

Applications topométriques industrielles du système de nivellement hydrostatique (HLS)

d'après les expériences de
Daniel Roux. Chef de Groupe
Alignement et Géodésie ESRF

Résumé

Le niveau hydrostatique HLS¹ développé dans le cadre du projet ESRF à Grenoble pour réaligner le synchrotron ne cesse d'étendre son utilisation dans l'environnement topométrique industriel. Nous présentons ici quelques applications non exhaustives, de son utilisation dans le domaine du génie mécanique des sols, liées aux activités du topomètre concernant le contrôle permanent ou saisonnier d'ouvrages d'art.

¹ Hydrostatic Levelling System

1. INTRODUCTION

Comme nous l'avons souligné lors de nos précédentes interventions à Washington, Lille, Annecy en 1993 la méthode de nivellement hydrostatique est devenue incontournable lorsque l'on veut mesurer avec certitude le déplacement d'ouvrages d'art ou d'ensembles mécaniques importants dans une plage de travail allant de quelques microns à quelques millimètres.

En effet la corrélation entre les déplacements et des événements périodiques ou occasionnels (thermiques, massiques, statiques dynamiques...), ne peuvent être démontrés et quantifiés que par un enregistrement continu des phénomènes. C'est ce que permet avec convivialité et fiabilité le HLS breveté par l'ESRF et fabriqué et commercialisé par la société FOGALE-NANOTECH.

2. AMÉLIORATIONS APPORTÉES AU SYSTEME EN 1994

Les dernières améliorations du système de mesure permettent aujourd'hui son utilisation dans la quasi-totalité des applications qui étaient jusqu'à un passé récent l'exclusivité du nivellement optique.

De plus dans bien des cas, il le surpasse dans le domaine de la précision, et surtout dans sa capacité à traverser les murs ou à contourner les obstacles.

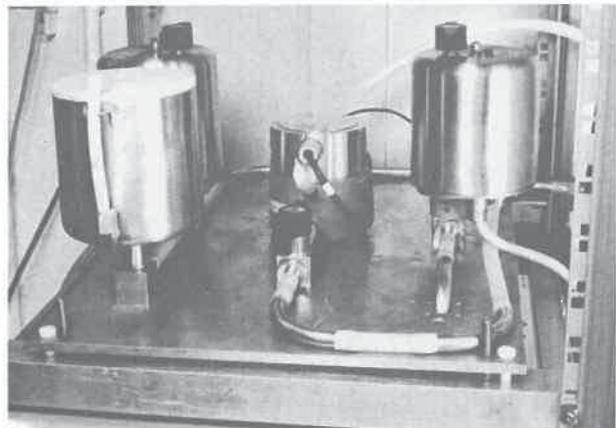
Il est irremplaçable dans tous les cas d'utilisation de mesure à distance, dans des milieux confinés ou inaccessibles en fonctionnement (milieu protégé des poussières : salles blanches, milieu protégé des rayonnements: réacteurs, accélérateurs, milieu protégé des chocs thermiques, ateliers de fabrication en micromécanique ou opto-électronique, etc....).

2.1. Système de remplissage automatique et vannes de sécurité.

Un récent système de remplissage automatique des-

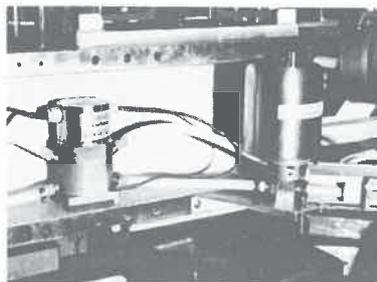
tiné à compenser l'évaporation du réseau (environ 10 µm/jour), a permis de supprimer la dernière opération de maintenance manuelle.

Par ailleurs l'adjonction d'un certain nombre de vannes de sécurité sur le même boîtier de commande permet la fragmentation du circuit et ainsi de minimiser l'impact d'une fuite accidentelle. La possibilité de fermeture à distance de l'ensemble des vannes à distance permet également d'optimiser le temps de stabilisation d'une portion du système, dans le cas d'un asservissement de table par exemple.



