

DEVELOPPEMENTS RECENTS ET PERSPECTIVES EN METROLOGIE DIMENSIONNELLE AU LNE

G-P Vaillau,
Laboratoire national de métrologie et d'essais
1 rue Gaston Boissier
75724 Paris Cedex 15

Résumé

Afin de mieux répondre aux besoins des industriels et des laboratoires de recherche, le LNE s'est doté, dans les derniers mois de nouveaux moyens de mesure dans des domaines aussi variés que les mesures de règles à traits, les mesures de diamètres et les mesures d'état de surface.

Chacun de ces moyens apporte ses solutions originales par rapport aux objectifs posés, soit en terme de réduction des incertitudes, soit pour une meilleure prise en compte des besoins du client ou d'une viabilisation de l'activité.

En fin d'exposé, ces développements sont mis en perspectives par rapport au plan de développement à moyen terme du laboratoire sur la période 2006-2010.

Abstract

In order to better meet the needs of industrials and research laboratories, the LNE acquired new measuring equipment in fields as diverse as line scales, diameter and roughness measurement.

Each different part of this equipment provides its own solution to meet the set targets, either in reducing uncertainties, or in taking further consideration of customers' needs, or in making the activity sustainable.

At the end of the presentation, these developments are put into perspective against the overall programme for medium term expansion of the laboratory over the 2006-2010 period

Introduction

Les missions du laboratoire de métrologie dimensionnelle du LNE consistent à développer et mettre en place les moyens et méthodes capables de répondre aux besoins de la recherche, de l'industrie et de la Société.

En parallèle le laboratoire doit assurer la dissémination de l'unité de longueur et de ses grandeurs dérivées ou connexes vers l'industrie par le biais de services d'étalonnage.

La métrologie dimensionnelle au LNE couvre les domaines suivants :

- La métrologie des longueurs d'onde des sources laser stabilisées,
- la mesure des longueurs, sur des étalons matérialisés,
- la mesure des écarts de forme et des états de surface,
- la mesure d'angle.

pour des éléments dont les caractéristiques dimensionnelles vont de quelques nanomètres à quelques mètres.

Les développements présentés dans cet article correspondent à trois objectifs : élargissement du champ de compétence du laboratoire sur la base des besoins des clients, réduction des incertitudes de mesure et fiabilisation des installations de mesure.

Le projet état de surface

les objectifs :

L'objectif de ce projet consiste à donner au LNE les moyens d'assurer ses missions du laboratoire national en se dotant d'une capacité de transfert et d'une expertise dans le domaine de la mesure des états de surface selon les normes ISO en vigueur.

Ce projet doit pouvoir répondre aux besoins futurs dans ce domaine en prenant en compte l'évolution de la normalisation en particulier en ce qui concerne les mesures surfaciques et l'utilisation de capteurs optiques.

Description du projet :

Afin de réduire le coût et le délai de développement, il a été décidé de bâtir l'instrumentation autour de deux composants essentiels existants sur le marché :

- d'une part un capteur inductif de marque Taylor-Hobson,
- d'autre part le logiciel d'analyse de données Mountains™ de Digital Surf.

Enfin compte tenu de la position de cet équipement dans le dispositif de la chaîne de raccordement nationale, la mesure des déplacements et/ou leur traçabilité aux étalons

nationaux est réalisée par deux (et à terme trois) axes interférométriques.

Les objectifs en terme d'incertitude élargie et d'étendue de mesure sont au minimum de :

- pour des étalons de type ISO 5436-1 type C et D :

Domaine	Paramètres d'amplitude moyenne : Ra, Rq, ...	Paramètres d'amplitude : Rt, Rz,	R ISO 12085	Paramètres d'espacement
$1 \mu\text{m} \leq R_t < 20 \mu\text{m}$	1 %	2% à 5%	2 %	1 %

Tableau 1 : ordre de grandeur des incertitudes élargies (k = 2)

- pour des étalons de type A :

domaine 10 μm à 1000 μm : U de 0,5 % à 0,1 %
 domaine 0,1 μm à 10 μm : U de 10 % à 1 %

L'architecture de la machine

Compte tenu des contraintes de développement décrites ci-dessus, l'architecture de la machine a été définie en respectant les principes de bases de la conception de tout équipement de mesure dimensionnel :

- Le principe d'ABBE : les faisceaux laser pointent sur l'extrémité de la pointe du stylet,
- La chaîne métrologique est la plus compacte possible et insensible aux variations de température.

