

Derniers résultats du programme de recherche et de développement du LNE en nanométrie dimensionnelle

F. Larsonnier¹, S. Ducourtieux¹, L. Lahousse¹, S. Leleu², J. David²

¹ Laboratoire National de Métrologie et d'Essais - Unité nanométrie
29 av Roger Hennequin
78197 Trappes Cedex

² Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers
8 boulevard Louis XIV
59046 Lille cedex



L'unité Nanométrie du Laboratoire National de Métrologie et d'Essais poursuit sa mission de développement d'une expertise en nanométrie

dimensionnelle. Un équipement de métrologie dimensionnelle de référence est installé dans les nouveaux laboratoires de nanométrie du LNE Trappes. Il combine des capacités de positionnement nanométriques, de mesures traçables à l'étalon national de longueur dans un volume de 300 mm x 300 mm x 50 µm et l'utilisation de divers types de palpeurs (AFM, microscope optique, profilomètre optique).

La machine est désormais équipée d'un nouveau dispositif de protection thermique lui permettant de disposer d'un environnement climatique très stable. Nous finalisons actuellement les étapes de caractérisation de la géométrie de la structure mécanique et d'évaluation des performances des chaînes métrologiques X, Y, et Z.

Rappels des principes de conception de la machine

La conception de la machine repose sur la mise en œuvre de deux sous-ensembles mécaniques [1]. Le premier matérialise l'espace fixe de référence de la machine et le second matérialise la structure mobile qui assure les déplacements et à la mise en position de l'objet à mesurer dans l'espace.

La structure mobile

Le déplacement et la mise en position d'un échantillon dans l'espace de mesure sont réalisés par une structure mobile constituée de deux systèmes mécaniques superposés. Le premier est matérialisé par une table XY qui assure les grands déplacements suivant les directions X et Y, avec une course utile de 300 mm suivant chaque axe. Le second système, embarqué sur la table XY, est un hexapode actif dont les six actionneurs sont des vérins piézoélectriques ayant une amplitude de déplacement de 100 µm. Ce second dispositif, compense en temps réel les défauts de déplacements et de positionnement engendrés par les

imperfections des guidages mécaniques et ses capteurs de positionnement de la table XY. De plus, de part sa configuration, il déplace l'échantillon suivant les six degrés de liberté à l'échelle du micromètre et met en position sous le palpeur, avec une résolution nanométrique, la zone de la surface à analyser.

La structure fixe de référence

La constitution d'un référentiel de mesure stable ou de repérage des déplacements de l'échantillon dans l'espace est obtenu par l'intermédiaire d'une structure fixe qui supporte tous les systèmes de mesure de déplacement y compris le palpeur, ainsi que des références de planéité. Cette structure matérialise le toit de la machine. Elle est constituée d'une épaisse plaque d'aluminium apportant une forte inertie ainsi qu'une grande homogénéité thermique sous laquelle est suspendue une structure XY en Invar dont chaque bras mesure 1.70 m. Cette plaque est liée à la base de la machine par une structure de type hexapode statique. Cet hexapode réalise un appui parfaitement isostatique et limite au maximum l'apparition d'efforts de frottement.

