

Suivis topométriques et géodésiques liés au projet de liaison ferroviaire entre Lyon et Turin

■ Michel BOISSENOT - Fabrice COL - Piero NURISSO - Ilario PREVITALI

Franco Gallara - Stefano LIONE

Dans le cadre des études menées pour le projet de liaison ferroviaire entre Lyon et Turin, par LTF, des travaux topométriques et géodésiques de grande ampleur ont été entrepris. Les investigations menées ont pour objectifs principaux le suivi des mouvements de terrains et d'infrastructures relatifs au percement des trois descenderies, côté français, de la section franco-italienne commune. Elles sont également destinées à caractériser les déformations tectoniques existant avant travaux. Ce deuxième objectif est novateur dans ce contexte de grand projet de génie civil.

Les programmes de suivi font appel à différents types de mesures tels que le positionnement GPS, le nivellement direct ou indirect et la tachéométrie. Dans le cas d'un grand projet de traversée alpine tel que celui de Lyon-Turin, les mesures doivent démarrer plusieurs années avant le début des travaux, selon un programme d'investissement cohérent, afin de permettre, à terme, la localisation des accidents éventuellement actifs et l'évaluation des déformations "naturelles" dans le temps.

Présentation du projet Lyon-Turin

Par le traité du 29 janvier 2001, les gouvernements italiens et français ont décidé d'engager la réalisation d'une ligne ferroviaire nouvelle entre Lyon et Turin, à haute performance et à grande capacité. Celle-ci doit permettre de limiter la croissance des trafics routiers dans cette partie de l'arc alpin en favorisant un report vers le rail.

Le projet est conçu pour un trafic mixte voyageurs et marchandises y compris pour celui des services d'Autoroute Ferroviaire.

Le projet s'inscrit dans le cadre des orientations de la Convention Alpine. Son objectif principal est de contribuer au rééquilibrage du transport de marchandises entre la route et le rail.

Le projet permettra la croissance du trafic ferroviaire grâce à la réalisation d'une ligne aux caractéristiques "de plaine" (rampes limitées à 1,2%), auto-

MOTS-CLÉS

Suivi de mouvements de terrain, Incidence en surface de travaux de percement souterrains
Mesures GPS, Nivellement



Figure 1. Pilier PAT2 – Barrage de Plan d'Aval.

Il constitue le maillon manquant qui va permettre la mise en réseau de 5 000 km de lignes nouvelles et relier ainsi 250 millions d'Européens.

La nouvelle liaison ferroviaire Lyon - Turin se compose (Figure 2) :

- d'une section nationale en France, entre l'agglomération lyonnaise et Saint-Jean-de-Maurienne, sous maîtrise d'ouvrage de Réseau Ferré de France (RFF),

risant la circulation de trains plus longs et plus lourds, améliorant la qualité et la fiabilité du service et les conditions économiques de l'exploitation.

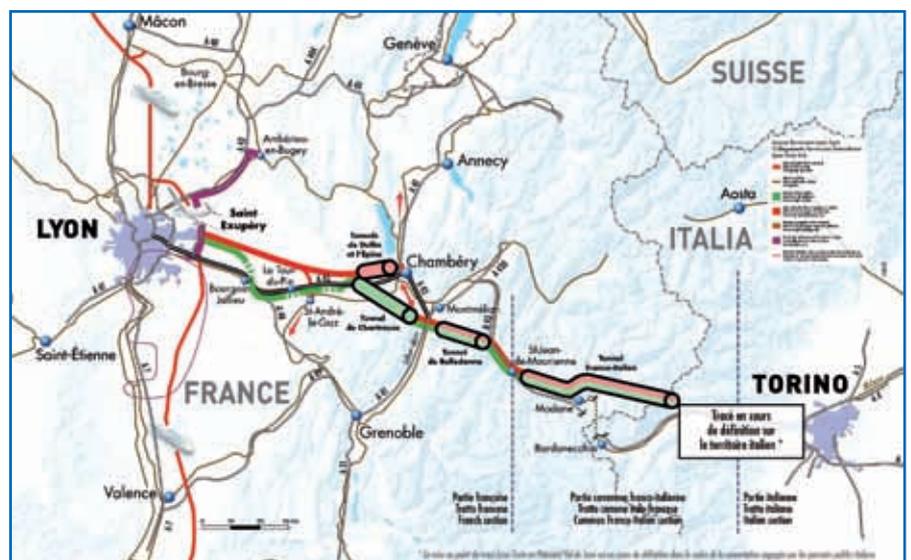


Figure 2. Tracé du projet de liaison ferroviaire entre Lyon et Turin.



