

■ Le Swissmetro transportera des passagers à 400 ou 500 km/h dans des véhicules à lévitation et guidage magnétique. Sécurité – Confort – Silence. C'est pour 2015 qu'on prévoit un tronçon pilote. Pour ce faire il faut mieux connaître les phénomènes aérodynamiques, d'où le projet HISTAR. ■

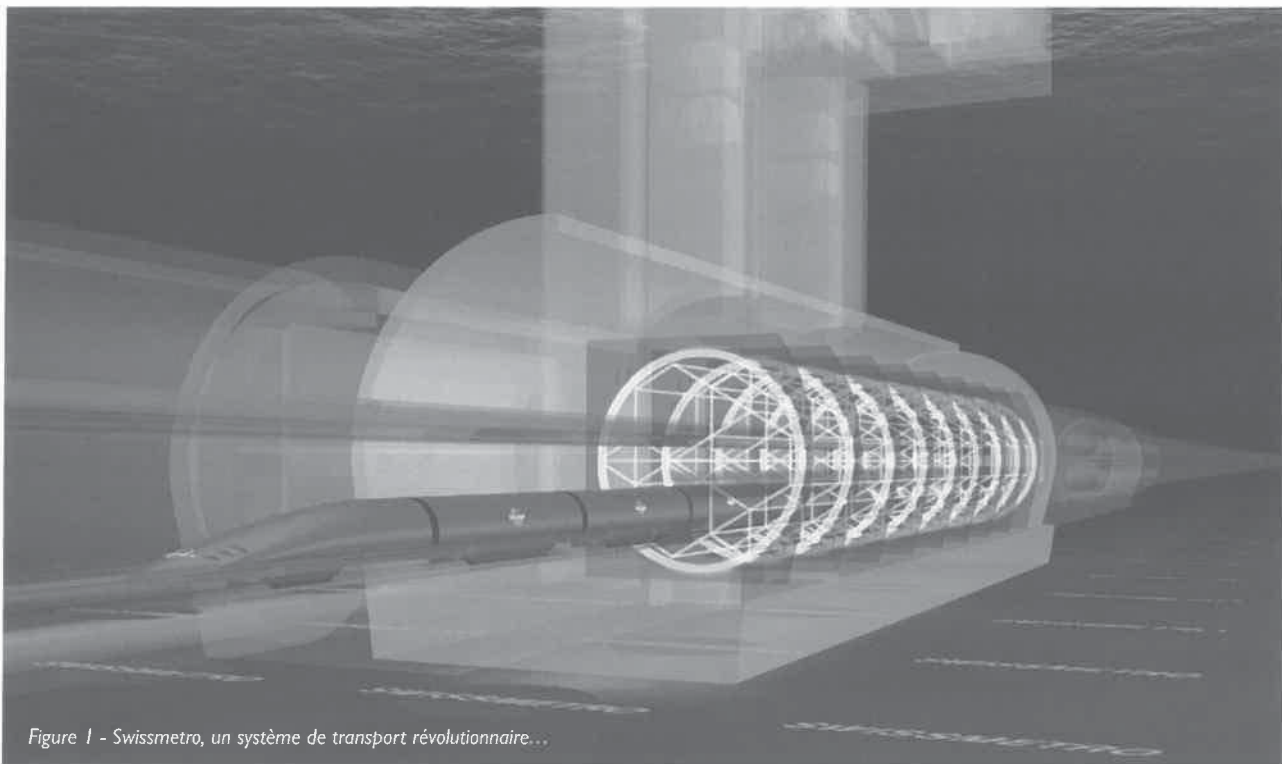


Figure 1 - Swissmetro, un système de transport révolutionnaire...

alignement par écartométrie biaxiale d'une maquette de train à très grande vitesse

