

# GÉOMÉTRIE DE PRÉCISION EN TEMPS RÉEL

## Contrôle altimétrique continu par le système hydrostatique HLS

par Daniel Roux, Ingénieur ESGT

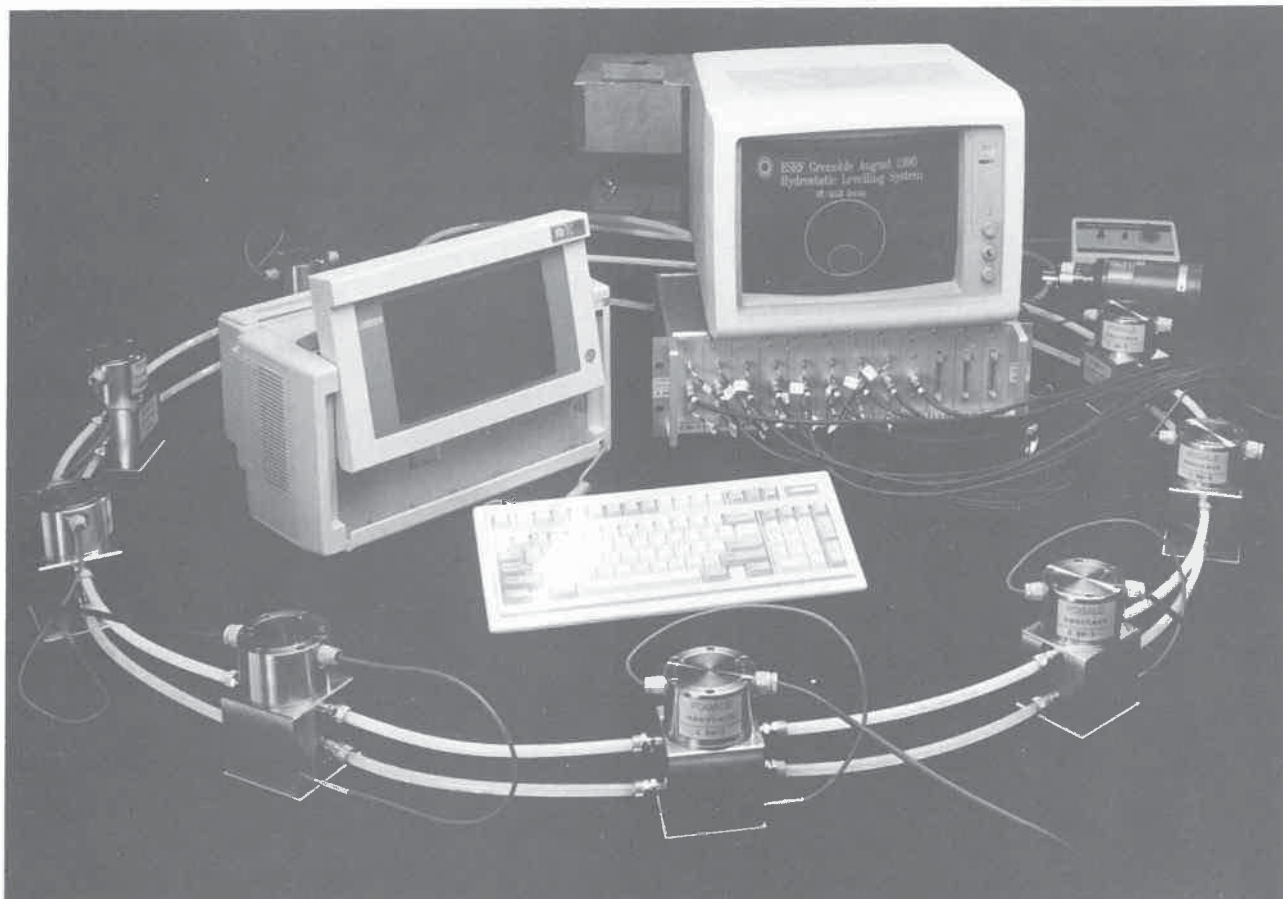


Fig. 1 : Le prototype HLS System.

*NDRL : L'article qui suit, de Daniel Roux, est la traduction en français de son intervention parue en anglais dans le numéro 50. Le décalage entre la conférence donnée au CERN en juin 91 et la publication aujourd'hui de cet article permet de présenter ici, en avant-première, un certain nombre de résultats postérieurs à ceux présentés au colloque de l'AFT. Nous publierons ultérieurement des articles détaillés sur ces applications.*

### 1. PRINCIPE GÉNÉRAL DU "HYDROSTATIC LEVELLING SYSTEM" (HLS)

Le HLS est basé sur le principe des vases communicants. Un fluide définissant un niveau altimétrique de référence circule librement à l'intérieur d'un tube reliant les différents pots de mesure entre eux. Les différences de hauteurs sont mesurées au moyen de capteurs capacitifs solidaires des pots de mesure placés à l'intérieur de ceux-ci et situés au dessus de la surface du fluide.

Par ce principe les différences de hauteurs, entre les points supportant les pots de mesure interconnectés, peuvent être déterminées. La

figure 1 montre le système de neuf pots HLS pré-série sur un banc de test entièrement équipé de son système de circulation du fluide, de son système de pompage, ainsi que de son système d'acquisition et de traitement des données.

L'eau a été choisie comme fluide de remplissage en raison de sa sécurité d'utilisation, son coût dérisoire et de sa bonne conductibilité électrique. Cependant son coefficient de dilatation important ( $2\mu\text{m}/\text{cm}/^\circ\text{C}$ ) conduit à respecter un certain nombre de règles d'installation, d'utilisation et de correction du signal.

- Minimisation des hauteurs d'eau différentielles entre pots de mesure (3 cm dans le cas du projet ESRF).

- Correction, par saisie de la température, de la hauteur d'eau dans chaque pot.

L'utilisation de capteurs capacitifs sans contact offre de nombreux avantages. Par ce principe même de non contact la mesure s'affranchit de tous les problèmes de corrosion ou de dépôts de sels minéraux sur les capteurs à contact traditionnels.

De plus par l'utilisation d'un capteur de grande dimension (10mm de diamètre), la mesure s'affranchit au premier ordre ( $< \text{nanomètre}$ ) des problèmes de poussières et de vibrations en moyennant une large surface de fluide. Les effets de ménisque et de sphéricité de la surface de l'eau sont éliminés par l'utilisation de pots de même dimension et en centrant mécaniquement le capteur sur un pot de forme cylindrique.

En outre la fréquence des saisies (100/s) dépendant de la carte d'acquisition permet de moyenner une mesure sur un large échantillonnage. Ceci est un facteur de sécurité important pour une utilisation en boucle d'asservissement. C'est le cas de l'application ESRF, et ceci permet de rejeter une éventuelle mesure parasitée pouvant entraîner un ordre d'asservissement erroné.

Les expériences réalisées jusqu'à ce jour montrent une résolution supérieure à  $0.1 \mu\text{m}$ . Seule l'absence d'un banc d'étalonnage nanométrique a fixé la limite affichée de tels capteurs.