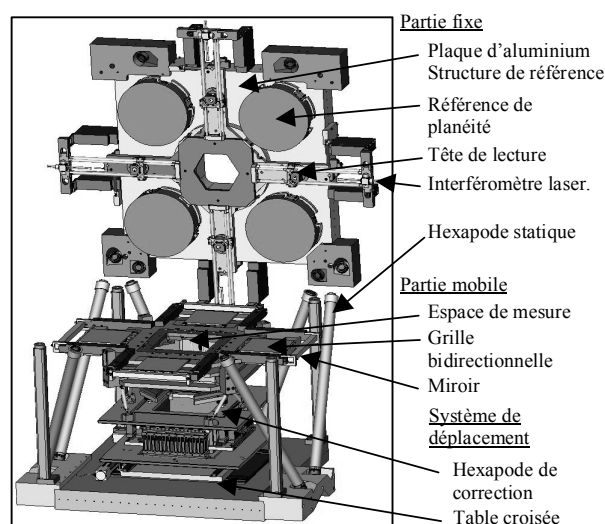


fig. 1 – vue CAO de la machine sans la protection thermique

Les déplacements de l'objet suivant X et Y sont mesurés simultanément par deux systèmes de mesure montés en principe d'Abbe. Le premier, utilise 4 interféromètres lasers qui délivrent deux mesures pour chacune des

directions X et Y. Le second fait appel à 4 codeurs optiques bi-dimensionnelles. Ces codeurs donnent les coordonnées X et Y vues chacune deux fois ainsi que la mesure du lacet.

Le repérage suivant la direction Z

Le repérage dans la direction Z est réalisé au moyen de quatre capteurs capacitifs dont l'étendue de mesure est de 100 μm . Ces quatre capteurs sont liés à la structure mobile. Ils sont montés en regard de quatre références de planéité réalisées sous forme de quatre plateaux circulaires en alliage d'aluminium de 440 mm de diamètre et de 70 mm d'épaisseur. Ces plateaux sont fixés sous la structure fixe de référence. Le traitement des mesures délivrées par ces quatre capteurs permet de reconstituer simultanément l'équivalent d'une double mesure de l'altitude Z en principe d'Abbe ainsi que les valeurs des rotations de l'objet autour des directions X et Y.

Environnement de la machine

La machine est installée dans une salle dédiée du laboratoire de nanométrie. Toutes les sources de chaleurs déplaçables ont été installées dans une salle distincte à partir de laquelle la machine est pilotée. Les sources de chaleurs résiduelles non transférables (électronique intégrée dans les capteurs et moteurs XY) in-situ ont été évaluées en terme de puissance dissipée. La puissance dissipée par les capteurs est de l'ordre de 15W. En ce concerne les moteurs nous envisageons de réaliser une nouvelle table XY qui permettra de les sortir du caisson.

La salle de la machine est régulée en température à $\pm 0.1\text{C}^\circ$, et en humidité à $\pm 5\%$. La machine est installée sur un massif en béton de 30 tonnes suspendu par des isolateurs à air pour minimiser l'impact des vibrations extérieures. Enfin, la salle est conçue telle une salle propre pour permet une maîtrise (niveau ISO6) de la contamination particulière.

Le niveau de maîtrise de la stabilité thermique des chaînes métrologiques au regard des dilatations des références de mesure, et des objets mesure a été évalué comme devant être maintenu à 0.01C° pendant la durée d'une mesure càd de l'ordre de cinq heures. Nous avons réalisé l'étude, la conception et la réalisation d'un caisson non régulé, en aluminium, capable d'apporter de l'inertie pour filtrer les variations rapides de température de la salle et d'homogénéiser l'environnement proche de la machine. Cet équipement a été installé fin 2006.

Grâce à ce nouveau dispositif, une fois l'équilibre thermique de la machine atteint, nous mesurons sur les références de mesure une variation de température de 0.01C° sur 5 heures et de l'ordre de 0.005C° sur une heure.

Un système de surveillance thermique de la machine a été intégré au dispositif électronique de commande. Ce

système délivre en continu des informations issues de 12 sondes de températures. Elles sont positionnées dans les chaînes métrologiques et dans la structure fixe de référence. Ce dispositif est capable de détecter des variations d'écart de température de l'ordre de 0.001C° . Cette information est utilisée pour suivre le comportement thermique de l'équipement et évaluer la pertinence des mesures délivrées.



