreurs de mesure des capteurs utilisés dans leurs process.
- **En pyrométrie optique** : en développant des moyens d'étalonnages de pyromètres ou de sources corps noir par rapport à un four corps noir pouvant atteindre 3 000 °C.



*Four haute température 2 000 °C*

En parallèle, le CNAM/INM et le LNE recherchent de nouveaux points fixes basés sur des matériaux eutectiques métal/carbone, pouvant être utilisés aussi bien en thermométrie de contact qu'en pyrométrie.

### **Le lancement d'un projet commun de recherche CNAM/ LNE visant à développer une nouvelle génération de points fixes pour la gamme 833,8058 K à 968,61 °C**

---

Les résultats obtenus lors de récentes comparaisons entre laboratoires nationaux de métrologie européens et similaires ont fait apparaître des dispersions inexplicables affectant la matérialisation de certains points fixes et des niveaux d'incertitude notablement différents selon les laboratoires considérés.

Ainsi, les incertitudes d'étalonnage annoncées par le NIST américain sont entre deux à quatre fois plus faibles selon le point fixe considéré.

Deux hypothèses peuvent être avancées : soit les incertitudes ne sont pas établies sur les mêmes bases et ne prennent pas en compte les mêmes paramètres d'influence, soit les matérialisations de l'échelle en Europe sont de qualité inférieure à celles réalisées ailleurs.

Le NIST avance pour arguments, l'intégration dans sa matérialisation des dernières avancées technologiques en termes de pureté des métaux et d'analyse chimique.

Cette situation doit donc être clarifiée, et le projet de recherche Euromet (732), piloté par la France et mené sous l'autorité du CNAM/INM avec la collaboration du LNE, a pour objet d'améliorer la matérialisation de ces points fixes.

La France a débuté en 2004 un projet de développement de 5 points fixes (argon, mercure, indium, aluminium et argent) en utilisant les technologies les plus performantes et les matériaux les plus purs possibles.

# LE LNE EN BREF

Au carrefour de la science et de l'industrie depuis sa création en 1901, le Laboratoire national de métrologie et d'essais offre son expertise à l'ensemble des acteurs économiques impliqués dans la **qualité et la sécurité** des produits : entreprises, collectivités, organisations de consommateurs, compagnies d'assurance, organismes de recherche, administrations.

Il exerce cette activité dans le cadre du statut d'EPIC, Établissement Public à caractère Industriel et Commercial, qui lui a été conféré par le ministère de l'Industrie.

**Accélérateur de progrès**, il apporte aux entreprises les solutions techniques dont elles ont besoin pour valider la qualité et la conformité de leurs productions et les valoriser sur les marchés.

**Métrologue confirmé**, il joue un rôle important dans l'amélioration de la qualité des mesures, aussi bien pour la métrologie fondamentale que pour la métrologie industrielle et la métrologie légale.

**Précurseur d'innovation**, il développe les méthodes de mesure, d'essais et d'analyse qui facilitent l'intégration des nouvelles technologies et le développement de nouveaux produits.

**Expert technique pluridisciplinaire**, il fait bénéficier la communauté scientifique, normative et réglementaire de son savoir-faire et participe à la protection des consommateurs.

Il contribue ainsi, jour après jour, à développer la qualité et la sécurité dans notre univers quotidien et à préparer un monde meilleur.

## 720 collaborateurs

dont près des deux tiers sont des ingénieurs et techniciens qualifiés

## 5 métiers

au service de la qualité et de la sécurité

Mesurer

Essayer

Certifier

Former

Rechercher et développer

## 8 domaines d'intervention

Métrologie

Santé

Construction

Environnement

Electrotechnique

Transports

Emballage et conditionnement

Produits de consommation

## Une compétence reconnue

aux niveaux européen et national

- Notification du LNE/G-MED pour les 3 directives dispositifs médicaux
- Notification du LNE pour près de 20 directives européennes (CEM, BT, produits de construction, emballage et déchets d'emballage, métrologie légale -pesage automatique ou non-, ascenseurs, bruit des matériels...)
- Plus de 40 agréments pour l'application de réglementations nationales relatives à la protection de la santé et à la sécurité du consommateur
- 28 accréditations COFRAC (site et portée d'accréditation consultable sur le site internet du LNE)

## 46 000 m<sup>2</sup> de laboratoires

dont 10 000 m<sup>2</sup> à Trappes, constituant un ensemble de moyens d'essais et d'analyse de tout premier plan au niveau européen

## 9 implantations

2 sites en Ile-de-France (Paris, Trappes)

4 délégations régionales

(LNE-Douai, LNE-Poitiers, LNE-Nîmes, LNE-Toulouse)

1 antenne LNE/G-MED à Saint-Étienne

1 filiale LNE/G-MED à Washington

1 filiale LNE-Asia à Hong Kong

## 8 000 clients

parmi lesquels des entreprises (plus de 70 %), des organisations de consommateurs, des collectivités, des compagnies d'assurances et des experts

## Plus de 25 000 rapports

d'essais ou certificats d'étalonnages par an

## Plus de 1 000 entreprises

titulaires d'une certification « produit » ou « système »

## 2 200 stagiaires

accueillis chaque année