Les figures 2 et 3 montrent les résultats obtenus à moyen et long termes.

La figure 2 montre, lors d'un asservissement permanent des trois vérins supportant un marbre de 3.2 Tonnes en fonction des consignes fournies par les pots HLS, les courbes résultantes de la sommation des compteurs des moteurs pas à pas des vérins. Ces courbes peuvent être considérées comme étant au premier ordre la représentation des mouvements absolus du sol pendant la période considérée.

La figure 3 montre la stabilité de quatre capteurs HLS sur une période de 20 jours incluant les déplacements du marbre sur cette période.

## 2. CORRECTIONS ET SOLUTIONS AUX PROBLEMES RENCONTRÉS

Pour atteindre une résolution de  $0.1 \mu\text{m}$  sur la détermination d'une différence d'altitude entre différents pots HLS plusieurs paramètres doivent être pris en compte.

Fig. 2.

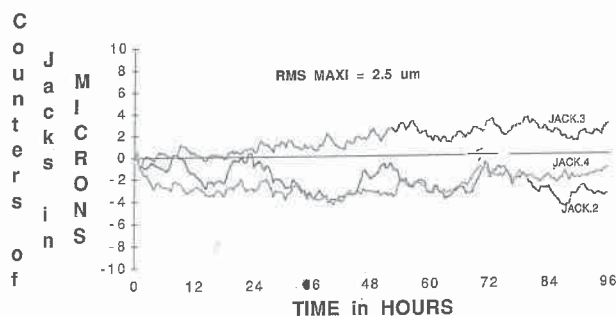
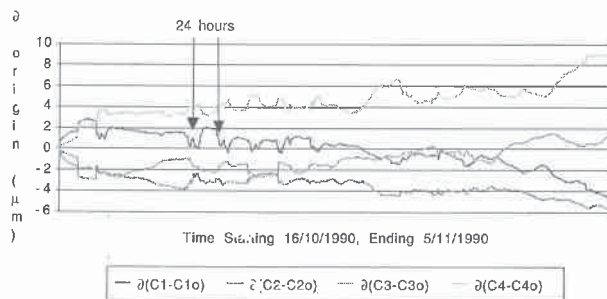


Fig. 3.

## Long Term Stability Tests



Les faibles variations de pression entre différents pots HLS doivent être corrigées. Cependant une solution simplifiée a été adoptée à l'ESRF en annulant les variations de pression locales attendues. (Celles-ci résultant essentiellement des courants d'air occasionnés par l'ouverture de portes ou de passages rapides des agents).

Cette solution consiste à connecter l'ensemble du système sur un circuit d'air commun, celui-ci étant mis à la pression atmosphérique ambiante en un seul point du réseau.

Les expériences réalisées en laboratoire et en milieu industriel n'ont pas permis de détecter des variations de pression entre des pots séparés jusqu'à 40 mètres de distance.

Le choix d'utiliser la pression atmosphérique ambiante plutôt qu'une surpression constante du système a été préférée en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

Les tests de laboratoire, confirmés par les utilisations en milieu industriel, montrent que si un changement global important de température a un fort effet sur la variation du plan d'eau moyen, il est sans effet sur le dh enregistré par

le système, alors qu'une différence de température entre deux pots contenant 5.5 cm d'eau (cas des pots prototypes) provoquerait une erreur de lecture de  $11\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ . (Voir NDM en 6).

Dans les pots de série du projet ESRF cette hauteur d'eau est de 3 cm. Elle est réduite à son minimum dans le souci de diminuer le premier ordre de cette correction. (A cette hauteur d'eau correspond une correction maximale de  $6\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ).

De plus un capteur de température de résolution absolue de  $0.1^\circ\text{C}$ , et relative de  $0.01^\circ\text{C}$  permet de déterminer cette correction avec un ordre de grandeur 10 fois moindre soit  $0.6\mu\text{m}$ .

Par ailleurs la réduction de l'influence des variations de température a été obtenue par des artifices d'ordre matériel, en augmentant par exemple l'inertie thermique du système, en utilisant un tuyau non métallique faible conducteur et en surdimensionnant le pot lui-même (inox par obligation) pour le rendre plus inerte par rapport à son environnement extérieur. (Voir NDM en 6). Par contre une corrélation maximum a été réalisée entre la sonde de température et l'eau du pot en minimisant l'épaisseur du pot au droit de la sonde centrée sur le pot.

L'humidité et la condensation permanente sur un capteur en milieu saturé amoindrissent considérablement les performances des capteurs de tous types, d'une part par la corrosion exercée par le fluide et d'autre part par les erreurs résultantes du dépôt des minéraux sur le capteur. Aussi des solutions élégantes ont été retenues et appliquées tant sur les choix électroniques que sur ceux des fluides et additifs.

### 3. ANALYSE EN TEMPS RÉEL

La précision et la fiabilité du système sont obtenues par l'utilisation de cartes analogiques/digitales de haute résolution permettant le traitement du signal de type 0-10 Volts ou 4-20 milliampères pour des applications plus spécifiques. Dans le cas du standard ESRF, la résolution est déterminée par le type d'application et le type de carte d'acquisition :

Carte de 12 bits	1 bit = $2.5\mu\text{m}$
Carte de 16 bits	1 bit = $0.15\mu\text{m}$

Cette résolution est considérablement améliorée par l'utilisation des lois statistiques dans le programme d'acquisition d'un facteur 10. Ce dernier permet, en fonction de l'application, de trouver un compromis entre nombre de saisies, vitesse de saisie et résolution de la carte choisie.

L'utilisation d'un logiciel adapté à l'intelligence du système rend possible des calculs en

temps réel et la détection des erreurs par affichage de messages clairs.

Par exemples l'analyse de surchauffe ou de refroidissement locaux, la détection de fuite dans le système, la variation générale du niveau permettant une maintenance préventive du système. Toutes ces informations étant obtenues capteur par capteur, la localisation géographique du problème est immédiate.

De plus l'utilisation de la statistique sur un tel système apporte un réel confort et une grande sécurité dans les données transmises au moyen d'un filtrage préalable. Chaque mesure pouvant être la résultante moyenne d'un échantillonnage selon l'application (dans le cas du projet ESRF, 100 saisies/seconde).

Le temps de saisie dépend du nombre de capteurs connectés au système et du choix des multiplexeurs analogiques/digitaux. La vitesse étant toujours en électronique une occasion de surcoût on choisira des solutions de grande vitesse seulement dans le cas de systèmes nécessitant un nombre de capteurs supérieur à 200. Il faut se rappeler qu'en général un tel système est utilisé pour enregistrer des événements relativement lents au regard des possibilités de l'électronique. Le facteur temps n'est donc pas prépondérant.

Dans le cas d'utilisation du système en boucle d'asservissement comme l'ESRF par exemple le temps de stabilisation du fluide (40 secondes/pour 100 mètres de tuyaux/pour stabilisation inférieure à  $5\mu\text{m}$ ) rend inutile une saisie de l'ordre de la milliseconde !!