fig. 2 – Machine dans le caisson thermique passif

Compensation en temps réel de la variation de l'indice de l'air

Les interféromètres laser utilisés pour les mesures XY sont par principe sensibles aux variations de l'indice de l'air. Le caisson thermique apporte un gain important mais il reste néanmoins des perturbations locales de l'air à l'intérieur du caisson, qui impactent les mesures. Une station météo est installée pour évaluer les variations de l'indice de l'air au niveau de chaque interféromètre. Ce dispositif est très efficace pour détecter les variations lentes, mais il n'est pas utilisable lorsque les fluctuations sont rapides. Afin de pouvoir prendre en compte en temps réel ces variations, nous avons développé et intégré in-situ un nouveau dispositif qui met en œuvre quatre interféromètres identiques aux précédents. Ses capteurs sont intégrés sur la structure de référence XY en Invar à 20 mm au-dessus et parallèlement aux interféromètres mesurant les déplacements afin que les faisceaux soient dans les mêmes conditions environnementales. Chacun de ces interféromètres vise un miroir plan solidaire de la structure XY de référence.

Désormais, chacun des 4 axes de mesure interférométrique de la machine est constitué d'un capteur de déplacement et d'un système de détection en temps réel de la variation locale de l'indice de l'air.

Etalonnage des axes XY

L'étalonnage des axes X et Y se décompose en deux parties. Dans un premier temps, l'étalonnage de chacun des axes et dans un second temps, l'étalonnage de la perpendicularité entre les axes X et Y.

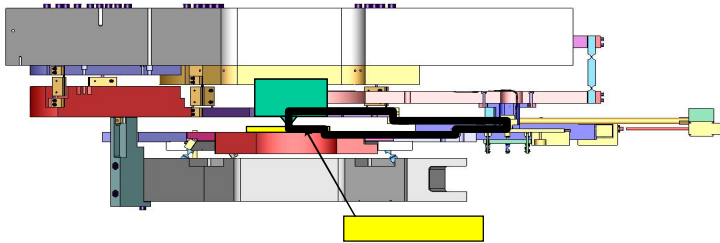


fig. 3- Chaîne métrologique XY

L'étalonnage de chacun des 4 axes de mesure interférométrique repose sur l'évaluation des incertitudes de mesure liées aux nombreux paramètres tels que les longueurs d'onde des 4 sources laser, les corrections des variations de l'indice de l'air, l'erreur d'interpolation de l'électronique de comptage, la stabilité thermique de la structure mécanique XY de référence, mais aussi l'alignement des interféromètres, et sur le défaut de rectitude des miroirs plans mobiles en Zérodur de 400 mm de longueur.

Alignement des faisceaux lasers

En ce qui concerne l'alignement des lasers et des miroirs plans par rapport aux axes de la machine, dans le plan d'Abbe, nous avons conçu et mis en œuvre un dispositif de réglage de l'orientation et de détection des faisceaux laser par rapport aux axes machine. Chaque interféromètre est monté sur une platine en Invar qui est intégrée à la structure de référence XY. Cette platine autorise des mouvements micrométriques suivant les six degrés de liberté pour la mise en position des interféromètres.

La détection du spot laser est réalisée à l'aide de photodiodes 4 cadrans qui sont intégrées à des faux miroirs (dimensions identiques aux miroirs de 400 mm). Chaque axe X et Y utilise deux faux miroirs, montés de part et d'autre de la partie mobile de la machine à la place des miroirs en Zérodur. A l'aide des signaux issus des photodiodes nous analysons les déviations verticales et horizontales des spots laser pour des déplacements de la partie mobile de 200 mm. A l'aide de l'hexapode piezoélectronique nous générons au préalable des déplacements micrométriques horizontaux et verticaux pour étalonner chaque photodiode dans la zone de plus grande sensibilité. Un programme spécifique permet de façon automatique d'acquérir les signatures de désalignement au cours des déplacements XY sur 300 mm, de calculer l'erreur résiduelle d'alignement en distinguant les défauts de guidage mécanique de la table XY et d'estimer les corrections mécaniques à apporter aux réglages des positions des interféromètres. Avec ce dispositif, nous alignons le parallélisme des faisceaux deux à deux en vis-à-vis par rapport aux axes de la machine à

quelques micro-radian, ce qui correspond à une erreur en cosinus inférieure au nanomètre.

