

Au service de la science et de l'industrie



Métrologie électrique Nanométrologie

Dossier

4 novembre 2004

Inauguration

du Pôle de Recherche en Métrologie
du Laboratoire National d'Essais
à Trappes



Inauguration du Pôle de Recherche en Métrologie du Laboratoire National d'Essais

4 novembre 2004

Plan du dossier

- Contexte et objectifs du Pôle de recherche
- Un bâtiment conçu pour répondre aux plus hautes exigences métrologiques
- Les travaux de recherche
- Les partenariats
- Le LNE, organisme technique de référence pour la santé, la sécurité et l'environnement

Annexes :

- Le triangle métrologique
- L'étalon quantique de tension
- L'étalon quantique de résistance
- L'étalon quantique de courant
- L'étalon de capacité calculable de Thompson-Lampard
- La transposition alternatif-continu
- L'étalon de puissance aux fréquences industrielles
- La métrologie haute fréquence
- La nanométrie
- La balance du watt
- Liste des publications

CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PÔLE DE RECHERCHE

En installant sur son site francilien une activité de recherche en métrologie fondamentale, le Laboratoire National d'Essais confirme sa volonté de mener à bien sa double vocation d'outil technique de référence à la croisée de la science et de l'industrie.

La mise en place du Pôle concrétise les missions confiées au Laboratoire en 2001 par les Pouvoirs Publics, avec l'accord du Bureau national de Métrologie, en matière de métrologie électrique et de nanométrie.

Ces deux domaines sont marqués par une évolution majeure. Comme le souligne le rapport de l'Académie des Sciences, « l'avènement des constantes fondamentales R_k (von Klitzing) et K_J (Josephson) dans la métrologie électrique, et le développement considérable des nanotechnologies, ont totalement bouleversé la vision et la pratique des laboratoires nationaux de métrologie, ouvrant ainsi une ère nouvelle, incontestablement moderne de la métrologie et suscitant un intérêt croissant pour une possible re-fondation du système international d'unités ».

L'effet Josephson (EJ) et l'effet Hall quantique (EHQ), à l'origine de ces constantes fondamentales, constituent la clé de voûte d'une nouvelle approche des unités électriques, compte-tenu du très haut niveau de reproductibilité de ces unités jamais atteint auparavant.

D'autre part une expérience comme la balance du watt, dans laquelle ces constantes interviennent pourrait être à l'origine d'une nouvelle définition du SI dans lequel la constante de Planck h prendrait le pas sur l'unité de masse kilogramme.

Il apparaît donc que la mise en œuvre d'expériences visant à démontrer la cohérence entre les valeurs théoriques et les valeurs phénoménologiques de ces constantes soit un objectif majeur. C'est dans ce cadre qu'intervient l'expérience du triangle métrologique par l'association de l'EHQ, l'EJ et l'effet tunnel à un électron pour vérifier la cohérence de ces constantes fondamentales en terme des constantes de Planck et de charge de l'électron.

La trentaine de docteurs et ingénieurs du pôle de recherche du LNE va contribuer encore davantage à ses évolutions métrologiques et développements de références, en s'appuyant sur un outil technologique aux meilleures performances.

Ces travaux scientifiques ont, par ailleurs, des retombées industrielles significatives, car ils contribuent dans le même temps à repousser les limites de mesure dans l'infiniment petit, au service du développement des nanotechnologies.

UN BÂTIMENT CONÇU POUR SATISFAIRE AUX PLUS HAUTES EXIGENCES MÉTROLOGIQUES

Les expérimentations scientifiques conduisant au développement de ces nouveaux étalons nécessitant une très bonne maîtrise des conditions de mesure, la réalisation du bâtiment s'est élevée à 10 millions d'euros, cofinancés par le **Ministère de l'Industrie** pour 50 %, le **Conseil Régional d'Ile-de-France** pour 15 %, le **Conseil Général des Yvelines** pour 11 %, le **Bureau National de Métrologie** pour 14 %, et le LNE pour 10 %, chaque partenaire témoignant ainsi de sa volonté de doter la France de l'infrastructure métrologique indispensable pour accompagner les nouveaux besoins de mesure des secteurs industriels de haute technologie.