Le système utilisé et présenté en figure 1 utilise 9 capteurs HLS, le logiciel utilisé permet de lire les données en provenance des capteurs de distance et de température, via des cartes analogiques/digitales de 12 bits de résolution. Les sous-programmes permettent l'élimination de tous les accidents extérieurs (électriques, électroniques, hydrauliques,...).

En conclusion, un tel système temps réel muni du logiciel de correction de non-linéarité des capteurs et de celles découlant des différences de température entre les pots de mesure, permet de définir un  $\text{dh}$  avec une précision inférieure à quelques microns entre deux points situés à plusieurs dizaines de mètres ( $5\mu\text{m}/100\text{mètres}$ ).

### 4. AMÉLIORATIONS DU PROTOTYPE AUX SÉRIES ACTUELLES

Entre la réalisation, en 1988, des premiers prototypes en laboratoire à l'ESRF (4), la production en 1990 des préséries par Fogale/Nanotech (9) et la construction des séries actuelles en

1991 (350 environ), des améliorations ont été réalisées pour atteindre un état de l'art près de la perfection.

La réduction de la hauteur d'eau à 3 cm pour les appareils de résolution  $0,1\mu\text{m}$  avec une course de 2,5 mm.

La hauteur de 5 cm a été maintenue pour les appareils de résolution  $10\mu\text{m}$  avec une course de 15mm.

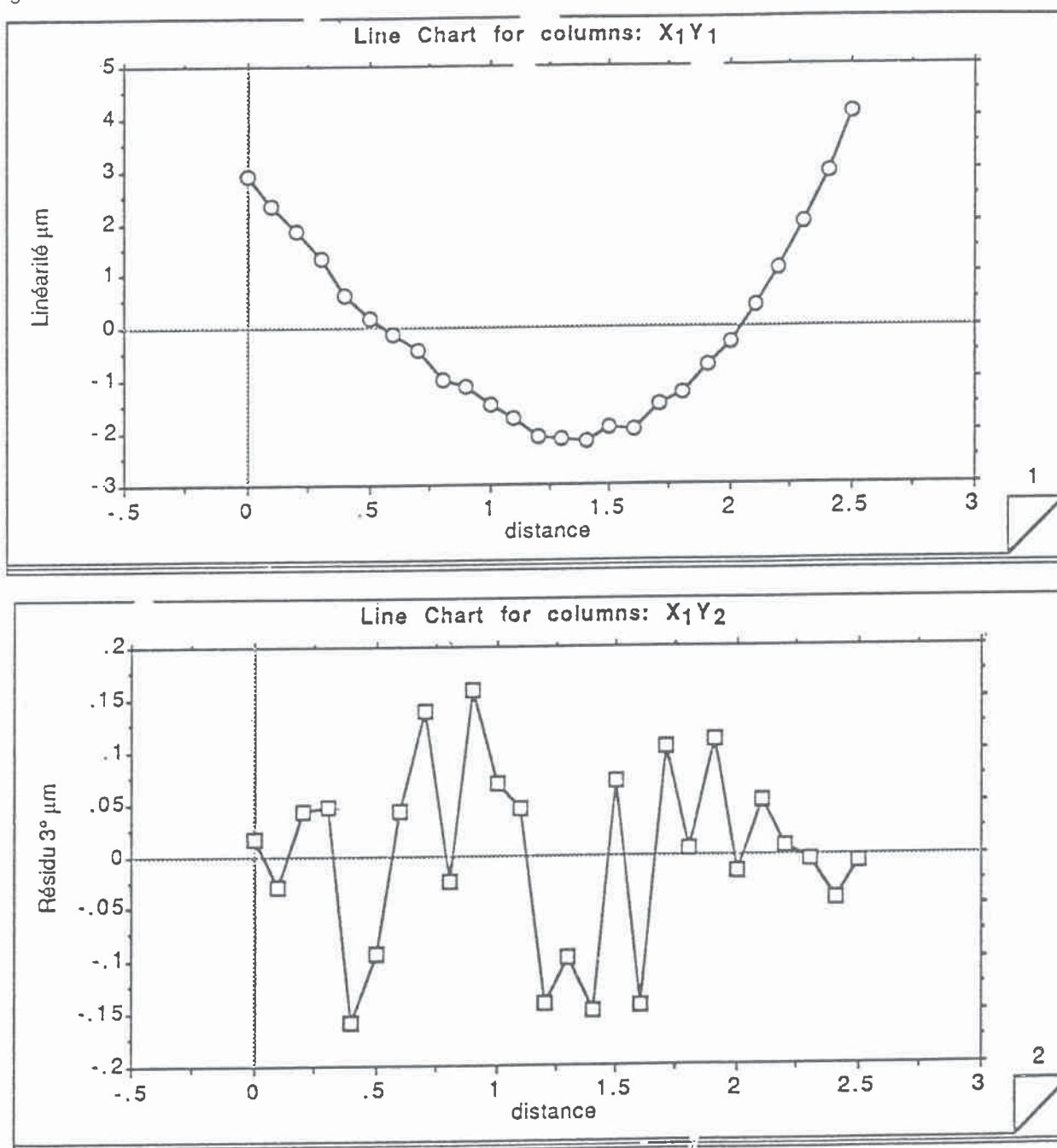
L'évaporation journalière de  $80\mu\text{m/jour}$  du prototype a été réduite à  $24\mu\text{m/jour}$  dans les préséries et à moins de  $3\mu\text{m/jour}$  dans les séries actuelles, repoussant le remplissage du système à une échéance annuelle.

## 5. APPLICATIONS INDUSTRIELLES POSSIBLES (VOIR NDM EN 6)

Au-delà de son utilisation pour l'installation et le réaligement périodique des accélérateurs de particules, le système HLS a de nombreuses autres applications potentielles. A l'ESRF même, il est envisagé d'intégrer ce système aux futures expériences, à l'instar du centre de recherche allemand DESY à Hambourg.

De nombreuses applications sont envisagées dans le contrôle et la surveillance d'ouvrages d'art tels que bâtiments, ponts, tunnels, barrages, centrales nucléaires, viaducs, etc.

Fig. 4 et 5.





De façon similaire, le système HLS sera utilisé dans le contrôle et l'alignement de rampes de lancement, de bancs d'étalonnage de grandes longueurs, de rails de guidage, des surfaces de référence et des machines-outils de grandes et moyennes dimensions.

Dans un premier temps, cette invention a été brevetée en France. La haute qualité du prototype et les excellentes performances des préséries sur de longues périodes (supérieures à 6 mois) ont confirmé les remarquables possibilités du système HLS.

De plus, un rapport de recherche et documentation réalisé par l'INPI (Institut National de Propriété Industrielle) a permis l'extension du brevet à travers l'ensemble des pays industrialisés des cinq continents.

Le but de l'ESRF n'étant pas l'industrialisation d'un tel produit, une licence d'exploitation a été cédée à la compagnie Fogale/Nanotech de Nîmes spécialisée dans les mesures capacitives de haute résolution.

Ces applications dans le domaine des accélérateurs et de l'industrie permettent de réaliser de substantielles économies de temps et de budget, et permettront de nouvelles études et interprétations de phénomènes, jusqu'alors impossible.