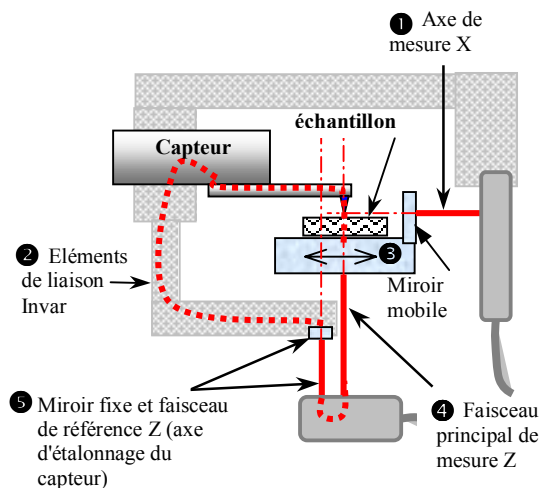


Figure 1 : Chaîne métrologique

La fonction de mesure de position en X

Dans la configuration présentée ci-dessus, l'échantillon est placé sur une table mobile dont la position est donnée par l'axe interférométrique X (repère 1)

Cet axe est constitué d'un ensemble de mesure Renishaw de type RLD 10 constitué d'une tête, intégrant les optiques et le détecteur, reliée à la source par une fibre optique. Ce

système fonctionne avec un miroir plan solidaire du porte échantillon.

Cette configuration a permis d'embarquer la tête de mesure laser sur le cadre support du capteur (repère 2) et ainsi de conserver la position relative du faisceau de mesure et de la pointe du stylet (quand le capteur est en milieu de course) quelle que soit la position verticale ou latérale (cas des mesures 3D) de la trajectoire étudiée.

La fonction de mesure de position en Z

Les relevés de l'altitude des points sont réalisés au moyen du capteur inductif FTSS2 de chez Taylor-Hobson, d'une course maximale de 2,6 mm. Sur sa plus petite gamme de mesure, soit 0,105 mm, la résolution de ce capteur est de 1,7 nm.

Une caractéristique essentielle des appareils de mesure d'état de surface porte sur la qualité de la référence de guidage. Cette référence doit être telle que la trajectoire du capteur ou, dans notre cas, de l'étalon soit parfaitement rectiligne.

Le déplacement de l'échantillon est réalisé au moyen d'une table à billes dont les spécifications nominales de rectitude sont de l'ordre du micromètre sur sa course totale de 50 mm.

Afin de corriger les défauts de trajectoire, la table porte échantillon est constituée par un miroir de référence (repère 3) de planéité $\lambda/20$ qui est scruté en permanence par un second faisceau laser (repère 4) La tête de mesure laser est une tête différentielle, ce qui signifie qu'elle est constitué de deux faisceaux dont on mesure la différence de chemin optique, un faisceau scrutant le miroir du porte échantillon, et un second faisceau (repère 5) en direction d'un miroir de référence lié au cadre porte capteur.

Ce cadre support est réalisé en INVAR afin de garantir sa stabilité dimensionnelle vis à vis des phénomènes thermiques.

De ce fait cet ensemble de faisceaux laser permet de corriger en temps réel les mouvements verticaux parasites de la table, principalement issus du guidage (rectitude, vibrations)

Ce miroir de référence doit bien sûr être caractérisé afin d'introduire dans ces corrections la valeur du défaut de rectitude (ou de planéité dans la version 3D) des pistes vues par le faisceau laser.

L'étalonnage du capteur

Cette opération peut être réalisée au moyen d'étalons matérialisés tels que des étages de cales étalons. Ce type d'étalon, outre une mise en œuvre délicate, présente deux inconvénients majeurs, d'une part l'incertitude sur l'échelon qui est de l'ordre de 10 à 15 nm suivant la qualité de réalisation (parallélisme des cales) d'autre part la limitation du nombre d'échelon ne permettant pas de caractériser finement la linéarité du capteur et sa courbe de réponse.

