

LABORATOIRE DE MÉTROLOGIE DIMENSIONNELLE : LE MÈTRE DANS TOUS SES ÉTATS

Aux fondements du SI, le mètre est aujourd'hui réalisé par des méthodes optiques. Au LNE-LCM, opticiens et mécaniciens travaillent main dans la main afin d'assurer la traçabilité des mesures dimensionnelles à l'unité de longueur du SI. Leurs travaux de développement de divers instruments de mesure permettent à l'industrie de gagner en justesse et en efficacité.

Au sein du laboratoire commun de métrologie (LCM), regroupement de laboratoires du LNE et du CNAM depuis 2008, c'est une dizaine de personnes, opticiens et mécaniciens, qui forme l'équipe de métrologie dimensionnelle du LNE-LCM située dans les locaux historiques du LNE à Paris. En charge de la référence nationale de longueur, ce sont des spécialistes des mesures de longueur d'onde, d'indice de réfraction, de distance, de quelques nanomètres à plusieurs kilomètres, et aussi d'angle, de surface ou de volume, grandeurs dont ils assurent la traçabilité au mètre. Pour ce faire, ces chercheurs mènent de nombreux projets, notamment dans le cadre européen, afin d'anticiper l'évolution des besoins de l'industrie aéronautique, automobile ou encore des travaux publics.

Dès 1983, l'unité SI de longueur avait été dématérialisée : un mètre est égal à la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde. Cela a été réaffirmé par la définition du SI de 2018 où la constante physique prise comme référence pour le mètre est la vitesse de la lumière dans le vide. Pour mettre en pratique cette définition, un comité du CIPM, commun pour la longueur et le temps, recommande une liste de transitions atomiques, ioniques ou moléculaires. Sa mise en œuvre est donc fondée sur des méthodes optiques.

En France, le mètre est matérialisé par la longueur d'onde dans le vide d'un laser



hélium-néon asservi sur une fréquence de transition de la molécule d'iode-127. Cet étalon national est comparé aux autres lasers étalons nationaux dans le monde. « En pratique, l'étalon de longueur est relié à la longueur d'onde du rayonnement émis par un laser étalon et les mesures de longueur sont réalisées par interférométrie », expose Jean-Pierre Wallerand, en charge de la réalisation pratique du mètre. Le laboratoire dispose aussi de différents lasers raccordés aux références nationales de fréquence à l'aide d'un peigne de fréquence issu d'un laser femtoseconde. « Au LNE-LCM, les longueurs d'onde optique sont mesurées au mieux avec une incertitude relative de quelques 10^{-11} , soit deux ordres de grandeur de mieux que les demandes de raccordement les plus exigeantes d'utilisateurs scientifiques ou industriels », poursuit le spécialiste.

À partir de ces lasers étalons, les métrologues opticiens étalonnent d'autres lasers en longueur d'onde, notamment ceux des mécaniciens du laboratoire à partir desquels ces derniers étalonnent un ensemble d'étalons matériels pour raccorder divers bancs de mesure dimensionnelle. « Nous étalonnons toute une gamme d'étalons, détaille José Salgado, en charge des références matérielles : des diamètres de trous, cylindres ou sphères, mais aussi des polygones et des codeurs angulaires pour les angles. Nous délivrons ainsi environ 600 certificats d'étalonnage par an, avec l'incertitude la plus faible en France. »

Les références de longueur sont également des références pour les mesures d'écart de forme : rectitude, planéité et circularité. Depuis 2021, le laboratoire dispose d'une machine de mesure primaire

de cylindricité. « Plusieurs stratégies de mesure peuvent être adoptées : section par section ou bien selon une trajectoire hélicoïdale qui, tout en accédant à une forme plus complexe, permet de réduire les incertitudes de mesure, comme par exemple sur les systèmes étalons pistons-cylindres de mesure de la pression », explique l'ingénieur mécanicien.

Outre le maintien au meilleur niveau des références de longueur, plus largement, les métrologues du « dimensionnel » développent des méthodes et des instruments destinés aux mesures dans « toutes les dimensions ».

L'une des spécialités maison : les mesures de grandes distances. Pour ce faire, le laboratoire a mis au point un télémètre laser original dont la particularité est d'être fibré. Sans le déplacer, il est ainsi connectable à plusieurs têtes de mesure, ce qui simplifie les mesures. Développé à l'origine pour des besoins en géodésie ou en travaux publics, cet instrument a aussi été mis en œuvre pour le projet européen EMPIR/GeoMetre pour déterminer le point de référence d'un radiotélescope. En parallèle, « nous avons développé une méthode dite de multilatération qui permet d'utiliser le télémètre pour déterminer le positionnement de pièces industrielles dans de grands volumes avec une incertitude comprise entre 10 et 50 μm », décrit Joffray Guillory. L'année dernière, ces recherches ont été publiées dans la revue *Measurement Science and Technology*, qui ont valu à Joffray Guillory, Daniel Truong et Jean-Pierre Wallerand, le Prix 2023 du meilleur article décerné par l'éditeur.

