

# PROJET ALPTRANSIT :

## instrumentation et essais in-situ pour deux tunnels de base en contexte alpin

**SOLEXPERTS**

Swiss Precision Geomonitoring

**Dr. Thut**  
Solexperts AG

**Mr Piedevache**  
Solexperts France

**Mr Prouvot**  
Solexperts AG

► **PROJET ALPTRANSIT** : instrumentation et essais in-situ pour deux tunnels de base en contexte alpin

Le projet Alptransit comprend la réalisation des deux tunnels de base du Saint Gothard et du Lötschberg, longs respectivement de 56,8 et 34,6 km, qui relieront Zurich et Berne à Milan. Les deux tunnels comprennent chacun deux galeries à voie unique distantes de 40 mètres. La géologie des tracés est généralement favorable mais quelques difficultés locales ont conduit à procéder à un suivi de mesures décrites par les auteurs : convergence et mesures de contraintes transmises à deux centres d'acquisition pour le St Gothard ; mesures de mouvements en surface, extrusion de sol, débits et pression des arrivées d'eau sur le Lötschberg. Dans certaines zones de fortes convergences, des essais spécifiques ont été réalisés tels que les cintres coulissants sur le St Gothard et les éléments HDC sur le Lötschberg. Les auteurs concluent en insistant sur l'importance des reconnaissances et de l'instrumentation dans les zones présentant des risques liés à la qualité médiocre des terrains et mettent l'accent sur l'évolution des instruments de mesure qui résulte du traitement de telles situations.

► **ALPTRANSIT** : instrumentation and in situ tests for two base tunnels in Alpine environment  
The Alptransit scheme includes the Saint Gothard and the Lötschberg base tunnels, respectively 56.8 and 34.6 km long, linking Zurich and Bern to Milano. Both tunnels include two one-way galleries, 40m apart each other. The geology is generally favourable but a few difficult areas have been encountered, leading to several measurements herein described : convergence and stress values transmitted to two acquisition centers for the St Gothard tunnel, surface movements, soil extrusion, water ingress and pressure value for the Lötschberg tunnel. In high convergence zones, specific tests were carried out such as sliding rings for the St Gothard and HDC (High Deformable Concrete) elements for the Lötschberg. The authors conclude by pointing out the particular attention to be given to investigation and instrumentation in the areas presenting risks due to the poor quality of rock and point out the evolution of instruments resulting from dealing with such situations.

### 1 - INTRODUCTION

#### 1.1 - Projet Alptransit : tunnels de base

Dans le cadre de la mise en œuvre du réseau ferroviaire européen à grande vitesse pour les passagers et du développement du transport fret, la Suisse réalise actuellement le percement de deux tunnels de base alpins. Les tunnels de base du Saint-Gothard et du Lötschberg permettront de relier Zurich et Berne à Milan et de désenclaver ainsi l'Italie vis-à-vis de l'Europe septentrionale.

Les conditions géologiques complexes et un contexte géotechnique difficile dû au fort recouvrement, ont nécessité une attention particulière lors du creusement.

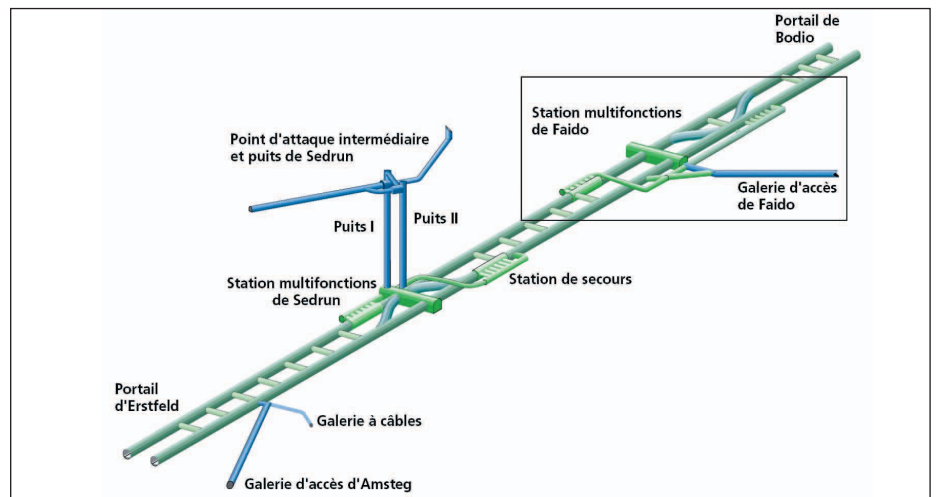
#### 1.1.1 - Tunnel de base du Saint-Gothard

Le tunnel de base du Saint-Gothard, long de 56.8 km, comprend deux galeries à voie unique, distantes l'une de l'autre de 40 m, reliées entre elles tous les 325 m par des rameaux de communication.

