

## MÉTROLOGIE POUR UN GRAND COLLISIONNEUR LINÉAIRE

Willame Coosemans

Adjoint du Chef du Groupe de Géodésie Appliquée  
CERN - Laboratoire Européen pour la Physique des Particules

### 1 - INTRODUCTION

Amener des électrons et des positons à une très haute énergie, n'est pas chose aisée. En effet, malgré les 28 km de circonférence du LEP (accélérateur-collisionneur d'électrons-positons) l'énergie maximum atteinte par les particules n'est que de quelques centaines de GeV. Cela est dû aux pertes d'énergie provoquées par le rayonnement synchrotronique émis par les faisceaux de particules quand ils circulent sur des trajectoires courbes. Ce phénomène est inversement proportionnel au rayon de courbure mais directement proportionnel à l'énergie à la puissance quatre.

Pour obtenir des collisions électrons-positons à des énergies plus élevées, le CERN étudie la possibilité de construire un grand collisionneur linéaire. Le complexe «CERN Linear Collider» (CLIC) serait principalement constitué de deux accélérateurs linéaires de 15 km chacun. Ils devraient accélérer et faire entrer en collision frontale des électrons et des positons pour obtenir une énergie totale de 2 TeV. La construction d'une telle machine lance des défis technologiques à toutes les disciplines scientifiques et techniques et notamment à la métrologie géodésique.

L'ensemble des deux accélérateurs principaux est constitué d'environ cent mille cavités accélératrices de 340 mm et de 35 mm de diamètre. L'ouverture pour le passage des faisceaux a un diamètre de 4 mm. Transversalement aux faisceaux, la précision sur la position relative de trois cavités consécutives est de 5  $\mu$ m (écart-type).

Les mouvements du sol, qu'ils soient provoqués par des phénomènes naturels, l'activité humaine ou la déformation des constructions où sont installées les machines, perturbent d'une façon significative l'alignement. Pour garantir des tolérances aussi exceptionnelles, seul un système d'alignement dynamique et de contrôle en temps réel peut être utilisé.

La mise en place d'un accélérateur débute par une *phase génie civil*, suivie d'une *phase pré-alignement*, utilisant les méthodes classiques. Au moment où l'on tente l'injection des faisceaux

dans les accélérateurs linéaires, l'alignement de ceux-ci doit être dans les tolérances requises. Pour obtenir un tel résultat, un système de mesure automatique de l'alignement doit être actif, avant et pendant les essais, et commander en temps réel les mouvements des actionneurs qui maintiennent en bonne position les 30 km d'éléments. C'est la phase d'alignement initial. Dès l'injection des faisceaux, les détecteurs de position, répartis régulièrement le long de la machine, fourniront les données aux actionneurs. Débute alors la *phase d'auto-alignement*. Le système de mesure ayant servi à l'alignement initial doit rester actif. Il devient de la sorte la mémoire de position des éléments, indispensable lors d'une nouvelle phase d'alignement initial, pour un redémarrage des faisceaux après arrêt.

Cette présentation décrit le système de supports équipés de micro-actionneurs commandés par ordinateur, ainsi qu'une méthode et une instrumentation envisagées pour un alignement en temps réel.

### 2 - SUPPORTS ET MICRO-ACTIONNEURS

(Figures 1, 2 et 3)

Pour réduire le nombre d'éléments à aligner dynamiquement, quatre cavités accélératrices sont fixées sur une même poutre. Les vés, qui supportent les cavités, sont alignés au moment de la fabrication de la poutre. Les extrémités de deux poutres adjacentes reposent sur un même berceau. L'extrémité d'une poutre est fixée rigidement au berceau ; l'extrémité de l'autre poutre est fixée au même berceau par l'intermédiaire de deux biellettes. Le berceau est relié à trois actionneurs et à une butée micrométrique par l'intermédiaire de biellettes. Deux actionneurs agissent suivant l'axe Z, un autre suivant l'axe X. La butée micrométrique permet un ajustage manuel suivant l'axe S. Le système est tel que les mouvements des actionneurs se traduisent par des déplacements angulaires entre les deux poutres autour d'un point d'articulation fictif, qui est l'intersection des lignes passant par les axes des vés des poutres.

