

PROGRAMME DE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT DU LNE EN NANOMETROLOGIE : DERNIERS RESULTATS.

L. Lahousse², S. Ducourtieux¹, F. Larssonier¹, S. Duhem¹, J. Salgado¹, J. David², G.P. Vailliau¹

¹Laboratoire national de métrologie et d'essais
1 rue Gaston Boissier
75724 Paris Cedex 15

²Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers – L2MA
8 boulevard Louis XIV
59046 Lille cedex

Résumé :

Dans le cadre d'un programme de recherche et développement, le LNE en collaboration avec le L2MA développe une machine constituant le pivot d'une nouvelle activité en nanométrie. Cette machine qui peut se définir comme une machine de mesure tridimensionnelle, possède une étendue de mesure suivant les axes X et Y de 300 mm et de 50 μm suivant l'axe Z. Les incertitudes visées sont de 30 nanomètres dans la direction X ou Y pour un déplacement de 300 mm et de 2 nanomètres dans la direction Z. Cet article présente quelques principes de conception utilisés lors de la réalisation de la machine ainsi que les premiers résultats obtenus dans le cadre de ce programme.

Abstract :

As part of a research and development program, LNE is in collaboration with L2MA to develop a machine which constitutes the key of a new activity in nanometrology. This machine that we can define as a coordinate measuring machine has a measuring range of 300 mm for both X and Y axis and 50 μm for Z axis. The searched uncertainties are 30 nm for a displacement of 300 mm in X and Y directions and 2 nanometers in Z direction. This paper presents some principles used to design the machine and the first results obtained in this program.

Introduction

Depuis quelques années maintenant, le Laboratoire national de métrologie et d'essais travaille conjointement avec le Laboratoire de Métrologie et de Mathématiques Appliquées (L2MA) de l'ENSAM de Lille au travers du projet nanométrie. Ce projet vise à développer une capacité de raccordement dimensionnelle pour des objets issus des nanotechnologies. Il se traduit dans un premier temps par la conception, la réalisation et la mise en service d'un nouvel instrument de mesure tridimensionnelle qui constituera le pivot d'une nouvelle activité en « nanométrie ». Cet instrument innovant rassemble pour la première fois sur un équipement de métrologie de référence raccordé à l'étalon national de longueur, un microscope à force atomique (AFM) et une structure mécanique mobile offrant une étendue de mesure de 300 mm suivant les axes X et Y et de 50 μm suivant l'axe Z. La structure mobile est utilisée pour la mise en position

d'un échantillon alors que l'AFM est exploité comme un palpeur pour mesurer la topographie de ce même échantillon. La possibilité d'adapter tout autre système de palpé a été préservée. Les incertitudes recherchées avec ce dispositif sont de 10 nm pour un déplacement de 20 mm suivant X ou Y et de 30 nm pour un déplacement de 300 mm. L'incertitude visée suivant l'axe Z sera de 2 nanomètres tant pour un déplacement de 10 mm en X, Y (rectitude X, Y) que pour un déplacement de 50 μm en Z.

Description de la machine.

Généralement, lors de la réalisation de machines de précision classiques, il est habituel de réaliser des guidages mécaniques suffisamment précis pour assurer le positionnement de l'objet à mesurer. Dans notre cas, la machine doit offrir un volume de mesure important et des incertitudes relatives très faibles. Ceci impose un niveau de performance difficilement atteignable avec des guidages mécaniques conventionnels. C'est pour cette raison que deux principes fondamentaux ont été appliqués lors de la conception de la machine.

Le premier principe consiste à parfaitement identifier les chaînes métrologiques de la machine. On appelle « chaîne métrologique » la suite de solides, de liaisons et de capteurs qui permettent d'établir la position relative du palpeur par rapport à l'échantillon à mesurer. La stabilité de cette chaîne métrologique ou à défaut la connaissance et la correction en temps réel de ses variations permettront de garantir les performances extrêmes attendues d'un tel dispositif.

