

## INSTRUMENTATION POUR LA SURVEILLANCE DE FALAISES A RISQUE

**Auteurs** : D. Naterop, J. Prouvot, avec la contribution de L. Bernard

**Date** : 08/08/2008

Solexperts AG, Mönchaltorf, Schweiz

### 1. Introduction

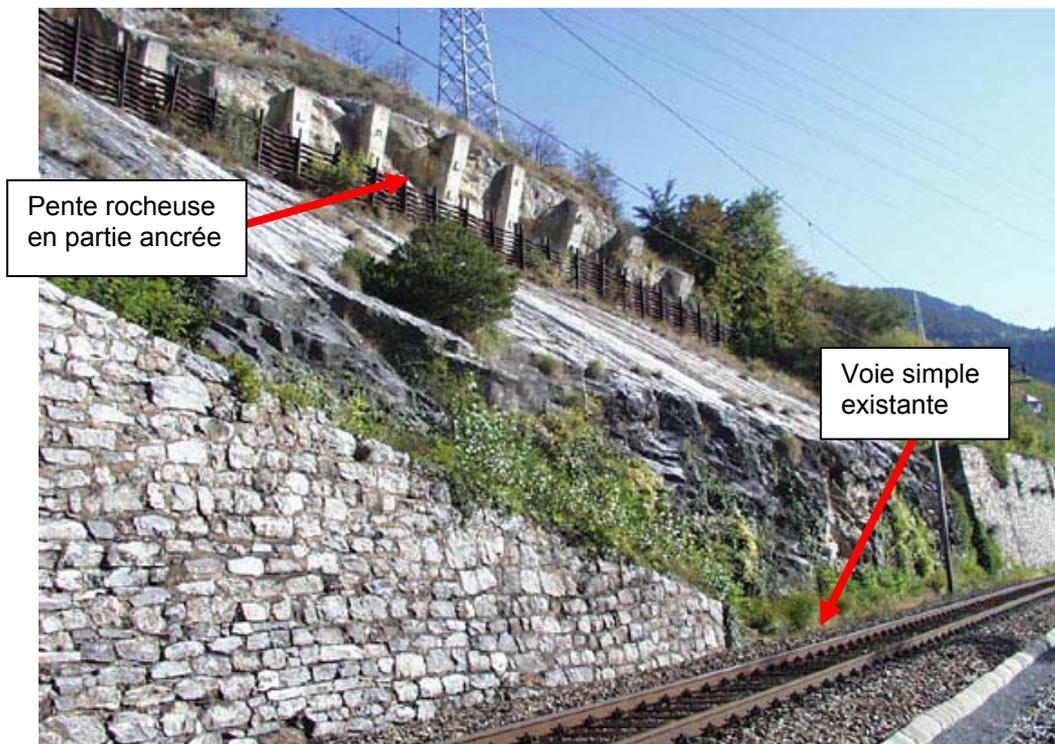
Dans le cadre de la construction de tunnels ou de routes de montagne, certains sites présentent des contextes géologiques et géotechniques complexes. En effet la présence d'une falaise ou d'une pente rocheuse à proximité directe des programmes d'excavation (souvent prévues à l'explosif) entraînent des risques non négligeables de déplacements de ces structures, qu'il convient à la fois de mesurer et de surveiller en cas de chutes d'éboulis. C'est dans ce contexte que Solexperts a été sollicitée à plusieurs reprises afin d'assurer l'instrumentation de ces sites potentiellement à risques. Cinq projets sont ici illustrés afin d'avoir un aperçu de la surveillance des falaises, avec à chaque fois la mise en place d'une instrumentation adaptée au site.

#### 1.1. – Projet de double voie ferroviaire Salgesch-Loeche (VS)

Dans l'optique du passage en double voie de la ligne ferroviaire Salgesch-Loeche située dans le canton du Valais, un tunnel a été construit. Ce dernier se situe à une distance de 60 mètres de la ligne existante, et son excavation à l'explosif pouvait conduire à des déplacements de la pente rocheuse en partie ancrée, située juste au dessus de la voie. Il s'agissait alors de confirmer la capacité des ancrages d'origine du massif à pouvoir résister à toute perturbation causée par l'excavation à l'explosif du tunnel. Les Chemins de Fers Fédéraux (CFF) ont donc demandé à Solexperts d'équiper le site en instruments de mesure et de surveillance afin de prévenir tout risque d'éboulis.