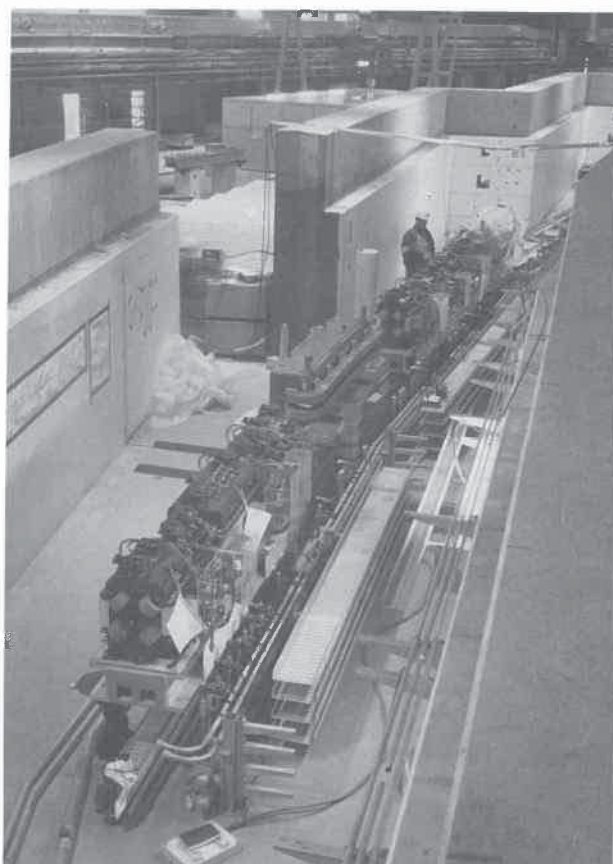
## 6. NOTES DE DERNIERE MINUTE (NDM)

En raison du décalage entre la conférence donnée au CERN à l'occasion des journées de l'AFT à Genève en juin 91 et la publication de cet article, il nous est possible de présenter un certain nombre de résultats en avant-première. Des articles plus détaillés seront publiés ultérieurement sur ces applications.

### 6.1. Résultats sur une cellule prototype du projet ESRF en cours d'installation

Pour rappel l'anneau de stockage du projet ESRF est composé de 608 éléments magnétiques définissant la trajectoire du faisceau de particules circulant à l'intérieur d'une chambre à vide encastree dans les entre fers de ces éléments. Ces éléments doivent être alignés horizontalement (sur 844,39 mètres) avec une précision de  $\pm 0.1\text{mm}$  (Cahier des charges).

Pour des limitations de charge admissible des ponts roulants et en raison du maillage de la machine, ces aimants sont répartis sur 96 poutres de support recevant les 320 quadripôles et les 224 sextupôles.



6.1 F.1 : Cellule type du projet ESRF.

Pour réaliser le nivellement, 288 pots HLS sont installés au droit de 288 vérins. (Voir photo 6.1.F.1).

Les résultats présentés ici ont été obtenus sur la cellule numéro 5 et montrent toute la sensibilité du système.

Les enregistrements thermiques 6.1.b montrent l'influence de l'arrivée et du départ des employés les jours ouvrables et la grande stabilité des week ends (30/11, 1/12, 7/12, 8/12, .....). Les périodes de fermeture de la zone durant les tests sur les cavités radio-fréquence du 12/12 au 23/12 et depuis le 3/1 donnent une bonne idée des conditions que nous aurons en cours de fonctionnement.

La finesse des mesures permet de voir l'influence des mouvements opérés sur les dalles du toit du tunnel. La conclusion a été de différer l'alignement final de la machine au delà de l'installation totale du toit (Voir fig 6.1.a)

Un réalignement test a été opéré le 16 décembre sur les 9 vérins de la cellule 5. Celui-ci a été réalisé en une seule itération à  $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$  sans rattrapage de jeu. Cette opération sera réalisée une nouvelle fois depuis la salle de contrôle fin janvier, mais déjà l'on peut dire «pari tenu», car malgré les allées et venues

6.1. F.2 : Vue d'ensemble HLS/Vérin sur une poutre type avec vanne de sécurité.

incessantes pendant la phase de construction la machine a été stabilisée à  $\pm 30 \mu\text{m}$  sur une période de 3 semaines avec une seule itération, et quelques manipulation des dalles du toit. Les  $100 \mu\text{m}$  du cahier des charges, et les  $50 \mu\text{m}$  espérés lors de la réalisation du prototype pourraient bien descendre en-dessous des  $20 \mu\text{m}$  lors de la mise en service prévue le 17 février 1992. A bientôt pour les résultats sur le KM du projet.

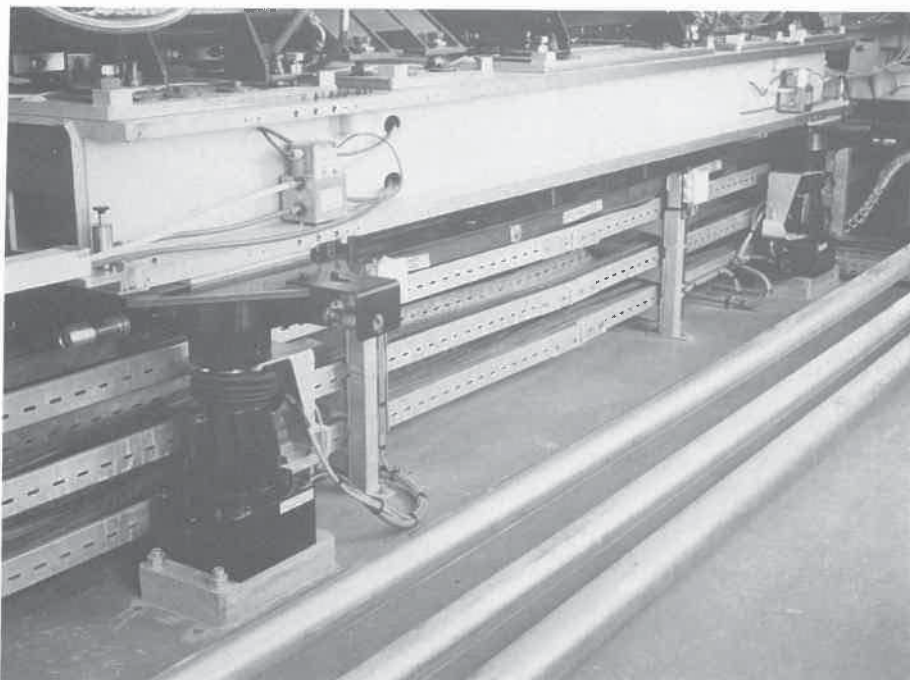
Enfin la courbe 6.1.c montre le taux de fuite ou évaporation du système qui est en l'état actuel de  $9 \mu\text{m}/\text{jour}$  et devrait être ramené en dessous des  $3 \mu\text{m}/\text{jour}$  selon nos estimations de laboratoire.