Le second principe appelé principe de « structure métrologique dissociée » [1] consiste à rendre indépendante la chaîne métrologique de la structure porteuse. La mise en œuvre de ce principe conduit à spécialiser dans un rôle unique les éléments qui transmettent les informations de position ou bien les éléments supportant ou assurant les déplacements principaux tout en optimisant leur conception.

Lors de sa conception [2], la machine a été structurée en deux sous-ensembles, un premier sous-ensemble fixe contenant le palpeur et un autre mobile contenant l'objet à mesurer. Ce choix de disposition facilite l'interchangeabilité du palpeur tout en évitant les contraintes de connexion liées à ce capteur. Le premier sous-ensemble fixe constitue la partie supérieure de la

machine. Il matérialise l'espace fixe de référence sur lequel vient se fixer le palpeur. Le second sous-ensemble mobile se compose de tous les éléments qui servent à la mise en position et au déplacement de l'objet. Un système de repérage de la partie mobile par rapport à la partie fixe a été mis en place.

La partie mobile

Lors de la conception de cette machine, l'objectif était d'amener l'objet à mesurer dans la position exacte souhaitée sous le contrôle d'un système de repérage constituant la chaîne métrologique. L'objet à mesurer est fixé sur une « palette » qui permet un chargement et un bridage rapide au cœur de la machine. Pour obtenir la capacité de déplacement et la précision recherchées, une superposition de deux systèmes de déplacements a été nécessaire (Figure 1). Le premier système est constitué d'une table croisée utilisant des guidages à billes. Cette table assure les grands déplacements de 300 mm de l'objet à mesurer suivant les directions X et Y. La précision de positionnement de cette table n'étant pas suffisante pour notre application (environ 5 µm), nous lui avons adjoint un système de correction actif. Ce système de correction est réalisé à l'aide d'un hexapode utilisant six vérins piézoélectriques. Cet hexapode de 100 µm de course permet d'une part de corriger les défauts de guidage et les erreurs de positionnement de la table assurant les grands déplacements, d'autre part de déplacer et mettre en position l'objet sous le palpeur suivant les six degrés de liberté avec une résolution nanométrique.

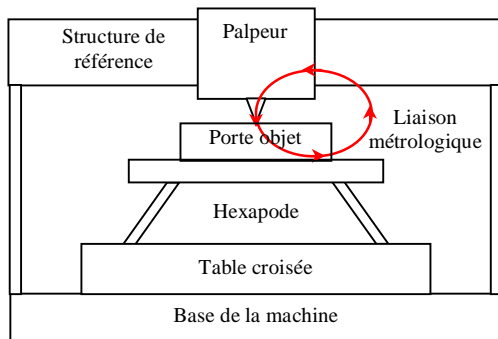


Figure 1 : schéma simplifié de la machine

La structure de référence

Pour repérer les déplacements de l'objet dans l'espace, il a fallu définir une structure fixe qui sert de référence à tous les systèmes de mesure de déplacement y compris au palpeur. Cette structure de référence matérialise le toit de la machine constitué d'une plaque épaisse d'alliage d'aluminium liée à la base de la machine par une structure hexapode. Cette structure hexapode réalise un appui parfaitement isostatique et limite au maximum l'apparition d'efforts de frottement. Le palpeur sera fixé au centre de cette structure de référence.

Le repérage de l'objet

Le repérage des déplacements de l'objet par rapport au palpeur est assuré par deux chaînes métrologiques totalement indépendantes :

- une chaîne métrologique XY devant admettre des mouvements de forte amplitude suivant les axes X,Y (300 mm)
- une chaîne métrologique Z devant admettre des mouvements de faible amplitude suivant l'axe Z (100 µm).

Ces deux chaînes devront en plus admettre des mouvements d'amplitude quasiment nulle pour les rotations autour des axes X,Y,Z.

Le repérage suivant les directions X,Y.