1. Photo du système de remplissage et de vidange automatique d'un système HLS.

2.2. Fonderie autocondensatrice



2. Photo du nouveau design autocondenseur du pot HLS en diamètre 12/14 mm

La modification des pots HLS par adjonction de condenseurs et augmentation du diamètre des tubulures supprime tous risques d'obturation du système par condensation capillaire. Il aug-

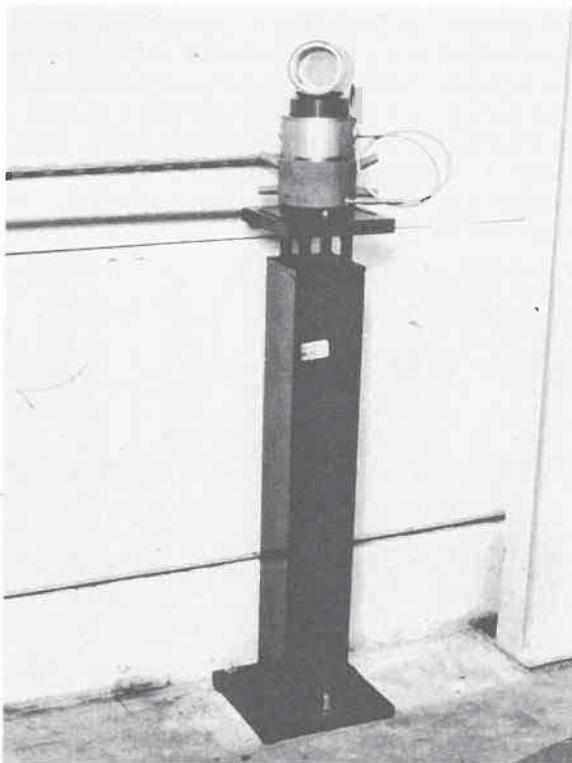
mente la vitesse de stabilisation du système d'un facteur 2,3 (144/64) sans augmenter démesurément le volume du liquide nécessaire.

2.3 Complémentarité Nivellement Optique et Nivellement Hydrostatique

Afin de permettre le transfert d'un référentiel optique à un référentiel hydrostatique, un interface standardisé a été développé. Il permet, soit au moyen d'une sphère Taylor & Hobson (fig 3), bien connue des topomètres ou d'une mire invar traditionnelle (fig 12) utilisée par les géomètres, d'assurer la mixité des deux techniques.

Cette complémentarité des deux modes opératoires permettra à de nombreux géomètres une adaptation progressive à cette mutation technologique du contrôle continu en procédant par étapes.

Le transfert de références peut se faire à des distances variant de quelques mètres (traversées murales) ou quelques kilomètres (connexion de différents ouvrages d'art) avec une précision relative inférieure à 10 microns/km.



3. Photo d'un support de référence HLS pour transfert d'un nivellement optique via une sphère Taylor & Hobson

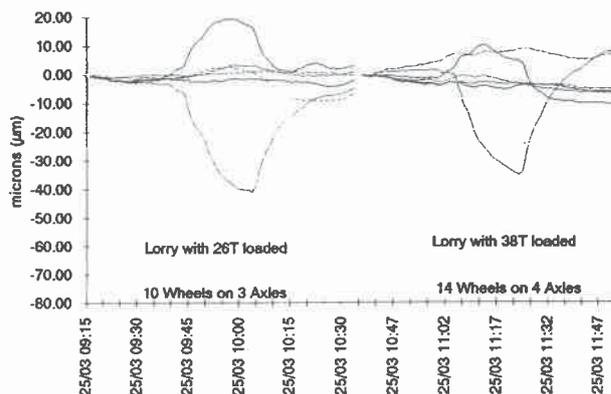
3. APPLICATIONS

3.1 Déformation d'un tunnel routier sous charge circulante

Le problème était de vérifier la stabilité du tunnel dans une tolérance inférieure à 0,1 mm sous la contrainte de la circulation d'un véhicule de 26T équipé de 3 essieux et 10 roues, ainsi que de celle d'un véhicule de 38T équipé de 4 essieux et 14 roues.

Le test a été réalisé au moyen d'un système standard à 8 pots HLS installé sur le radier du tunnel avec des références situées à environ une trentaine de mètres de part et d'autre de l'axe de la route de passage supérieur. Le capteur d'amplitude maximum était situé à l'intersection de l'axe du tunnel et de l'axe de circulation.