Grâce au système de biellettes équipées de rotules de petit diamètre, les mouvements se font par rotation autour d'un point, quasiment sans

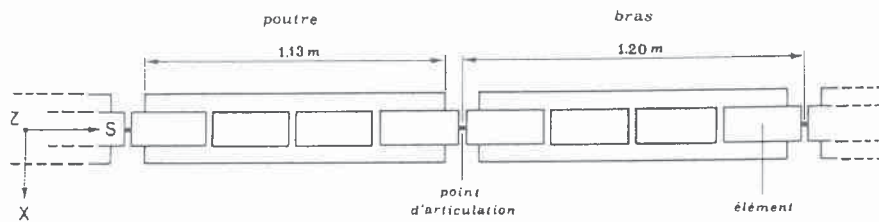


Figure 1

Figure 2

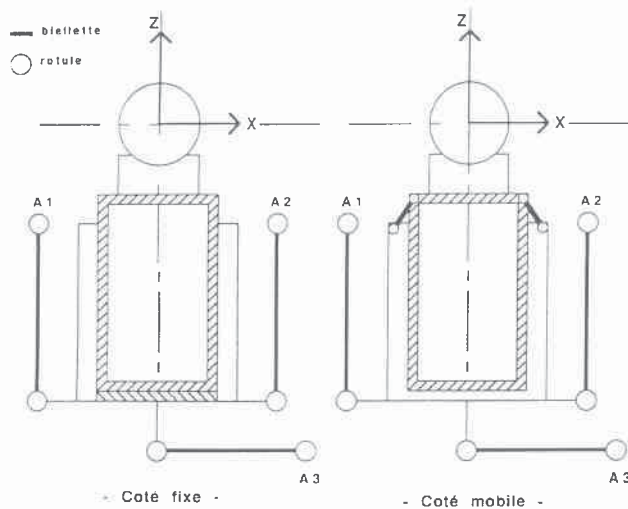
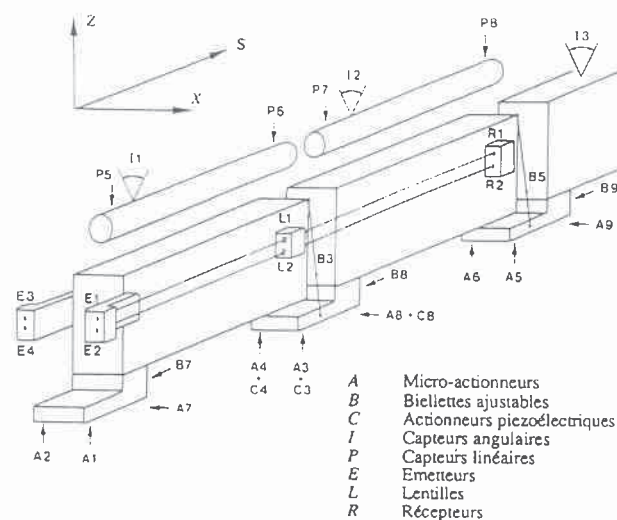


Figure 3



frottement, n'introduisant pas de contraintes dans les structures.

Une maquette à l'échelle 1/1 a été construite. Elle comporte deux poutres équipées de vés. Elles sont supportées par neuf actionneurs fixés rigidement sur une table en granit de deux tonnes, qui est le référentiel spatial du système. Des capteurs de déplacement linéaire, fixés au référentiel, ainsi que des clinomètres, fixés sur les poutres, contrôlent les mouvements des éléments prototypes fixés sur les vés, lorsque l'on effectue des mouvements sur les actionneurs. Les boîtiers de commande et de contrôle des capteurs et des actionneurs sont connectés à un ordinateur.