Le repérage en X et en Y est réalisé simultanément par deux systèmes de mesure de déplacement. Le premier utilise quatre interféromètres lasers qui délivrent deux mesures pour chacune des directions X et Y et dans un respect parfait du principe d'Abbe [4]. Le second système fait appel à 4 grilles incrémentales bi-dimensionnelles au pas de 4 µm interpolable au nanomètre. La lecture de ces grilles permet d'aboutir aux coordonnées X et Y vues chacune deux fois dans les conditions de respect du principe d'Abbe. Deux autres lectures permettent d'aboutir à une troisième lecture par un principe d'Abbe reconstitué. Ces grilles sont aussi utilisées pour repérer deux fois le lacet, c'est à dire la rotation du porte-objet autour de l'axe Z.

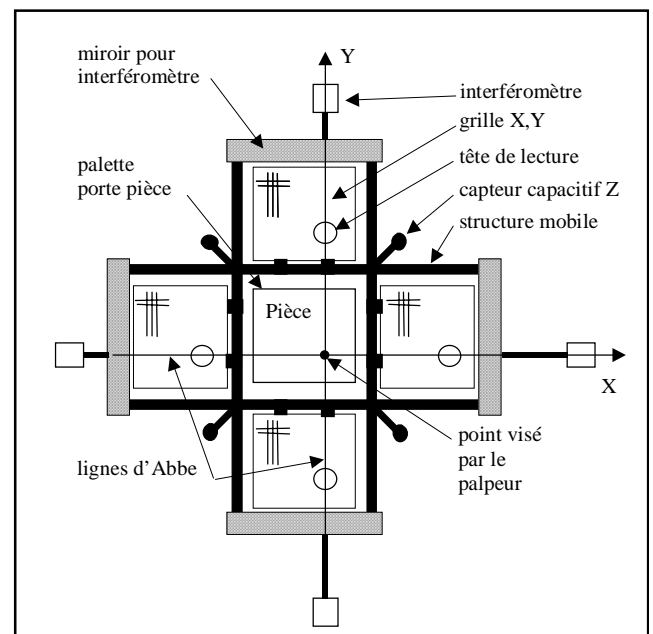


Figure 2 : vue de dessus de la structure mobile et du système de repérage XY

La Figure 2 montre la disposition générale de ces systèmes de repérage. Le fait de disposer de systèmes de lecture doublés de part et d'autre du point de mesure et ce pour chaque direction permet d'obtenir une symétrie parfaite de la chaîne métrologique XY lorsque le palpeur est au centre de l'espace de mesure. Dans ce cas, si les variations de température sont suffisamment homogènes dans le volume

de la machine, l'influence de ces variations de température sera quasiment nulle. Dans tous les cas, une telle disposition permet d'évaluer comparativement les deux systèmes de mesure notamment en terme de dérive thermique. De plus, le fait de mesurer des points éloignés du centre de la zone de mesure permettra d'évaluer la sensibilité de la machine aux perturbations thermiques et d'optimiser les dispositifs de protection thermique.

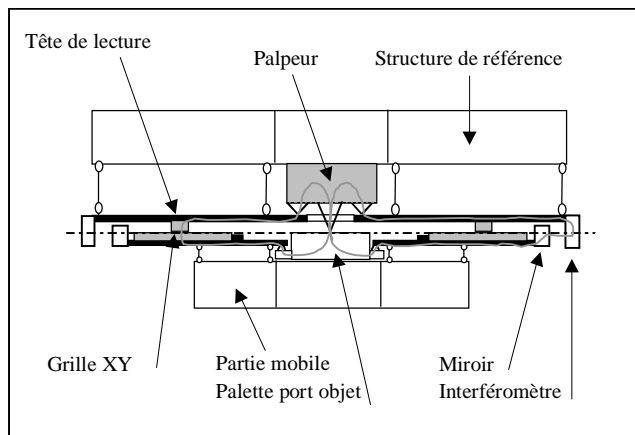


Figure 3 : chaîne métrologique XY

Le schéma de la Figure 3 représente une coupe de la machine suivant un plan médian de direction X ou Y. Il montre les parties de la structure de référence fixe et de la partie mobile constituées à partir de matériaux à faible coefficient de dilatation. Les boucles montrent les chaînes métrologiques X et Y : à gauche, la chaîne métrologique correspondant à la lecture des grilles, à droite à la chaîne interférométrique. Cette figure montre que la longueur des chaînes métrologiques est réduite au minimum de ce qui est imposé par le respect du principe d'Abbe.