PROJET HISTAR

H. Dupraz, W. Coosemans, F. Ossart, V. Bourquin

1. Le projet SWISSMETRO

Un système de transport révolutionnaire à très grande vitesse, capable de transporter des passagers à des vitesses supérieures à 400, voire 500 km/h, est en cours de développement par la société Swissmetro SA. Ce système de transport, appelé Swissmetro, sera constitué de véhicules à lévitation et guidage magnétiques (technologie de type « Maglev »), circulant dans un réseau de galeries souterraines de petit diamètre dans lesquelles, pour réduire la consommation d'énergie, la pression de l'air sera ramenée au dixième de la valeur atmosphérique. Le concept Swissmetro fait actuellement l'objet de nombreuses études tant sur le plan numérique qu'expérimental. La réalisation d'un tronçon-pilote devrait être achevée avant 2015. En Suisse, le réseau à l'étude pourrait relier les principales villes du pays, avec des liaisons internationales vers Lyon, Strasbourg, Francfort, Munich, Milan et Turin. Toutefois, le potentiel de ce système permet d'envisager son application à différentes zones géographiques en Europe et

dans le monde. Ses principales qualités par rapport aux systèmes classiques sont une faible consommation énergétique (même inférieure au TGV de par la diminution de la pression dans le tunnel), l'absence de nuisances (pas de bruit, effets de souffle, etc. en surface), une charge environnementale réduite, une grande flexibilité dans le choix du tracé, un niveau de confort et de sécurité très élevé.

2. Introduction générale au projet HISTAR

La conception et l'optimisation des systèmes de transport terrestre en général, et de Swissmetro en particulier, passe par une amélioration de notre connaissance des phénomènes aérodynamiques et la création de meilleurs outils d'analyse et de prédiction. C'est dans ce cadre qu'est développée l'installation HISTAR (*High Speed Train Aerodynamic Rig*).

Les installations existantes n'ont jamais simultanément la longueur, la vitesse et l'échelle suffisantes pour analyser fine-

ment les effets aérodynamiques des systèmes de transport modernes. HISTAR se révélera donc unique en terme de performances (piste de 250 m de longueur, vitesse de plus de 500 km/h, échelle 1/10, vitesse contrôlable en continu, temps à vitesse maximale constante de plus de 1 seconde, accélération de 20-30 g). Si le projet HISTAR est primordial pour la réalisation de Swiss-metro, l'intérêt d'un tel outil en dehors de Swissmetro est d'autant plus fort que les phénomènes aérodynamiques sont directement impliqués dans bon nombre de nuisances dans les systèmes de transport de surface existants ou futurs (stabilité, bruit, ondes de pression, consommation énergétique, charges sur l'infrastructure).

Dans le cadre du projet Swissmetro, l'accent sera mis prioritairement sur la mesure des forces et des moments agissant sur le véhicule. L'objectif est double: il s'agit d'une part de vérifier les prédictions théoriques et numériques effectuées jusqu'à présent et d'autre part d'optimiser les géométries du tunnel et du véhicule. L'échelle 1/10 et la gamme de vitesses prévue (200-500 + km/h) permettent une parfaite similitude des phénomènes aérodynamiques majeurs entre le système à pleine échelle et le modèle réduit, dans le cas de Swissmetro.

Les autres systèmes de transport terrestre à haute vitesse, en exploitation ou en projet (trains à grande vitesse, maglev), se différencient de Swissmetro par leur géométrie (notamment le système de guidage) et leurs conditions d'exploitation, soit:

- L'occurrence de croisements à l'air libre (nécessite une seconde piste)
- L'entrée en tunnel
- Le passage au travers de tunnels courts
- La circulation en plein air (avec vents traversiers)

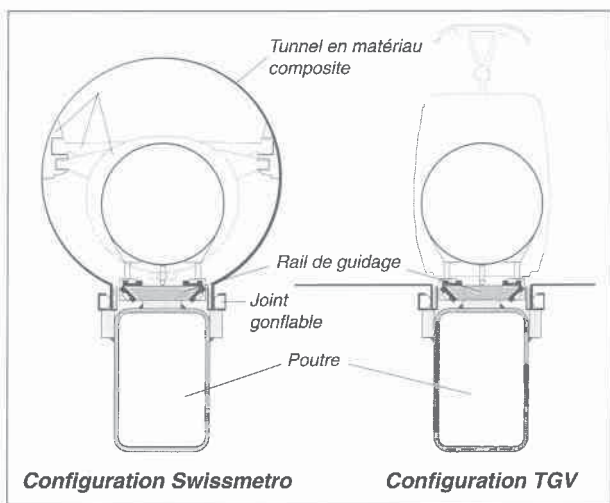


Figure 2 - Le projet HISTAR: à gauche, la configuration Swissmetro, avec le tunnel pour une mise sous vide partiel. À droite, la configuration à l'air libre, de type TGV.