Le bâtiment correspondant, dénommé Maxwell en référence au père de l'électromagnétisme, occupe 3 380 m², répartis en trois zones :

- un local technique de 1 016 m² abritant les installations de climatisation, le transformateur d'alimentation électrique, un onduleur, la chaufferie et le groupe de réfrigération ;
- une zone de 1 660 m² consacrée aux 8 laboratoires de métrologie électrique et leurs salles de contrôle :
 - les salles de contrôle occupant en moyenne 23 m² chacune et les laboratoires proprement dits, entre 20 et 60 m²,
 - une zone de 170 m² dédiée à l'expérience de la balance du watt et constituée de la salle dans laquelle se fera le montage du dispositif, d'une salle de gravimétrie et d'une salle de contrôle,
 - 110 m² réservés à l'activité de nanométrie comprenant une salle de préparation des échantillons, une salle de contrôle, et deux salles pour les expérimentations,
 - une aire de stockage et de préparation des échantillons de 45 m², commune à l'ensemble des laboratoires ;
- une zone de 710 m² équipée en bureaux, salles de réunions,

La conception du bâtiment a pris en compte toutes les contraintes d'environnement fondamentales pour la réalisation des mesures de haute exactitude :

- **protection contre les vibrations** : la majorité des expériences exigeant un niveau de vibrations inférieur à quelques micromètres par seconde, toutes les zones contigues à la zone de laboratoires sont équipées de dalles en béton reposant sur des suspensions à ressort ; les laboratoires et salles de contrôle étant quant à eux, montés sur des dalles flottantes individuelles (constituées de béton posé sur une couche de sablon), totalement désolidarisées des autres structures du bâtiment. Une protection supplémentaire est apportée aux laboratoires de nanométrie et de la balance du watt par un massif lourd individuel monté directement sur le sablon ;

- **précision et stabilité de la température** : les laboratoires sont tous régulés en température et hygrométrie comme le prévoient les exigences métrologiques ; à titre d'exemple, le laboratoire de l'étalon de capacité exige une stabilité de température de $\pm 0,1$ °C ;
- **gravité terrestre** : les deux salles de la balance du watt devant garantir une stabilité à long terme de l'altitude et de l'horizontalité, leurs sols reposent sur des piliers ancrés dans les couches stables profondes du sous-sol ;
- **protection contre les perturbations électromagnétiques** : la résolution des mesures pouvant atteindre dans certains cas un nanovolt, ou mieux, les signaux parasites induits par les rayonnements électromagnétiques ne peuvent dépasser quelques microvolts. Pour assurer cette protection contre les rayonnements, la plupart des salles de mesure ont été protégées par un blindage et par des protections individuelles de chaque raccordement électrique extérieur (insertion de filtres ou de câblages blindés selon les cas) ;
- **protection contre la contamination particulaire** : le laboratoire de nanométrie et la salle de la balance du watt sont respectivement équipés de salles blanches de classe 1000, et ce afin de protéger les échantillons de toute contamination.

LES TRAVAUX DE RECHERCHE DU PÔLE MÉTROLOGIE ÉLECTRIQUE ET NANOMÉTROLOGIE

Présentés synthétiquement dans les fiches jointes au dossier, les travaux de recherche portent sur :

- les trois étalons quantiques, tension, résistance, courant, qui permettront de refermer le triangle métrologique
- l'étalon de capacité
- le transfert AC/ DC
- l'étalon de puissance aux fréquences industrielles
- la métrologie haute fréquence
- la nanométrie
- la balance du watt

Vous trouverez des informations plus complètes sur chacun de ces travaux en vous référant à la rubrique Recherche & Développement de notre site internet www.lne.fr ou en vous procurant les publications des chercheurs (cf. liste en annexe).

LES PARTENARIATS SCIENTIFIQUES

L'activité de recherche du pôle est faite en partenariat avec ses homologues métrologues au niveau national, européen et international.

A ce titre, on peut souligner la participation du LNE à deux projets européens relevant de la recherche en métrologie quantique :

- **Le projet JAWS** (Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer), auquel il participe aux côtés de 5 autres laboratoires européens (Pays-Bas, Royaume-Uni, Allemagne, Slovénie, Suède). Les travaux visent à améliorer l'exactitude et la traçabilité de la mesure et de la génération de tensions alternatives de formes d'onde arbitraires, en particulier pour la tension alternative de faible niveau (10 mV) dans le domaine fréquentiel 1 Hz à 10 kHz. Le principe de fonctionnement du synthétiseur repose sur un code numérique à haut niveau, transformé par un réseau de jonctions Josephson en un code parfait qui est ensuite filtré de façon calculable pour obtenir enfin un signal utile de grande exactitude.

