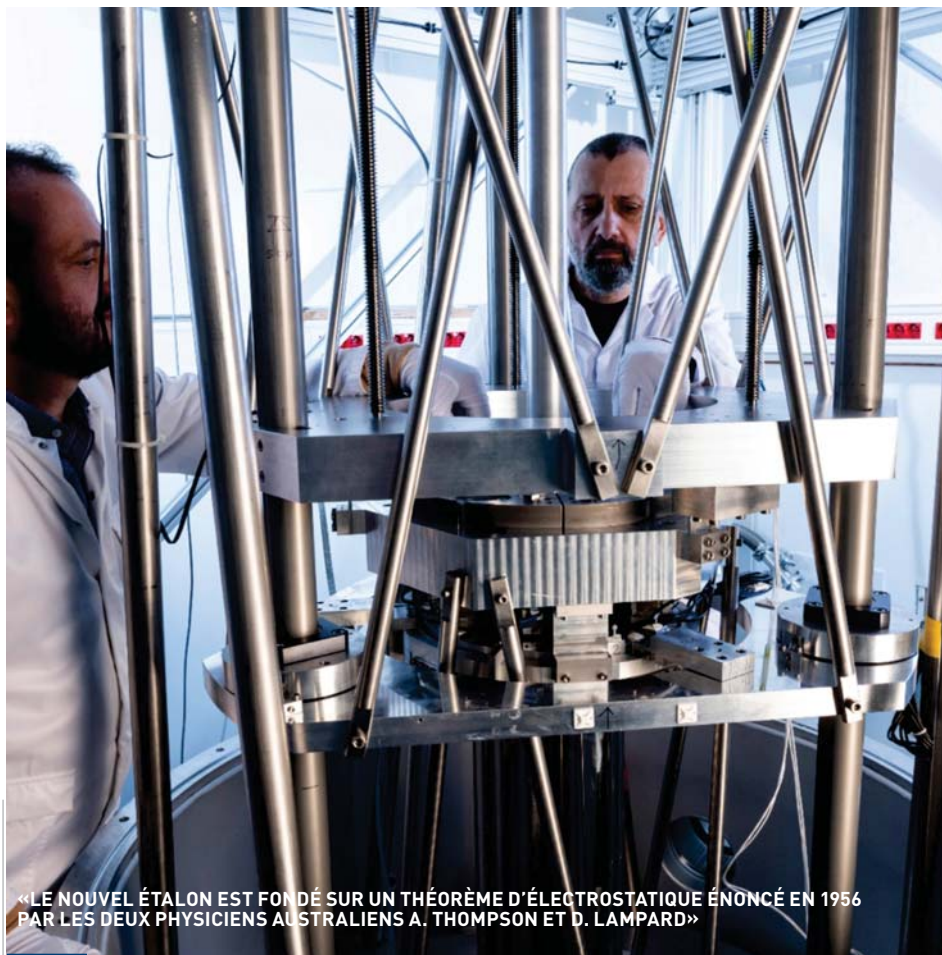


RÉALISATION DU FARAD : LE NOUVEAU «LAMPARD» DU LNE EST PRÊT !

L'ÉTALON DE CAPACITÉ CALCULABLE DE THOMPSON-LAMPARD DU LNE VA PERMETTRE DE RÉALISER LE FARAD AVEC UNE INCERTITUDE RELATIVE PROCHE DE 10^{-8} . LES PREMIÈRES MESURES RÉALISÉES L'ANNÉE PASSÉE CLOSENT UNE AVENTURE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE PLUS DE 15 ANS.



«LE NOUVEL ÉTALON EST FONDÉ SUR UN THÉORÈME D'ÉLECTROSTATIQUE ÉNONCÉ EN 1956 PAR LES DEUX PHYSICIENS AUSTRALIENS A. THOMPSON ET D. LAMPARD»

«LE LNE POSSÈDE UNE LONGUE EXPÉRIENCE DU MAINTIEN DES UNITÉS ÉLECTRIQUES ET A DÉVELOPPÉ PLUSIEURS VERSIONS D'ÉTALONS CALCULABLES DEPUIS LES ANNÉES 1960.»