L'étape suivante d'alignement vise à faire coïncider les faisceaux précédemment rendus parallèles. Cela est obtenu à l'aide de l'hexapode piezoélectrique et des photodiodes en faisant décrire un mouvement de rotation de la partie mobile de la machine autour de l'axe Z. L'analyse des signaux issus des deux photodiodes permet de remonter au défaut de concurrence des faisceaux et d'évaluer les corrections à appliquer aux supports des interféromètres.

Alignement des miroirs plans

S'ils ne sont pas corrigés, les défauts d'alignement et de rectitude des miroirs plans sont interprétés par les interféromètres comme un déplacement à part entière de la partie mobile de la machine.

Ce dernier point a particulièrement retenu notre attention dans la mesure ou nous avons une contrainte supplémentaire qui est de réaliser autant que possible l'étalonnage des capteurs et des références in-situ pour bénéficier de l'environnement thermique optimal de la machine et ne pas dégrader les étalonnages par des opérations de démontage et de remontage des références.

L'alignement des miroirs par rapport aux faisceaux des interféromètres consiste à retirer la composante d'ordre 1 sur le signal issu de la mesure interférométrique des déplacements en faisant se translater la partie mobile (perpendiculairement aux faisceaux) sur 300 mm pour les directions X ou Y. Les supports des miroirs ont été conçus pour permettre le réglage en position à l'échelle du micromètre.

Caractérisation in situ du défaut de rectitude des miroirs plans

Le défaut de rectitude de chaque miroir sur l'étendue de mesure utile est réalisé in situ à l'aide des interféromètres. La méthode utilisée met en œuvre le principe de multi-retournement combiné des quatre miroirs (A, B, C, D). Douze combinaisons sont nécessaires pour extraire les quatre rectitudes. Le principe est le suivant : deux miroirs A et B en vis-à-vis sont translattés sur 260mm suivant X ou Y. La somme des mesures issues des deux interféromètres en vis-à-vis des deux miroirs combine les informations de rectitude des miroirs A et B, ainsi que la pente résiduelle de l'alignement des miroirs par rapport aux interféromètres. Cette opération est réalisée à l'identique pour chacune des combinaisons de miroirs (AC, AD, BA, BC, BD, CA, CB, CD, DA, DB, DC) en utilisant à chaque fois les deux mêmes interféromètres. Nous obtenons à la fin de cette procédure, un système équations linéaires à quatre familles d'inconnues (les quatre rectitudes des miroirs) dont la solution est obtenue par résolution du système aux moindres carrés.

Les mesures préliminaires de faisabilité technique et de validation de la méthode ont été réalisées avant que la machine ne soit installée dans son caisson thermique et

sans le nouveau dispositif de compensation de variation d'indice de l'air. Pour chaque combinaison de miroirs nous avons effectué deux aller-retour.

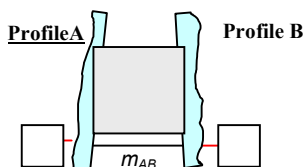


fig. 4- Principe de la méthodologie de permutation et de combinaison des miroirs

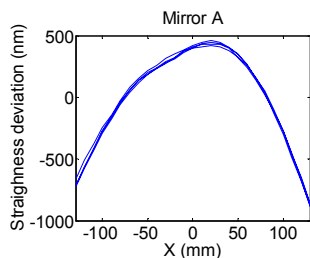


fig. 5 - Résultat de l'étalonnage de la rectitude d'un des miroirs

Pour estimer la cohérence des mesures, nous avons calculé l'écart entre les mesures de la rectitude d'un miroir et la moyenne des mesures de rectitude du même miroir. Le résultat est de +/-25nm pour le miroir A. Des résultats similaires sont obtenus pour les trois autres miroirs.