Deux programmes tests ont été développés. Le premier permet d'étudier le comportement mécanique du système pendant les déplacements. Il est possible de choisir un ou plusieurs actionneurs et de commander un déplacement quelconque. Le programme calcule les valeurs théoriques à atteindre sur les capteurs et, après les déplacements, fait la comparaison avec les valeurs lues. Le second programme est un logiciel d'alignement dynamique. Des valeurs sont choisies pour les capteurs. Le programme calcule

les mouvements à effectuer, commande les déplacements et maintient dynamiquement le système sur la position choisie.

Les poutres en céramique (carbure de silicium) ont une section de 120 x 60 mm et une épaisseur de paroi de 7.5 mm. Pour les mêmes dimensions, une poutre en métal tel que l'acier serait trois fois moins rigide et trois fois plus sensible aux variations de température. L'erreur d'alignement des vés, collés sur les poutres, est inférieure à 3 µm.

Les actionneurs sont des moteurs pas-à-pas. Ils ont un pas de 0.1 µm et une course de 8 mm. Les capteurs linéaires ont une résolution de 0.1 µm, une course de 10 mm et une erreur maximum de 1 µm. Les capteurs angulaires ont une course de ± 2 mrad et une précision de 2.10<sup>-6</sup> mrad.

Les performances de ce banc-test peuvent être résumées comme suit :

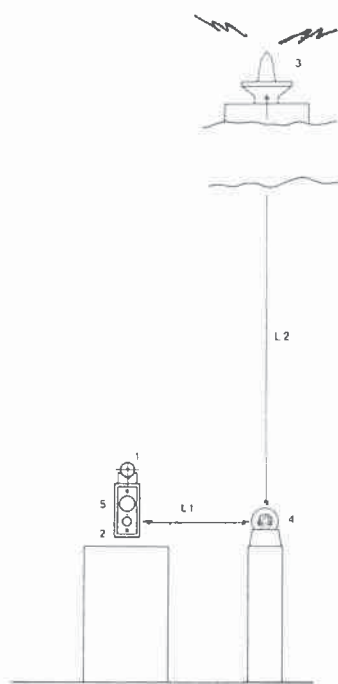
- plus petit déplacement possible dans une direction quelconque : 0.2 µm ;
- hystérésis maximum mesurée pour un déplacement de ± 4 mm : 3 µm ;
- écart maximum entre la position prévue et celle

obtenue en alignement dynamique :  $0.2 \mu\text{m}$  ;  
 • fréquence de ré-alignement d'un berceau  $\sim 1 \text{ Hz}$ .

## 3 - MÉTROLOGIE EN TEMPS RÉEL

Les cavités accélératrices sont parfaitement référencées par rapport aux poutres qui les supportent. Ces poutres, de par la conception de leurs supports, sont articulées autour d'un point fictif mais géométriquement défini. Il suffit donc d'aligner ces points pour réaliser l'alignement des poutres, et, par leur intermédiaire, les éléments de l'accélérateur.

Le système de mesure est constitué de trois réseaux régulièrement rattachés les uns aux autres (figure 4). Le premier, un réseau géodésique (précision des mesures de l'ordre de  $1 \text{ mm}$ ), garantit la position absolue de l'ensemble des installations et les positions relatives de points éloignés de plusieurs kilomètres. Le second, un réseau de topométrie fine (précision des mesures de l'ordre de  $0.1 \text{ mm}$ ), assure la position relative de points éloignés de plusieurs dizaines de mètres. Enfin, le troisième, un réseau de métrologie (précision des mesures de l'ordre de  $0.001 \text{ mm}$ ) garantit la position relative de points éloignés de quelques mètres.