- d'une partie commune franco-italienne de Saint-Jean-de-Maurienne et la basse vallée de Suse, sous maîtrise d'ouvrage de Lyon Turin Ferroviaire (LTF),

- d'une section commune en Italie, entre la basse vallée de Suse et l'agglomération de Turin, sous maîtrise d'ouvrage de Réseau Ferré Italien (RFI).

La partie la plus complexe est constituée par le tunnel de base, à deux tubes, de 53 km environ, entre la France (Saint-Jean-de-Maurienne) et la Vallée de Suse en Italie.

■ Contexte géologique

Les grands découpages des Alpes occidentales sont classiquement subdivisés en deux entités géologiques majeures, les Alpes externes à l'Ouest et les Alpes internes à l'Est séparées par le Front Pennique.

Ces zones correspondent à un découpage tectonique et sont donc limitées par des chevauchements majeurs qui se rapportent à des zones de contact souvent tectoniques.

Les contextes géologique, thermique et hydrogéologique sont complexes et, sur ces sujets, plusieurs études ont été confiées aux Universités de Chambéry, Grenoble et Turin.

La connaissance de la géologie structurale et de la tectonique des formations rocheuses concernant le projet sont à la base de l'interprétation de l'évolution de la dynamique quaternaire des versants : cette connaissance est indispensable à la compréhension des évolutions de la dynamique actuelle et des mesures de contrôle de surface.

Cette évolution doit être prise en compte dans le projet plusieurs années

avant le début de travaux, selon un programme d'investissement précis et cohérent, et portant sur les mesures de suivi et de contrôle de stabilité des terrains et des infrastructures préexistantes.

La connaissance du régime et de l'évolution des déformations locales, dues à des phénomènes liés soit à la gravité, soit à la tectonique active, constitue donc un des objectifs des mesures à long terme entreprises par LTF. Celles-ci doivent permettre, à terme, de localiser les accidents éventuellement actifs et d'évaluer les déformations "naturelles" dans le temps.

■ Programme des travaux préliminaires

Le programme des travaux préliminaires comprend l'excavation de trois galeries de reconnaissance (descenderies de Saint Martin la Porte, de La Praz et de Modane) ainsi qu'une galerie en Italie (Figure 3).

Ces travaux ont pour but principal d'appréhender les conditions d'exécution des ouvrages prévus, aussi bien du point de vue géologique, hydrogéologique que géotechnique. Ils vont également permettre de préciser les temps et les coûts de réalisation de l'ouvrage.

■ Objectifs des mesures topométriques et géodésiques entreprises dans le cadre du projet LTF

Deux raisons principales motivent les investigations topométriques et géodésiques :

1. La volonté de caractériser les déformations tectoniques avant les travaux. Cet objectif est le plus novateur

et le plus original dans ce contexte de grand projet de génie civil.

2. Le besoin de suivre ces déformations durant les travaux (demande effectuée par EDF dans le cadre de la descenderie de Modane, du fait de la présence du barrage de Plan d'Aval et de conduites forcées à faible distance du projet) et éventuellement après les travaux (suivi de l'ouvrage).

Ces deux points se complètent. Le but est en effet de pouvoir distinguer, en cas de mouvements observés durant les travaux, la part des déformations naturelles de celle induite par les travaux.

Un troisième cas de figure est toutefois envisageable : il s'agit de déformations naturelles modifiées par les travaux (par le drainage du massif rocheux principalement).

Les raisons qui ont poussé la société LTF à adopter une stratégie de contrôle à long terme du projet sont, d'une part, la complexité de l'évolution géologique et tectonique des Alpes du point de vue historique et d'autre part, la volonté de mieux connaître les plus récents phénomènes liés à l'érosion et à la gravité dans les vallées concernées.

LTF a entrepris des campagnes de mesures topométriques et géodésiques régulières durant la phase précédant les travaux afin d'accroître la connaissance des régimes de déformation aussi bien au niveau local qu'au niveau transalpin.