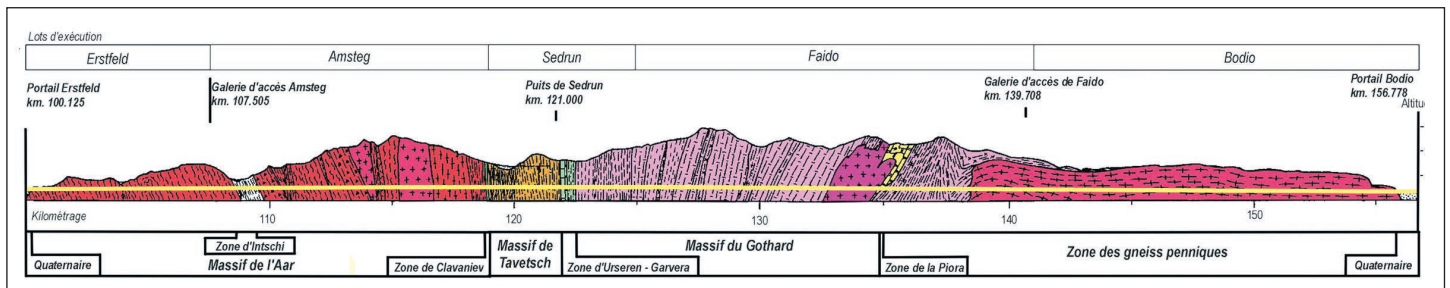
Trois points d'attaque intermédiaire ont été réalisés pour faciliter la construction. A Sedrun, un puits d'accès a été creusé à l'emplacement de la station multifonction n°1. A Faido, une galerie d'accès d'une longueur de 2.7 km et d'inclinaison 12.7 % permet d'atteindre la station multifonction n° 2. Le point d'attaque d'Amsteg est situé quant à lui au nord, sous la forme d'une galerie d'accès horizontale.

Cinq tronçons de creusement sont effectués :

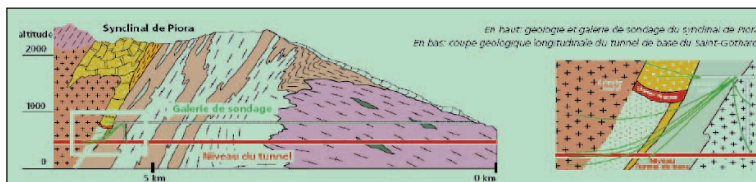
- Erstfeld, au nord, réalisé dans une fouille à ciel ouvert au niveau initial, doit être excavé par tunnelier (marché non attribué à ce jour suite à un recours sur le lot 151).
- Amsteg, depuis une galerie creusée à l'explosif, des tunneliers progressant vers Sedrun. 800 m restant environ à ce jour.
- L'accès au tronçon Sedrun est rendu possible au moyen d'une galerie d'accès de 1 km de longueur, reliée à deux puits de 835 m de profondeur. Excavation à l'explosif vers Amsteg (80 %) et Faido (40 %), station multifonctions achevée..



Représentation schématique du système à deux galeries



Profil géologique en long du tunnel du St-Gothard (Alptransit Gothard, 2005)



Géologie et galerie de sondage du synclinal de Piora (Alptransit Gothard, 2005)

- Le tronçon de Bodio est réalisé à ciel ouvert, puis par attaque ponctuelle dans les éboulis de pente, et enfin au tunnelier dans la roche granitique.
- La station multifonction de Faïdo est creusée à l'explosif, puis deux tunneliers y sont amenés depuis Bodio. Le creusement vers Sedrun est dès lors effectué avec les deux tunneliers (320 m réalisés).

La géologie rencontrée sur le tracé est caractéristique des massifs de l'Aar et du Saint-Gothard, à savoir un ensemble de gneiss et de granite. Cependant, l'orogénèse alpine à l'ère tertiaire a intégré des intercalaires sédimentaires et provoqué des fracturations nombreuses et une forte hétérogénéité des formations, nécessitant des reconnaissances préalables. Des forages réalisés à partir d'une galerie pilote d'une longueur de 5.5 km ont permis d'éclaircir les zones complexes du synclinal de Piora. Les résultats ont révélé que les circulations d'eau étaient absentes à cette profondeur. A l'opposé, le massif intermédiaire du Tavetsch, sous-jacent au village de Sedrun, est la partie la plus défavorable, car elle présente des gneiss sous forte contrainte et comporte des hautes pressions. (voir schémas ci-dessus)

## 1.1.2 - Tunnel de base du Lötschberg

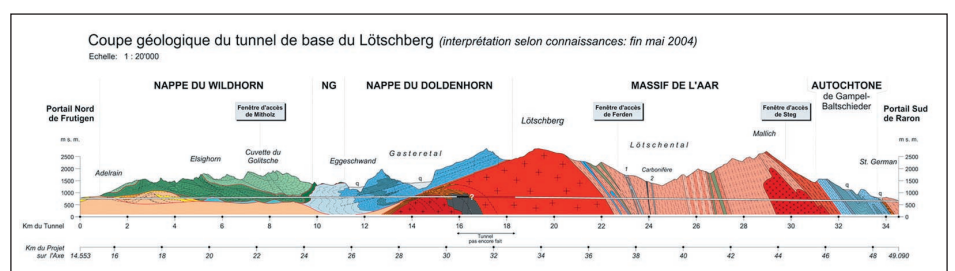
Le tunnel, d'une longueur de 34.6 km, est composé de deux galeries à voie unique, séparées de 40 m entre elles, reliées entre elles tous les 333 m par des rameaux de communication.