Cette fois ça y est, le LNE dispose de son nouveau «Lampard» ! Précisément d'un nouvel étalon de capacité calculable de Thompson-Lampard grâce auquel réaliser le farad, l'unité de capacité électrique, est possible avec une incertitude de l'ordre de 10^{-8} . Ce faisant, aux termes de plus de 15 ans de développement, les métrologues français entrent dans le club très fermé des équipes capables d'une telle prouesse. Mieux, le LNE devient ainsi l'un des rares endroits au monde où sont mises en œuvre les deux solutions préconisées par le CIPM pour réaliser le farad (l'autre solution est fondée sur une traçabilité à l'effet Hall quantique), confirmant sa place parmi les leaders dans le monde de la métrologie électrique.

Le nouvel étalon est fondé sur un théorème d'électrostatique énoncé en 1956 par deux physiciens australiens A. Thompson et D. Lampard. Le théorème stipule qu'un système de 4 électrodes cylindriques parfaitement parallèles, de longueur infinie et placées dans le vide, réalise un ensemble de condensateurs croisés dont les capacités linéiques ne dépendent que de la permittivité du vide. Déterminer celles-ci se ramène alors à une mesure de longueur, reliant ainsi le farad au mètre.

En pratique, un étalon calculable prend la forme d'un système d'électrodes tel que défini par Thompson et Lampard, à partir duquel il est possible d'étalonner un condensateur dont on souhaite déterminer la capacité électrique. Précisément, l'ensemble est intégré dans un montage électrique permettant de comparer un rapport de tension délivré par un trans-

formateur étalon à un rapport faisant intervenir les capacités du Lampard et celle du condensateur à caractériser. En réalisant deux configurations du Lampard – par le déplacement d'une électrode mobile placée au centre de la cavité formée par les autres électrodes – et ce faisant, deux valeurs de sa capacité, on détermine alors la capacité inconnue en mesurant le déplacement de l'électrode mobile par interférométrie laser. CQFD.

Le LNE possède une longue expérience de matérialisation des unités électriques et a développé plusieurs versions d'étalon calculable de capacité depuis les années 1960. Au cours de la décennie qui a suivi, le LNE a mis au point un étalon à 5 électrodes, configuration originale permettant de multiplier le nombre de condensateurs croisés traversant la cavité inter-électrode. Au début des années 2000, avec le « Lampard » alors

en fonction, le laboratoire affichait une incertitude relative autour de 5×10^{-8} sur la mesure de capacité. Mais, comme l'indique Olivier Thévenot en charge du développement du nouvel étalon, « nous savions que nous ne pouvions pas faire mieux avec cette version dont nous avions une parfaite maîtrise ». Or ce n'était plus suffisant dans la perspective de la révision du SI, alors en préparation.

Une révision du SI sera finalement adoptée en 2018 par la CGPM. Et depuis les sept unités de base du SI sont définies à partir de constantes de la physique dont les valeurs numériques ont été préalablement fixées exactement.

Dans le contexte des travaux préparatoires de cette révision, les métrologues du LNE envisagent alors de mesurer la constante de von Klitzing reliée à deux constantes de la mécanique quantique,

ÉTALON CALCULABLE DE LAMPARD : UNE EXPÉRIENCE DE MÉTROLOGIE TOUTS AZIMUTS

La réalisation d'un étalon calculable de Thompson-Lampard vise à réaliser l'unité électrique de capacité, le farad. Mais pour y parvenir, c'est une compétence pluridisciplinaire que les spécialistes du LNE ont dû mobiliser. Ainsi, pour atteindre l'objectif d'une incertitude relative de 10^{-8} , ils ont dû maîtriser des contraintes mécaniques hors normes sur le polissage et l'ajustement des électrodes de leur condensateur ; réaliser des instruments de mesure électrique, notamment un transformateur étalon, au meilleur état de l'art mondial ; mettre au point un système optique permettant d'assurer, in situ, la traçabilité au mètre de leur mesure de déplacement de la garde mobile ; prendre en compte les contraintes liées aux techniques du vide ; et assurer le développement de logiciels pour l'automatisation de l'expérience en s'assurant, s'agissant d'un développement au long cours, de faire communiquer des équipements dont certains ont jusqu'à 40 ans d'âge !

la charge électrique élémentaire et la constante de Planck, avec une incertitude cible de 1×10^{-8} . Or une telle mesure est réalisable à partir d'un étalon de capacité calculable pour peu que celui-ci réalise le farad avec la même incertitude relative. «En 2005, les instances de gouvernance de la Métrologie française ont décidé de se lancer dans l'aventure de la réalisation au LNE d'un nouveau Lampard», se souvient le chercheur.