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 liés au chariot porte objet, proches des quatre coins de la zone de mesure, sont en regard de quatre références de planéité réalisées sous forme de quatre plateaux circulaires en alliage d'aluminium de diamètre 440 mm et d'épaisseur 70 mm. Ces plateaux sont fixés à la structure de référence par des liaisons qui permettent une libre dilatation de ces références sans entraîner de déformation. L'interprétation 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 autour des directions X et Y entre le porte pièce et le palpeur fixé à la structure de référence.

Le schéma de la Figure 4 représente une coupe de la machine suivant la diagonale X,Y. Il montre les pièces massives concourant au repérage vertical dans les structures fixe et mobile ainsi que la chaîne métrologique Z.

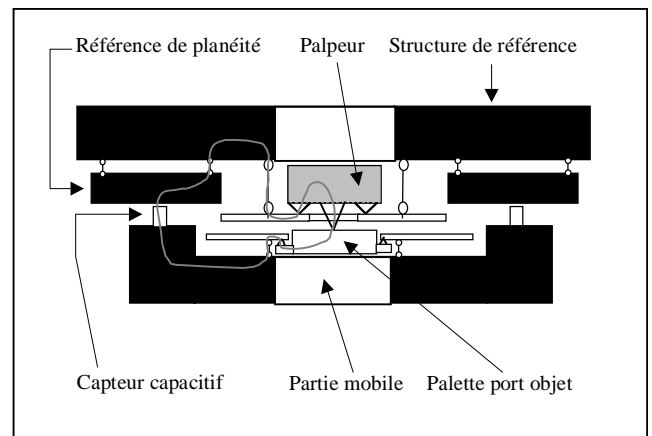


Figure 4: chaîne métrologique Z

La Figure 5 montre l'ensemble de la machine. Pour faciliter la compréhension du dessin, la plaque supérieure qui constitue la structure de référence a été représentée artificiellement soulevée afin de montrer sa face inférieure ainsi que le dessus du porte objet.

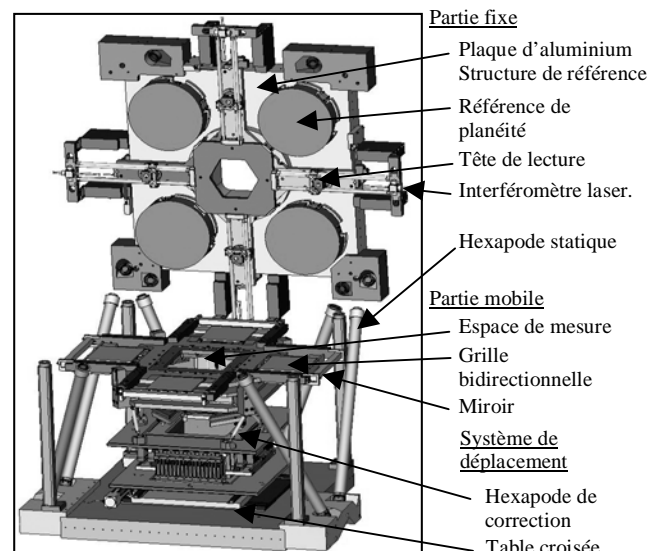


Figure 5 : ensemble de la machine.

La disposition générale de la machine permet de réduire au minimum la longueur des chaînes métrologiques. Si une déformation éventuelle du dispositif de liaison entre la référence métrologique et le chariot mobile apparaissait, elle serait corrigée par une réaction de l'hexapode de correction.

La redondance des mesures

Les systèmes de mesure décrits précédemment présentent une très forte redondance. Cette situation permet d'affiner les incertitudes aux travers d'interprétations aux moindres carrés et de surveiller la cohérence entre les diverses sources d'information. Cette analyse est un élément de jugement sur l'efficacité des solutions technologiques mises en œuvre pour préserver l'exactitude des mesures. De cette façon on disposera en temps réel d'une indication sur le niveau de fiabilité des informations que délivrera la machine.