L'installation permettra également de tester d'autres types de véhicules, comme des voitures de compétition, ou d'analyser l'effet de proximité du sol sur un avion ou un composant d'un système.

En outre, il s'agira de la première réalisation d'un modèle complet et fonctionnel de Swissmetro mettant en vitrine le savoir-faire des partenaires du projet.

La phase de conception détaillée et de construction de HISTAR a démarré en juin 1999 dans le cadre d'un projet CTI (Commission fédérale pour la Technologie et l'Innovation) d'une durée totale de 3 ans (1 1/2 année de construction et de mise au point, 1 1/2 année d'exploitation pour les mesures Swissmetro). Le projet s'appuie sur un partenariat entre l'École

Polytechnique Fédérale de Lausanne, la société Swissmetro SA et ses partenaires industriels. L'installation sera construite dans une galerie technique souterraine reliant l'EPFL et l'Université de Lausanne.

3. Les contraintes d'alignement

Le système de guidage prévoit un glissement de patins spéciaux fixés au véhicule sur des rails. Les rails sont soumis à des efforts engendrés par les effets aérodynamiques, par la force de propulsion et par des effets de dynamique. Ces derniers comprennent des efforts latéraux induits à grande vitesse par des défauts d'alignement dus:

- (I) aux déflexions dynamiques liées au mouvement du véhicule
- (II) aux imprécisions liées à l'usinage des rails
- (III) aux défauts de montage
- (IV) à l'effet du poids propre de la poutre porteuse sur la rectitude du rail.

À cela viennent s'ajouter les problèmes de jonctions de poutres et les effets thermiques.

Les accélérations transversales les plus néfastes sont celles provoquées par des défauts d'alignement de courtes longueurs d'onde.

Pour une vitesse donnée et un niveau d'accélération transversale toléré, on peut calculer l'écart d'alignement acceptable, rapporté à sa "longueur d'onde": les écarts maximums tolérés entre la géométrie réelle et la droite idéale ont ainsi été fixés à 0,02 mm sur 1 m, 0,1 mm sur 2 m et 1 mm sur 7 m.

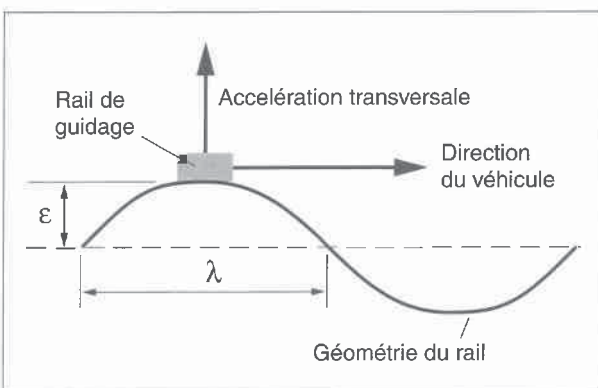
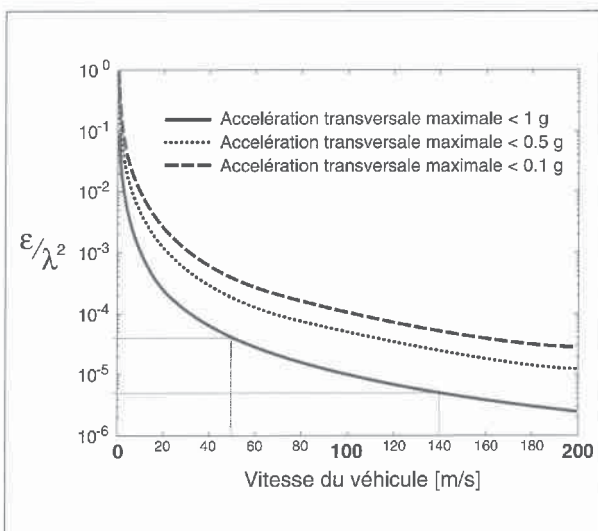


Figure 3 - Les défauts d'alignement tolérables sont une fonction de la vitesse et de l'accélération transversale admissible. Ils sont donc d'autant plus critiques qu'ils sont "à courte longueur d'onde".