Un des objectifs des mesures est donc de détecter, à l'avance, la présence de phénomènes actifs, caractérisés par des déformations naturelles, et ensuite, en phase de réalisation des ouvrages, de contrôler les éventuelles déformations pouvant se déclarer lors des travaux souterrains.

■ Présentation des dispositifs de suivi topométriques

Dès 1997, le maître d'œuvre, Alpetunnel (GIE), puis LTF Sas, ont fait réaliser des mesures destinées à mettre en évidence et à quantifier les mouvements de terrain naturel et les ouvrages situés dans des zones jugées sensibles.

Ces mesures, périodiques, discontinues, sont de différents types.

Elles portent sur les terrains et les ouvrages EDF situés dans le secteur de

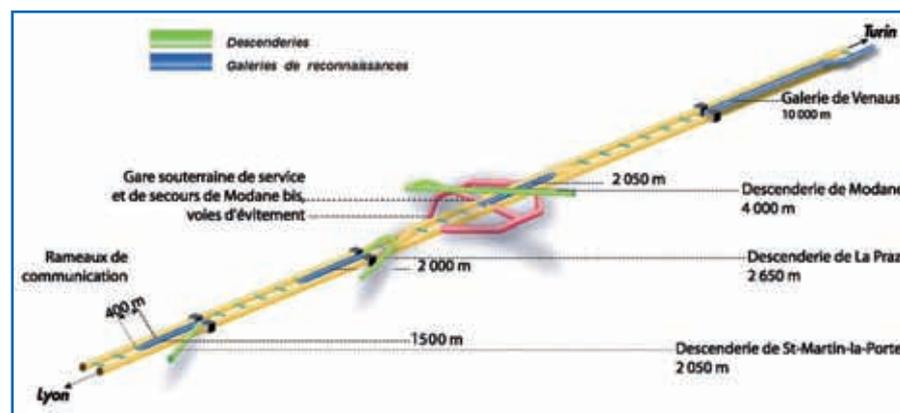


Figure 3. Descenderies de Modane, La Praz et St Martin La Porte.



Mesures	Données fournies	Applications LTF
Nivellement direct	dZ	Suivi terrain naturel Suivi ouvrages (barrage / conduites forcées)
GPS	XYZ	Suivi terrain naturel Suivi ouvrages (barrage / conduites forcées)
Nivellement indirect Mesures dites Zénithales	Z	Suivi ouvrages (barrage / conduites forcées)
Triangulation	XY	Suivi ouvrages (barrage / conduites forcées)

chacune des trois descendries citées ci-dessus.

- Entre 1997 et 2005, trois réseaux locaux ont été créés et complétés au fur et à mesure des besoins.
- Ils font l'objet d'un suivi courant adaptable en fonction de l'avancement des travaux, ainsi que d'un suivi spécifique conditionné par la cinématique des sols, pouvant mener à un suivi intensif.

Elles concernent également d'autres réseaux globaux couvrant l'ensemble du projet de tunnel de base.

- Réseau GPS franco-italien connecté aux réseaux Alpes/Regal et IGM95,
- Réseau de nivellement direct reliant la France à l'Italie via le col du Mont Cenis,
- Réseau de nivellement direct et indirect reliant la France à l'Italie via le col de Clapier,

LE RÉFÉRENTIEL GÉODÉSIQUE PROPRE À L'OUVRAGE

La nécessité de disposer de référentiels géodésiques X, Y et Z, précis, uniques, homogènes et pérennes, couvrant la section internationale franco-italienne de l'ouvrage, a conduit LTF à définir et matérialiser les deux nouveaux systèmes suivants :

- **LTF2004G** : Référentiel géographique tridimensionnel, réalisation du système européen ETRS69,
- **LTF2004(N)** : Référentiel altimétrique de type Normal, calé sur le réseau de référence italien.

Une grille de conversion altimétrique locale a été créée (RALT2004), afin de permettre la conversion de hauteurs ellipsoïdales en altitudes LTF2004(N)

Ces deux nouveaux systèmes ont été définis conjointement par l'Institut Géographique National - France (IGN) et l'Institut Géographique Militaire - Italie (IGM).