Instrumentation mise en place :

- 5 extensomètres de surface
- 1 filet de détection des éboulis
- 1 géophone (capteur de vibration)
- 1 système d'acquisition automatique des données GeoMonitor



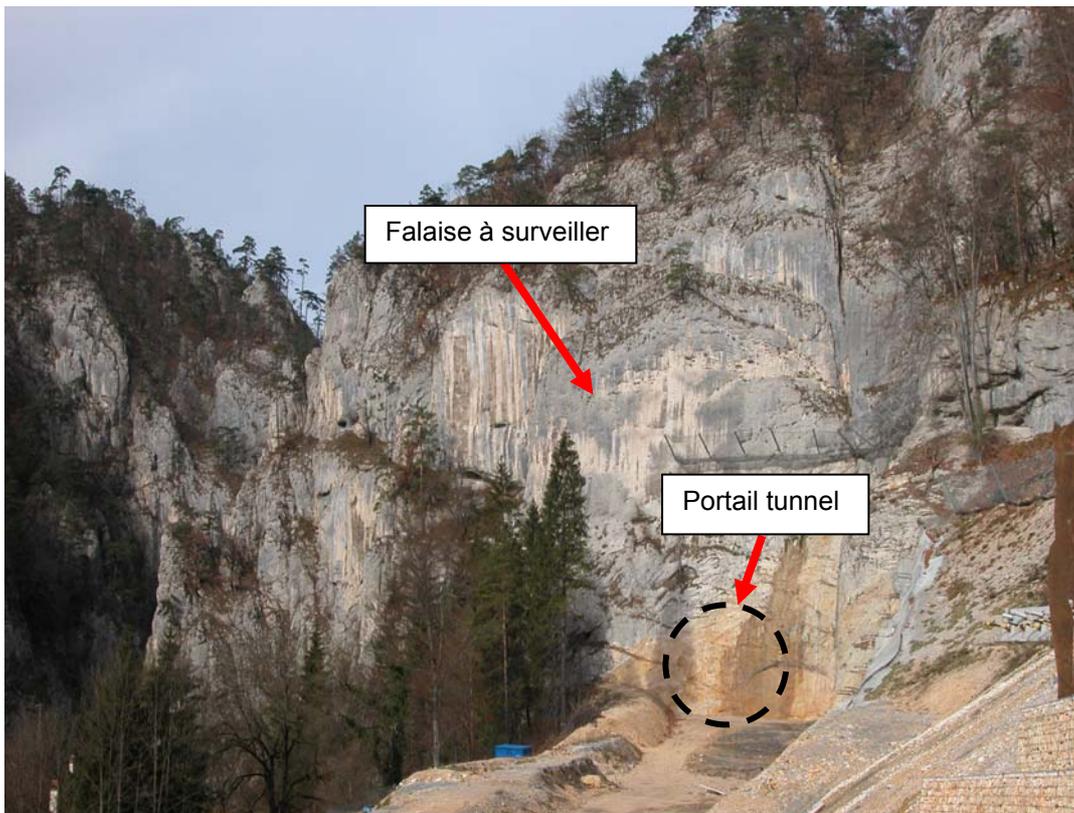
*Pente rocheuse au dessus de la voie ferroviaire existante*

## 1.2. – Projet du tunnel de la Roche St Jean (BE)

Dans le cadre de la construction de l'autoroute A16 Transjurane qui reliera à terme Boncourt (JU) à Bienne (BE), de nombreux ouvrages souterrains sont à réaliser. Ce fut le cas pour le tunnel de la Roche St Jean, percé à l'explosif, qui traverse le massif dont figure une illustration ci-dessous. Cette technique d'excavation présente un risque de chute de blocs sur la route cantonale et sur la ligne de chemin de fer en contrebas. Afin d'assurer la surveillance permanente du site pendant les travaux, Solexperts s'est vu confier l'installation d'un dispositif de mesures.

Instrumentation mise en place :

- 8 extensomètres de surface avec capteurs de température intégrés
- 9 capteurs triaxiaux de vibrations
- 1 centrale permanente d'acquisition, de stockage et de lecture (Solexperts GeoMonitor)
- 1 équipement de transmission pour gestion et consultation à distance (modems + logiciels d'interprétation et de pilotage)



*Site de percement du tunnel avec la falaise à surveiller*

## 1.3. – Surveillance d'une paroi à la sortie du tunnel de Roche à Sceut (JU)

Suite au glissement de terrain d'un massif rocheux à la sortie du tunnel de Roche dans le canton du Jura, il a été demandé, après confortement de la paroi résiduelle, d'équiper le site d'un système de surveillance afin de prévenir toute nouvelle chute d'éboulis. Ce site est particulièrement sensible étant donné qu'une route et une voie de chemin de fer se trouvent en contre bas de la falaise. Il a donc été nécessaire d'équiper la zone avec une instrumentation permettant de mesurer en permanence les déplacements du massif rocheux.

Instrumentation mise en place :

- 12 extensomètres de surface avec capteur de température intégré
- 1 capteur de température séparé
- 1 théodolite motorisé (10 points cibles + 5 points de référence)
- système d'acquisition automatique des données GeoMonitor
- système de visualisation des données Web-DAVIS



*Eboulement survenu avant la pose de l'instrumentation*

#### 1.4. – Projet du tunnel Val d'Infern Calancatal (GR)

En vue de l'excavation par explosif du tunnel routier Val d'Infern dans le canton des Grisons, la surveillance de la falaise située à l'entrée du tunnel existant a été prévue. Les dispositifs de mesure visent à garantir la sécurité des personnes participant à la construction du tunnel et celle des usagers de la voie existante, maintenue en circulation pendant les travaux. Solexperts s'est vu confier l'installation d'un système de surveillance optique par théodolite automatisé, et d'un GeoMonitor intégrant des capteurs existants sur site.