Les précautions prises vis à vis des perturbations thermiques

Les éléments composant la structure fixe et la structure mobile ont la même fonction, la transmission des informations de position suivant les axes X, Y et Z. Cependant, le comportement des chaînes métrologiques X,Y et Z vis à vis des variations de température est quelque peu différent. En effet, dans un souci de respect du principe d'Abbe, l'architecture que nous avons choisie nous a conduits à prévoir des éléments relativement longs pour la transmission des informations en X et Y, ce qui à pour conséquence de rendre la structure sensible à la dilatation longitudinale. Quant à la structure mobile qui porte les quatre capteurs capacitifs réalisant la mesure suivant Z, elle doit présenter une stabilité de forme parfaite en flexion. Ainsi pour que la structure soit thermiquement plus robuste, nous avons séparé les fonctions de mesure en X,Y et Z dont le comportement est différent.

Pour la fonction de mesure Z, il est nécessaire de maîtriser la stabilité en flexion [3] des structures métrologiques fixe et mobile. C'est pour cette raison que ces éléments ont été réalisés à partir de matériaux possédant une très bonne conductivité thermique. Dans notre cas, nous avons utilisé de l'aluminium sous une forme massive, le but étant de privilégier l'homogénéité de température des éléments et ainsi éviter les effets de « bilame » [3]. Ces éléments seront de plus protégés des perturbations extérieures par un système d'écrans thermiques.

Pour la fonction de mesure X,Y une structure ayant une bonne stabilité longitudinale aussi bien au niveau de la structure mobile que de la structure de référence a été réalisée. Pour cela, nous avons utilisé des matériaux à faible coefficient de dilatation. Qui plus est, pour minimiser le coût de l'utilisation de matériaux souvent difficiles à mettre en œuvre, cette structure a été réalisée le plus possible à partir d'éléments de forme très simple.

De par les matériaux utilisés, les deux structures ainsi définies présentent des coefficients de dilatation différents. Il est donc important de prévoir une liaison entre ces deux structures qui permette une dilatation différente. C'est ce que nous avons réalisé en mettant en œuvre une liaison « concentrique » [2] constituée de quatre bielles flexibles (Figure 6).

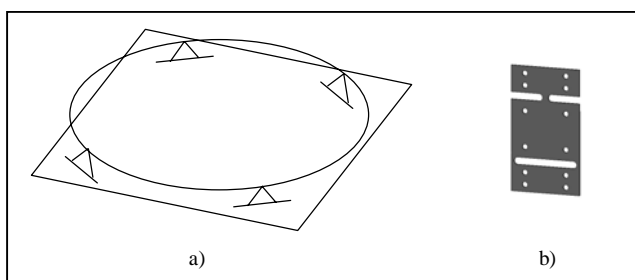


Figure 6 : liaison concentrique (a) constituée de 4 bielles flexibles (b)

Chacune des bielles flexibles réalise la fonction d'une rotule coulissante. L'ensemble constituerait une liaison de

Boys s'il était réalisé à partir de trois lames. La quatrième lame rend la liaison hyperstatique. Il est nécessaire de prévoir les précautions pour ne pas introduire de contraintes internes parasites lors du serrage de la quatrième lame. Cette disposition a pour but de conserver une symétrie parfaite à la liaison entre les deux pièces. De cette façon, on évitera que les variations de température ne génèrent un déplacement relatif des centres des deux pièces liées.

Derniers résultats

Maquette hexapode piézoélectrique

Les résultats suivants concernent une maquette de l'hexapode de correction piézoélectrique (Figure 7) que nous avons fabriqué afin d'optimiser la conception de l'hexapode présent sur la machine et notamment la disposition des vérins au regard de la stabilité et des courses admissibles. La maquette est équipée de 6 vérins piézoélectriques montés en configuration quasi-circulaire et de 8 capteurs capacitifs qui analysent les déplacements de la partie mobile de l'hexapode suivant ses six degrés de liberté. Pour simuler les futures conditions d'utilisation, la maquette a été chargée d'une masse de 250 kg. La maquette est contrôlée par un système d'asservissement 6 axes développé sous Labview (fréquence de boucle : 500 Hz).