1 : Main Linac : structure accélératrice  
 2 : Main Linac - poutre support  
 3 : Réseau de géodésie de surface  
 4 : Réseau de topométrie fine  
 5 : Réseau de métrologie  
 L1, L2 : Mesures de liaisons

Figure 4

L'ensemble de l'instrumentation qui mesure ces réseaux communique en continu l'information à un système de calcul. Celui-ci en fait l'analyse statistique, calcule la position des éléments, en déduit et commande les déplacements à effectuer sur les actionneurs.

## 3.1 Réseau de métrologie

Ce réseau doit déterminer le cheminement géométrique ayant comme sommets les points d'articulation des poutres et doit garantir les tolérances sur la position relative de ces poutres. L'instrumentation est intégrée dans les berceaux supports.

Méthode :

### Ecartométrie bi-axiale extrapolée (figure 5)

Dans le plan (V) passant par le point 3 et perpendiculaire à la ligne (2,3), on mesure les différences en abscisse ( $m_x$ ) et en ordonnée ( $m_z$ ) entre le point 3 et le point d'intersection I de la ligne (1,2) et du plan (V).

Instrumentation :

### Ecartomètre optique (figure 6)

Une cellule à quatre quadrants (dénommée récepteur) et un objet lumineux (dénommé émetteur) sont situés sur l'axe optique d'une lentille mince, de part et d'autre de celle-ci et à deux fois la focale. L'émetteur est un carré lumineux produit par un cache posé sur un verre dépoli éclairé par une source de lumière rouge. La droite de référence est définie par l'émetteur et la lentille. Les écarts se mesurent sur le récepteur.

Mise en œuvre :

Dans la mesure par écartomètre à fil, les lignes de référence se chevauchent et les mesures

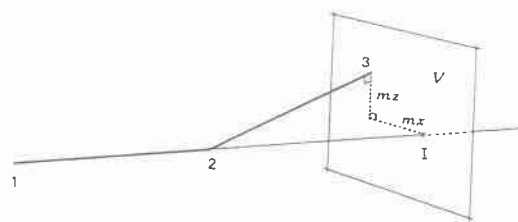


Figure 5

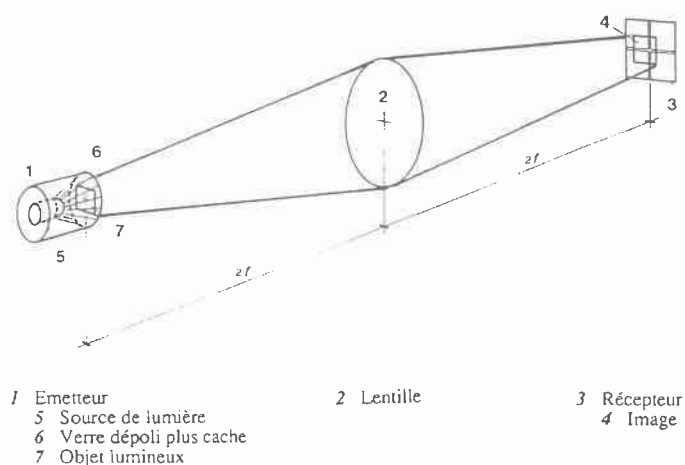


Figure 6

d'écarts se recoupent. Il en sera de même pour l'écartomètre optique. Chaque point à mesurer sera équipé alternativement d'un émetteur, d'une lentille, d'un récepteur. Comme dans les autres réseaux, l'ensemble des mesures doit être réalisé en continu. Chaque berceau devra être équipé à demeure de l'instrumentation nécessaire. Il y aura deux types d'équipement (figure 7). Les trajets optiques passent à travers les poutres.

Les mesures, décalées en z par rapport aux cavités, sont faites sur un axe passant par le centre de ces dernières. Il faut donc tenir compte de l'inclinaison de cet axe. Les poutres seront donc équipées d'un inclinomètre mesurant l'angle  $t$  dans le plan ZX.