Capteurs et systèmes en place :

- extensomètres de forage
- extensomètres de surface
- capteurs de température
- capteurs de vibrations
- fissuromètres
- 1 théodolite motorisé (16 points cibles + 5 points de référence)
- systèmes d'acquisition automatique des données GeoMonitor
- 1 système de visualisation des données Web-DAVIS
- 1 filet de détection des éboulis

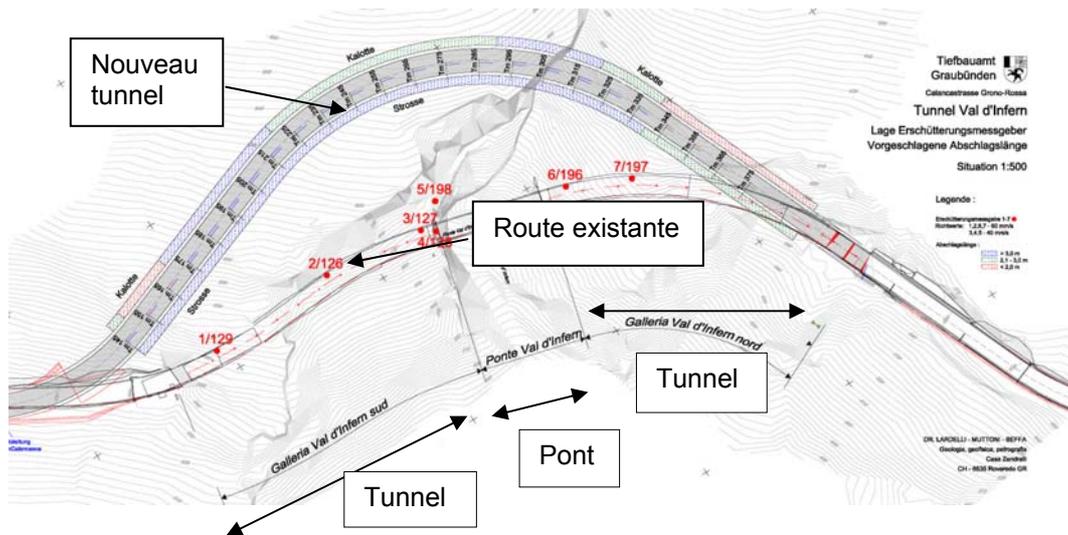


Photo accès au tunnel Val d'Infern avec la falaise instrumentée (GR)

### 1.5. – Surveillance de la falaise Lorette (FR)

Depuis 2002, Solexperts s'est vu confier la surveillance de la falaise de Lorette située dans le canton du Fribourg. Au bord de cette falaise se trouve une maison ancienne, qui est à présent surveillée, afin de prévenir tout déplacement anormal de la falaise. A cet effet, 2 extensomètres de forage horizontaux ont

été installés, chacun comportant 5 ancrages positionnées à différentes profondeurs (profondeur maximale de 33m).

Installation en place :

- 2 extensomètres de forage à 5 tiges chacun
- 1 enregistreur SOLO remplacé depuis 2006 par une centrale Solo-GeoMonitor



*Falaise de Lorette avec emplacement des 2 extensomètres de forage (site WebDAVIS)*

## 2. Instrumentation et surveillance des sites

### 2.1. Le théodolite

Le théodolite motorisé permet de mesurer les coordonnées polaires de cibles fixées sur une structure, pour en déduire les mouvements dans le temps selon les directions x, y et z de l'espace. Une ou plusieurs références situées en dehors de la structure concernée sont également mesurées pour donner des déplacements absolus.

Le théodolite est placé à un endroit stratégique du site permettant de balayer l'ensemble des points-objets matérialisés par des prismes, puis il effectue une mesure automatique de ces mini-prismes. Le théodolite motorisé est relié à une centrale GeoMonitor via une interface et un câble bus. Ce système permet de mesurer automatiquement l'ensemble des prismes fixés à la paroi et d'obtenir l'évolution des déplacements d'une structure. Le logiciel GeoMonitor peut gérer jusqu'à 20 théodolites à la fois ; chaque théodolite possédant sa propre interface, qui lui permet de gérer la visée des cibles et de sauvegarder les données indépendamment. Le PC d'acquisition récolte alors ces données une fois le relevé effectué et les envoie sur la base de données Solexperts, puis sur une page Internet WebDAVIS.