Nous avons donc cherché à optimiser cette opération en étalonnant le capteur in situ au moyen de l'interféromètre laser utilisé pour la compensation des défauts de guidage.

Dans cette configuration le capteur est décalé de telle sorte que la pointe du stylet soit en face du faisceau de référence (repère ⑤)

Le capteur est alors mis en contact avec un plan de référence puis déplacé selon la direction verticale sous le contrôle de l'interféromètre, le faisceau repère ④ sert alors de faisceau de référence pour contrôler la stabilité du plan de référence.

L'étalonnage du capteur est alors automatisé et répété en optimisant le fonctionnement du faisceau laser par son confinement. Cet étalonnage conduit à une modélisation de la courbe de réponse du capteur qui est prise en compte lors des mesures.

Conclusion



Figure 2 : Photo de l'installation

La réalisation de l'équipement a été confiée à la société NANOJURA pour la partie mécanique et commande et à la société DIGITAL SURF pour la partie traitement des données via le logiciel MOUNTAINS.

L'équipement a été livré fin 2006 et les tests de caractérisation et d'évaluation conduisant à l'estimation des incertitudes de mesure sont en cours. Les premiers tests laissent présager de bonne performance de l'appareil.

A titre d'illustration l'écart type de répétabilité de mesure d'un étalon sinusoïdal de Ra 0,5 μm ont donné un écart type de 0,5 nm.

Les essais de comportement statique ont montré un bruit d'amplitude ± 4 nm (données brutes non filtrées)

Les essais de caractérisation doivent se poursuivre dans les tous prochains mois en vue de faire reconnaître cet équipement au plan national puis international.

Perspectives

- **L'analyse des sources d'incertitudes : vers une évolution de la pratique actuelle :**

Les travaux réalisés au LNE devraient servir de base à un approfondissement des pratiques actuelles en terme de raccordement et d'évaluation pertinente de l'incertitude de mesure des équipements industriels.

En effet la dernière comparaison COFRAC de 2004 met en évidence des résultats assez contrastés, selon les critères et selon l'amplitude des défauts, avec dans certains domaines une dispersion inter laboratoire bien inférieure aux incertitudes des laboratoires ou à l'inverse une grande dispersion non expliquée par les incertitudes de mesure. En complément de ce constat, les conditions de raccordement de ces instruments de mesure sont très différentes d'un laboratoire à l'autre, la grande majorité des laboratoires utilisent un étalon de rugosité, d'autres laboratoires appliquent les procédures constructeurs, (mesure d'étage de cales ou plus fréquemment mesure d'une calotte sphérique) et il est donc intéressant d'évaluer ces différentes pratiques.

- **Les mesures surfaciques et les capteurs optiques**

Le projet est conçu pour évoluer vers la mesure des états de surface 3D, ou surfacique, avec la possibilité d'utiliser un capteur optique.

Outre les possibilités apportées par cette évolution, il sera intéressant de procéder à la comparaison des différentes technologies de capteur (stylet et optique)

Les mesures de diamètre

Rappel des objectifs du projet et contexte :

Il existe de nombreux domaines de la métrologie ou de l'industrie qui requiert de faibles incertitudes de mesure sur des étalons de forme cylindriques. C'est en particulier le cas en métrologie des pressions, où les pressions générées sont raccordées à la masse et à l'unité de longueur par la mesure des sections effectives des ensembles pistons-cylindre.

La connaissance de cette section est établie à partir de mesures de diamètres - et de forme - permettant de modéliser la surface cylindrique (piston ou cylindre) avec une incertitude type relative de $3 \cdot 10^{-6}$, ce qui correspond à une incertitude élargie de 100 nm sur le diamètre.

A terme cette incertitude relative sur la section effective doit être portée à $1 \cdot 10^{-6}$ ce qui conduit à réduire l'incertitude sur les mesures des diamètres dans un rapport de 1/3.

Cet objectif, très ambitieux, ne peut être traité indépendamment de la connaissance de la forme des surfaces.