À l'autre extrémité des distances, les experts en métrologie dimensionnelle développent actuellement un système capable de mesurer les défauts de positionnement d'un robot à 10 nm près à l'aide d'une instrumentation embarquant pas moins de 6 interféromètres dans un boîtier de quelques centimètres de côté, notamment dans le cadre du projet NanoLab. « L'état de l'art des robots est de l'ordre de 0,1 μm , précise Alain Vissière. Nous pourrions donc améliorer les systèmes d'un facteur 10 ! »

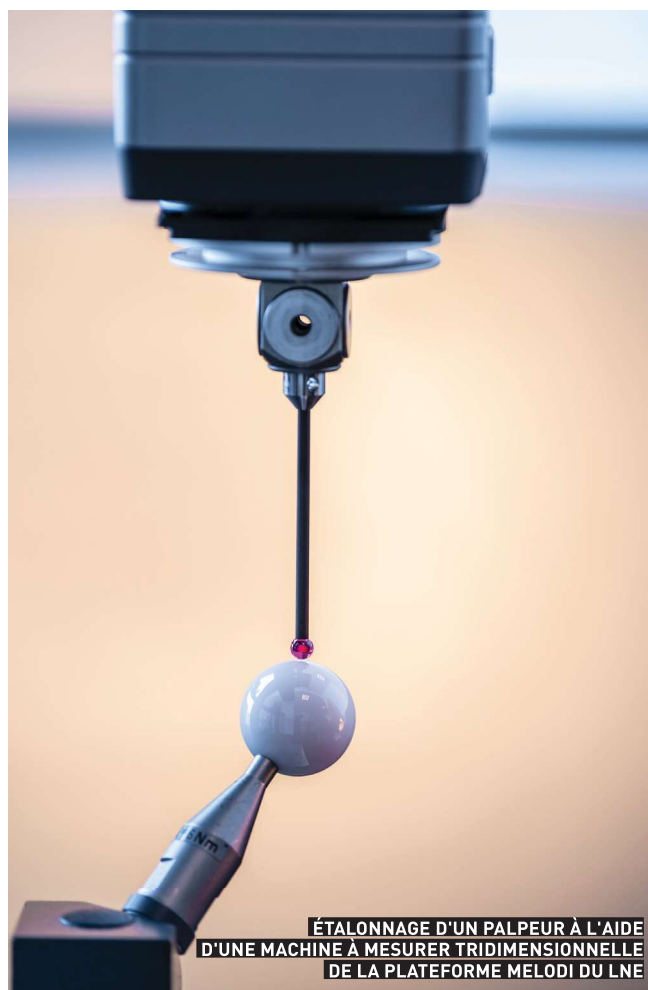
La recherche en métrologie dimensionnelle répond aussi à des problématiques industrielles bien spécifiques. C'est typiquement le cas de la fabrication additive (FA). Car, si cette technique permet la fabrication de pièces mécaniques d'une grande complexité, l'infrastructure métrologique adaptée à cette technique reste encore à développer. Et le laboratoire y contribue depuis une dizaine d'années. Le laboratoire a par exemple proposé des étalons matériels représentatifs de pièces fabriquées par FA pour l'étalonnage des tomographes X qui constituent le moyen de mesure de référence pour détecter d'éventuels défauts dans une pièce conçue par synthèse 3D. « Cela a été mené grâce au projet AdvanCT. Et actuellement, nous participons au projet SensMonCT II, dans le but d'identifier les limites de détection en termes de taille de défauts », complète Anne-Françoise Obaton, qui vient par ailleurs de contribuer à la rédaction de deux projets de normes : la première, proposée à l'ISO/ASTM, sur les mesures dimensionnelles par tomographie ; la seconde, au niveau américain, sur la limite de détection de cette technique.

Pour les industriels, le contrôle de pièces manufacturées, si possible « en ligne », est une problématique essentielle. Dans ce but, les scientifiques déploient depuis quelques années un système de mesure sans contact, de stéréovision, susceptible, contrairement à une machine 3D, d'être intégré sur une ligne

de fabrication. Son principe ? Une mire lumineuse projetée sur une pièce à mesurer et deux caméras pour acquérir les images de cette mire qui, après traitement, permettront de caractériser cette pièce en 3D. Outre ses aspects instrumentaux, le système a nécessité un important développement logiciel de reconstruction de formes.

Cette dimension « numérique » de la R&D du laboratoire s'illustre également à travers le développement d'outils de simulation de type « jumeau numérique ». Comme l'explique Hichem Nouira, « les mesures dimensionnelles dépendent de très nombreux paramètres. Ainsi, un modèle multiphysique d'un instrument de mesure permet de déterminer l'impact de chaque facteur et de mieux déterminer les incertitudes. Si de plus ce modèle est alimenté par un flux de données provenant d'une machine à mesurer, il est alors possible d'intervenir en temps réel sur la mesure pour l'affiner. » Concrètement, ces chercheurs développent actuellement des modèles de jumeau numérique pour la machine de cylindricité du laboratoire, dans le cadre du projet VIDIT, pour une machine-outil à 5 axes, en collaboration avec un industriel grâce au projet ADAM débuté fin 2024, ou encore pour un système de détection sans contact par balayage intégrant un système de positionnement par multilatération, au sein du projet européen DI-Vision.

Un signe indubitable que la « petite » équipe de métrologie dimensionnelle du LNE-LCM, voit résolument les choses en grand !



ÉTALONNAGE D'UN PALPEUR À L'AIDE D'UNE MACHINE À MESURER TRIDIMENSIONNELLE DE LA PLATEFORME MELODI DU LNE