## 6.2. Contrôle d'une structure métallique supportant un banc d'étalonnage interférométrique

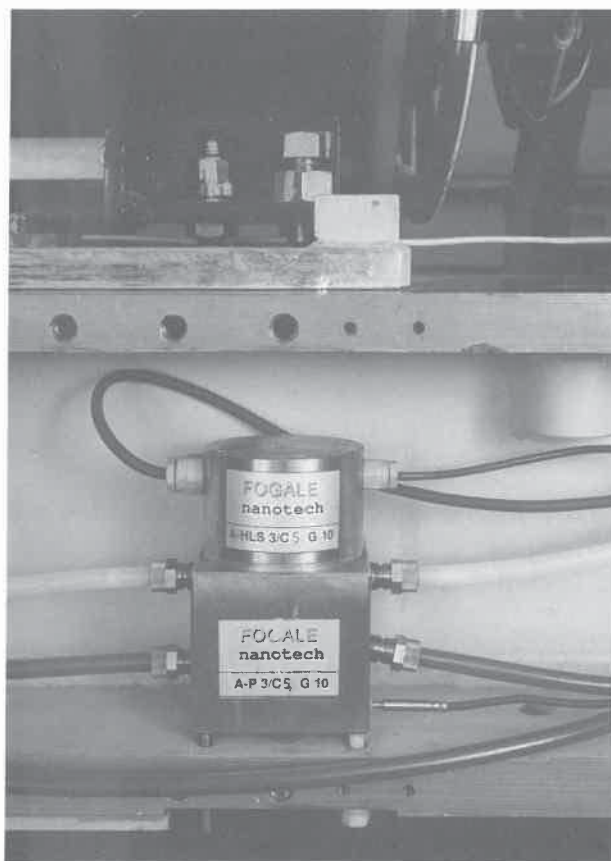
La micro-géodésie des accélérateurs de particules ou synchrotrons utilise de nombreux instruments de mesure de distances. Ces instruments peuvent être soit à mesure directe, c'est le cas des E.D.M. (Electronic Distance-meter), soit à mesure comparative (Distinvar). Dans les deux cas, un étalonnage fréquent de l'appareil lui-même ou de l'élément de comparaison (fil d'invar) utilisé est nécessaire. Pour ce faire, l'ESRF a construit un banc de conception moderne de longueur utile de 0 à 56 mètres.

Ce banc de mesure doit être lui même réaligné en fonction des mouvements du sol pour permettre aux instruments de mesure, interféromètre ou inclinomètres, de rester dans leur plage de mesure. Le contrôle par HLS permet de suivre l'évolution de ce banc de 60 mètres de long et de prévoir son réaligement bien avant qu'il ne devienne inopérant.

Les résultats présentés ici ont été enregistrés sur un intervalle de temps d'un mois dans de très mauvaises conditions thermiques pour une base d'étalonnage (amplitude de  $17$  à  $29^\circ\text{C}$ ), mais elles étaient celles de la phase de construction. Depuis le mois de décembre l'air conditionné du local devrait permettre de réaliser le réglage définitif du banc. La fréquence du réglage attendue est inférieure à une année et prend environ une journée.

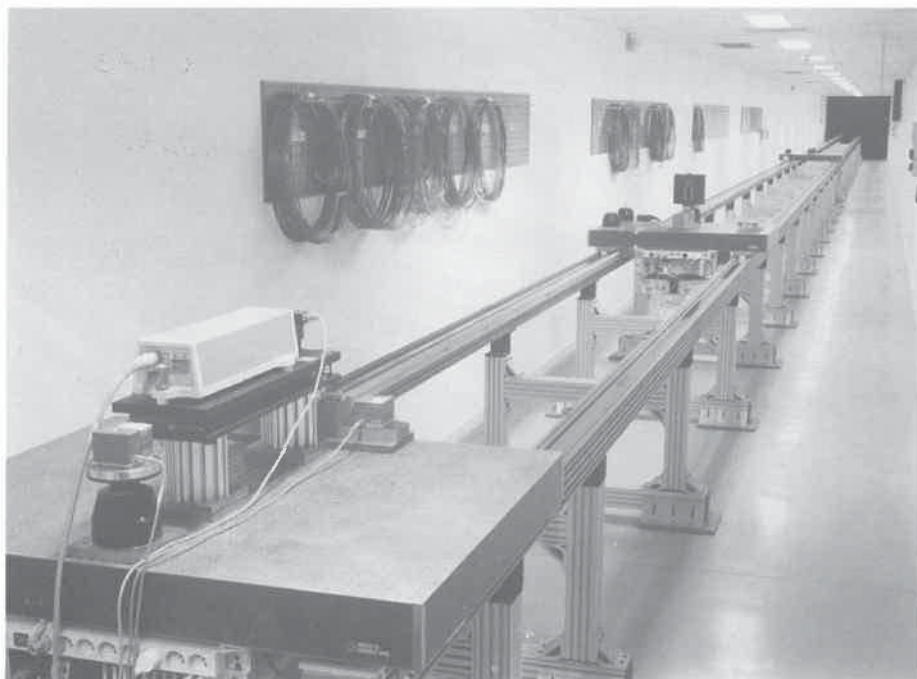


Les figures 6.2.a et 6.2.b montrent que malgré les conditions difficiles de mesures (coupures de courant et mauvaises conditions thermiques), les résultats ont toujours présenté une parfaite cohérence lors de ces brusques variations thermiques ou remises sous tension brutales du système.



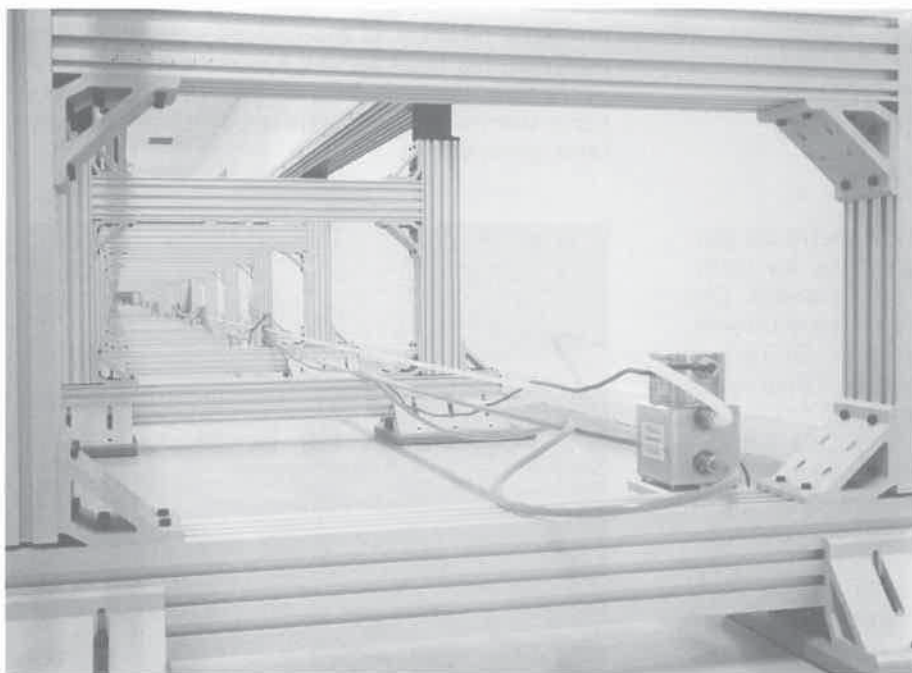
6.1 F.3 : Détail d'un pot HLS.