4. Évaluation des méthodes d'alignement envisageables

Les manuels et les publications s'accordent sur l'inventaire des méthodes d'alignement pour l'ajustage de machines et de rails de guidage. On peut les classer selon la figure 4.

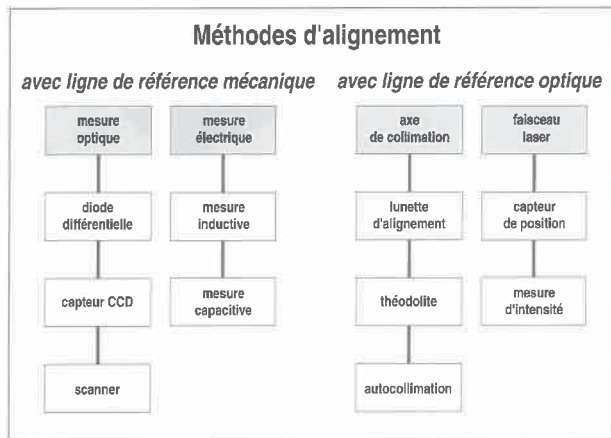


Figure 4 - La classification des méthodes géodésiques d'alignement, selon W. Schwarz, réf. [1]

Dans les méthodes à ligne de référence optique, on peut distinguer les méthodes directes, qui réalisent la ligne de référence avec un faisceau laser, et les méthodes indirectes utilisant une lunette de théodolite par exemple. Dans les deux cas, on retrouve d'abord la nécessité de traiter avec soin les erreurs d'origine instrumentale, telles que les erreurs de collimation, celles dues au déplacement de la lentille de focalisation, ou celles dues aux variations de la forme et de l'intensité du faisceau laser en fonction de l'éloignement, les influences thermiques sur la source, ou encore l'étalonnage des capteurs de position du faisceau.

Dès qu'on exige une grande précision, on se heurte en fin de compte à la principale difficulté, la réfraction, qui courbe plus ou moins la ligne de référence optique en fonction du gradient de l'indice de réfraction n . C'est la composante perpendiculaire à la direction de la visée qui est déterminante pour estimer cette courbure. Même si on supposait que cette composante est constante, il faudrait être capable de mesurer le gradient de température dT/dy avec une précision et une représentativité supérieures à 0.1K/m, pour que l'écart latéral n n'excède pas 1 mm sur 100 m [4], [5]. Cette hypothèse ne serait d'ailleurs que rarement acceptable, car il faut prévoir que le champ de température, donc aussi le champ de l'indice de réfraction, seront beaucoup plus complexes, dans l'espace et dans le temps, surtout pendant les périodes de montage et d'exploitation, à cause de la présence de personnes et de machines constituant autant de sources de chaleur et de déplacement de masses d'air dans la galerie.

Dans les méthodes à référence mécanique, généralement un fil tendu, on doit modéliser avec soin la forme exacte du fil, et tenir compte de son comportement en fonction du vent, de la température, voire de l'humidité. On doit procéder au calibrage exact des capteurs chargés d'observer la position du fil, y compris leur comportement thermique et leur stabilité à long terme. Ces méthodes, si elles exigent généralement de plus grands coûts de mise en œuvre initiale, offrent par contre de grandes possibilités d'automatisation, précieuses lorsqu'il s'agit de garantir un suivi continu ou de procéder à des contrôles d'alignement fréquents, comme ce sera le cas pendant toute la durée de vie de l'installation.

Il faut enfin se souvenir que si lors de la construction le rail à aligner sera accessible, il sera le plus souvent masqué par le tunnel en période d'exploitation, ce qui représente une contrainte supplémentaire importante sur le choix de la méthode d'alignement.

5. La méthode d'alignement retenue

Pour toutes ces raisons, la méthode d'alignement retenue s'inspire largement des développements effectués au CERN pour la construction du CLIC (*Compact Linear Collider Study*). En effet, si le CLIC et le projet HISTAR ne sont comparables ni par leurs dimensions ni par leurs tolérances, ils ont en commun une structure linéaire composée de plusieurs dizaines d'éléments qu'il s'agit d'aligner bout à bout, chaque élément disposant de 6 degrés de liberté.