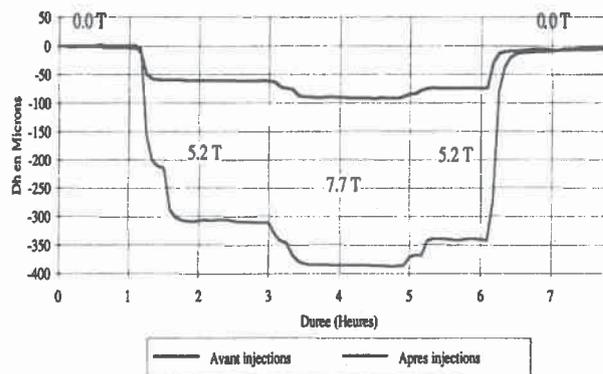
La courbe présentée ci-dessous montre la déformation et quantifie avec précision l'intérêt d'imposer un nombre d'essieux suffisants par rapport à une charge nominale donnée pour minimiser les effets de tassements des ouvrages d'art. Cette méthode peut être également utilisée pour des tests de réception des ouvrages d'art (ponts, tunnels par exemple).



4. Courbe de déformation d'un tunnel routier sous charge circulante de 26T et 38 T

3.2 Mesure des taux de compression d'un sol ou dallage (Contrôle Qualité d'une injection)

Comparaison de test de charge avant et après injections de béton



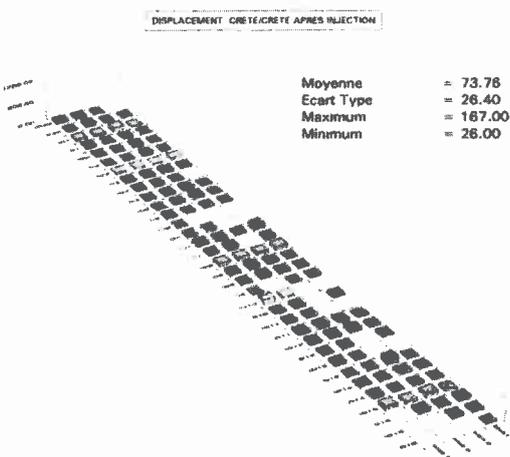
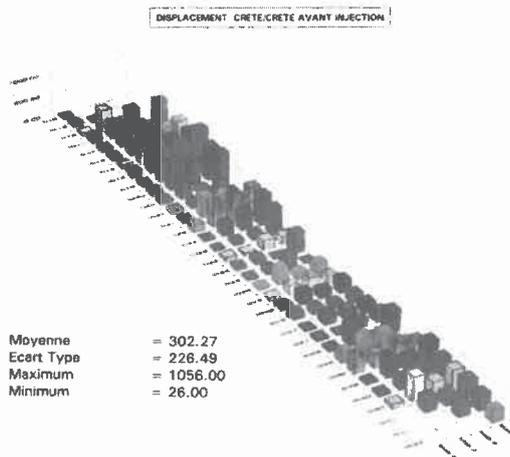
5. Courbes de déformation élastique et permanente d'un sol avant et après injection (Exemple d'un contrôle TERRASOL)

Le problème était de vérifier après l'exécution d'une injection profonde le facteur d'amélioration de résistance à la compression d'un sol. Pour réaliser ce contrôle qualité il a été utilisé une gueuse de 5 tonnes (fig 11) suspendue à un pont roulant et venant coiffer un pot HLS connecté à un réseau. Le nombre de HLS installé (dans ce cas 8) a été adapté à la cadence de réalisation des injections par l'entreprise Terrasol.

La durée d'un test est d'environ 1/2 heure et la préparation du réseau 1/2 journée.

La première courbe montre la qualité de la mesure et son enregistrement permanent permet de quantifier à la fois l'élasticité et l'hystérésis du phénomène.

La seconde analyse permet de quantifier statistiquement l'amélioration considérable de l'homogénéisation du sous-sol après injection. La valeur de l'écart-type de compression ayant été amélioré d'un facteur voisin de 9 (226 µm avant injection à 26 µm après injection).



6. Résultats d'une campagne de mesure de 256 dalles d'un Hall de 30 000 m² avant et après injection. (Exemple d'un contrôle d'injection par Terrasol)

La mesure optique de ce chantier n'aurait pu être réalisée en raison même du positionnement du niveau optique dans la zone de travail (l'appareil subissant le même tassement que le point à mesurer), alors que dans le cas du nivellement HLS la référence a été reportée à plus de 40 mètres hors de la zone d'influence du pont roulant.