Il a été décidé de mener ce projet en deux étapes, d'une part améliorer les conditions de mesure de diamètres afin d'obtenir une incertitude élargie de l'ordre de 0,06/0,08 μm , puis à partir des acquis apportés par cette amélioration poursuivre vers la réalisation d'un moyen de mesure capable de traiter simultanément les mesures de forme et les mesures de diamètres avec une incertitude voisine de 0,03 μm .

Cette première phase de l'amélioration correspond également à des besoins industriels portant sur la réduction

des incertitudes de mesure sur des étalons de transfert en particulier dans le secteur de composants pour l'automobile et la micromécanique.

Les moyens actuels

Description des moyens utilisés :

Le laboratoire dispose de machines SIP 214, qui à leur origine, avaient été conçues pour fonctionner avec des règles de mesures intégrées et des incertitudes de positionnement de l'ordre de 0,5 µm. Ces machines ont été équipées dans les années soixante dix d'interféromètres laser puis ont fait l'objet d'améliorations régulières (acquisition automatique, mesures des conditions ambiantes, déplacements sur tables à vérins piézoélectriques...) pour aboutir aux performances actuelles en délivrant des mesures avec une incertitude de l'ordre de 0,1 µm. Mais il n'est plus possible, compte tenu de la conception de ces moyens, de réduire l'incertitude de mesure et ce pour deux raisons fondamentales :

- La stabilité mécanique de la structure, qui est sensible à la charge et à la position de la table de mesure. Compte tenu de la disposition de l'interféromètre, ce phénomène engendre une instabilité de la chaîne métrologique difficile à corriger compte tenu du niveau d'incertitude recherché,
- En second lieu le fait que la mesure soit manuelle, d'où la présence d'un opérateur durant toutes les phases de mesure avec les perturbations thermiques que cela peut provoquer la limitation du nombre de répétition qui en découle.

Le nouvel équipement sur une base de machine SIP 420 M

Pour cette première étape de réduction d'incertitude, il a été décidé de partir d'une base de machine de mesurer SIP 420 M, transformée afin d'optimiser la chaîne de mesure et d'automatiser certaines séquences de mesure.

Le gain en incertitude a été traité au travers des améliorations suivantes :

- Automatisation de toutes ou parties des séquences de mesure : possibilité de répéter les mesures et de réduire l'effet opérateur (réduction des composantes aléatoires constitutives de la répétabilité de mesure, réduction des perturbations thermique en l'absence d'opérateur durant les séquences de mesure critiques)
- Réalisation d'une chaîne métrologique indéformable pour éviter les corrections de déformation de bâti,
- Montage du faisceau de l'interféromètre en principe d'Abbe quel que soit le plan de mesure,
- Amélioration des conditions d'acquisition en prenant en compte la valeur indiquée par le capteur

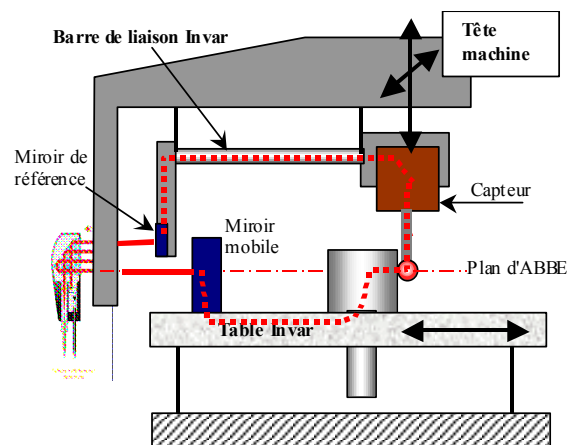
en contact avec la pièce au lieu de se contenter d'atteindre une valeur cible à $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

La chaîne métrologique :

La chaîne métrologique présentée sur le schéma ci-dessous permet de respecter deux des principales contraintes de conception.

D'une part le principe d'ABBE, grâce à l'emploi d'une tête de mesure différentielle fibrée en regard du centre de la bille de palpage. L'ensemble est embarqué sur la tête de la machine SIP et ainsi mobile verticalement (axe Z) et transversalement (axe Y) Cette configuration autorise les contournements selon l'axe Y sans perdre le faisceau et surtout les mesures à différentes altitudes Z en respectant le principe d'Abbe.