Cinq points d'attaque, dont trois intermédiaires, ont permis d'obtenir des tronçons ne dépassant pas 10 kilomètres. Les portails sont situés à Frutigen (Canton de Berne) et Raron (Canton du Valais). Le portail nord à Frutigen comporte en outre une tranchée couverte.

Les fenêtres d'accès intermédiaires de Mitholz, Ferden et Steg sont des tunnels longs de 1.5 à 4.5 km et constituent des voies de garage et de secours.



Tracé du tunnel du Lötschberg (BLS Alptransit, 2003)



Profil géologique en long du tunnel du Lötschberg (BLS Alptransit, 2003)

La géologie rencontrée sur le tracé est assez favorable ; les zones plus difficiles ont été reconnues à l'aide de 2 forages profonds (longueur de 1400 m) ainsi que par des sondages plus courts à partir de la galerie de reconnaissance de Frutigen (longueur 9.4 km) et des tunnels routiers et hydroélectriques existants. Trois zones difficiles ont été reconnues d'après la géologie :

Le trias au niveau du portail sud (sous le village de St. Geman), le cône de la Vierge (Jungfrau keil) aux alentours de Ferden, et la nappe calcaire allochtone du Doldenhorn au sud de Mitholz.

80 % de l'excavation est réalisée à l'explosif et 20 % au tunnelier.

## 2 - SÉCURITÉ DES OUVRAGES

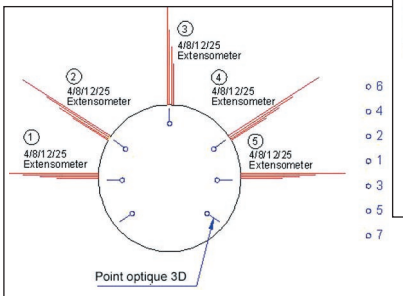
### 2.1 - Suivi de la stabilité des ouvrages souterrains

#### 2.1.1 - Mesures de convergence : St-Gothard

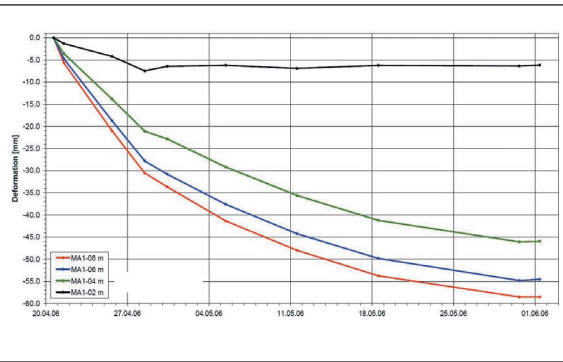
Neuf sections de mesure sont réparties sur la zone de Sedrun en fonction des profils géologiques rencontrés. Chaque section comprend des mesures de déformations radiales du massif grâce à trois ou cinq extensomètres 4 tiges de longueur 25 m (convergence absolue), complétées par des mesures de convergence relatives par théodolite manuel. Ces extensomètres sont conçus pour être complètement installés dans le forage avec un logger à mémoire intégré avec transmission radio afin de pouvoir être mis en œuvre au plus près du front, même dans le cas d'utilisation d'explosifs.

# Projet AlpTransit : instrumentation et essais in-situ pour deux tunnels de base en contexte alpin

Les déformations sont comprises entre 2 et 180 mm (inférieures au seuil d'alerte), ce qui correspond aux prévisions.



Exemple de section de mesure en tunnel (Transco Sedrun, 2004)



Résultat de l'ancrage de mesure MAI dans la section EST-NW-1598 (Solexperts, 2003)

En cas d'arrêt prolongé de l'avancement vers le nord, la stabilité du front de taille est surveillée en continu par un théodolite automatisé.

## 2.1.2 - Mesures de contraintes

Les mesures de déformation sont complétées par des mesures des contraintes dans le soutènement.

L'instrumentation des boulons au moyen d'ancrages de mesure permet de donner le déplacement par rapport à la tête de forage en quatre points répartis sur la longueur du boulon. On peut ainsi calculer l'évolution de la tension normale et ensuite optimiser le positionnement et la longueur des ancres. Cet instrument a été utilisé pour des mesures dans la calotte au niveau des stations multifonctions de Faido et de Sedrun dans le tunnel de base du St.-Gothard.