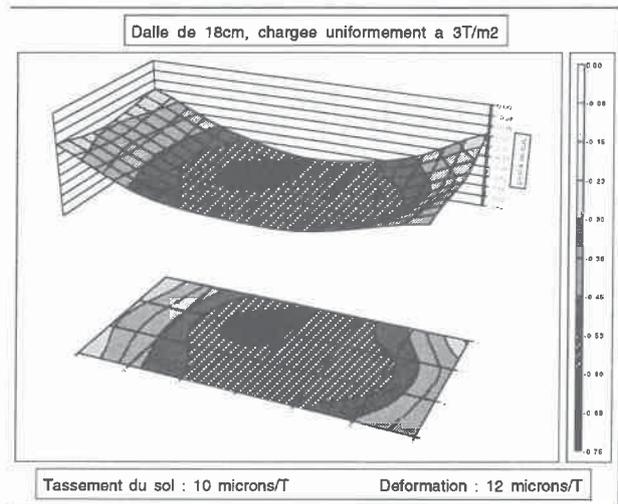
De notre point de vue cette méthode pourrait avantageusement remplacer l'essai de plaque bien connu en matière de mesure de taux de compression de sol brut ou bétonné (suppression du camion).

Asservi à l'outil d'injection ce système fournirait un moyen de contrôle en ligne de l'opération d'injection. Ce contrôle permettrait en particulier la détection immédiate du soulèvement de la dalle.

3.3 Mesure de déformation d'une dalle sous charge uniforme (Contrôle Qualité des bétons)

Dans cette opération, il était demandé de vérifier la déformée géométrique sous charge uniformément répartie de 3 tonnes/m² sur une dalle de 18 cm de béton non armée de 14,5 mètres.

Utilisation de 28 pots HLS répartis sur le réseau maillé. Le résultat présenté en 3D permet de quantifier à la fois le tassement du sous-sol et la déformée propre de la dalle.

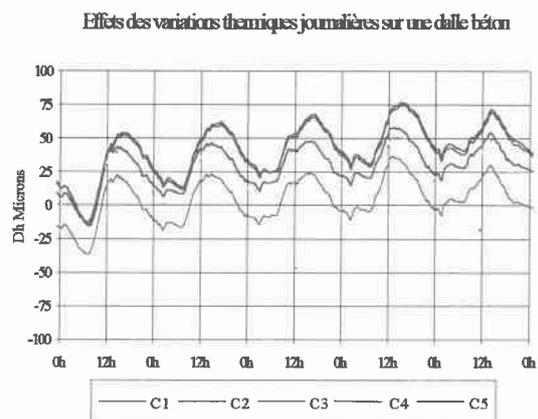


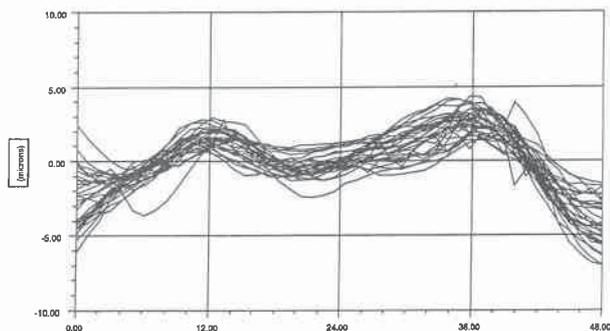
7. Courbes de déformation élastique et permanente d'une dalle 18 cm sous charge de 3T/m²

3.4 Mesure de déformation d'un joint de construction ou de dilatation

Ceci n'était pas un problème posé, mais une constatation qui a été effectuée et qui est d'un grand intérêt aujourd'hui pour la maîtrise de la stabilité de l'orbite d'un accélérateur de particule. Cette constatation a d'abord été établie sur des structures fortement contraintes avec des amplitudes de déformation importantes puis étudiée sur un radier de forte épaisseur (60 cm) dans une atmosphère climatisée (fig 8).

Cette mesure peut avoir un intérêt identique pour la surveillance des grands ouvrages d'art, barrage, centrale et pour étudier leur comportement dimensionnel sous l'effet de variation thermique, journalière et saisonnière. Ce type de mesure précise et continue permet par analyse comparative d'en déduire leur degré de vieillissement ou de fatigue.