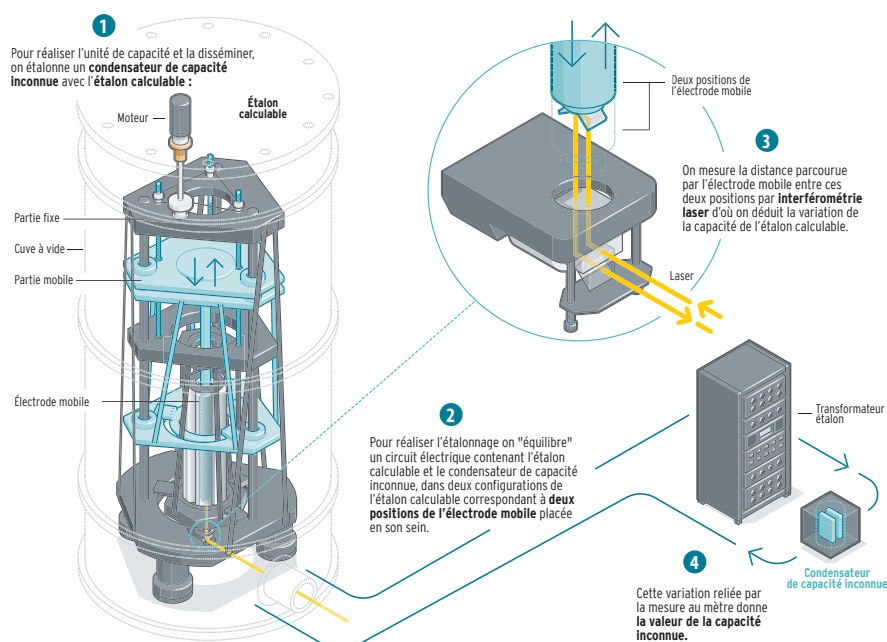
Aventure, c'est bien le mot, une épopée même. Car la réduction de l'incertitude d'un facteur 5 à réaliser représente pour les métrologues du LNE un défi pluridisciplinaire absolument hors pair (voir encadré), pour lequel ils vont devoir à bien des égards partir de zéro, et dont la composante principale s'avère rapidement être d'ordre mécanique. De fait, les calculs

montrent que la valeur cible ne pourra être atteinte qu'à la condition de maîtriser la géométrie des électrodes cylindriques à mieux que 100 nm. De même, il faudra pouvoir assurer leur parallélisme, et donc leur positionnement, avec la même précision. Mais aussi s'assurer que ce positionnement est conservé dans le temps, une fois l'instrument réglé. Et on ne parle là que des aspects mécaniques quand la mise en œuvre de l'étalon calculable implique également des développements en métrologie électrique, une instrumentation optique pour la mesure de distance, l'ensemble devant fonctionner sous vide. «Lorsque nous avons démarré le projet, nous avions une bonne idée des défis que nous aurions à relever, évoque Olivier Thévenot. Et face à des problèmes que nous n'avions pas toujours pu anticiper, nous avons dû plusieurs fois changer

notre manière de faire.»

Ainsi, au cours de plus de 15 années de travail (voir la frise chronologique), les chercheurs et techniciens ont mis au point deux techniques de polissage sur inox et ont aussi développé une instrumentation originale de mesure capacitive permettant de caractériser la géométrie des électrodes à la précision requise. Concernant le réglage du parallélisme, ils ont imaginé une solution permettant de déplacer les deux extrémités de chaque électrode indépendamment l'une de l'autre avec une incertitude de quelques dizaines de nanomètres. Comme le précise Kamel Dougdag, ingénieur projet en mécanique au LNE, «cela permet d'assurer le parallélisme des électrodes à l'intérieur de la cavité qu'elles définissent, y compris dans le cas où elles présenteraient un léger défaut de concicité». À quoi

L'ÉTALON CALCULABLE DE THOMPSON-LAMPARD DU LNE



L'ÉTALON CALCULABLE EN 5 DATES

2005	2010	2014	2018	2021
Décision de développer un nouvel étalon de Thompson-Lampard au LNE	Début de la fabrication des électrodes en inox	Premier montage de l'étalon avec des électrodes factices	Fin de la fabrication des cinq électrodes avec les spécifications attendues	Première mise sous vide et premières mesures de capacité

s'ajoute un système de mesure capacitive embarqué permettant de vérifier l'alignement et un système de bridage ne modifiant pas les réglages une fois ceux-ci effectués ! Enfin, pour assurer la stabilité dans le temps de cette structure métrologique, celle-ci a été dissociée mécaniquement de sa structure porteuse, de quoi isoler l'étalon de toute perturbation extérieure pendant la mesure. Raffinement supplémentaire : Almazbek Imanaliev, chercheur en instrumentation qui a rejoint l'équipe en 2019, a mis en place une méthode de mesure permettant de vérifier le bon alignement de l'ensemble par l'intérieur, y compris lors du fonctionnement sous vide.