*Théodolite en position sur le site du tunnel de Val d'Infern (GR)*

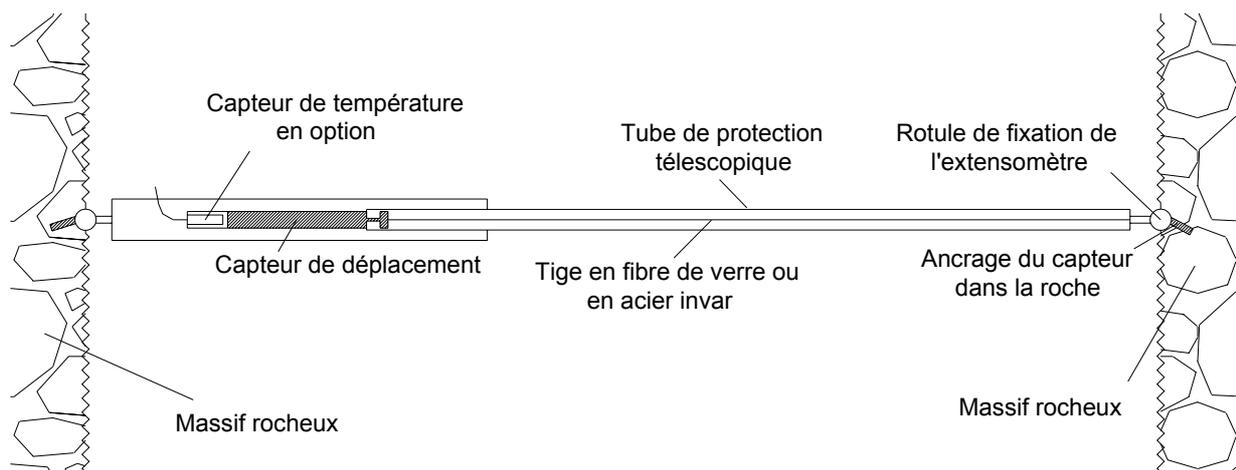


*Prisme optique pour théodolite – Val d'Infern (GR)*

Le théodolite est un instrument parfaitement adapté à l'étude globale d'un site pour permettre de mesurer les déplacements d'ensemble. Cependant il ne donne qu'un aperçu général des déformations d'un massif rocheux et son coût d'achat et de maintenance reste élevé. Son utilisation est requise sur des sites dont le périmètre d'influence des déformations est bien défini, comme ce fut le cas à Sceut en vue de la surveillance de la paroi, ou encore pour le percement du tunnel de Val d'Infern (respectivement 12 et 25 points de mesure).

## 2.2. L'extensomètre de surface

Cet instrument permet de mesurer avec précision les déplacements sur des sites où l'accès ou la visibilité des points de surveillance sont délicats. Il convient donc parfaitement à la surveillance de falaises ou de pentes rocheuses. L'extensomètre de surface est un instrument adaptable selon les spécifications du projet ; les longueurs peuvent varier de 0,5 à 5 mètres (grâce à un système de tubes télescopiques). Le capteur de déplacement (gamme de mesure 25, 50, 100, 250 mm ; résolution : 0,002 à 0,005 ; précision : 0,1mm) et le capteur de température éventuel sont protégés dans une enceinte étanche jusqu'à 15 bars.



*Schéma de principe de l'extensomètre de surface*

L'extensomètre de surface est, contrairement au théodolite, un instrument ponctuel qui mesure les déplacements différentiels d'un massif au niveau d'une zone précise. On a par conséquent un aperçu local des déplacements du massif qu'on ne peut pas généraliser à l'ensemble, d'où de multiples implantations sur des zones stratégiques.

En contrepartie, la précision des mesures de l'extensomètre de surface permet une approche beaucoup plus fine et beaucoup plus rapide dans la surveillance des falaises (1 mesure toutes les secondes contre une mesure toutes les heures en moyenne pour le théodolite). Ceci explique le recours fréquent à un tel instrument dans la plupart des sites.

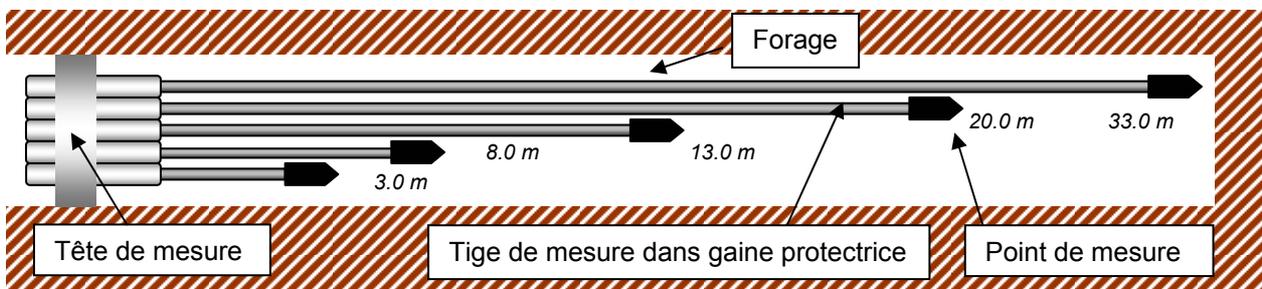


*Extensomètre de surface en place sur le site de Sceut (VS)*

### 2.3. L'extensomètre de forage

Cet instrument peut s'apparenter à l'extensomètre de surface ; à savoir qu'il permet, couplé avec un capteur de déplacement, de mesurer les déplacements de massif rocheux. La différence notable réside sur le fait que l'extensomètre s'implante dans un forage dont la profondeur et l'orientation peut varier selon le projet. Cet extensomètre, sous sa version « modulaire », permet d'utiliser jusqu'à 12 tiges qui sont ensuite ancrées à différentes profondeurs, afin d'avoir une vision globale et de localiser les zones de fracture éventuelles.