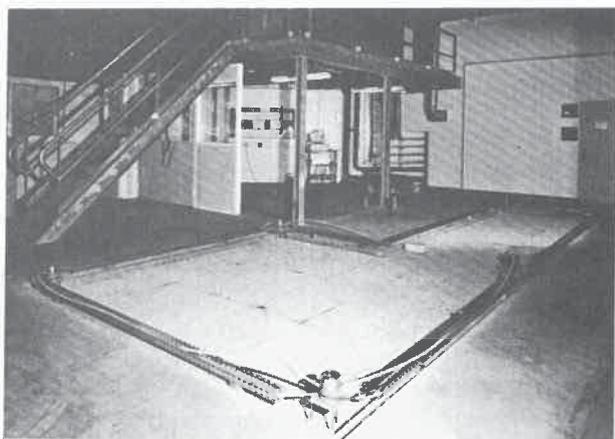
8. Courbes de variation dimensionnelle de joints de dallage de 18 cm en haut, de joints de radier béton de 60 en bas, sous influence thermique journalière (Effet jour-nuit)

Dans la mesure du dallage de 18 cm, le hall n'était pas climatisé et a subi de fortes variations thermiques (plusieurs degrés), dans le cas du radier de 60 cm le tunnel était climatisé avec une variation inférieure à 0,25°C, ce qui montre l'importance des effets thermiques sur la stabilité dimensionnelle d'un sol.

3.5 Mesure du retrait des bétons à long terme

Cette étude a pour objectif le contrôle qualité des bétons mis en œuvre dans le cadre de la réalisation de massif à usage métrologique.

La mesure ci-dessous concerne un massif de béton ferrailé en forme de L d'épaisseur de 1 mètre.

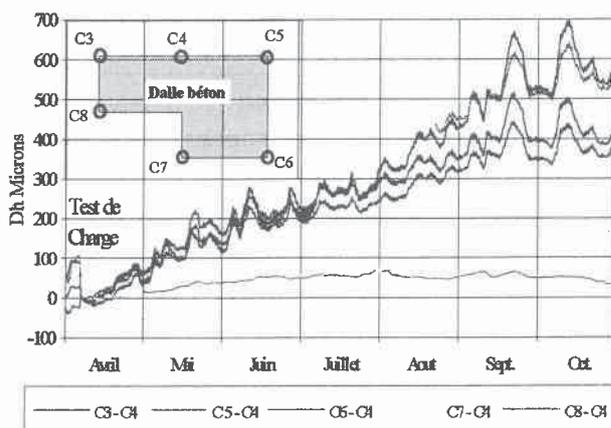


9. Photo d'une installation de contrôle de retrait de béton

Le calcul ci-dessous a été réalisé en considérant le point médian du bord droit (HLS4) comme fixe et donne les variations dimensionnelles des angles par rapport à ce point. Au cours de cette étude il a été également contrôlé la variation altimétrique du bloc par rapport à une référence éloignée d'une distance supérieure à 140 mètres.

La mesure a été réalisée à partir du 28ème jour de séchage et montre un retrait d'environ 500 µm en six mois. Par ailleurs le local n'étant pas climatisé, on observe au cours de deux semaines exceptionnellement froides des mois de septembre et octobre une variation dimensionnelle thermique supérieure à 100 µm.

Retraits d'un bloc béton sur 7 mois

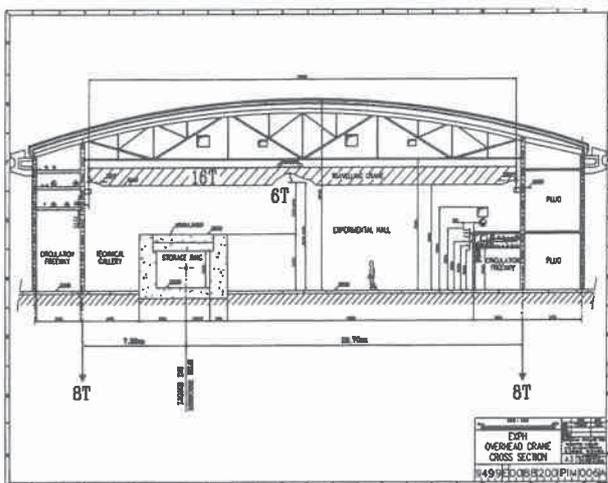


10. Courbes de retraits sur un bloc béton en L de 1 mètre d'épaisseur (Installation photo 9)

3.6 Déformée élastique d'un ouvrage d'art sous influence d'un pont roulant

Cette étude est de loin la plus spectaculaire réalisée sur un ouvrage d'art de grande dimension (1 kilomètre). Le problème consistait à déterminer l'affaissement élastique de l'ouvrage (caisson béton) tout au long de sa développée circulaire sous l'effet du stationnement d'un pont roulant de 16 tonnes de charge passive.