Les simulations montrent que, pour un écart-type de  $2\text{ }\mu\text{m}$  sur les mesures, la propagation des erreurs est telle, qu'à  $100\text{ m}$ , l'écart-type sur la position d'un point d'articulation serait de  $0.2\text{ mm}$ . Tous les  $100\text{ m}$ , nous établirons donc une liaison avec le réseau de topométrie fine.

Essais et tests :

L'instrumentation a été développée par un institut de physique et est utilisée pour contrôler

automatiquement l'alignement des détecteurs de particules dans de grands ensembles expérimentaux. D'après les utilisateurs, la précision et la fiabilité des systèmes sont excellentes. Pour en avoir confirmation, quatre systèmes ont été fixés sur l'extérieur des deux poutres de la maquette. Des déplacements sont effectués par les actionneurs et les valeurs obtenues sur les récepteurs sont comparées aux valeurs des capteurs linéaires de référence (figure 3). Les résultats intègrent les erreurs de fonctionnement de la maquette et les erreurs des capteurs de référence. Pour une course de  $\pm 200\text{ }\mu\text{m}$ , on constate des écarts de linéarités inférieurs à  $1\%$ , légèrement différents pour chaque récepteur. La répétabilité des mesures en toute position est inférieure à  $2\text{ }\mu\text{m}$ . Le constructeur, s'appuyant sur quelques tests significatifs, certifie que l'instrument peut être amélioré - c'est ce que nous nous efforcerons de faire.

Très prochainement, la maquette fonctionnera avec six poutres. Chaque berceau sera équipé avec les composants de l'écartomètre optique. Le système sera calibré par rapport à l'axe des cavités ou des vés supports et testé en situation réelle.

3.2 Réseau de topométrie fine

Son but est de rigidifier le réseau de métrologie. Il sera constitué, sur  $30\text{ km}$ , d'un alignement de piliers espacés de  $50\text{ m}$ . Mesuré d'une façon statique, il servira d'appui à la phase de pré-alignement. Il sera ensuite équipé d'un système de mesure en continu.

Méthode :

Ecartométrie bi-axiale interpolée (figure 8)

Dans le plan (V), perpendiculaire à la ligne (1,3), on mesure les différences en abscisse ( $m_x$ ) et en ordonnée ( $m_z$ ) entre le point 2 et le point d'intersection I de la ligne (1,3) et du plan (V).

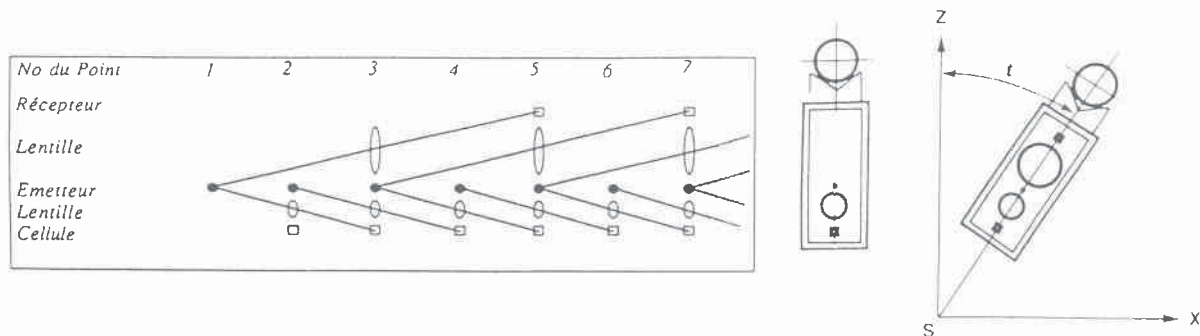


Figure 7

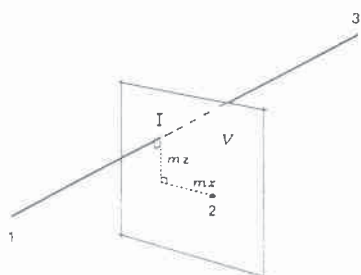


Figure 8

## Instrumentation :

a) *Ligne de référence* : Un fil métallique est tendu à une valeur légèrement inférieure à sa limite de rupture. La ligne de référence sera donc une courbe ayant théoriquement la forme de la *chaînette*. La mesure en  $z$  dépendant de la connaissance de cette courbe, la tension du fil doit être particulièrement soignée. Le système actuellement à l'étude doit être sensible à une différence de 0.01 N.