D'autre part La chaîne métrologique est constitués d'éléments en Invar (barre de liaison miroir de référence – porte capteur et table porte objet) reliés à la structure par des lames flexibles. Cet ensemble est donc parfaitement stable du point de vue mécanique et thermique.



La commande des déplacements des axes X , Y et Z :

Les trois axes de déplacement de la machine ont été motorisés.

La commande de ces moteurs répond aux exigences de mouvement rapide et de mouvement fin d'approche des produits. L'approche finale et la mise en contact sont réalisées au travers d'un mouvement secondaire assuré par un vérin piézo-électrique. Enfin une boucle PID permet de réaliser la mise en contact de la touche du capteur en asservissant le vérin sur le signal de sortie du capteur.

Cette phase d'accostage automatique complétée par une acquisition de la valeur du capteur est une évolution importante par rapport à la configuration actuelle, assurée manuellement ; cette fonction automatique permettra de réaliser des mesures pour différentes valeurs de déviation du capteur donc pour différentes valeurs de force de contact ce qui donne la possibilité d'extrapoler à force de mesure nulle.

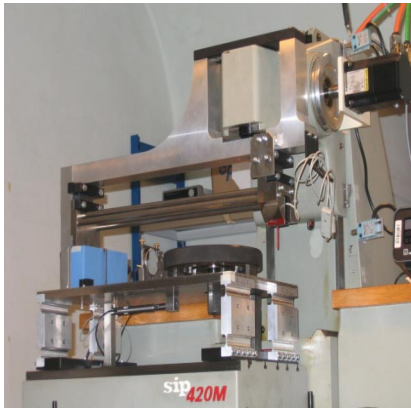


Figure 3 : Vue de la machine en cours de mise au point

La réalisation du programme de pilotage et d'étalonnage :

Le programme d'étalonnage fait appel à trois niveaux de programmation :

- une application d'étalonnage qui intègre des commandes de haut niveau (de type mesure produit, mesure de l'étalon, ...) et qui réalise les acquisitions et le traitement des données. Cette application est directement dérivée de l'application actuelle WINCALIS.
- Une application, contenue dans un châssis PXI, qui à partir des commandes de haut niveau définit les trajectoires et génère les déplacements ; Cette application permet également de rechercher la position de l'axe du cylindre mesuré afin de positionner parfaitement la touche capteur sur un diamètre.
- Enfin une application "Fenêtre Machine" qui permet de visualiser la position et le statut en cours de chaque axe.

Avancement du projet :

Le projet est maintenant en phase terminale, toute la partie pilotage est maintenant au point et il ne reste plus qu'à tester les communications entre le programme principal, porteur de l'application d'étalonnage, et le programme de génération des trajectoires. Des mises au point sont prévues notamment au niveau des différentes séquences de mouvements, des rattrapages de jeu et de l'évaluation des risques de collision.

Le programme de mise au point et d'évaluation finale doit se dérouler sur le premier semestre 2007.

Mise en œuvre d'une méthode de détection de traits par caméra CCD

Le LNE a engagé un programme de maintenance de ses équipements d'étalonnage de règle et micromètre avec les objectifs suivants :

- garantir la pérennité des capacités d'étalonnage en remplaçant le microscope photo-électrique du banc de 3 m par un système de microscope optique associé à une caméra vidéo,
- avoir un principe d'étalonnage plus polyvalent et proche des conditions d'utilisation des étalons à traits.

Pour réaliser les études sans perturber l'activité sur le banc utilisé pour les étalonnages (banc de 3 m) un banc d'étude dédié aux micromètres objet a été réalisé, dans un premier temps en configuration microscopie photoélectrique. Ce banc a permis de mettre au point la méthode d'alignement d'un faisceau laser sur une courte distance de l'ordre de 20 mm.

Les comparaisons entre les deux équipements ayant été concluantes il a été décidé de passer à la seconde phase du projet, à savoir le remplacement du microscope photo électrique par un microscope optique.

Conception et réalisation du montage de support du microscope.



Photo 1 : Vue du banc de mesure des micromètres objets

Ce montage a été conçu de manière à supporter le microscope optique et les optiques de l'interféromètre laser tout en réduisant au maximum la chaîne métrologique et en garantissant sa stabilité.