Dans le cadre du projet de surveillance de la falaise Lorette, 2 extensomètres ont été mis en place horizontalement afin de pouvoir suivre les déplacements de la falaise et prévenir les éventuels désordres pouvant être provoqués sur la construction située à flanc de falaise. Les données sont transmises sur un système Solo-GeoMonitor, qui permet l'acquisition et le transfert des données et possède également des fonctions d'alarme et de contrôle, le tout pouvant être piloté à distance via un modem. La visualisation des mesures est assurée par le logiciel WebDAVIS.

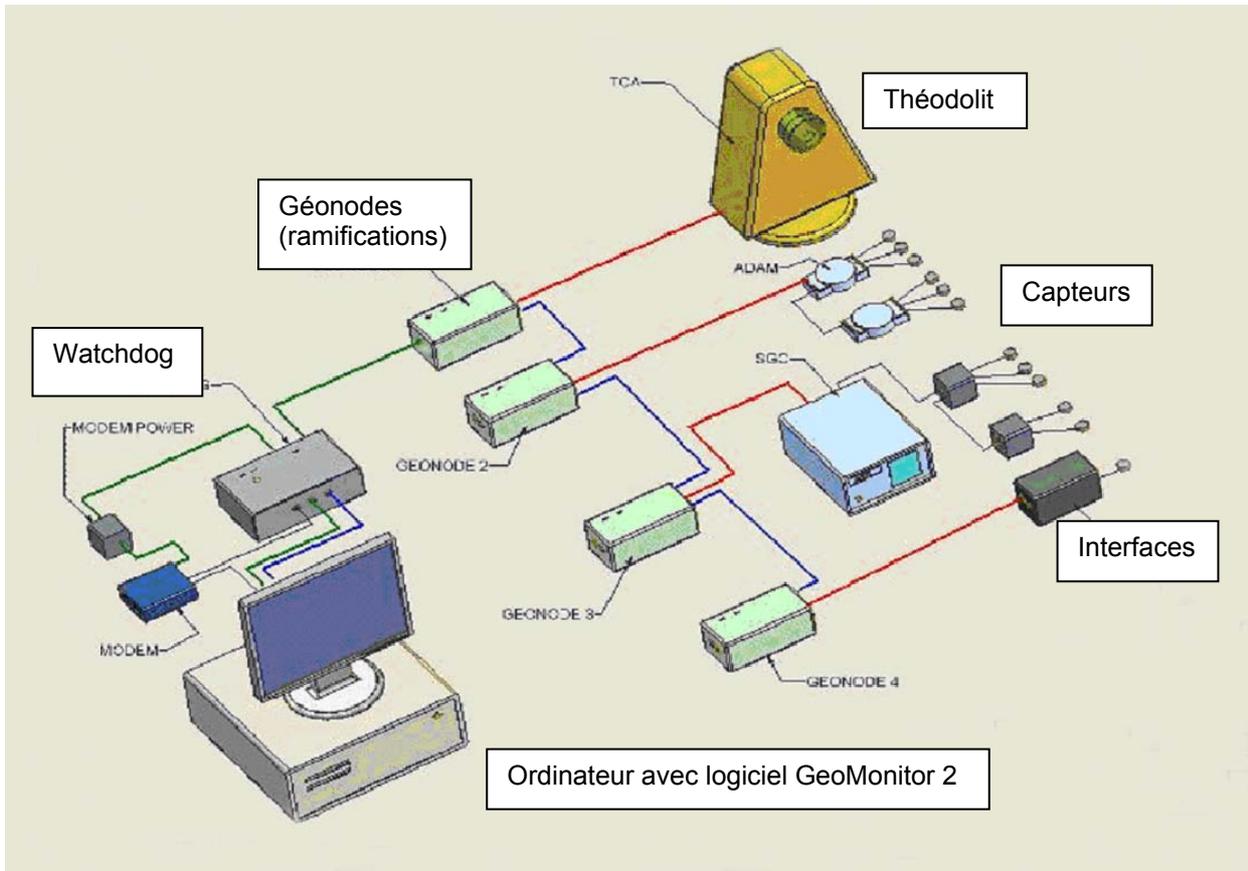


*Extensomètre de forage en place avec ses 5 tiges sur le site de Lorette (FR)*

## 2.4. Acquisition des données et surveillance de chantier

Le système GeoMonitor développé par Solexperts constitue l'élément central de l'instrumentation automatique pour l'acquisition de données géotechniques et hydrogéologiques. Il permet l'acquisition des données de l'ensemble des capteurs mis en place sur chaque site, ainsi que des données fournies par le ou les théodolites installés.