Le problème ne consiste donc pas seulement à mesurer des écarts par rapport à un alignement idéal, mais encore à les éliminer par des dispositifs de réglage offrant la précision, la rapidité et le confort nécessaires.

La méthode retenue s'appuie sur une technique d'*décartométrie bi axiale* sur fil tendu, le fil étant embarqué sur un *train métrologique* parcourant séquentiellement toute la piste à aligner. Les mesures ainsi collectées sont soumises à un calcul de compensation qui constitue un diagnostic complet d'alignement, diagnostic suivi d'un réglage de toute l'installation d'un seul jet.

6. La structure de la piste Le système de support et de réglage

La piste de 240 mètres sera composée de 40 éléments porteurs de 6 mètres environ, sous la forme de poutres métalliques dont le profil exact reste à définir. Pour chaque élément, on procédera en atelier à une rectification complète des surfaces faisant office de rail par fraisage sur "grosse machine 3D". On prendra garde à ce que chaque élément repose pendant l'opération sur les mêmes trois points d'appui que pour sa mise en place définitive, afin que la déformation due au poids propre soit largement éliminée par l'usinage. Ensuite, l'alignement global consistera à aligner les uns par rapport aux autres ces éléments déjà rectilignes.

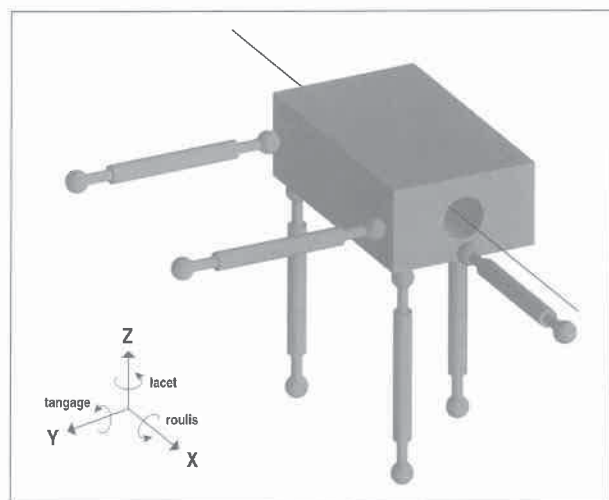


Figure 5 - Le système de support classique à six biellettes selon trois axes orthogonaux, autorisant les 6 degrés de liberté.

De nombreuses variantes d'un système de support à six biellettes peuvent être mises en œuvre pour le positionne-

ment fin de machines, notamment dans le montage d'accélérateurs de particules. L'idée de base est très simple: la position d'un objet rigide dans l'espace est définie par 6 degrés de liberté (trois translations X-Y-Z, et trois rotations: roulis, tangage et lacet). Un système de support composé de 6 biellettes réglables judicieusement disposées offre exactement ces 6 degrés de liberté, sans jeu ni contrainte additionnelle sur l'objet. Dans le cas le plus simple, les 6 biellettes sont disposées selon des directions orthogonales, comme sur la figure 5.

Pour différentes raisons, notamment d'encombrement et d'accessibilité, nous avons choisi une disposition un peu différente: la figure montre qu'un élément porteur est lié au sol, à une extrémité, par l'intermédiaire de 4 biellettes principales, capables de lui imprimer des translations absolues X, Y et Z, ainsi qu'une rotation autour de l'axe longitudinal X. À l'autre extrémité, il repose par l'intermédiaire de deux biellettes secondaires directement sur l'élément adjacent. La disposition orthogonale de ces deux biellettes ne permet d'introduire que des translations relatives dY et dZ entre les deux éléments, sans détruire les réglages déjà effectués grâce aux 4 biellettes principales.

Cette disposition ne réduit pas le nombre total de biellettes, mais facilite le réglage.