La caméra utilisée est une caméra CDD noir et blanc Firewire (IEEE 1394a) de résolution 768x1024, 8 bits de niveau de gris. Le microscope possède un barillet muni d'objectifs x10, x20, x50, x100.

Détection du centre de trait et calcul de l'écart entre traits

La position du centre de trait se déduit du positionnement de chacun des bords. Pour cela deux méthodes de détermination des bords ont été étudiées :

- la première est le passage par un seuil (en général 50 % de l'intensité maximale)
- la seconde, consiste à définir les caractéristiques du bord (contraste, largeur du bord, largeur de l'avant et après bord) pour déterminer le niveau haut et le niveau bas du profil. Ensuite on en déduit la position du bord au passage par le niveau moyen.

Pour ces 2 méthodes des résolutions subpixel sont obtenues en interpolant. L'exactitude attendue est de l'ordre de 0,1 pixel (soit environ 10 nm pour un objectif x50 et moitié moins pour un objectif x100.)

Pour ne pas être sensible aux défauts locaux des traits, et afin de disposer d'un mesurande comparable à celui traduit par un microscope photo-électrique, les bords de traits ont été déterminés sur le profil moyen obtenu sur toute la hauteur de l'image.

De plus pour ne pas dépendre d'une éventuelle inhomogénéité du gain de la caméra ou d'aberration optique la même zone de l'image est utilisée pour chaque détection de trait.

Les 2 méthodes ont donné des résultats comparables à 10 nm près.

Détermination de la distance entre traits.

En théorie, après avoir pris une photo d'un trait et déplacé le micromètre objet d'une distance d égale à la distance entre traits, l'image de second trait se superpose exactement à celle du premier.

Dans la pratique la distance entre traits n'est pas connue, donc pour un déplacement connu D , voisin de la distance nominale entre trait du micromètre il existe un déplacement d du centre de trait sur l'image.

La distance entre trait D_T s'écrit alors :

$$D_T = D + G \cdot d$$

où G est un facteur d'échelle (grandissement) local qui permet le passage d'un déplacement local en pixel-caméra à un déplacement en mètres sur la règle.

Par conséquent pour connaître la distance D_T il faut déterminer G .

Afin de s'affranchir de la contrainte sur l'étalonnage de la caméra il a été choisi d'acquérir deux images pour chacun des traits du micromètre objet. Ces deux images d'un même trait sont prises avec un léger décalage en position (typiquement 1 à 2 μm) et à partir de ces données il est possible de déterminer le facteur d'échelle (grandissement) pour chacun des traits.

Le facteur d'échelle pour un trait est ainsi donné par :

$$G_i = \frac{L_{i2} - L_{i1}}{P_{i2} - P_{i1}}$$

avec les notations suivantes, pour un trait i :

Position 1 : soit P_{i1} la position (en pixels) sur l'image 1 et L_{i1} la position correspondante du trait sur le banc donnée par l'interfèromètre.

La *position 2* donnera respectivement les informations P_{i2} et L_{i2}

La moyenne des grandissements de chacun des traits est ensuite calculée par :

$$G = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N G_j$$

Après avoir déterminé le grandissement pour chacun des traits et en avoir fait la moyenne, il est possible de calculer la distance entre deux traits D_{ab} :

$$d_1 = [(L_{b1} - L_{a1}) + G \cdot (P_{b1} - P_{a1})]$$

$$d_2 = [(L_{b2} - L_{a2}) + G \cdot (P_{b2} - P_{a2})]$$

$$d_3 = [(L_{b1} - L_{a2}) + G \cdot (P_{b1} - P_{a2})]$$

$$d_4 = [(L_{b2} - L_{a1}) + G \cdot (P_{b2} - P_{a1})]$$

$$D_{ab} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{4}$$

Résultats

Comparaison avec la détection photo-électrique

Pour pouvoir assurer la traçabilité et la continuité des résultats, les résultats issus de la détection photo-électrique sur le banc de 3 m ont été comparés avec les mesures faites sur le banc micromètre avec le microscope optique. Les écarts représentés sur le graphique ci-dessous montrent l'équivalence des deux techniques.