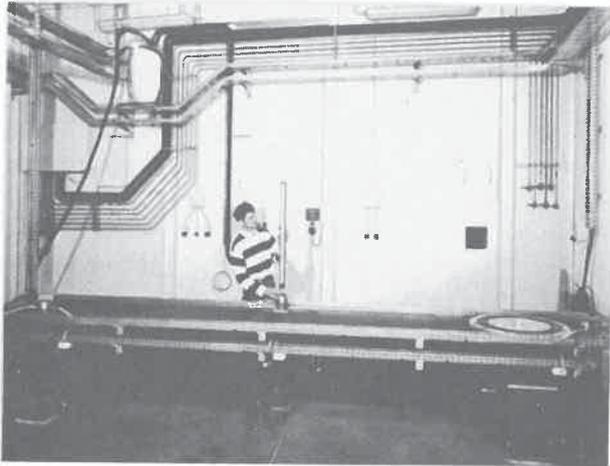
Cette opération a duré 4 heures avec 32 stationnements de 5 minutes en 32 points également répartis sur la circonférence. Les points d'appui du pont roulant sont situés à 7,3 et 22,7 mètres de l'axe du circuit HLS qui comportaient 288 pots répartis le long du kilomètre.



11. Schéma du pont roulant de 16 T passives et 5 T actives installé au dessus du caisson tunnel, les capteurs HLS sont situés sur l'axe du caisson.

3.7 Table asservie à une référence éloignée

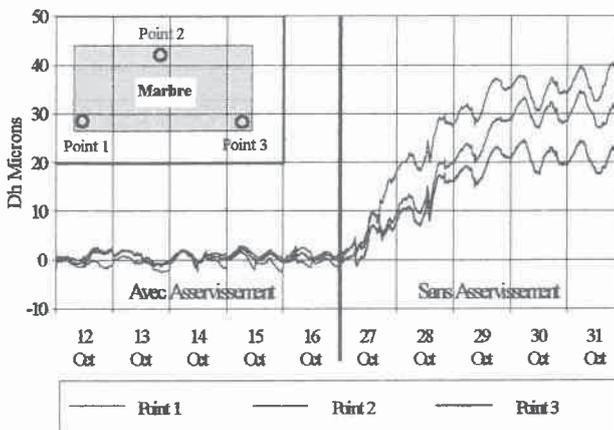
Le problème posé est de maintenir en permanence en milieu industriel, quels que soit les événements extérieurs, une table de granit horizontalement à mieux que 10 microns près et de maintenir la position verticale de ce plan à mieux que 100 microns près par rapport à un référentiel éloigné de 30 mètres.



12. Photo d'un marbre asservi en position verticale à une référence extérieure située à 40 mètres

Le système est actif depuis environ deux mois et la courbe ci-dessous montre les possibilités actuelles d'un tel système. La consigne d'asservissement a été de plus ou moins 5 μm dans la première partie de l'enregistrement. Dans la deuxième partie le marbre a été volontairement laissé en mode non asservi pour montrer la réelle différence de stabilité dimensionnelle entre les deux modes. Par ailleurs et en avant première d'un rapport qui sera publié au nom d'Henri Annoni avant fin 1994, nous voyons apparaître très nettement l'enregistrement de l'influence des marées phréatiques les 29-30-31 octobre sur la stabilité du marbre contrôlé. La fréquence de réalignement dans ce cas a été d'environ deux fois par jour.