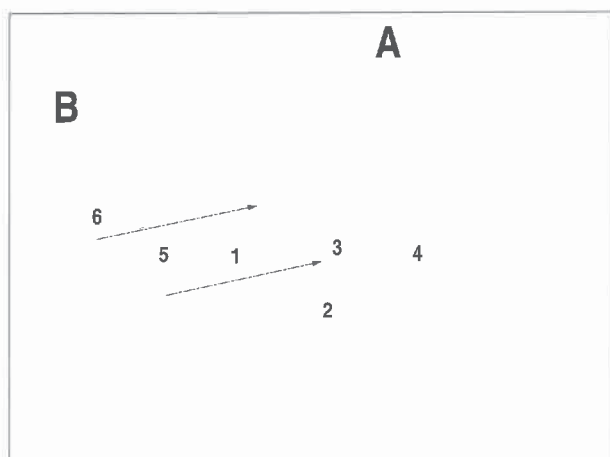


Figure 6 - Le système de support modifié. Les biellettes 1 à 4 sont dites absolues et règlent la poutre A par rapport au sol. Les biellettes verticales 1 et 2 règlent la hauteur (translation Z) et la rotation autour de l'axe X (roulis). La biellette 3 règle la position latérale (translation Y) et la biellette 4 règle la position longitudinale (translation X). Les biellettes 5 et 6 sont dites relatives et règlent l'extrémité de la poutre B par rapport à la poutre A, en translation relative seulement, c'est-à-dire les rotations de la poutre B autour de l'axe Y (tangage) et autour de l'axe Z (lacet).

7. Le principe de l'écartométrie bi axiale

L'écartomètre WPS2 développé par la société Fogale Nanotech mesure par procédé capacitif et sans contact la position, selon deux axes, d'un fil tendu, avec une résolution de 1 μm pour une course de 10 mm (voir fig. 7).

Un ensemble de 3 capteurs traversés par un fil tendu permet de mesurer la position de chaque capteur par rapport au fil. On peut en déduire le défaut d'alignement d'un des capteurs par rapport aux deux autres, selon les deux composantes Y et Z. Ces deux composantes, constituent 2 "observations", au même titre des observations de distances, de directions ou de différences de niveau dans un logiciel de calcul de réseaux géodésiques (voir fig. 8).

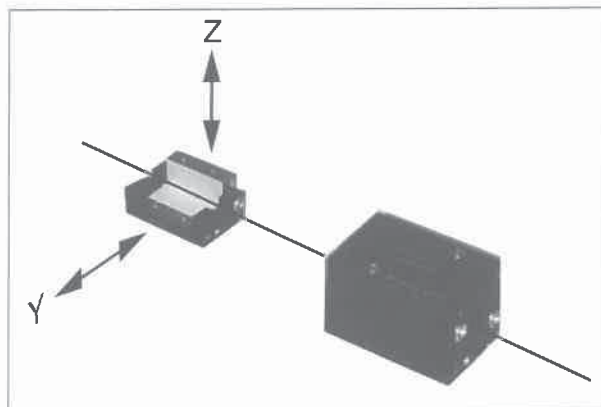


Figure 7 - L'écartomètre à deux axes WPS2 de la Société Fogale Nanotech mesure sa position par rapport à un fil tendu, par procédé capacitif, sans contact, avec une précision de l'ordre de 1 μm .

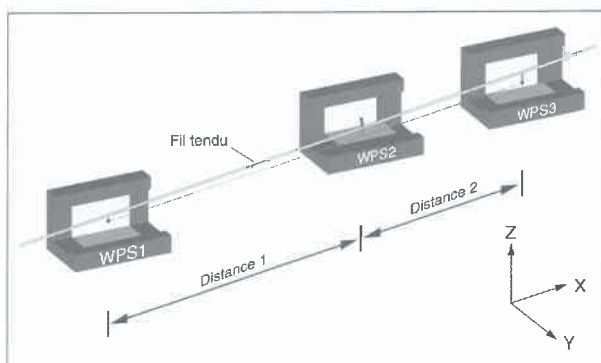


Figure 8 - Le principe de l'alignement par écartométrie bi axiale. De la mesure de la position de 3 capteurs par rapport à un fil tendu, on peut déduire le défaut d'alignement de l'un des capteurs par rapport aux deux autres.

Sur un ensemble de p points à aligner dans l'espace, deux points peuvent être choisis arbitrairement pour fixer l'alignement théorique, et il reste (p-2) points dont la position XYZ est inconnue. La direction longitudinale X n'étant pas critique, des valeurs des coordonnées X peuvent être admises comme constantes, et il reste (p-2)*2 coordonnées Y et Z constituant des paramètres inconnus.