Dans le tunnel de base du Lötschberg, les mesures des contraintes sur les cintres de

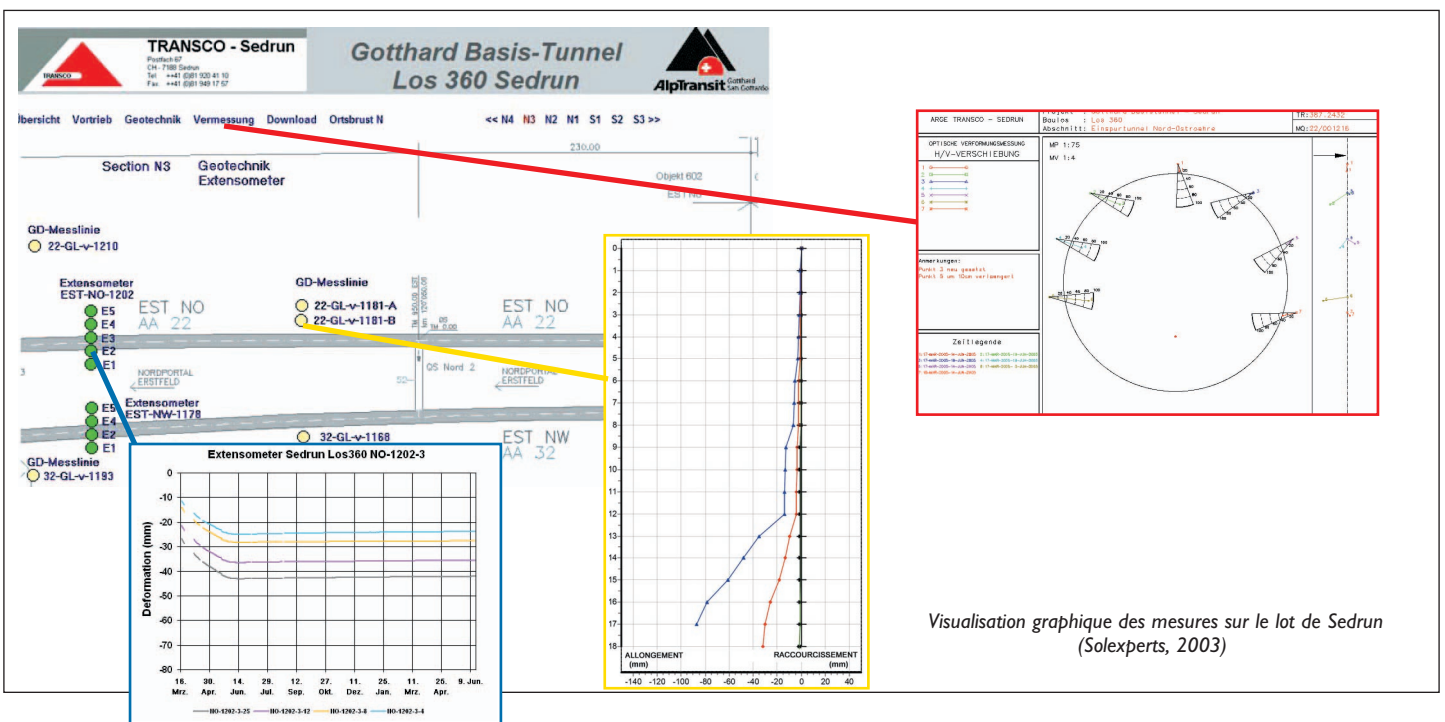
soutènement, dans le béton projeté et dans l'anneau béton sont réalisées soit à l'aide d'extensomètres à cordes vibrantes, dont sont déduites les contraintes dans la structure, soit avec des cellules de pression totale. La mise en œuvre des cellules de pression totale nécessite de soigner le remplissage de béton projeté, afin que la cellule soit parfaitement enrobée par le matériau.



Cellules de pression tangentielle sur le ferrillage (Solexperts, 2005)

## 2.1.3 - Visualisation des données, St.-Gothard

L'ensemble des capteurs est relié à deux centrales d'acquisition de données GeoMonitor, une pour chaque front d'attaque sud et nord. Le système modulaire est adapté aux conditions du chantier, avec par exemple l'utilisation de loggers à mémoire dans les zones d'excavation à l'explosif, qui sont câblés après éloignement du front. Toutes les mesures automatiques ainsi que les mesures manuelles sont intégrées dans une base de données gérée par le logiciel de visualisation Web-Davis. Les différents intervenants (Maître d'ouvrage, Maître d'œuvre, entreprises, bureaux experts) ont accès aux données via un site internet sécurisé, où ils peuvent consulter et télécharger les données de manière simple et rapide. Les différents prestataires de mesure (topographes...) peuvent également intégrer leurs mesures à cette base de données au travers d'un site de transfert FTP dédié. Diverses informations relatives au chantier sont visualisables sur cette base de données : rapport journalier d'activités, avancement, procédures d'alarme.