Asservissement d'un marbre monté sur verins

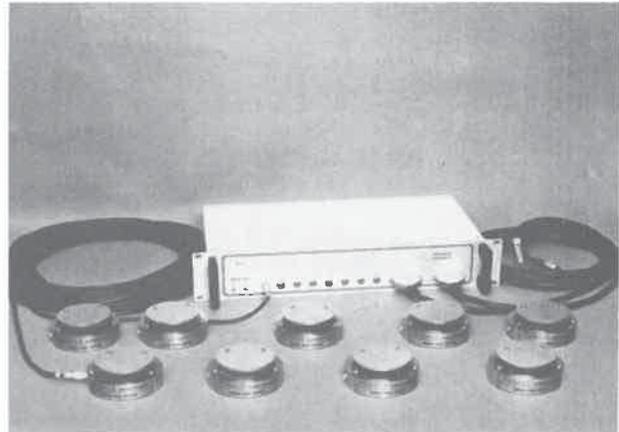


13. Courbes montrant la stabilité de la table entre le mode asservi et non asservi par rapport à une référence extérieure située à 40 mètres

4. CONCLUSION

Nous avons voulu par les exemples décrits d'application du système HLS, volontairement limités à la publication de résultats concernant le domaine de la topométrie industrielle, démontrer l'étendue de ses perspectives de développement dans l'univers du topo-

mètre d'aujourd'hui. Nous nous proposons dans un avenir très proche de montrer qu'associé avec l'instrument dévoilé en avant première à l'occasion de ce salon de la CITOP, le WPS² (Wire Positioning System), nous sommes capables de poser les bases de la NANOGEO-DESIE à l'aube du XXIème siècle.



14. Photo du système WPS monoaxe développé par la société FOGALE-NANOTECH et son boîtier électronique 8 voies (identique HLS)

5. RÉFÉRENCES

- [1] Gelman M., Le nivellement hydrostatique, ESGT 1981.
- [2] Roux D., Conception d'un système de contrôle altimétrique automatique et permanent pour le projet ESRF. ALGE-87-03, Octobre 1987.
- [3] Roux D., Alignment and Geodesy for the ESRF project, Proceedings of the first international workshop on accelerator alignment, July 31-August 2, 1989, Stanford Linear Accelerator center, Stanford University (USA).
- [4] Martin D & Roux D, Real Time Altimetric Control By A. Hydrostatic Levelling System, Second International Workshop On Accelerator Alignment, September 10-12, 1990 Deutsches Elektronen (DESY, Germany).
- [5] Martin D, Alignment At The ESRF EPAC (Berlin, Germany, Mars 1992).
- [6] Roux D, Determination Of The Accuracy Of An HLS Network, TS/WR/ALGE/92-22b, Septembre 1992.
- [7] Martin D. & Roux D, Dimensional Control Of The Experimental Hall, June 1992.
- [8] Löffler F, Döbers T, Neubauer G, High. Precision Levelling System For The HERA-Detectors And Interactions Quadrupoles. DESY, Hamburg, Germany July 1992.
- [9] Roux D., A New Alignment Design, Application of ESRF Storage Ring, SEE, Paris, France, November 1992.
- [10] Roux D., The Hydrostatic Levelling System (HLS)/Servo-Controlled Precision Jacks. A new Generation Altimetric Alignment and Control System PAC, Washington USA, May 1993.
- [11] Sugahara R. et al., Measurement of The Seismic Motion and the Displacement of the Floor in the Tristan Ring. Third International Workshop On Accelerator Alignment September 1993.
- [12] Martin D. & J.M. Filhol, Effect on The Crane Motion On The ESRF Storage Ring. 2nd European Synchrotron Radiation Light Sources Workshop, Grenoble, France, November 1994.
- [13] Roux D., Low Frequency Ground Motion, Deformation of The ESRF Machine as a Result of Activity at St Egrève Dam On The Dragon and Snake Rivers. 2nd European Synchrotron Radiation Light Sources Workshop, Grenoble, France, November 1994.
- [14] FOGALE-NANOTECH
190, Parc Georges Besse - 3000 NIMES France
Tél. : (33) 66.38.14.85 - Fax : (33) 66.38.14.59

2. Le système WPS est destiné à la mesure radiale de haute précision (résolution identique au système HLS) et est basé sur le concept d'une mesure d'écartométrie continue. Un prototype bi-axial, développé par la société FOGALE-NANOTECH pour les besoins du CERN fonctionnant sur la méthode dite du zéro (Concept W. Coosemans), a été présenté à Annecy en 1993. Un capteur monoaxe industriel, développé par la société FOGALE-NANOTECH pour l'ESRF fonctionnant sur la méthode dite de mesure réciproque avec une linéarité pleine échelle inférieure au micron (Concept D. Roux) est entièrement compatible avec l'électronique et les programmes d'acquisitions HLS déjà développés précédemment (fig 14). Ces deux capteurs ont été exposés par le constructeur FOGALE-NANOTECH à l'occasion de ce salon de la CITOP.