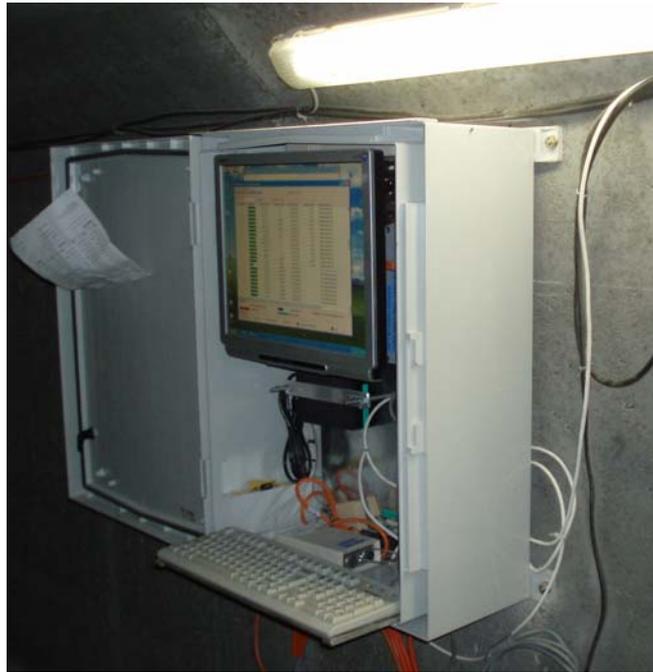
Ce système est parfaitement adapté à l'instrumentation automatique pour la surveillance de massifs rocheux instables. Le GeoMonitor est caractérisé par sa flexibilité (utilisation de tous types de capteurs) et sa sécurité (redémarrage automatique en cas de coupure de courant). Enfin, un câble unique (ligne databus) permet de connecter tous les capteurs au système, permettant ainsi une limitation des coûts.



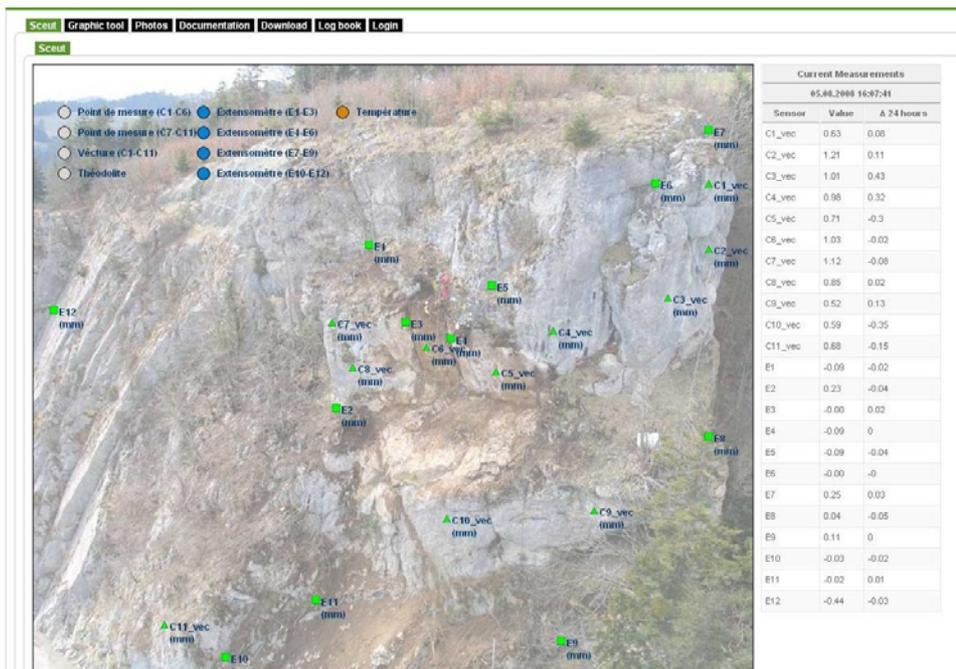
*Principe de fonctionnement du système GeoMonitor*

La visualisation des données acquises par GeoMonitor ou Solo-GeoMonitor se fait grâce au WebDAVIS. Il s'agit d'un portail Internet qui permet d'accéder facilement et rapidement aux données pour un chantier donné. L'accès est protégé par un mot de passe. L'emplacement des différents capteurs et autres instrumentations, une visualisation de courbes ou des simples données, ainsi que des documentations du projet sont intégrés à cette interface web. Un onglet permet également le téléchargement des données pour d'éventuels calculs.