- Réseau de nivellement direct reliant la France à l'Italie via les tunnels du Fréjus (routier et ferroviaire),
 - Réseau de nivellement St-Jean-de-Maurienne-Modane
- A titre d'exemple, il est proposé la présentation du réseau de la descenderie de Modane-Villarodin-Bourget, qui sera dénommé "dispositif de Modane"

■ Dispositif de Modane

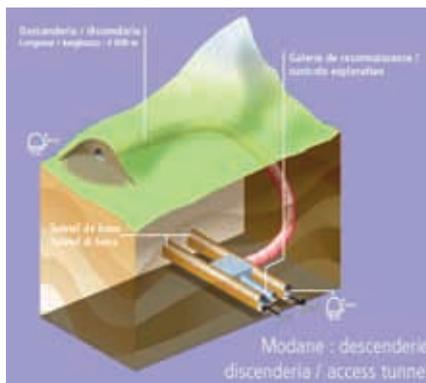


Figure 4. Descenderie de Modane.

Travaux : Ils concernent la réalisation (à l'explosif) de la descenderie de Modane d'une longueur de 4036 m, présentant une section libre d'environ 56 m². Les travaux d'excavation se sont terminés en novembre 2007.

Contexte géologique local : Les terrains traversés par la descenderie sont pour leur plus grande part des quartzites et micaschistes. Dans cette unité globale, des zones de cisaillement ont provoqué des intercalations des micaschistes du socle et des séquences carbonatées.

Le suivi topométrique : Il porte sur 5 réseaux :

- Réseau de 11 points suivi par mesures GPS X, Y, Z,
- Réseau de 6 références et 11 repères placés, en extérieur, sur les deux conduites forcées de EDF, suivi par mesures tachéométriques X, Y et Z,



Figure 5. Mesures de nivellement - Aussois.

- Réseau de 28 points placés, en intérieur, sur les massifs d'ancrage de la conduite forcée ouest couverte d'EDF, suivi par mesures de nivellement indirect tachéométrique Z,
- Réseau de 10 références et 5 repères placés sur le barrage EDF de plan d'Aval, suivi par mesures tachéométriques X, Y et Z,
- Réseau de 429 repères couvrant toutes les communes concernées (75 km environ), suivi par mesures de nivellement direct.

Matérialisation

Réseau	Matérialisation
GPS	Plaquette de centrage sur pilier en béton Boulon de centrage 14b
Nivellement direct	Repère métallique scellé sur structure ou roche
Nivellement indirect Conduite forcée > Intérieur	Potence Baechler
Nivellement indirect Conduite forcée > Extérieur	Refs : Plaquette de centrage sur pilier en béton Boulon de centrage 14b
Tachéométrie barrage	Refs : Plaquette de centrage sur pilier en béton Cocardes EDF DTG

Périodicité des mesures de suivi topométrique

Les réseaux sont observés complètement une fois par an, depuis 1997.

Ils sont également observés partiellement, selon l'avancement du front de taille de la galerie de reconnaissance (quatre fois par an en moyenne).

Précisions requises

Mesures	Planimétrie Ecart-type	Altimétrie Ecart-type
GPS	± 5 mm	± 8 mm
Nivellement direct		± 0.5 mm $\times \sqrt{n}$
Nivellement indirect Conduite forcée > Intérieur		± 1 mm en relatif
Nivellement indirect Conduite forcée > Extérieur		± 8 mm
Tachéométrie barrage	± 1 mm	± 2 mm

Mesures : modes opératoires et moyens mis en œuvre

Mesures	Moyens mis en œuvre	Modes opératoires
GPS	Récepteurs bifréquence (Leica SR530) avec antennes choke ring (Leica AT503) > jusqu'à 11 récepteurs en simultané	Sessions de 72h Pour triple détermination de 24h de chaque point Enregistrement à 30 sec
Nivellement direct	Niveau électronique (Leica DNA10) avec mire invar à code barres	Chemins simples en boucle et antennes en aller/retour
Nivellement indirect Conduite forcée > Intérieur	Tachéomètre électronique Leica TCA2003	± 1 mm en relatif
Nivellement indirect Conduite forcée > Extérieur	Tachéomètre électronique Leica TCA2003	Centrage forcé 2 cercles / 4 pointés Relevé météo Protection / soleil
Tachéométrie barrage	Tachéomètre électronique Leica TCA2003	Centrage forcé 2 cercles / 4 pointés Relevé météo Protection / soleil