Dans le cas d'un rail de 240 mètres matérialisé par p = 121 points équidistants de 2 mètres, on a $(121-2)*2 = 238$ coordonnées inconnues. Un train métrologique de 4 capteurs respectant la même équidistance pourra occuper séquentiellement $m = (p-n + 1) = 118$ positions de mesure, et générer $m*4 = 472$ observations. On disposera donc de $472 - 238 = 234$ observations surabondantes. La compensation par la méthode des moindres carrés fournira un diagnostic complet de l'alignement des 121 points, sous la forme de leurs coordonnées compensées. Si l'axe X, axe d'alignement, est strictement défini par deux des 121 points, les coordonnées compensées Y et Z des 119 autres expriment directement leur défaut d'alignement.

8. Le train métrologique

Le train métrologique est composé de 5 wagons reliés par des tringles rigides montées sur des rotules, de telle sorte que les wagons puissent épouser la forme exacte du rail. Chaque wagon porte un capteur d'alignement (voir fig. 9); tous les capteurs sont traversés sans contact par un fil fixé aux extrémités du train et tendu par un enrouleur spécial. La forme du fil tendu est modélisée et sert de référence métrologique mobile.

Quatre des wagons sont espacés de 2 mètres et sont ainsi distribués sur une distance de 6 mètres, ce qui permet de vérifier la linéarité d'un élément porteur pour lui-même. Le cinquième wagon, situé à 20 cm du quatrième, se trouve ainsi déjà sur l'élément suivant, ce qui permet un diagnostic sur l'alignement relatif des deux éléments adjacents.

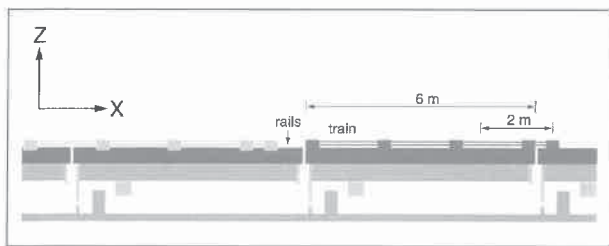


Figure 9 - Le train métrologique est composé de 5 wagons, reliés à distances fixes par un système de rotules. Les capteurs d'écartométrie sont embarqués sur les wagons et traversés par un même fil tendu servant de ligne de référence mobile.

En outre, deux inclinomètres embarqués renseignent de manière contrôlée sur le défaut d'horizontalité transversale de chaque élément (voir figure 10).

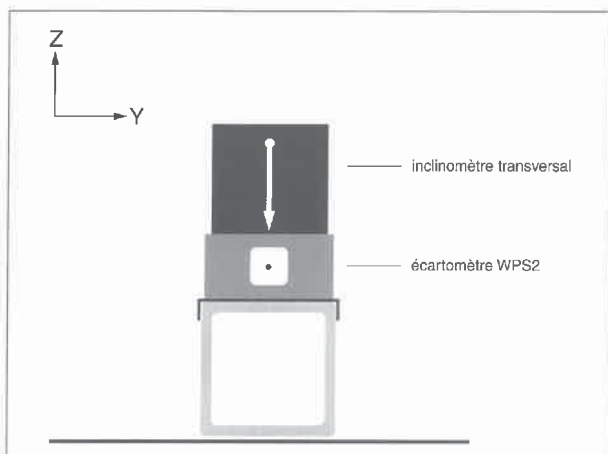


Figure 10 - Les 5 wagons embarquent chacun un écartomètre WPS2. Deux d'entre eux embarquent en plus un inclinomètre pour le contrôle de l'inclinaison transversale des rails de guidage.

Après un passage séquentiel complet du train, et connaissant la géométrie de l'installation – rail et système de support – on pourra déduire de ces défauts d'alignement issus de la compensation des observations la correction à apporter à chacune des 240 biellettes de réglage.

L'ensemble de ces réglages pourra ensuite être réalisé d'une seule traite. Le cas échéant, un nouveau passage séquentiel du train métrologique, suivi d'un calcul de compensation, permettra de contrôler la qualité du nouvel alignement.

9. État du développement et perspectives

- Un prototype simplifié de train métrologique comportant 4 capteurs distants de 18 cm et de deux éléments porteurs de 1 m a permis de valider le principe retenu, et de montrer une excellente répétabilité des mesures.