Visualisation graphique des mesures sur le lot de Sedrun (Solexperts, 2003)

## 2.2 - Suivi des ouvrages de surface à Frutigen, Lötschberg

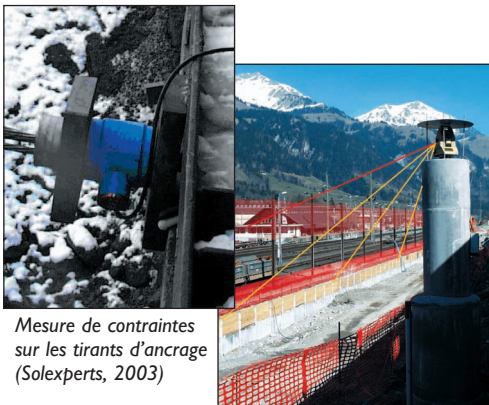
Les deux tubes de la tête nord du tunnel du Lötschberg sont prolongés par une fouille de 2.5 km de long, parallèle à la gare et à la voie ferrée de Frutigen. Une paroi berlinoise et une paroi clouée retiennent les terrains de structure grossière avec des lentilles de sable. Le niveau de la nappe se situe à peu près au niveau du fond de fouille.



Fouille de Frutigen en construction (Solexperts, 2003)

La circulation des trains étant maintenue, les conditions de sécurité imposent un suivi en continu des parois de la fouille et de la voie ferrée.

La stabilité de la fouille est contrôlée par des mesures optiques automatisées avec cinq théodolites fonctionnant simultanément. Ces mesures de déformation sont complétées par des mesures manuelles d'inclinomètre et de déformètre de forage en paroi. L'effort sur les tirants d'ancrage est contrôlé à l'aide de cellules de charge et d'extensomètres à simple tige placés le long des ancrages.



Mesure de contraintes sur les tirants d'ancrage (Solexperts, 2003)

Mesures au théodolite sur la fouille

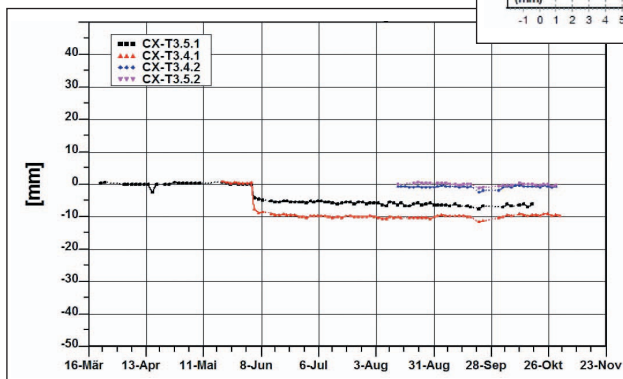
Les voies ferrées attenantes à la fouille sont instrumentées avec un système de mesure spécifique développé pour suivre les variations d'inclinaison. Les capteurs utilisés, d'une précision de 0.01 mm/m sont conçus pour des conditions difficiles en termes d'amplitude thermique et d'effets dynamiques dus au passage des trains. Les variations d'inclinaison latérale des voies sont contrôlées sur quatre sections avec chacune 2 capteurs montés sur les traverses en bois.



Capteur inclinométrique sur une traverse (Solexperts, 2003)

Le système GeoMonitor assure l'acquisition des données de tous les capteurs, et l'ensemble des calculs de mise en forme des mesures optiques par théodolites. La précision, la simplicité du système et les seuils d'alarme associés au dispositif permettent d'analyser efficacement les effets de l'excavation et de prendre rapidement des mesures correctives.

Cet effet un plan d'action (PQM) a été mis en place, définissant par exemple une limite de déplacement de 10 mm/24 h pour la paroi berlinoise. En cas de dépassement, l'alarme programmée sur le système de surveillance envoie un fax et un SMS, permettant aux responsables de comparer les valeurs de tous les instruments voisins, et d'appliquer les mesures correctives nécessaires. Le chantier n'a pas présenté de problèmes à ce niveau, la valeur maximale de déplacement atteinte par la paroi ayant été de 15mm vers la fouille sur quelques semaines.