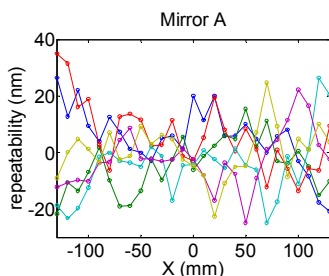


fig. 6 - écart des mesures sur le miroir A par rapport à la moyenne des 6 mesures

Caractérisation du défaut de perpendicularité des axes XY

La méthodologie de la caractérisation de la perpendicularité des axes XY a été établie. La mise en pratique est prévue en juin. Elle est basée sur des mesures successives dans le plan XY mais selon des directions angulaires différentes d'une longueur de référence inconnue mais dimensionnellement stable pendant la série de mesures. L'étalon de longueur qui sert de référence de longueur est placé dans le plan de mesure interférométrique XY suivant une direction angulaire écartée de 45° par rapport à celle de l'axe X ou Y. Une première mesure de la longueur de l'étalon est alors réalisée dans cette configuration. Ensuite de quoi, l'étalon est orienté à 90° par rapport à la précédente position tout en restant dans le plan XY. Une seconde mesure de la

longueur de l'étalon est alors réalisée. Nous obtenons ainsi deux mesures de longueur L_1 et L_2 du même étalon de référence.

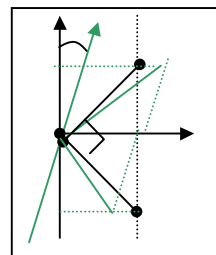


fig. 7 - Principe de l'évaluation du défaut de perpendicularité

Si les conditions de mesures n'ont pas varié au cours de l'opération, l'écart des valeurs des deux mesures met en évidence le défaut de perpendicularité des axes XY. Du point de vue mathématique, en faisant l'approximation des petits angles le défaut angulaire de perpendicularité γ s'exprime par la relation $\gamma = 2 \times (L_1 - L_2) / (L_1 + L_2)$. Dans la pratique, nous avons conçu et réalisé les dispositifs mécaniques devant accueillir, et orienter l'étalon dans le plan XY ainsi que l'étalon de référence lui-même.

La fonction de référence de longueur de l'étalon est de matérialiser deux points ou origines dont les positions relatives sont aisément détectables, répétables et stables sur la durée de la procédure de perpendicularité. La solution mise en œuvre repose sur l'utilisation de réseaux de mesure bidimensionnel PP281 de Heidenhain intégrant des marques de référence gravées avec le réseau de mesure. Ces marques sont les motifs choisis pour le repérage des origines. Les réseaux sont lus par une tête optique qui détecte également les marques de référence. Deux plaques identiques sont préalablement alignées avec un dispositif adapté puis judicieusement collées sur un barreau en DivlerP. Cet ensemble constitue l'étalon de référence de longueur pour la perpendicularité comme le montre la figure ci-dessous.

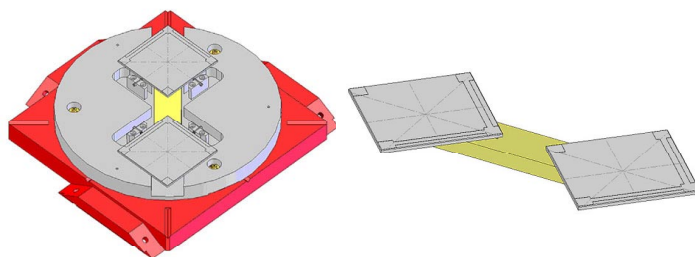


fig. 8 - Etalon de perpendicularité et son support orientable

L'étalon est ensuite placé sur son support sans contrainte mécanique. Ce support est intégré à la partie mobile de la machine. Il est par ailleurs réglable en rotation (roulis et tangage), et indexable tous les 15° pour répéter la procédure en faisant varier les directions angulaires. La tête de lecture utilisée pour détecter les marques de références de chacun des grilles est installée sur un support dédié, solidaire de la chaîne métrologique XY, au centre de la machine en lieu et place de l'axe Z.