Enfin WebDAVIS permet également de définir les seuils d'alarmes nécessaires dans le cadre de la surveillance de falaises. En effet, il est indispensable de pouvoir prévenir efficacement les personnes responsables à la moindre rupture de contraintes, c'est-à-dire lorsqu'une variable dépasse la valeur tolérée préalablement établie. Les ingénieurs d'études définissent ainsi des valeurs seuil d'alertes ou de tolérance qui, lorsqu'elles sont dépassées, permettent l'activation d'une procédure d'alarme. L'information est alors transmise par sms ou par appel aux téléphones portables des responsables préalablement désignés. Ce système peut être adapté à chaque projet pour permettre, par exemple en plus de la diffusion de l'alerte, l'activation de voyants lumineux et/ou de signaux d'avertissement sonore. Ce fut le cas pour le projet du tunnel de Val d'Infern (GR) et le tunnel de la Roche St Jean (BE) pour avertir les intervenants sur chantier et les usagers des routes et voies ferroviaires d'une éventuelle chute d'éboulis.



Centrale d'acquisition GeoMonitor



Portail WebDAVIS pour la falaise de Scout (JU)

#### 2.4. Le filet de détection des éboulis et autres instrumentations

Certains sites présentant un risque important de chutes d'éboulis, notamment pendant la durée d'excavation à l'explosif d'un tunnel, et peuvent être équipés d'un filet de détection des éboulis en complément du système préventif (extensomètres de surface et théodolite). Le projet de double voie ferroviaire Salgesch-Loèche (VS) et celui du tunnel du Val d'Infern (GR) ont permis l'utilisation de ce système. Solexperts a donc, dans ces contextes particuliers, mis au point un système de filet constitué

de plusieurs câbles électriques fixés sur des pieux. Ces câbles sont tendus pour résister à un effort de rupture donné (600 Newtons par exemple pour le projet Salgesch).

Ce système redondant fonctionne en général indépendamment au système GeoMonitor et est directement relié à un avertisseur sonore et/ou lumineux. En cas de rupture du câble, ces derniers sont activés. En cas de coupure de courant, le signal lumineux passe automatiquement au rouge.