6.2 F.1 : Vue d'ensemble du banc d'étalonnage.

6.2. F.2. : Vue d'ensemble du système HLS.



### 6.3. Contrôle de stabilité d'un ensemble de dalles d'un hall expérimental en Génie-civil

La physique de rayonnement synchrotron se situe à l'extérieur de la machine anneau de stockage et sur une superficie de 30 000 m<sup>2</sup>. Cette surface est constituée par un ensemble de dalles d'environ 70/80 m<sup>2</sup> qui supporteront les équipements expérimentaux de physique. Afin de quantifier les mouvements

attendus sur ces dalles, relativement à la machine productrice de rayonnement et de choisir les supports adéquats, un enregistrement continu sur une période de 5 mois a été réalisé sur une zone type choisie.

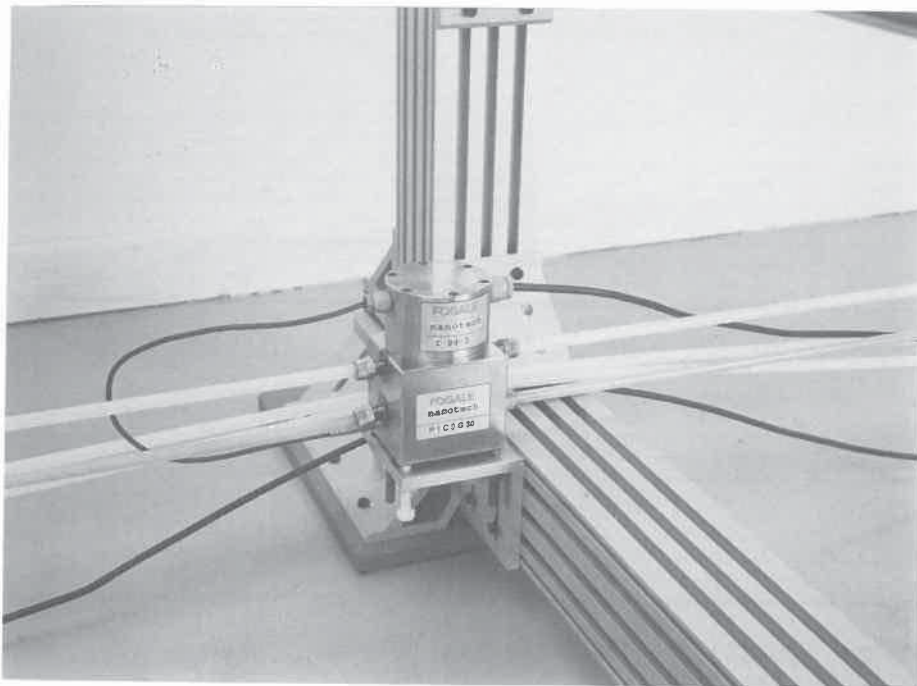
Là encore les conditions étaient extrêmes (amplitude de 19 à 29°C) et ont permis à la fois de tester la fiabilité à long terme du système avant sa mise en service en tunnel et de mettre en évidence des phénomènes liés aux dilatations des bétons sur une période s'étalant de l'été à l'hiver en l'absence de climatisation. La mise en service de la climatisation à partir du 16 décembre montre combien elle est nécessaire et bénéfique. Elle a permis de réduire d'un facteur 10 l'amplitude des mouvements journaliers du dallage. Cette mesure préalable à l'installation a montré que la "respiration" des différentes dalles entre elles, dans le temps, serait d'une amplitude de  $\pm 1$  mm en relatif sur un intervalle annuel en absence de toute erreur à caractère accidentel.

Ceci est loin d'être négligeable pour des expérimentateurs désirant une stabilité faisceau de  $\pm 100$   $\mu$ m mensuel environ et de quelques microns journalier. Le choix de systèmes similaires à la machine synchrotron (HLS et Vérins servo-commandés) sera sans doute néces-

saire pour les expérimentateurs les plus exigeants.

Une seconde expérience débutera à partir de mars pour quantifier les mouvements relatifs des dalles par rapport à la machine elle-même.

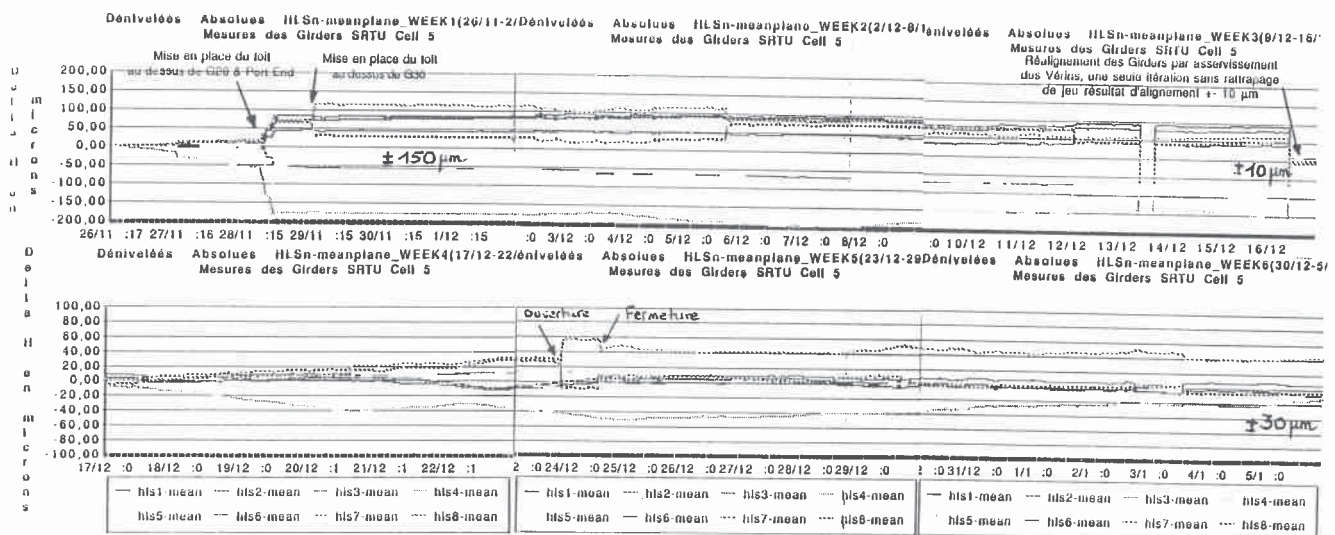
Un contrôle périodique au niveau N3 sur les deux premiers mois a permis de confirmer, au premier ordre près, les résultats impressionnants enregistrés par le système HLS.