Tous les déplacements de l'étalon de référence étant mesurés par les interféromètres XY, la détection des marques de références gèrent un signal qui déclenche les mesures XY correspondant aux coordonnées des deux origines entre lesquels sont établies les mesures de longueurs L_1 et L_2 .

Etalonnage des références de planéité

Les déplacements de la partie mobiles de la machine suivant la direction verticale Z sont mesurés par 4 capteurs capacitifs en regard chacun d'une référence de planéité solidaire de la structure fixe de référence. Par ailleurs le microscope AFM ou autre monté suivant Z donne des informations qui combinées à celle des capacitifs permet d'extraire la topographie des objets mesurés par la machine. Tous ces éléments participent à la construction de la chaîne métrologique Z.

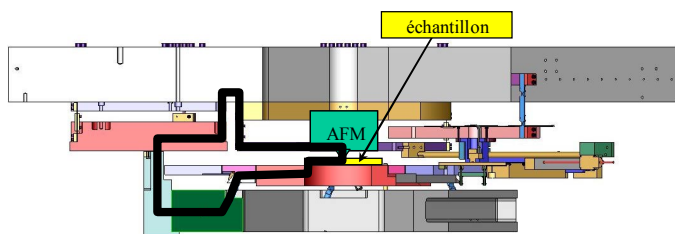


fig. 9 - Chaîne métrologique Z

Les références de planéité sont constituées d'épais cylindre d'aluminium de 400mm de diamètre. Lorsque la partie mobile de la machine se translate jusqu'à 300mm, les capteurs capacitifs mesure un profil de la référence qui intègre le défaut de planéité de celle-ci en plus des mouvements parasites de la structure mobile. L'objectif d'incertitude suivant Z de quelques nanomètres impose que la chaîne métrologique Z soit étalonnée, ce qui conduit à étalonner les références de planéité. Cet étalonnage est prévu pour être réalisé in-situ. Cependant dans un premier temps nous exposerons résultats des travaux qui correspondent au développement de la méthode sur un profil de la surface ou rectitude, ainsi qu'à la mise en œuvre de l'étape de faisabilité sur un banc d'essais conçu, développé et installé à l'ENSAM de Lille.

Mise en œuvre

Le banc est constitué d'une structure fixe sur laquelle est suspendue une référence de planéité de façon identique à la configuration de la machine. Cette référence est en tout point similaire à celles installées sur la machine. Il intègre aussi une structure mobile constituée d'une table XY de 300 mm de course qui déplace sous la référence de planéité, une matrice de 4x4 capteurs capacitifs identiques à ceux de la machine. Par ailleurs, un double dispositif de mesure d'inclinaison (niveau électronique Leica Nivel 20) est intégré au banc. Un niveau est installé sur la partie fixe et l'autre sur la matrice mobile porte capteurs capacitifs. La mesure angulaire relative entre la référence et la

matrice capacitive est utilisée pour éliminer un biais dans la méthode de reconstruction qui engendre une l'erreur de forme sur le profil.

Enfin, le banc intègre un dispositif de micro-actionnement de la matrice porte capteurs afin de balayer une course significative du niveau et des capteurs capacitifs.