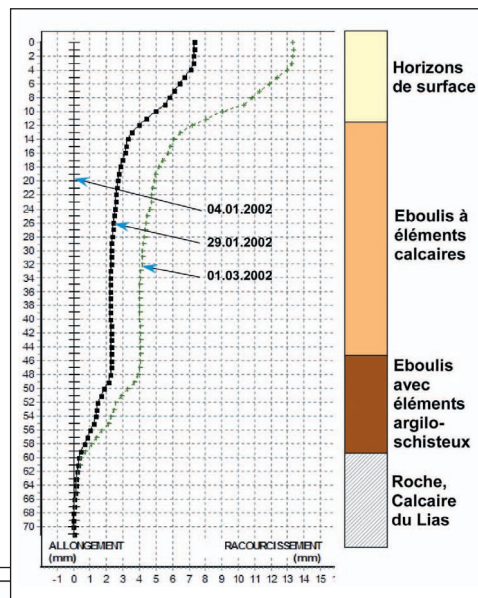
Visualisation des déformations verticales et mise en relation avec la géologie (P. Teuscher, BLS Alptransit, 2002)

Courbe temporelle des déformations en 4 points de mesure optiques (Solexperts, 2003)

## 2.3 - Suivi des ouvrages de surface à St German, Lötschberg

Dans la zone du portail de Raron, sous-jacente au village de St German, le tunnel de base passe à une profondeur de 80 à 100 m dans des roches fortement perméables (calcaires du Lias). Un débit d'eau de 40 à 90 l/s a été rencontré lors du passage du tunnelier, provoquant l'abaissement de la nappe phréatique sous le village et des tassements proches de 20 cm, qui se sont ralentis après 6 mois. Quarante bâtiments de la commune ont ainsi été endommagés. Deux forages ont alors été équipés avec des tubes TRIVEC afin de mesurer les déplacements verticaux et horizontaux et de caractériser les zones de tassement.

Il apparut dès la troisième mesure que les 13 m en surface (humus) avaient subi des tassements. Cependant, et contre toute prévision, la partie inférieure des éboulis surmontant le Lias avait également présenté des mouvements. L'étude géologique détaillée des matériaux a montré que les blocs formant l'horizon inférieur sont en effet enrobés de sédiments qui se sont rétractés avec la vidange provoquée par le percement du tunnel.



# Projet AlpTransit : instrumentation et essais in-situ pour deux tunnels de base en contexte alpin

Les études ont donné une suite favorable aux habitants de St Germain qui se sont vus indemnisés par le Groupement d'Entreprise du Lötschberg.

## 3 - MESURES À L'AVANCEMENT

### 3.1 - Mesures d'extrusion, St.-Gothard

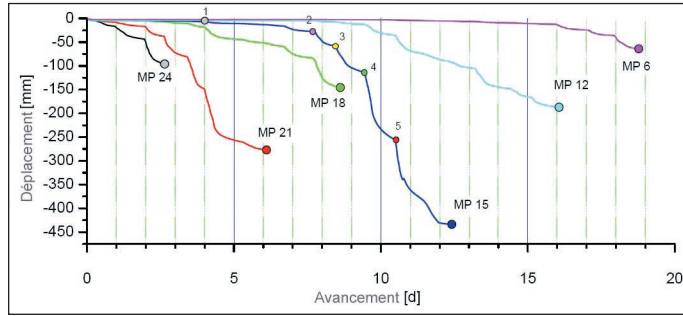
L'analyse des déformations du noyau en réponse à l'excavation d'un tunnel est indispensable pour l'organisation et l'ajustement du soutènement, permettant d'assurer une construction sûre et économique. L'extrusion du noyau d'avancement sur le front du tunnel est mesurée en pratique grâce au déformètre de forage. Ces mesures, efficaces dans les massifs "classiques", ont posé plusieurs difficultés dans le cadre du tunnel du St.-Gothard, du fait de la forte convergence et des hautes pressions du terrain. Le tube de mesure, en HPVC, puis en acier renforcé, ne résistait pas aux fortes pressions et aux déformations à l'avancement.



Extrusion du massif après excavation dans le St.-Gothard (Solexperts, 2006)

Un nouveau type d'instrument, le RH-Extensometer (Reverse Head), a été développé et breveté pour mesurer l'extrusion à l'avancement dans les massifs à grande convergence afin d'estimer l'extrusion, puis le maillage d'ancrages nécessaires dans le front de taille.

La tête de mesure avec logger à mémoire intégré est placée en fond de forage, et mesure en continu les déplacements de 6 ancres réparties dans le forage. Dans le cas présent, un dispositif de 30 m à 6 ancres a été utilisé. L'excavation provoque le déplacement des ancres par rapport à la tête de mesure ultra-renforcée et fixe placée au fond du forage. Les ancres sont détruites au passage du front. Les données sont relevées soit pendant, soit à la fin de l'excavation après récupération de la tête de mesure.



Courbe d'extrusion temporelle du RH-Extensometer (Solexperts, 2006)

En comparaison avec le déformètre de forage, les déformations sont enregistrées en continu sur des positions d'ancrages déterminées, et la gamme de mesure est bien supérieure en amplitude (jusqu'à 500 mm). La répartition des ancres dans le front d'excavation ainsi que dans le soutènement a ainsi pu être adaptée par l'entreprise en fonction des déplacements attendus.