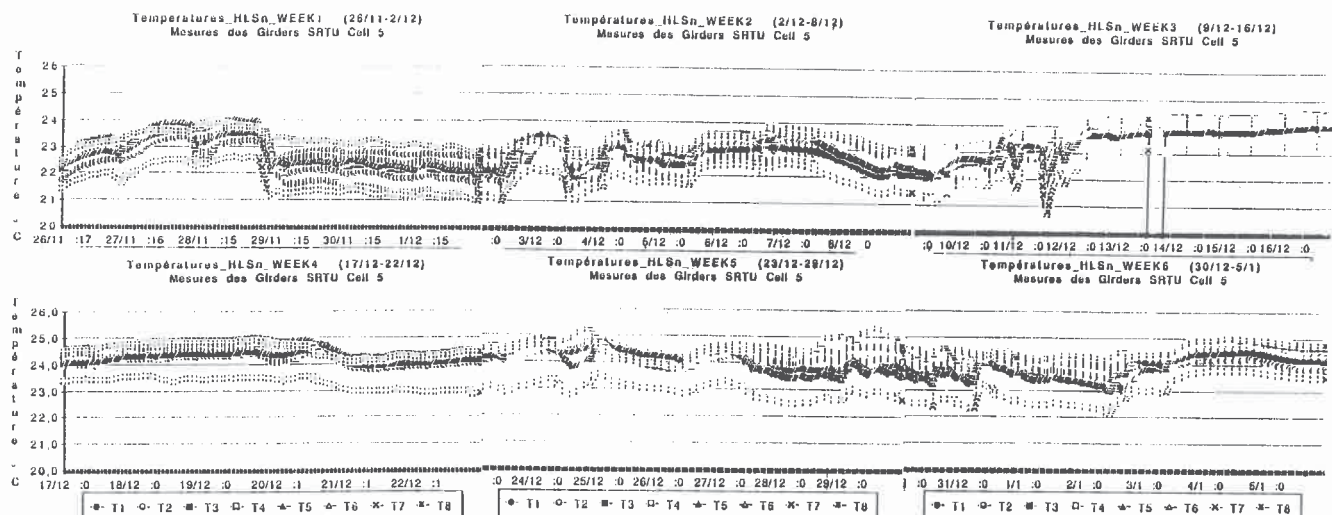
#### 6.4. Contrôle d'un barrage en temps réel sur deux mois

Un système HLS a été installé en octobre 1991 sur un barrage français dans un environnement particulièrement difficile (température de 7°C et taux d'humidité de 100%). Nous laissons à nos collègues grenoblois de la DTG/EDF le soin de présenter ultérieurement les résultats spectaculaires obtenus par ce système au cours d'une opération de vidange et de remplissage d'un bassin d'amortissement de chute d'un barrage dont ils ont la responsabilité du contrôle.

6.2. F.3. : Détail d'un pot HLS sur son support.

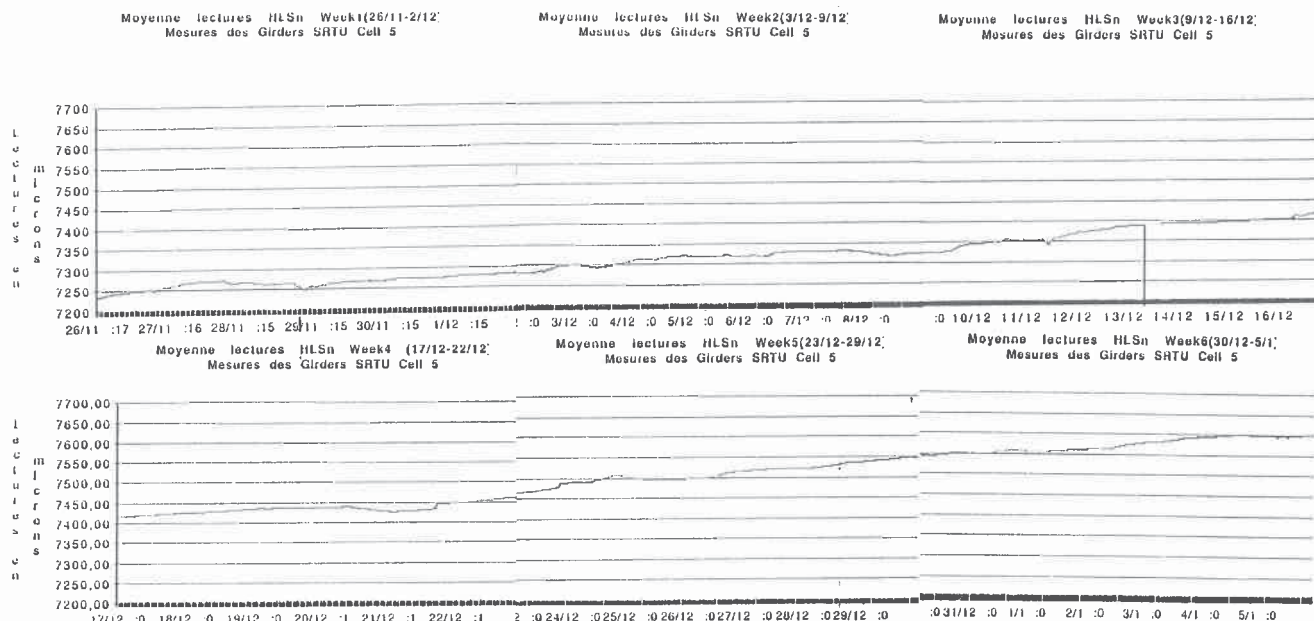


#### 6.1.a Dénivelées par rapport au Plan Moyen des 3 Poutres.



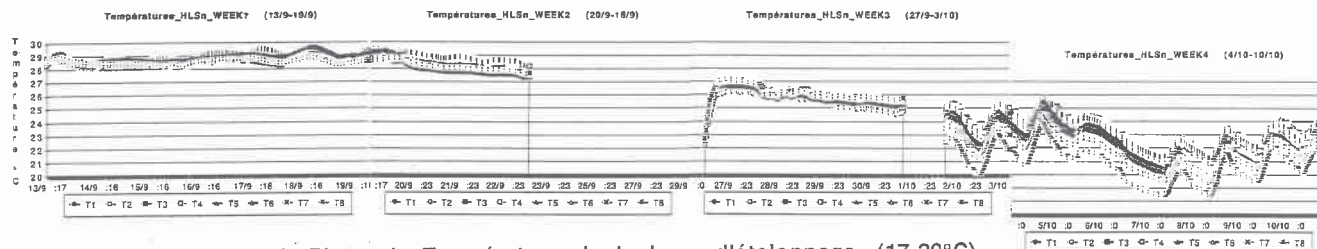
#### 6.1.b Plage de Température du Tunnel (21-25°C)