La réalisation d'un tel instrument suppose : la fabrication de nouveaux réseaux programmables de jonctions Josephson commandés par des impulsions micro-ondes, le développement de l'électronique de commande des impulsions, l'élaboration du filtre calculable et la préparation des dispositifs expérimentaux, incluant notamment la mise en œuvre d'un cryostat particulier, compact et transportable. C'est sur ce dernier point que le LNE a porté ses efforts.

- **Le projet COUNT**, qui porte sur le comptage d'électrons un par un et qui associe 5 autres laboratoires (METAS, NMI, NPL, PTB, SP), et qui vise à développer une instrumentation destinée à générer et à mesurer avec une très grande exactitude les courants électriques d'intensité inférieure à 1 nanoampère. Le projet vise aussi à améliorer la connaissance dans le domaine des très faibles courants, afin de répondre aux besoins des industries de la micro-électronique dont les composants actifs ou passifs utilisés, compte tenu de leur miniaturisation, doivent pouvoir fonctionner avec des courants de plus en plus faibles. Ce projet comprend deux axes de recherche : la réalisation du générateur de courant à partir d'une pompe à électrons munie de toris, quatre ou cinq jonctions tunnel. L'exactitude à atteindre est de 10 aA pour un courant de 10 pA (soit 1.10^{-6} en valeur relative) ; la réalisation d'un mesureur de courant basé sur un compteur monoélectronique doté d'une vitesse de comptage d'au moins 60 MHz, ce qui correspond à un courant de 10 Pa. L'objectif est de réduire l'incertitude de mesure de 100 aA pour 10 pA (soit 1.10^{-5} en valeur relative).

Les **partenariats scientifiques et collaborations** des équipes de chercheurs concernent également les domaines :

- de la **résistance** : le LPN/CNRS, Université de Montpellier II, Groupe de Physique des semi-conducteurs, et l'industriel LEP/Omic pour la réalisation des étalons quantiques nouvelle génération (étalons QHARS), mettant en jeu l'intégration de nombreuses barres de Hall élémentaires connectées sur un seul échantillon,
- du **courant** : le Laboratoire Photonique et Nanostructures (CNRS/LPN) et l'équipe quantique du CEA ; pour la fabrication de dispositifs monoélectroniques dans l'état normal ou supra, et la PTB pour la mesure de pompes supraconductrices,

- du **triangle métrologique** : NIST, CNRS, NPL, METAS, PTB, Université de Chalmers,
- de la **puissance** : le National Measurement Laboratory (NML) du CSIRO (en Australie) pour la construction d'un diviseur de tension inductif ; le Swedish National Testing and Research Institute SP (en Suède) pour la réalisation des shunts de courant,
- de la **nanométrie** : l'ENSAM de Lille, l'INM, le CEA Leti, l'ESPCI, ainsi que des industriels (Altis semi conductor, Dupont Photomasks et Jobin Yvon/Horiba).

LE LNE ORGANISME TECHNIQUE DE RÉFÉRENCE POUR LA SANTÉ, LA SÉCURITÉ ET L'ENVIRONNEMENT

Le Laboratoire National d'Essais est l'organisme technique français chargé d'accompagner à la fois les progrès de la collectivité et les entreprises dans leur démarche d'amélioration de la qualité des produits et process.

Si cette dualité d'intervention est une particularité qui accompagne le LNE depuis sa création en 1901, elle prend aujourd'hui une nouvelle dimension en raison de la compétition européenne et internationale existante et des exigences de sécurité et de santé publique renforcées.

Le LNE est ainsi dès à présent très impliqué dans un grand nombre de chantiers aux enjeux nationaux, européens et internationaux :

- **La métrologie**

A compter du 1^{er} janvier 2005, le LNE devrait être désigné comme l'organisme national de métrologie chargé de **piloter l'ensemble de la métrologie au niveau national** et d'animer le réseau des différents acteurs intervenant dans ce domaine, avec l'aide d'un Comité National de Métrologie. Dans ce cadre, il représentera la France auprès des instances internationales et européennes chargées de la métrologie scientifique et appliquée.

Parallèlement, le LNE continuera à **développer des étalons** dans ses domaines de compétence (mécanique et dimensionnel, thermique et optique, électrique et magnétique, chimique et biologique). Les développements correspondants s'appuieront sur les domaines jugés prioritaires, en accord avec le Comité National de Métrologie, telles que :

- la nanométrie, afin d'accompagner les besoins des industries de la micro-électronique,
- la métrologie associée à la santé et à la protection de l'environnement, pour répondre aux besoins de mesures et d'analyses de traces de composants chimiques et biologiques,
- les très hautes températures,
- les mesures de puissance en électricité-magnétisme,
- les états de surface...