### 3.2 - Mesures des débits et pressions d'eau en zones fracturées, Lötschberg

Les reconnaissances préalables avaient montré l'existence de zones à risque avec des karsts présentant de très fortes pressions hydrostatiques et des débits de fracture importants dans la nappe calcaire allochtone du Doldenhorn au sud de Mitholz. Pour assurer la sécurité de l'ouvrage et des personnes, et pour prévoir au plus tôt les traitements à mettre en œuvre, une reconnaissance systématique à l'avancement par forages horizontaux longs a été préconisée.

Une première phase de reconnaissance a été conduite avec un forage horizontal de plus de 500 m de long, parallèle au tunnel et réalisé depuis une niche d'essais. La suite de la reconnaissance s'est faite directement en front de taille par deux forages horizontaux parallèles de plus de 300 m de long, avec un recouvrement de 50 m entre forages successifs. Un relevé géologique, des essais radar (par G-tec SA) et des tests hydrauliques sont conduits dès la fin des forages ou lors de venues d'eau importantes.

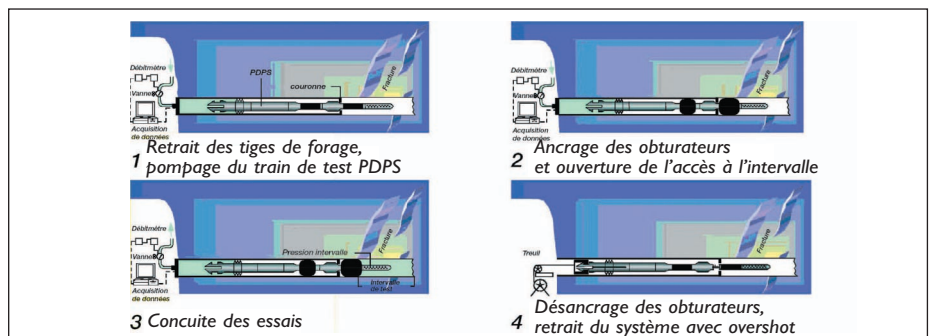
Après retrait du train de tige uniquement sur la longueur de la chambre de test souhaitée (environ 50 m), un système à obturateur



Foration par la société Morisette en front de taille, une des 2 foreuses visible sur le cliché (Solexperts, 2003)

(PDPS) est pompé et ancré au travers du train de tiges. Après ancrage des obturateurs, le premier dans le massif définissant une chambre de test en fond de forage, et le second dans les tiges pour utiliser celles-ci comme lignes hydrauliques, des tests sont conduits, en général en production. La transmissivité, la pression de formation, les caractéristiques de la fissuration et les débits libres sont déterminés après interprétation en temps réel sur site.

En fin de test, le système est retiré avec l'overshot de carottier et la foration peut reprendre aussitôt. La réalisation des mesures, à plus de 50 m du front de taille, supprime l'influence de l'excavation du tunnel sur les mesures de pression et permet de tester uniquement la zone fracturée voulue. Le train de tige reste dans le forage, ce qui assure la stabilité du trou, le BOP reste en fonctionnement pour la sécurité du personnel (jusqu'à 75 bar de pression), et la mise en œuvre rapide (5 heures par test) bloque relativement peu le chantier.



# Projet AlpTransit : instrumentation et essais in-situ pour deux tunnels de base en contexte alpin

15 essais dans 13 forages ont été effectués, avec des transmissivités mesurées jusqu'à  $5.10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s et des débits libres au maximum de 1500 l/min dans les tiges de forage (Ø77.8 mm).

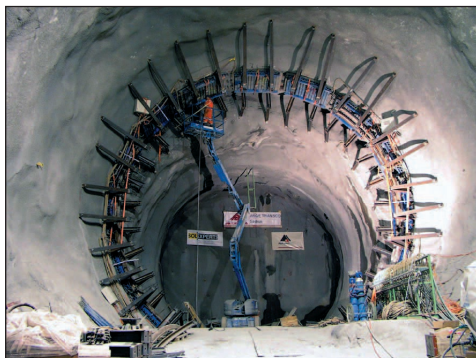
Ces résultats de tests ont conduit au traitement préventif de plus de 3 zones, ce qui a évité tout arrêt de chantier et permis de traverser sans problèmes majeurs cette partie difficile.

## 4 - ZONES À FORTE CONVERGENCE

### 4.1 - Essais sur cintres coulissants, St.-Gothard

Au niveau de la station de Sedrun (Saint-Gothard), dans le massif intermédiaire du Tavetsch, on prévoit un soutènement avec des cintres coulissants, qui permettent une réduction du diamètre du tunnel jusqu'à 1,4 m de sa valeur nominale, et qui se comportent ensuite comme des cintres ordinaires. Pour tester le comportement en déformation et en portance de ces nouveaux cintres, une série d'essais a été élaborée avec le Prof. Dr. K. Kovári et réalisée en collaboration avec le groupement Transco Sedrun. Au moyen de coussins gonflables en gomme renforcée, la pression du massif est simulée jusqu'à 300 t/m<sup>2</sup> avec une déformation radiale de 60 cm sur des cintres dont le diamètre initial est de 13 m. Cet essai est conduit dans une niche de section équivalente au tunnel, pour simuler exactement les conditions de fonctionnement réelles.