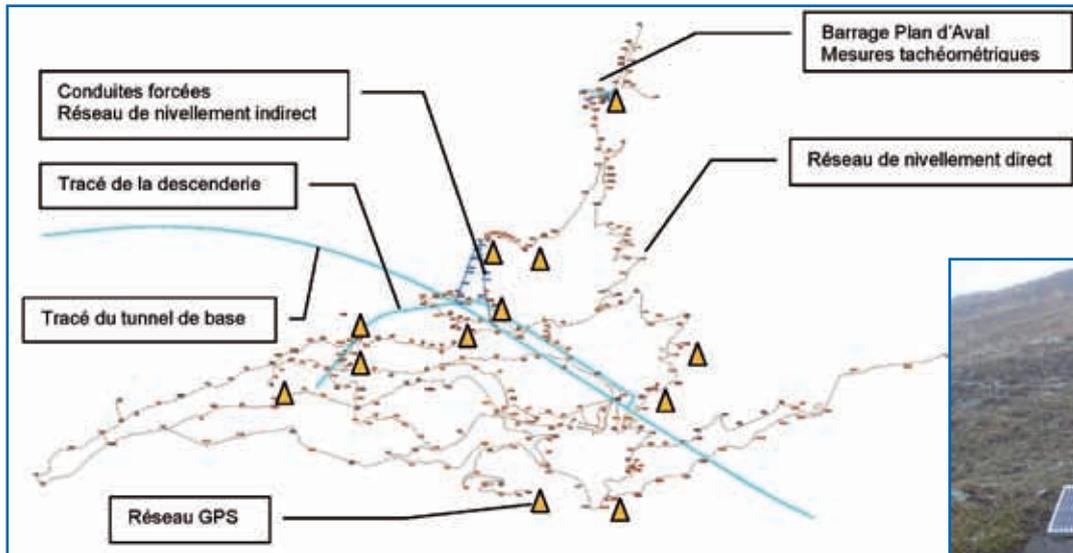


Figure 6. Réseau de Modane-Villarodin-Bourget et Avrieux.



Figure 7. Repère GPS équipé d'une antenne Choke Ring.

Post traitements

Pour chaque campagne de mesures, le post traitement inclut les phases suivantes :

- Calcul des coordonnées X,Y et/ou Z de l'OPN
- Détermination des mouvements OPN / OPN-1 et OPN / OPO
- Etablissement des graphes d'ensemble et point par point
- Analyse et rapport technique détaillé (rapport de mise en œuvre et rapport d'interprétation)

La détermination des mouvements passe par une phase destinée à analyser les valeurs dX-dY-dZ obtenues entre opérations successives.

Ces valeurs sont jugées significatives, ou non, d'un mouvement en fonction du dépassement, ou non-dépassement, du seuil de confiance retenu.

- Pour chaque opération, le bruit de mesure est appréhendé sous forme d'écart-types
- Pour chaque opération, un seuil de confiance équivalent à deux fois cet

écart-type est alors appliqué : il permet de se rapprocher d'un niveau de probabilité plus réaliste (95.4 % dans une dimension, au lieu de 68.3 % et 86.5 % en deux dimensions, au lieu de 39.4 %)

- Pour la comparaison entre chaque opération : un facteur de $\sqrt{2}$ est introduit.