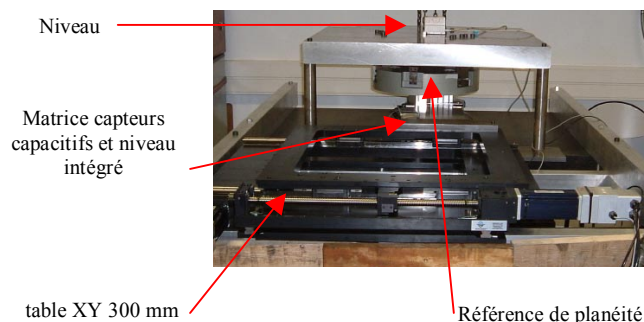


fig. 10 - Banc d'étalonnage de planéité

Méthodologie

La bibliographie [2] actuelle fait état de la mesure de rectitude par propagation avec 3 capteurs capacitifs. La principale difficulté réside dans la connaissance de la position relative des 3 capteurs. La mesure par propagation consiste à utiliser une matrice porte capteurs capacitifs qui se déplace suivant le profil à caractériser (voir fig. 1)

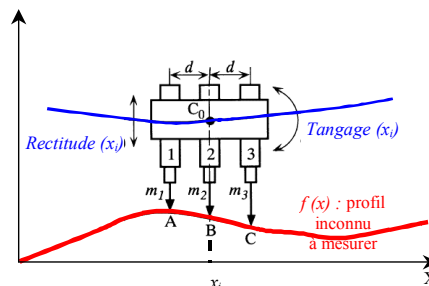


fig. 11 - schéma de principe pour 3 capteurs capacitifs

La position des deux premiers points est prise arbitrairement (correspond au calage vertical et en rotation du profil). La mesure du 3^{ème} capteur donne l'altitude du 3^{ème} point. Après un décalage de la matrice porte capteurs d'une valeur d, les deux premiers capteurs permettent de recalculer la position du porte capteur en rectitude et tangage et l'altitude du 4^{ème} point est donnée par le 3^{ème} capteur et ainsi de suite.

L'une des difficultés de cette méthode réside dans la connaissance de la position relative des capteurs. En effet, si le capteur 2 est décalé d'un nanomètre par rapport aux capteurs 1 et 3, la simulation de reconstruction du profil par propagation montre un biais de 400 nm pour un profil de 400 millimètres de long et un pas d de 10 millimètres.

Une seconde difficulté concerne la grande sensibilité aux incertitudes de mesures des capteurs et en particulier à leur erreur de justesse locale du fait même du principe de propagation. Par exemple, une erreur de justesse d'un capteur capacitif de 1 nanomètre par micromètre peut engendrer des erreurs de reconstruction du profil de plusieurs dizaines de nanomètres.

Trois évolutions majeures originales ont été proposées pour rendre la mesure par propagation cohérente avec les objectifs du projet. La première consiste à introduire un niveau électronique pour mesurer les mouvements angulaires de la matrice porte-capteurs. Cette information supplémentaire permet de connaître la position relative des capteurs de manière suffisamment fine. La seconde réside dans l'ajout de capteurs afin d'introduire une redondance dans la mesure ce qui permet de réduire l'incertitude sur le résultat et une auto-vérification du processus de mesure. La troisième consiste à micro actionner la matrice porte capteurs afin non seulement d'améliorer la résolution de mesure du niveau mais également d'utiliser les capteurs capacitifs sur une course significative et ainsi s'affranchir des erreurs de justesse locales.

Les premiers résultats ci-dessous ont été obtenus sans protection thermique du banc d'étalonnage. Malgré des conditions environnementales non optimales par rapport aux conditions de la machine, nous obtenons un écart type d'une vingtaine de nanomètre sur le profil moyen.