Dans une deuxième série d'essais préliminaires, différentes sections de cintres, réduites d'un huitième de leur circonférence totale, ont été testées. Au cours des expériences, différents paramètres ont été mesurés : les efforts au moyen des relevés de pressions, les déplacements des cintres au droit des clefs à l'aide d'extensomètres spéciaux. La répartition des contraintes a été déterminée par des mesures des déformations à corde vibrante, et le suivi de la position du cintre a été réalisé au moyen d'un théodolite motorisé.



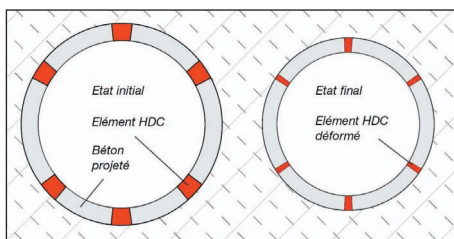
Réalisation de l'essai sur cintre à grande échelle (Solexperts, 2003)

Les essais ont permis de valider un système de cintre simple coulissant avec un espacement intercintre de 1 mètre.

### 4.2 - HDC- Éléments, Lötschberg

Dans la zone de houiller du tunnel de base du Lötschberg, la maîtrise du soutènement pour éviter les effondrements et la formation de cavités s'est en premier lieu effectuée au moyen d'un profil d'excavation à contre-voûte en radier. La réduction des déformations n'ayant pas été suffisante, un profil circulaire déformable a été proposé et réalisé sur les 60 mètres de la zone difficile, dans un premier temps pour le reprofilage, puis de manière systématique à l'avancement.

Le profil déformable est réalisé au moyen de saignées radiales, situées au niveau des serrures de cintre, remplies avec des HDC-Éléments (High Deformable Concrete, breveté) de dimension 800 x 200 x 200 mm, développés par le Prof. Dr. Kovari et Solexperts AG. Les HDC-Éléments présentent



Principe de fonctionnement des HDC-Éléments (Solexperts, 2006)

la caractéristique majeure de se déformer jusqu'à 50 % de leur taille initiale, tout en conservant la même résistance en compression.

Avec 6 HDC-Éléments et 31 Ancrages IBO 38 N par mètre de tunnel, la convergence a été réduite de plus de 100 mm par rapport au profil initial avec contre-voûte. Un réajustement du profil a été réalisé 2 mois plus tard, étant donné que les HDC-Éléments avaient atteint leur course de déformation limite. Le nouveau profil a permis de mettre en œuvre 6 éléments avec 16 ancrages IBO 38 N de 16 m de longueur par mètre de tunnel, et ainsi de freiner davantage la convergence.



Section du tunnel du Lötschberg en zone houillère avec des HDC-Éléments de type poutre (Solexperts, 2004)

## 5 - CONCLUSION

La construction des tunnels de base en milieu alpin avec une forte couverture est actuellement achevée dans le cas du tunnel du Lötschberg, qui est actuellement en phase de test des voies ferrées, et réalisée à 65 % dans le cas du St-Gothard.

Les conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques complexes nécessitent une attention toute particulière à l'instrumentation et à la reconnaissance des zones à risques. Solexperts a ainsi pu mettre en œuvre toute son expérience dans le suivi classique de la stabilité d'ouvrages par mesures automatisées, mais a surtout pu développer de nouveaux équipements de mesure d'extrusion et de reconnaissance hydrogéologiques à l'avancement, ainsi que de nouvelles procédures de soutènement adaptées aux zones à forte convergence.

## BIBLIOGRAPHIE

**GTS** (Groupe Spécialisé pour les Travaux Souterrains) (2002 - 2005) "Alptransit-Tagung, Fachtagung für Untertagbau", Band 1, 2, 3 und 4.

**UNTERSCHÜTZ, P.** (2005) "La nouvelle ligne du Saint-Gothard", AlpTransit Gotthard AG.

**EHRBAR, H., HENKE, A.** (2003) "AlpTransit Gotthard : Aktuelle Erfahrungen und Entwicklungen beim Bau des Gotthard Basistunnel", Universität Karlsruhe.

**EHRBAR, H.** (2004) "AlpTransit Gotthard, Teilabschnitt Sedrun : Vortriebskonzept in den druckhaften Zonen – Vom Projekt zur Ausführung", EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium.

**TEUSCHER, P.** (2002) "Lötschberg-Basistunnel – Das Walliser Dorf St. German senkte sich – Was ist passiert? " Felsbau n°20

**BLS ALPTRANSIT** (2003) "Lötschberg tunnel de base. En Suisse, l'ouvrage du siècle prend forme", BLS AlpTransit.