PROCESSUS DE CALCUL PAR OPÉRATION

Le réseau GPS

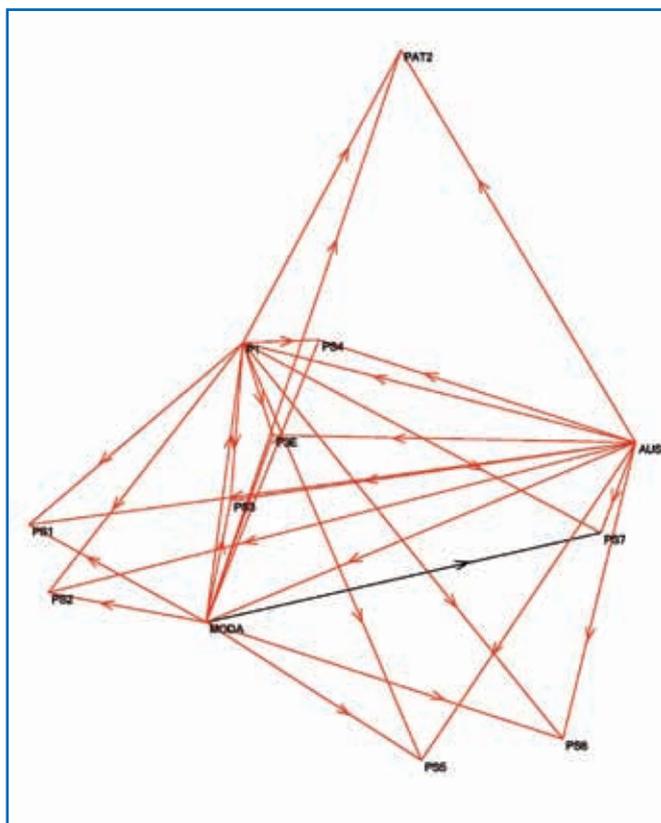


Figure 8. Figure d'ajustement du réseau GPS.

- Les lignes de base sont calculées avec le logiciel Bernese par sessions de 24 h (avec éphémérides précises IGS).
- L'analyse qualitative est basée sur l'examen de la répétabilité sur les 3 sessions de 24 heures.
- Un premier ajustement du réseau en libre est calculé.
- Le rattachement en absolu est ensuite effectué par l'intermédiaire de stations permanentes.
- La détermination des mouvements significatifs est basée sur l'analyse des dépassements de seuils de confiance retenus.

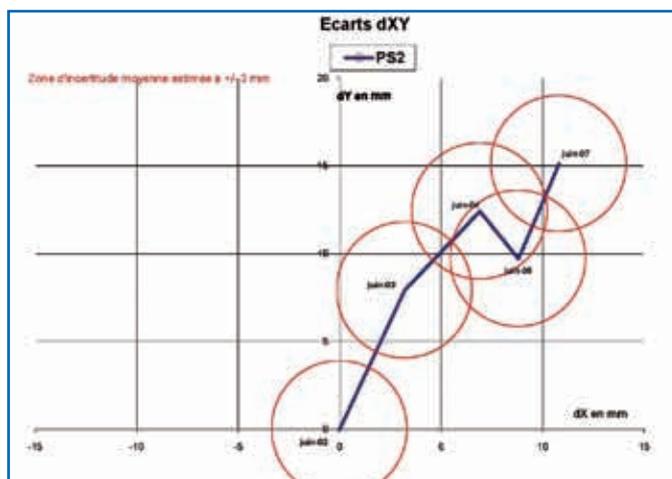


Figure 9. Exemple de graphe de déplacement en planimétrie avec report de cercles moyens d'incertitude ramenés à 3 mm.

Le réseau de nivellement direct

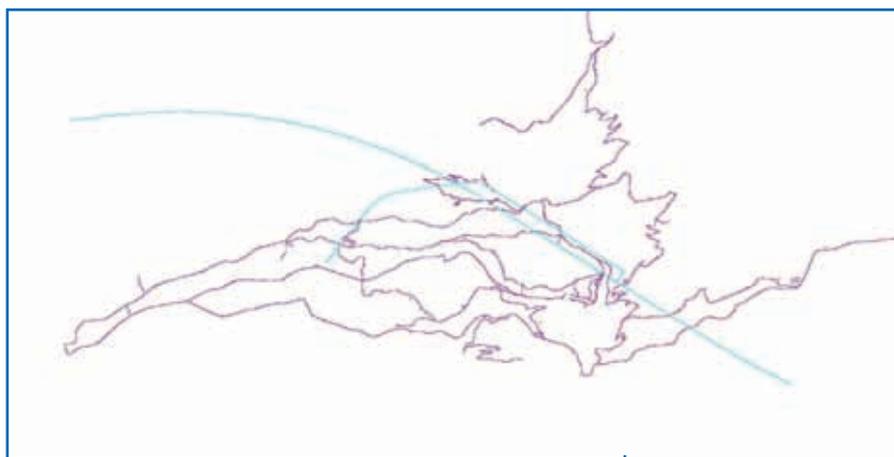


Figure 10. Figure du réseau de nivellement direct.