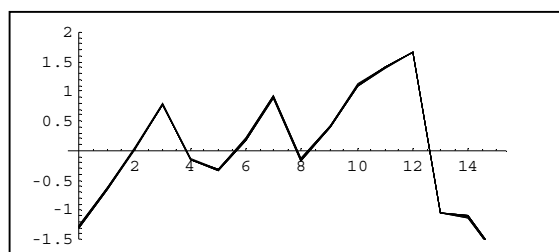


fig. 12 - rectitude d'un profil mesuré dix fois

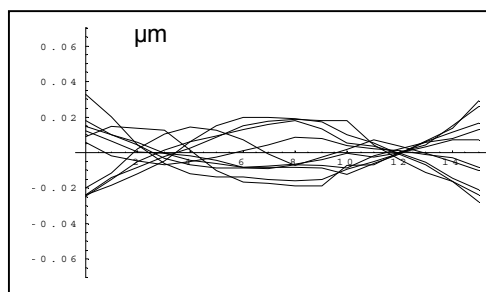


fig. 13 - écart des dix profils par rapport au profil moyen

Les principaux besoins actuels en nanométrie dimensionnelle

Le LNE a lancé fin 2006 une enquête nationale concernant les acteurs et les besoins en matière de nanométrie dimensionnelle. Le taux de retour est actuellement de plus de 30%. Un questionnaire a été adressé à de nombreux industriels de tous secteurs (transports, microélectronique, fabricants de matériaux, produits de santé...) aux équipementiers et fabricants d'instruments de mesure et à de nombreux laboratoires de recherches qui utilisent ou développent des instruments destinés aux nanotechnologies.

Les principaux éléments qui ressortent de cette enquête est d'une part que la nanométrie dimensionnelle concerne

aujourd'hui directement ou indirectement tous les acteurs des nanotechnologies. Une prise en compte très large de la criticité de la maîtrise de la mesure dimensionnelle à l'échelle submicrométrique (seulement 30% des mesures sont réalisées en dessous de 10 nm). Plus d'une vingtaine de techniques de mesure sont utilisées quotidiennement pour accéder aux informations de mesures dimensionnelles. De toutes, les techniques de microscopies en champ proche sont de loin les plus répandues et en particulier l'AFM.

Les industriels s'équipent de plus en plus d'instruments très performants et adoptent de plus en plus une démarche de qualification et d'évaluation des performances de leurs outils de mesure en lien avec la validation de leurs processus de fabrication. L'usage d'étalons apportant une référence de mesure, lorsque ceux-ci sont disponibles dans le commerce (des attentes fortes sont exprimées sur de nouveaux étalons) tend fortement à se développer et l'estimation des incertitudes de mesure à l'échelle submicrométrique devient un paramètre qui souhaite être pris en compte. Les équipementiers sont fortement motivés par offrir des meilleures garanties de performance de leurs équipements et mettent en place également une démarche de qualification et d'accompagnement de leur client pour une exploitation optimale des outils.

Les besoins en terme de caractéristiques dimensionnelles mesurées et en étendue de mesure sont très variés (mesure de profondeur et d'épaisseur, de largeurs de motifs, de taille de particule, de forme, de distances entre des motifs...).

De manière plus générale, le développement de la nanométrie dimensionnelle s'inscrit dans le développement global de la nanométrie multi-grandeur. Preuve en est, la présence de cette thématique parmi les trois thématiques (vocabulaire et Hygiène-Santé-Environnement pour les deux autres) qui ont été retenues comme prioritaire par le Technical Committee ISO229 créée en 2006 pour l'établissement des futures normes internationales sur les nanotechnologies.

Conclusion

Les résultats obtenus cette année sont encourageants. La mise au point de l'étalonnage suivant XY sera achevée en 2007. Concernant l'étalonnage suivant Z, les résultats de rectitude obtenus sur le banc de l'ENSAM de Lille montrent que la méthodologie retenue est pertinente et les résultats sont compatibles avec les niveaux d'incertitude attendus. La mise en place du caisson thermique ainsi que l'intégration du nouveau dispositif de compensation des variations d'indice de l'air permet désormais de bénéficier d'un environnement de mesure optimal.

[1] : Lahousse L, Ducourtieux D, Larsonnier F. Programme de recherche et développement du LNE en nanométrie. Congrès international de métrologie 2005.

[2] : Li CJ, Li S, Yu J. "High-resolution error separation technique for in-situ straightness measurement of machine tools and workpieces." Mechatronics 1996;6(3):337-347