b) *Ecartomètre à fil* : Plusieurs technologies existent pour réaliser un capteur capable de détecter un fil. Des développements sont en cours dans différents laboratoires. Il a été convenu avec ces derniers de développer une méthode capacitive. La variation de la capacité électrique mesurée entre le fil et une surface de référence est proportionnelle à la variation de distance. Une société, spécialisée dans ce type de mesures, a, suivant nos spécifications, développé et construit un système prototype actuellement en test dans notre laboratoire (figure 9).

Ce système, qui se présente sous la forme d'un parallélépipède creux ouvert aux extrémités ( $4 \times 4 \times 10$  cm), intègre huit capteurs, trois sur deux faces opposées et un sur les deux autres faces. La course est de  $\pm 4$  mm et le fil étant approximativement centré,  $1 \mu\text{m}$  de déplacement correspond à un signal de sortie de 1.3 mV, ce qui est une bonne sensibilité. La disposition particulière des capteurs a été réalisée pour donner un maximum d'information sur le comportement de ceux-ci

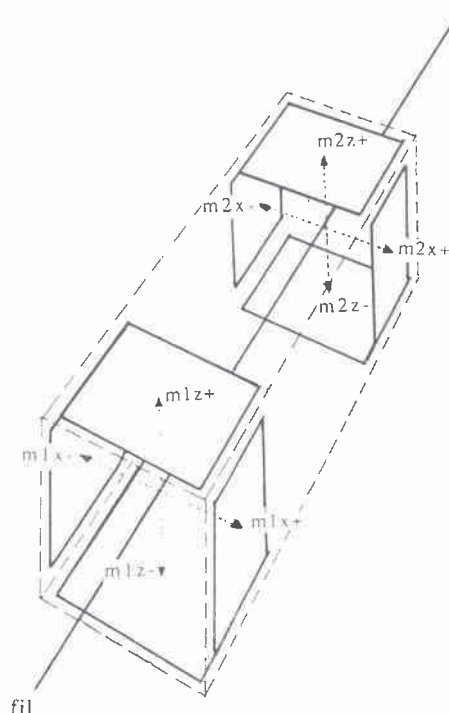


Figure 9

pendant les tests. Le système final aura probablement deux capteurs par face, afin de mesurer les déplacements linéaires et angulaires de façon surabondante. Du fait de l'acquisition récente de ce matériel, il n'est pas possible de donner plus de détails sur la précision ou sur l'utilisation optimum d'un tel système.

## Mise en œuvre :

Dans la détermination statique d'un réseau linéaire par écartométrie à fil, on déplace la ligne de référence de proche en proche et les repères deviennent alternativement points d'appui et points mesurés. Afin de le reproduire dans un système de mesure du réseau en continu, on installe à demeure deux lignes de références parallèles.

Les fils sont tendus sur 200 m. L'écart entre les lignes est fonction des capteurs utilisés ; dans notre cas : environ 10 cm. Les points d'attache des fils sont décalés de 100 m d'une ligne à l'autre. Les points d'attache, combinés avec les systèmes de mise en tension, sont communs à deux fils consécutifs.

On mesure la position des points d'attache des fils d'une ligne par rapport aux fils de l'autre ligne. Ces mesures, plus les distances entre points d'attache, déterminent strictement la figure. Les informations surabondantes sont obtenues en mesurant la position des fils d'une ligne par rapport aux fils de l'autre ligne, à 50 m des points d'attache (figure 10).