Par ailleurs, s'agissant de l'instrumentation de mesure, les métrologues ont dû revoir entièrement la partie électrique de leur infrastructure. En particulier, ils ont conçu un nouveau transformateur étalon pour délivrer le rapport de tensions permettant de relier la mesure de distance à la valeur de la capacité étalon. «Nous avons amélioré la qualité de tous les enroulements des bobines, redimensionné l'ensemble et ajouté des écrans électromagnétiques, le tout permettant d'obtenir une incertitude relative de 10^{-9} pour la contribution du transformateur à l'incertitude globale», précise Olivier Thévenot. Et pour finir, afin d'assurer la

traçabilité au mètre de la mesure de distance, ils ont réalisé un interféromètre laser dont la fréquence est asservie sur une raie atomique de l'iode.

L'année dernière, l'étalon calculable a été mis sous vide pour la première fois. «Ça a été un moment fort de vérifier que les réglages géométriques du condensateur, réalisés initialement à pression atmosphérique, étaient bien conservés sous vide», se félicite l'ingénieur. Comme le résume Almazbek Imanaliev, «nous savons maintenant que tous les problèmes mécaniques ont été résolus. Nous sommes donc prêts pour les premières mesures de capacité mettant en œuvre tout le système de mesure associé.»

Une fois le Lampard remis sous vide, le LNE disposera alors d'une nouvelle voie pour réaliser le farad, plus directe qu'en reliant l'unité de capacité électrique à l'effet Hall quantique. Quant au niveau d'incertitude atteint, il placera le laboratoire français aux côtés des laboratoires nationaux de métrologie australien, chinois et américain, seuls capables de réaliser aujourd'hui le farad avec une incertitude relative de quelques 10^{-8} , avec un étalon de type Lampard. De quoi assurer durablement la place du LNE parmi les leaders mondiaux en métrologie électrique.

LE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉTALON CALCULABLE DE THOMPSON-LAMPARD AU LNE, C'EST :

1×10^{-8} d'incertitude relative sur la mise en pratique du farad selon la définition du SI.

100 nm de taille maximale des défauts de rectitude des électrodes, atteinte par polissage mécanique, une prouesse !

100 nm de précision sur le positionnement des électrodes.

10^{-9} d'incertitude sur le rapport de tension électrique fourni par le transformateur étalon.



Trois questions à...

OLIVIER THÉVENOT,
RESPONSABLE DU DÉVELOPPEMENT DE
L'ÉTALON CALCULABLE DE CAPACITÉ.

A quoi pensez-vous en reconsidérant cette aventure ?

O.T. : Je pense à la persévérance dont il a fallu faire preuve pour aboutir. Clairement, il y a eu des hauts et des bas, des moments où l'on y a cru, et d'autres où nous avons beaucoup douté et où il a fallu faire preuve d'énormément d'abnégation pour continuer à avancer.

À cet égard, je voudrais dire toute ma gratitude au Comité scientifique «Électricité-Magnétisme» et autres instances dirigeantes du Réseau national de la métrologie française (RNMF), qui ont su nous encourager et nous redonner le sens de l'objectif dans les moments difficiles.

Quelles ont été les étapes les plus marquantes ?

O.T. : La réalisation de la première électrode a sans doute été l'étape la plus cruciale. Lorsque nous avons reçu le barreau d'inox, il présentait des défauts de l'ordre de 3 µm. Atteindre 300 nm a été relativement rapide, mais il nous a ensuite fallu presque un an pour descendre à 100 nm. C'était une marche immense à franchir mais ça a été un jalon essentiel car alors nous avons montré que le projet était réalisable. L'assemblage complet de l'étalon, même si les électrodes définitives n'étaient pas finalisées a également été un moment fort. On a alors apporté la preuve que l'on pouvait atteindre l'incertitude requise sur le positionnement.

Qu'allez-vous faire maintenant ?

O.T. : L'assemblage de l'étalon et sa mise sous vide marquent la fin d'une aventure. Néanmoins, alors que nous allons maintenant commencer les mesures électriques, c'est une autre aventure qui commence qui nous réservera j'en suis certain d'autres surprises !