- Par simulation numérique, on a généré aléatoirement plus de cent jeux d'observations, correspondant à une installation de 240 mètres et un train métrologique de 4 écartomètres, avec un écart type de 0,01 mm pour les mesures d'écartomé-

trie. La compensation de ces pseudo-observations montre que les 100 trajectoires résultantes sont lisses et toujours comprises dans une enveloppe de 3 mm autour d'un alignement théorique fixé par les deux points extrêmes de la piste (voir figure 11). Le contrôle d'alignement sur des distances inférieures à 6 mètres est directement garanti par le fait que le fil tendu mesure 6 mètres, et que la précision des écartomètres est supérieure aux tolérances requises.

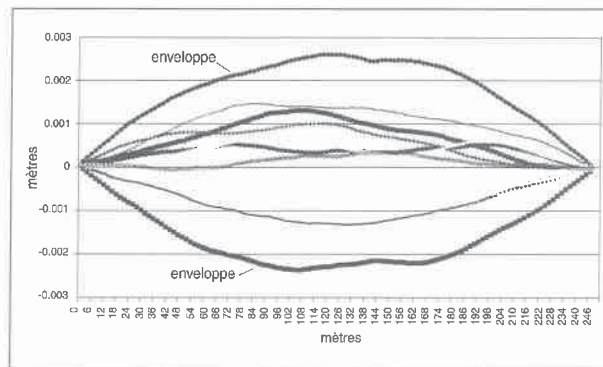


Figure 11 - Simulation de 100 diagnostics d'alignement. Les deux courbes extérieures constituent une enveloppe des 100 simulations. La figure montre en outre 11 simulations prises au hasard. Le rail ne s'écarte jamais de plus de 3 mm sur 240 mètres.

- Le montage d'un banc de 3 éléments de 6 mètres et du système de propulsion, et la réalisation du train métrologique, sont prévus pour ce printemps. Ils permettront de valider "en vraie grandeur" le système d'usinage des rails, le système de mesure et de réglage de l'alignement.
- Le montage de l'installation HISTAR complète devrait débuter en été 2000.

10. Bibliographie

- [1] W. Schwarz, hrsg - Vermessungsverfahren im Maschinen und Anlagenbau Wittwer 1995.
- [2] W. Coosemans, H. Mainaud - Métrologie linéaire: écartométrie axiale et fil tendu - CERN CLIC-Note No 316, septembre 1996.
- [3] H. Mainaud - Une nouvelle approche métrologique: l'écartométrie bi axiale. Application à l'alignement des accélérateurs linéaires. Thèse de doctorat - ENSAIS - Strasbourg 1996.
- [4] W. Thur et al. - Rigid, adjustable support of aligned elements via six struts. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1997.
- [5] M. Hennes, R. Dönicke, H.-P. Christ - Zur Bestimmung der temperaturgradienteninduzierten Richtungsver-schwenkung beim Tunnelvortrieb. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 8/99.
- [6] V. Bourquin - Reduced-scale aerodynamic testing of high-speed vehicles in tunnels. PhD Thesis n° 1973, Lausanne 1999.
- [7] H. Dupraz, W. Coosemans et al. - High-precision alignment for the HISTAR project, dans Ingenieurvermessung 2000/K. Schnädelbach, hg. XIII. Int. Course on Engineering Surveying - Verlag K. Wittwer Stuttgart 2000.
- [8] Ph. Pot, Y. Trottet - Rapport final de l'étude principale Swissmetro. Genève, 1999.

Pour davantage de renseignements sur le projet Swissmetro, il est possible de consulter le site <http://www.swissmetro.ch>

11. Adresses

Hubert Dupraz
Institut de géomatique
École Polytechnique fédérale
CH-1015 Lausanne Suisse
E-mail: hubert.dupraz@epfl.ch

William Coosemans
CERN/Métrologie de positionnement
CH 1211 Genève 23 Suisse
E-mail: William.Coosemans@cern.ch

Frédéric Ossart
Société FOGALE Nanotech
F-30035 Nîmes France
E-mail: info@fogale.fr

Vincent Bourquin
Institut de machines hydrauliques
et de mécanique des fluides
École Polytechnique fédérale
CH-1015 Lausanne Suisse
E-mail: Vincent.Bourquin@epfl.ch