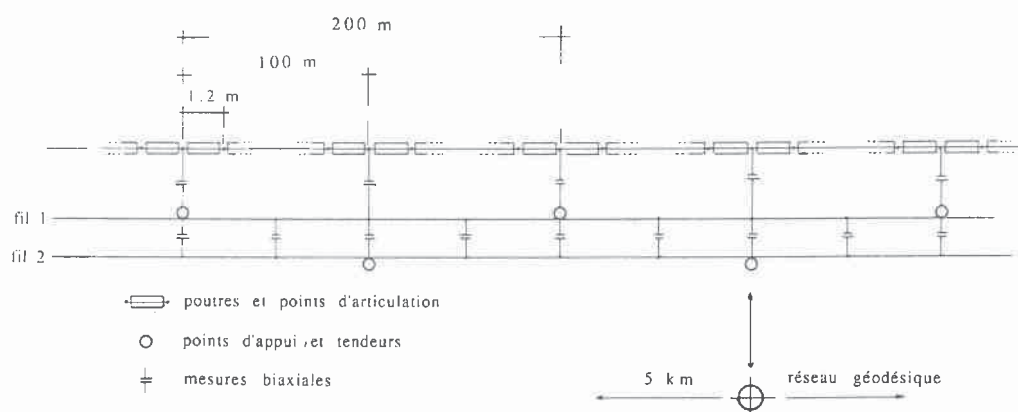


Figure 10

Les simulations sur ordinateur ont montré que, théoriquement, pour un écart-type de 0.01 mm sur les mesures, la propagation des erreurs est telle, qu'à 5 km, l'écart-type sur la position d'un repère serait de 2 mm. La maille du réseau géodésique pourrait donc être de 5 km.

#### Tests, essais :

Le système à fil décrit ci-dessus n'existe pas encore. Nous ne savons pas s'il est possible de l'utiliser pour des mesures absolues en Z, si la forme géométrique du fil tendu est dans les tolérances exigées. Des essais sont en cours avec un fil d'acier de 0.2 mm tendu sur 130 m. Ils ont également pour but l'étude du système à capteurs capacitifs et des points d'appui tendeurs.

### 3.3 Réseau géodésique

Ce réseau n'a pas fait l'objet d'études particulières. On peut cependant imaginer un réseau de 30 km de long, intégrant obligatoirement un alignement de piliers distants de 5 km et situé à l'aplomb des accélérateurs. Ces piliers seront reliés au réseau de topométrie fine.

La mesure par géodésie spatiale permettra des déterminations ponctuelles pendant les phases de génie civil et de pré-alignement et des déterminations continues pendant la phase d'alignement initial. Les mesures de descente de verticale devront elles-aussi pouvoir se faire en continu.

## 4 - CONCLUSION

C'est à la demande du Groupe de Recherche CLIC, préoccupé par la faisabilité d'une telle machine, que ce programme d'étude et de développement a été entrepris. Notre scepticisme du départ s'est progressivement atténué.

Aujourd'hui, nous sommes résolument entrés dans le monde du micromètre et l'idée de devoir un jour aligner 80.000 éléments sur 30 km nous est devenue familière.

Nos études ont bien progressé. Le système de supports et d'actionneurs qui équipe la maquette a donné entière satisfaction et on peut envisager son utilisation pour une solution finale. Il en est de même pour l'écartomètre optique. Des solutions industrialisables sont envisagées pour ces deux types de produits.

Nous sommes cependant loin des solutions finales et des questions restent sans réponse. Pour n'en citer qu'une : comment gérer 200 000 capteurs, simultanément et en continu, tout en agissant sur 75 000 actionneurs ? Cette question, comme les autres, trouvera forcément une solution un jour ... c'est de la technique !

Les vraies questions sont celles auxquelles des centres de recherche fondamentale comme le CERN tentent de répondre : de quoi est faite la matière ? quelles sont les forces qui régissent l'univers ? La machine CLIC est conçue pour y répondre partiellement.