*Filet d'une longueur de 52m  
(direction Salgesch)*

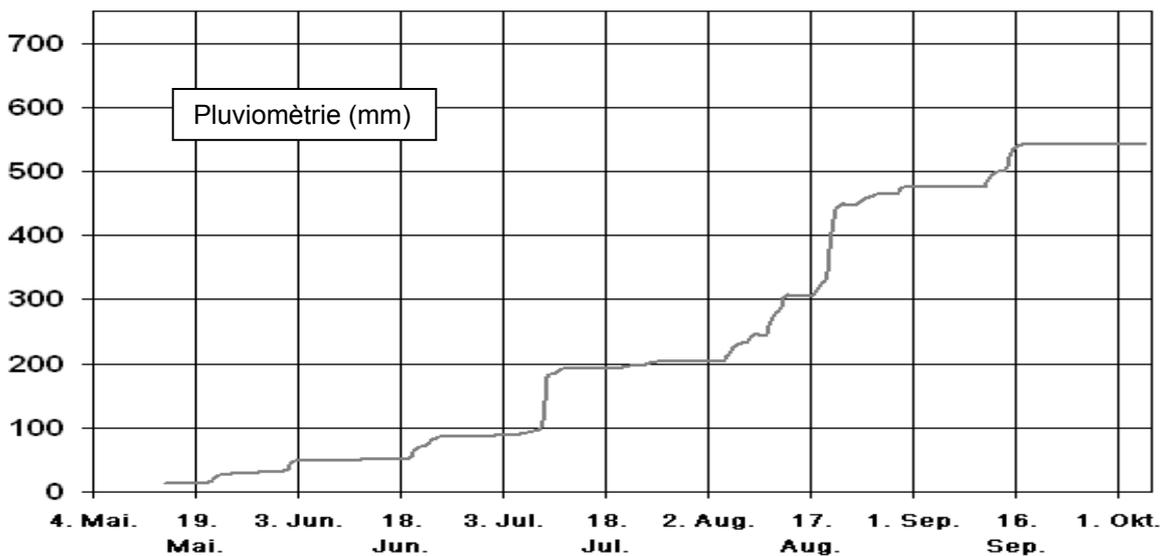


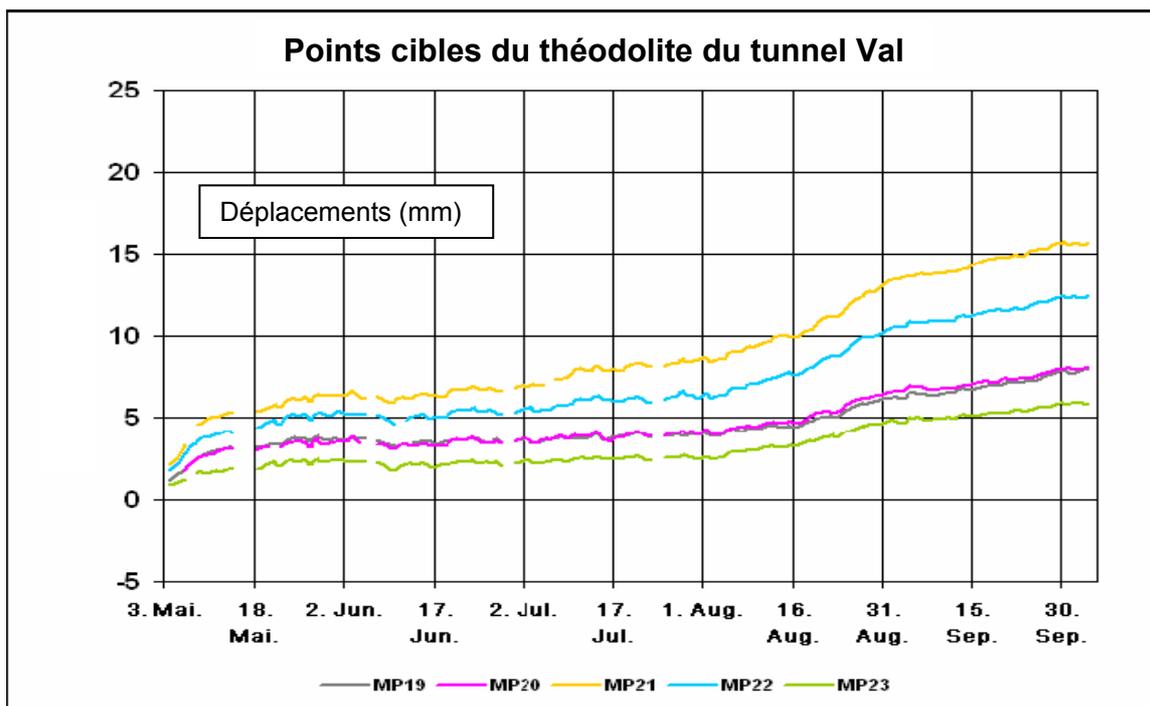
*Capteur de vibration triaxial utilisé  
sur le site du tunnel de la Roche St Jean*

Un certain nombre d'instruments peut être également utilisé pour le suivi des déplacements de massifs rocheux. Il s'agit alors de mesurer des paramètres complémentaires tels que les températures extérieure et intérieure du massif, la pression interstitielle à l'intérieur du massif, les vibrations subies par le massif lors des explosions pour l'excavation des tunnels (pour le tunnel de la Roche St Jean ou du Val d'Infern par exemple), ou encore la pluviométrie du site, qui peut rentrer en jeu dans les processus de déplacement.

Ces paramètres mesurés par les différents instruments sont alors intégrés au système GeoMonitor, de la même manière que pour les capteurs et théodolites. Ceci permet de prendre en compte les effets du milieu environnant dans la mesure des déformations des massifs et ainsi de pouvoir mieux interpréter les résultats obtenus.

### Mesures pluviométriques à Val





*Influence de la pluviométrie sur les déformations du massif à Val d'Infern*

### 3. Conclusion

La surveillance des falaises nécessite une attention toute particulière afin de pouvoir étudier et surtout prévenir tout déplacement important de massifs rocheux ou pentes instables. La sécurité des usagers de voies ferroviaires ou routières est engagée, et toute perturbation du massif doit pouvoir être appréhendée, notamment dans le cadre d'excavation de tunnels à l'explosif.

Selon le site étudié, différentes instrumentations peuvent être installées. Le théodolite motorisé donne un aperçu global dans l'étude des déplacements d'une falaise, alors que l'extensomètre de surface donne un aperçu ponctuel mais plus précis et plus rapide. Dans certains cas le couplage des 2 instrumentations peut s'avérer intéressant pour le site étudié, comme ce fut le cas pour la surveillance de la falaise de Scout ou le creusement du tunnel de Val d'Infern.

Les données, collectées de manière indépendantes, peuvent alors être regroupées via le système GeoMonitor et comparées. Des capteurs de température, de pluviométrie, de pression interstitielle, de vibration peuvent être également installés sur certains sites, afin de tenir compte de variables liées à l'environnement immédiat, et notamment de pouvoir étudier l'effet d'une vibration sur un massif suite à l'explosion d'une charge.

Le système GeoMonitor est la clef de voute du dispositif de mesure et de surveillance des sites. Il assure l'acquisition des données de tous les capteurs, et l'ensemble des calculs de mise en forme. La précision, la simplicité du système et les seuils d'alarme associés au dispositif permettent d'analyser efficacement les effets de l'excavation d'un tunnel à l'explosif et de prendre rapidement des mesures correctives.

Des systèmes annexes peuvent être installés afin de prévenir les chutes d'éboulis. Ces systèmes sont complémentaires au GeoMonitor et fonctionnent en parallèle. Ils sont essentiellement mis en place dans le cas où un risque avéré de chutes a été mis en évidence.

**Solexperts AG**  
08/08/09  
Laurent Bernard

**Référence : Mesures géotechniques et surveillance lors de la construction des tunnels Val d'Infern, La Roche et Salgesch, Daniel Naterop, Solexperts AG, Mönchaltorf, Schweiz**