Enfin, Le LNE apporte aux Pouvoirs Publics le soutien nécessaire à l'élaboration et à l'amélioration des réglementations nationales et communautaires en **métrologie légale**. En développant des outils et équipements techniques de référence, il permet en effet aux Pouvoirs Publics de garantir la qualité des instruments de mesure utilisés, soit dans le cadre des transactions commerciales, soit pour des opérations touchant à la santé ou à la sécurité publique. Il intervient dans ce cadre pour certifier la conformité d'un grand nombre d'instruments, dont les 31 prévus par le décret du 3 mai 2001 ou ceux couverts par la directive « Instruments de mesure ».

- **Santé - Environnement**

Dans le contexte du plan national Santé-Environnement et du plan Climat 2004, le LNE va apporter une contribution significative sur les points suivants :

- **Qualité de l'air**

Au titre de Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA), dont il est membre, le LNE développe les références permettant d'assurer la traçabilité des mesures réalisées par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air, pour tous les polluants déjà réglementés et ceux susceptibles de le devenir.

- **Qualité de l'eau**

Le Laboratoire est associé à des avancées significatives dans la télédétection des pollutions marines et a fourni aux Douanes Françaises un nouveau dispositif de surveillance des pollutions par hydrocarbures (Polmar III).

Il va contribuer à la mise en place d'une « métrologie » de l'eau, permettant d'assurer à terme la traçabilité des mesures effectuées par les laboratoires d'analyses d'eau, dans le cadre de la recherche de contaminants.

- **Médical**

Le LNE s'implique de plus en plus dans la mise au point de procédures et de méthodes permettant de mieux maîtriser les mesures et analyses réalisées dans le domaine biomédical et en site hospitalier.

- **Lutte contre l'effet de serre et maîtrise de l'énergie**

La contribution du LNE est attendue pour la définition de méthodes de mesure de très faibles fuites de gaz à effet de serre (en particulier HFC), l'évaluation des moyens de mesure, la caractérisation des matériaux au regard de leur isolation thermique et le développement, dans un cadre pré-normatif, de méthodes de référence pour l'évaluation du rendement énergétique des appareils de chauffage et équipements divers.

- **Sécurité des produits et surveillance du marché**

Le LNE est appelé à intervenir, à la demande des Pouvoirs Publics, en amont pour l'élaboration de référentiels techniques, et en aval dans le cadre de la surveillance du marché.

Les thèmes d'intervention prioritaires concernent :

- **La sécurité domestique**

Le Laboratoire doit être un acteur indépendant de référence pour tout sujet de sécurité relatif aux produits de consommation courante, hors produits alimentaires et médicaments.

- **La sécurité routière**

Le LNE apporte son expertise pour le développement de nouveaux instruments et méthodes de mesure (éthylométrie, détection de drogues, contrôle de l'inter-distance entre véhicules dans les tunnels, contrôle automatique de vitesse...) induit par la politique de sécurité routière, priorité du Gouvernement.

- **Les substances chimiques dangereuses**

A la demande des Pouvoirs Publics, le Laboratoire réalise des études et développe des méthodes d'analyses pour améliorer les connaissances relatives à l'utilisation, au transport, au conditionnement et à l'élimination des substances dangereuses.

- **La sécurité et la conservation des données sur support numérique**

Les Pouvoirs Publics, très sensibilisés aux problèmes de la conservation dans le temps des données stockées sur les nouveaux supports numériques (CD-R, DVD-R...), ont chargé le LNE de participer à la constitution d'un pôle national de compétence avec d'autres laboratoires pour les guider dans le choix des supports les mieux adaptés.

- **La sécurité sanitaire des matériaux et emballages**

La compétence du LNE dans le domaine de l'emballage est mobilisée pour améliorer les connaissances relatives aux questions de sécurité sanitaire des matériaux et emballages en contact avec les aliments. A titre d'exemple de développement récent, une certification Hygiène et HACCP vient d'être mise en place pour aider les fabricants d'emballages à répondre aux exigences croissantes des distributeurs.

Pour assurer l'ensemble de ces missions, le LNE s'appuie sur les compétences pluridisciplinaires de plus de 700 personnes, dont 400 ingénieurs et techniciens, et sur une plate-forme de moyens de mesure et d'essais de tout premier plan au niveau européen, dont la plus importante est située à Trappes (36 000 m²).

Le LNE prend peu à peu une dimension internationale, avec d'une part sa filiale à Hong Kong pour le contrôle des produits de consommation (LNE-Asia) et la création d'une antenne à Washington pour la conformité des dispositifs médicaux.