- Dans un premier temps les dénivelées relatives sont calculées
- Ensuite une compensation par la méthode des moindres carrés du réseau est effectuée (à l'aide du logiciel spécifique de l'Institut polytechnique de Turin)
- La détermination des mouvements altimétriques significatifs prend en compte les seuils de confiance retenus

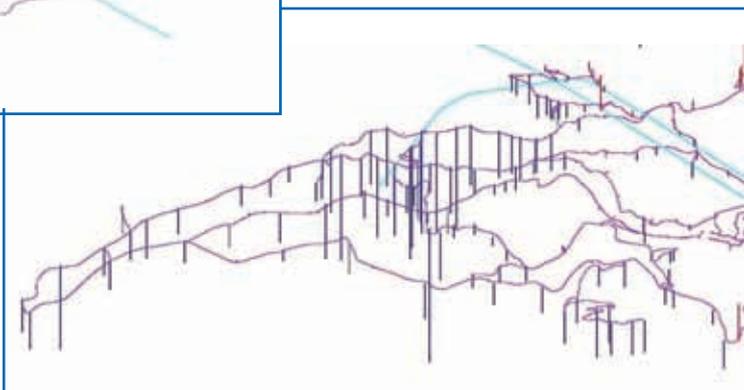


Figure 11. Exemple de graphe de déplacement en altimétrie - Secteur du Bourget.

Le réseau des conduites



Figure 12. Le réseau des conduites forcées EDF extérieures et intérieures.

Mesures extérieures

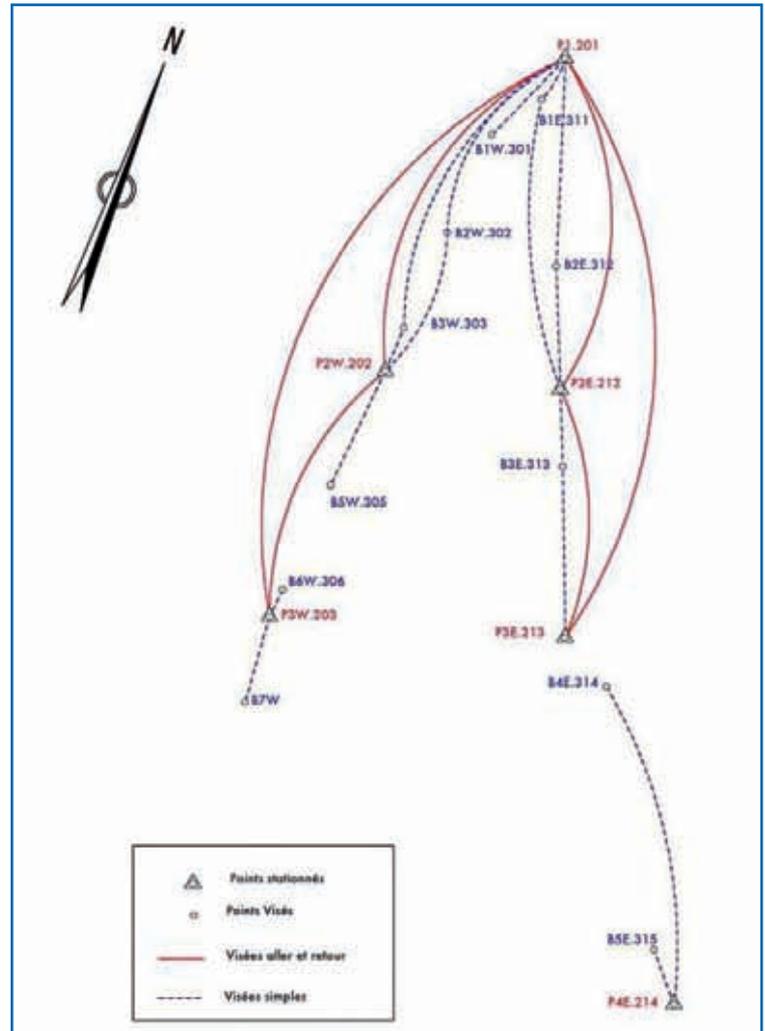


Figure 13. Figure du réseau de nivellement indirect des conduites extérieures.