Ecart LNE (microscope photo-électrique banc de 3 m) - LNE (microscope optique)

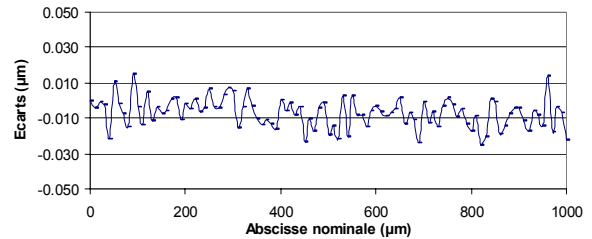


Figure 4 : Ecart constatés entre la détection photo-électrique sur le banc de 3m et la détection optique sur le banc micromètre.

La pleine échelle correspond à l'incertitude sur la différence.

Comparaison avec un autre LNM utilisant une méthode similaire

Pour finaliser cette validation, il a été décidé de faire mesurer un micromètre objet de référence par le LNM Finlandais (Mikes) car ce dernier possède un banc d'étalonnage utilisant une méthode de mesure similaire. La figure ci-dessous présente les écarts entre les résultats de mesures du nouveau banc et ceux du Mikes. On peut constater l'équivalence des résultats étant donné les incertitudes élargies annoncées (24 nm à 1 mm pour le Mikes, 42 nm pour le LNE).

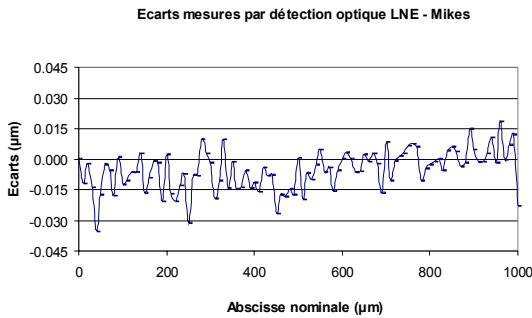


Figure 5 : Ecart constatés pour des mesures en détection optique sur le banc micromètre et au Mikes.

La pleine échelle correspond à l'incertitude sur la différence.

L'incertitude élargie est de 42 nm pour 1 mm.
Ce résultat est à rapprocher des 60 nm obtenus avec le microscope photo-électrique.

Conclusion :

Les travaux réalisés ont conduit à :

- une méthode d'étalonnage plus proche des conditions d'utilisation des micromètres-objet mais qui reste équivalente à la détection photo-électrique utilisée jusqu'à ce jour,
- un banc d'étalonnage avec des moyens de mesure simples et courants (microscope optique, caméra CCD) dont la maintenance peut être assurée sans difficulté.
- une méthode plus performante.

Les différences constatées sur les écarts observés laissent penser que l'incertitude trouvée est légèrement surestimée. Des investigations supplémentaires seront menées pour affiner encore la méthode.

Perspectives de développement

Les grandes tendances en métrologie dimensionnelle

L'évolution de la métrologie dimensionnelle repose sur de grandes tendances qui sont étroitement liées à la sophistication ou à la qualité croissante des produits industriels ainsi qu'à l'optimisation des processus de production, il s'agit de :

- la recherche d'une plus grande exactitude des mesures :

Cette tendance se retrouve dans tous les domaines industriels et à toutes les échelles en liaison avec les tolérances de fabrication, du très petit (nanométrie) en passant par les éléments de dimension courante de quelques millimètres (éléments d'injection diesel) jusqu'au plus grand (construction aéronautique). Ces exigences dans les spécifications de produit concernent tous les domaines de la métrologie dimensionnelle : mesures de dimension, mesures de

forme, d'état de surface mais également mesures tridimensionnelles.

- la miniaturisation des produits liés aux nouvelles technologies,
- la recherche d'une information complète capable de définir complètement un produit ou une forme géométrique et qui intégrerait les différents niveaux d'observations : dimension, écarts géométriques de forme et caractéristiques de surface.