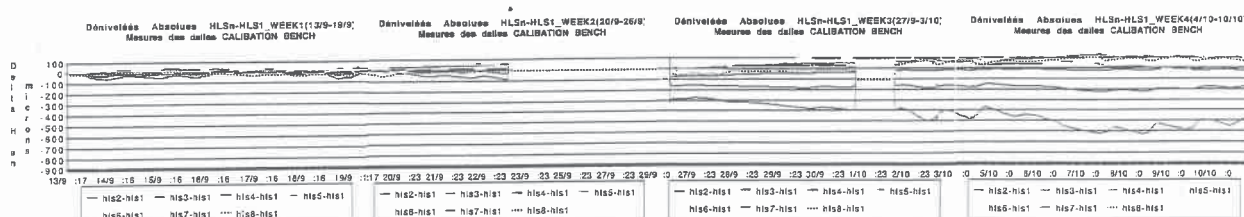


### 6.1.c Taux de Fuite ou d'Evaporation ( $9 \mu\text{m/jour}$ ) Evolution du Plan Moyen

### 6.2.a Dénivelées par rapport à la Table Support de l'Interféromètre.



### 6.2.b Plage de Température de la base d'étalonnage. (17-29°C)



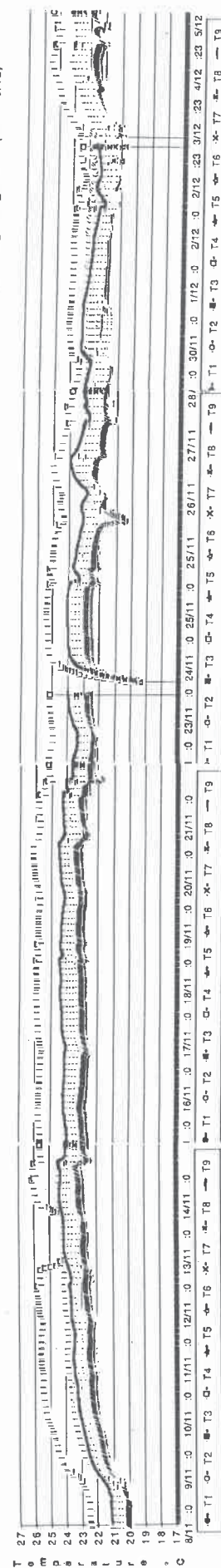
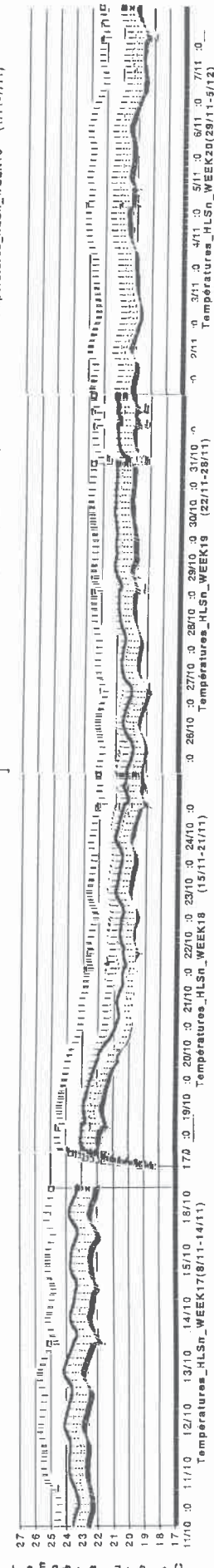
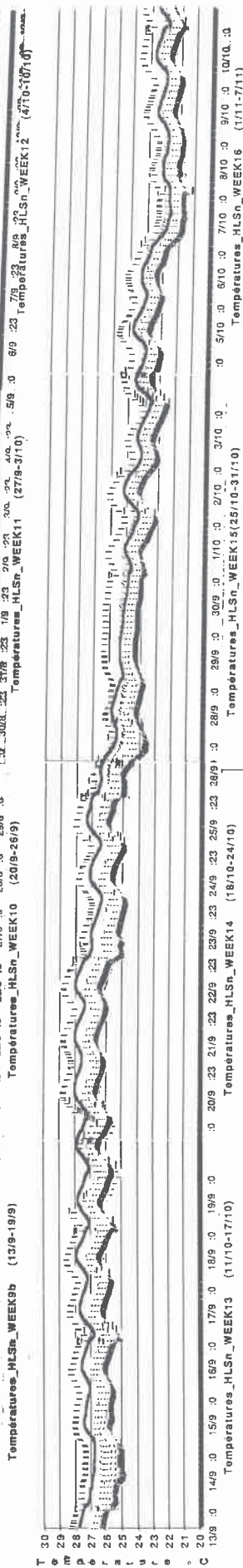
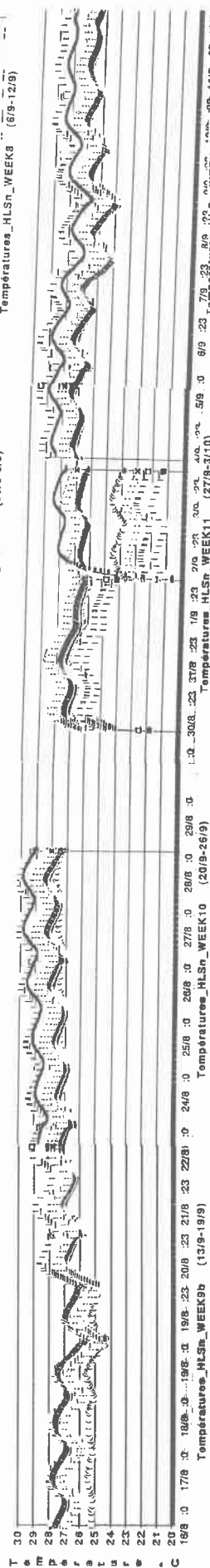
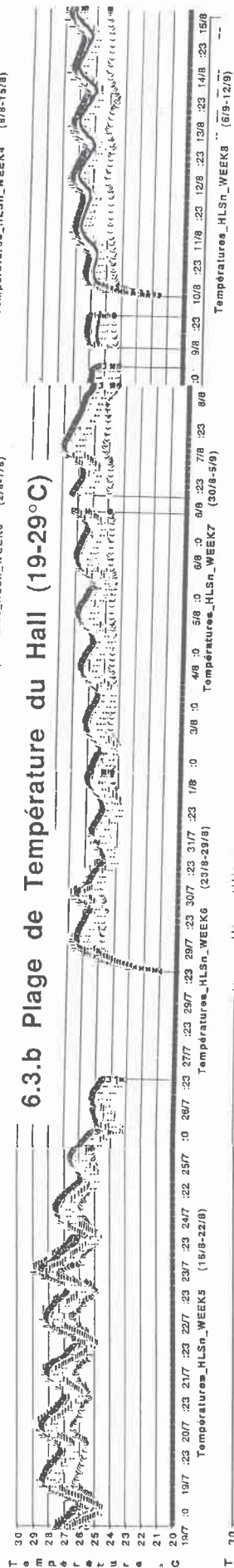
Températures\_HLSn\_WEEK1 (19/7-25/7)

Températures\_HLSn\_WEEK2 (26/7-1/8)

Températures\_HLSn\_WEEK3 (2/8-7/8)

Températures\_HLSn\_WEEK4 (8/8-15/8)

## 6.3.b Plage de Température du Hall (19-29°C)





### 6.3.3.a Mouvements relatifs des Dalles du hall.