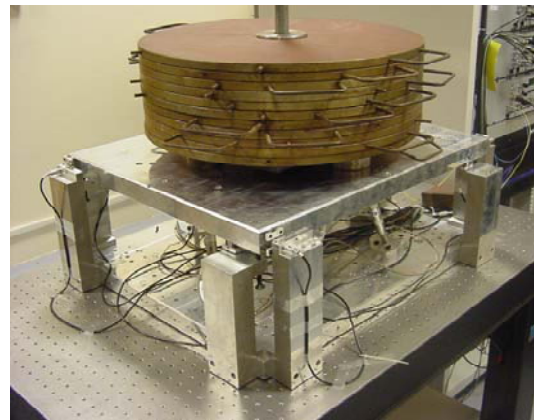


Figure 7 : maquette de l'hexapode de correction piézoélectrique

Les tests effectués ont montré que la configuration était stable dans le temps, qu'il était possible de mouvoir la charge suivant les six degrés de liberté de l'hexapode et avec une finesse de déplacement suffisante pour notre application. La Figure 8 présente un pas de 1 nanomètre commandé sur l'axe Z et observé par le système d'analyse des déplacements. Dans la meilleure configuration d'asservissement, les temps de réponse observés sont de l'ordre de 30 ms pour un déplacement de 500 nm. Ces performances convenables au vue du dispositif pourront être légèrement améliorées en réduisant le temps de boucle du système d'asservissement, en augmentant la vélocité des vérins piézoélectriques et si cela est possible en réduisant la masse embarquée.

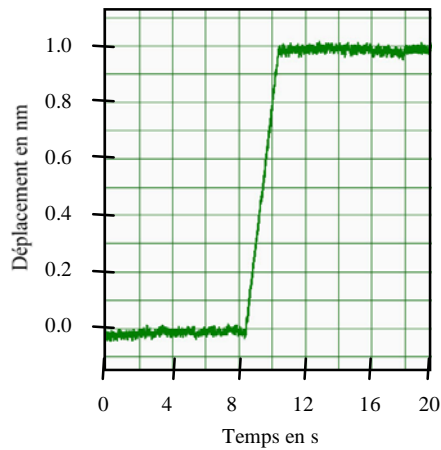


Figure 8 : déplacement de 1 nm suivant z obtenu sur la maquette de l'hexapode piézoélectrique

Confrontation des capteurs

Pendant le développement de la machine, nous avons fabriqué un banc spécialement destiné à évaluer et confronter les trois types de capteurs de déplacement mis en oeuvre sur la machine, à savoir les capteurs capacitifs, les codeurs optiques et l'interféromètre laser. Le principe de fonctionnement de ce banc repose sur le déplacement d'une cible observée par l'ensemble des capteurs en principe d'Abbe. Des précautions ont été prises afin de réduire au maximum les chaînes métrologiques et les protéger des variations de température. Pour cela, l'ensemble du montage est intégré au cœur d'un caisson d'aluminium qui permet de garantir le centième de degré de stabilité au cœur du système.

Ce dispositif nous a permis d'évaluer les dérives intrinsèques de chaque capteur, d'apprécier leur comportement vis à vis des variations de température et de pression, d'estimer les erreurs d'interpolation. La Figure 9 présente par exemple l'écart de mesure entre un interféromètre et un capteur capacitif étalonné.