Ces tendances sont bien sûr accompagnées par la mise sur le marché d'une instrumentation répondant à ces évolutions; on peut citer entre autres exemples :

- La combinaison sur un même équipement de plusieurs types de mesure : forme et dimension ou forme et état de surface,
- L'apparition de machines de mesure 3D de seulement quelques dizaines de nanomètres d'incertitude de mesure pour des volumes de mesure de (100 x 100 x 50) mm³
- L'apparition de moyens de mesure de résolution nanométrique dans les domaines de la forme et des états de surface,
- L'apparition de nouveaux moyens de mesure dans les domaines des grandes longueurs ou grands volumes (quelques dizaines de mètres)

Les conséquences en terme de développement pour le LNE:

- Poursuivre les efforts de réduction des incertitudes de mesure dans pratiquement tous les domaines en poursuivant le développement de méthodes ou d'instruments adaptés.
- Prendre en compte, dans ces développements, la nécessité d'une mesure globale permettant de dimensionner et caractériser une surface,
- Développer des outils capables de répondre aux demandes liées à la miniaturisation des produits,
- Enfin développer une approche nouvelle, d'assistance à l'évaluation des équipements de mesure industriels, qui ne serait plus basée et limitée à des mesures d'étalons de transfert, mais qui intégrerait le développement et le transfert de méthodes de caractérisation.

Concrètement ...

Le laboratoire continuera de développer les thèmes transversaux suivants :

- La conception et les techniques d'évaluation des systèmes de mesure de grande précision : il s'agit de profiter et pérenniser les acquis du projet nanométrie. Ce projet bien qu'orienté vers les

activités de nanotechnologie est une formidable source de progrès dans le développement de nouvelles architectures de systèmes de mesure, dont on a pu voir les retombées sur les projets présentés ci-dessus, de méthodes de caractérisation d'équipements (interféromètres, capteurs capacitifs...) ou de moyens (mesure de rectitude et planéité au nanomètre, mesure d'orthogonalité...) voire d'étude des phénomènes et des conditions de maîtrise de l'environnement (vibration et thermique)

Afin de poursuivre ces développements le LNE a signé avec l'ENSAM de Lille une convention de collaboration scientifique portant création d'un laboratoire commun LNE-ENSAM *LC3M* : Laboratoire Commun de Mécanique et de Mathématiques pour la Métrologie. Cette convention garantit la pérennisation de la participation de l'ENSAM aux travaux communs de développement du LNE initiés dans les années quatre vingt dix avec le projet plateau de référence angulaire.

Parmi les projets phares des années futures on peut citer en premier lieu le projet relatif à la mesure de cylindre combinant les mesures de forme et de dimension avec une incertitude de quelques dizaines de nanomètres.

Ce projet est bien sûr orienté vers la mesure des ensembles piston cylindre des balances manométriques mais son apport pour d'autres domaines de la métrologie de référence ou dans un certain nombre d'applications industrielles est évident.

Ce projet devait démarrer en 2008 après une phase préalable d'identification des besoins.

Dans le domaine des mesures de forme et d'état de surface le LNE prévoit de développer la mesure surfacique des états de surface.

Dans ces domaines le laboratoire souhaite également mener une étude de fond sur, d'une part, les conditions de traçabilité des mesures (apport des différents types d'étalons présents sur le marché, besoins en terme d'incertitude) mais aussi sur les conditions d'évaluation des incertitudes de mesure dans ces domaines.

Enfin d'autres domaines de mesure requièrent une meilleure prise en compte des conditions d'évaluation des équipements et de raccordement des mesures : les mesures 2D par voie optique, les mesures de grandes dimensions mais aussi les mesures à l'échelle nanométrique.

Conclusion

La métrologie dimensionnelle couvre un vaste champ d'activités et de domaines industriels où la mesure dimensionnelle est très présente. Les progrès réalisés par les techniques de mesure, tant en terme d'exactitude des mesures, que de domaines d'application, du très petit au très grand, la variété des techniques de mesure employées ouvrent un vaste domaine d'investigation et de développement pour l'activité d'un laboratoire national de métrologie.

Il est évident que tous ces besoins ne peuvent plus être traités par un seul laboratoire national et que des coopérations internationales et en particulier européennes doivent être engagées afin d'assurer une meilleure complémentarité des laboratoires et développer des synergies capables de répondre aux défis des progrès industriels.

Le LNE se place dans cette perspective avec des atouts importants pour répondre à ces futurs défis.