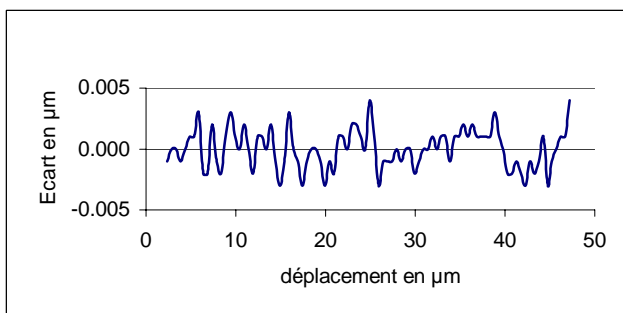


Figure 9 : écart entre la mesure capacitive et interférométrique lors d'un déplacement de 50 µm

Intégration de la machine dans ses nouveaux locaux

Fin 2004, la machine a été intégrée au sein des nouveaux locaux du LNE sur le site de Trappes. Ce nouvel

environnement spécialement dédié à l'activité nanométrie est régulé en température à $20 \pm 0,1^\circ\text{C}$. La machine (voir Figure 10) repose sur un massif en béton suspendu par un système de découplage pneumatique afin de limiter les vibrations provenant du sol.



Figure 10 : photo de la machine dans son environnement

Les résultats présentés ci-après ont été obtenus dans ce nouvel environnement. Le premier résultat que nous présentons ici est le test de la stabilité de la chaîne métrologique Z schématisé sur la Figure 4. Pour ce test nous avons équipé la machine avec un palpeur de type capteur capacitif. La machine a été immobilisée à l'origine sans asservissement de position. Nous avons alors relevé au cours du temps la différence d'altitude entre la chaîne de mesure Z de la machine et l'altitude Z fournie par le palpeur. Cette différence est présentée sur la Figure 11.

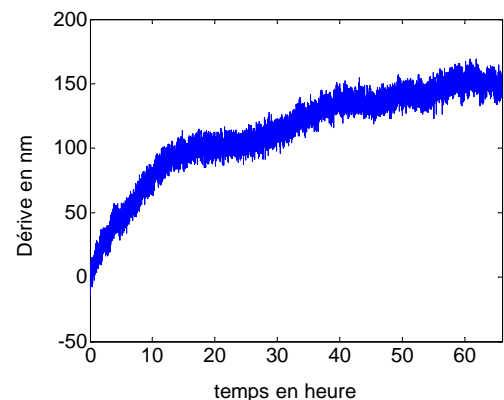


Figure 11 : stabilité de la chaîne métrologique z

La courbe révèle une dérive de l'ordre de 150 nm sur 66 heures. Bien entendu, cette dérive sera en grande partie compensée par le système d'asservissement en position qui fera appel à l'hexapode piézoélectrique de correction et à l'ensemble des chaînes de mesure de position.

Conclusion

L'objectif au travers de cette machine est de positionner le LNE en nanométrie dimensionnelle en offrant au secteur en pleine expansion des nanotechnologies, un

moyen de raccordement traçable au mètre étalon. C'est aussi un moyen de concrétiser et de valider des principes de conception telle que la structure métrologique dissociée qui doit permettre de faire avancer significativement les performances des machines à mesurer vers des exactitudes nanométriques. Ce projet servira également à développer de nouvelles procédures de qualification de ce type de machine tant en ce qui concerne les capteurs que les références géométriques. Pour finir, le projet nanométrie permettra de tester de façon importante l'efficacité des dispositifs de protection thermique destinés à assurer la stabilité des mesures.

Dans l'état actuel d'avancement, la machine est en cours de caractérisation et d'étalonnage.

Références

[1] J. David et T. Coorevits, "Les limites de la correction par logiciel des erreurs de géométrie des machines à mesurer tridimensionnelles : définition d'une architecture nouvelle de machine", dans Actes des Conférences du Congrès International de Métrologie, 1993.

[2] L. Lahousse « contribution à la conception d'une machine à mesurer de précision nanométrique - Architecture globale – Dispositions constructives - Etalonnage de références planes » thèse en cours de soumission.

[3] L. Carter Hale « Principles and Technique for Designing Precision Machines » Thèse février 1999

[4] J. B. Bryan « The Abbé principle revisited: An updated interpretation », Precision Engineering , Vol. 1, I3, juillet 1979, pp 129-132.