- Dans un premier temps, les mesures sont réduites
- Ensuite, les dénivelées relatives sont calculées
- Les coordonnées finales sont obtenues par un ajustement en bloc du réseau avec utilisation d'altitudes de référence issues du nivellement direct
- La détermination des mouvements Z prend en compte les seuils de confiance retenus

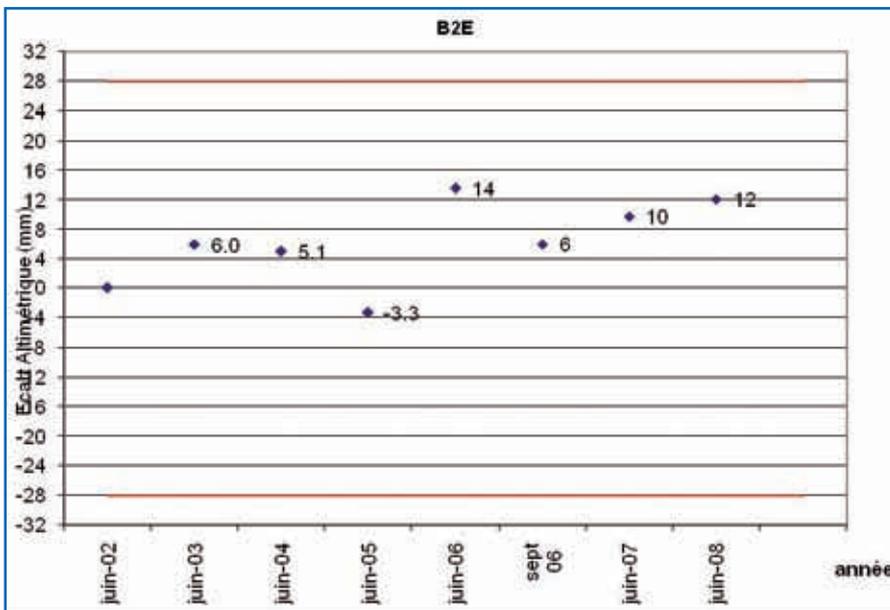
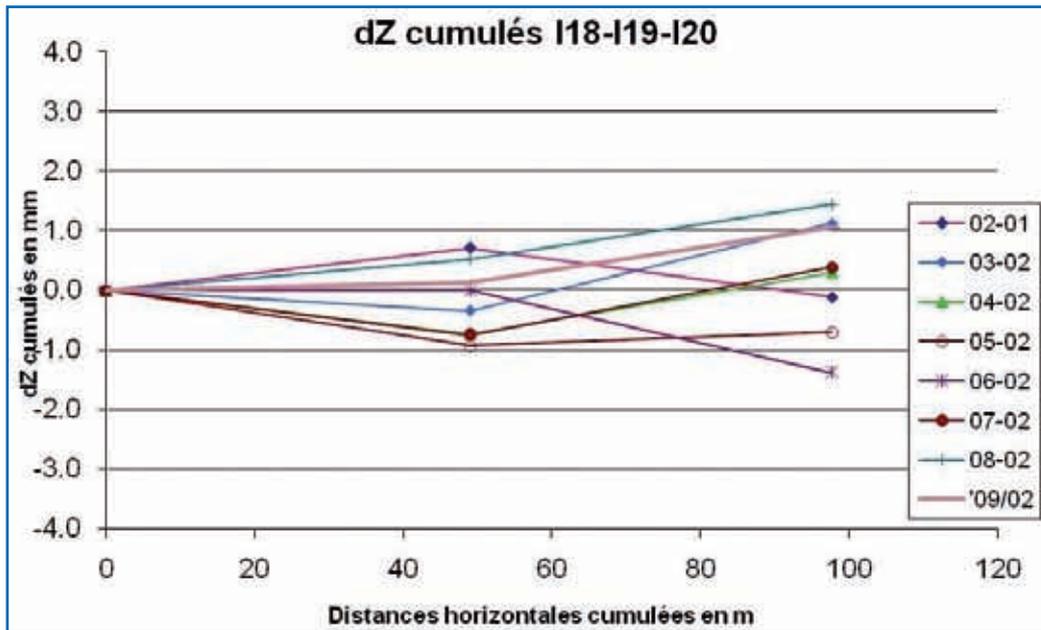


Figure 14. Exemple de graphe de mouvements altimétriques avec report de l'intervalle de confiance retenu de 2.8 mm.

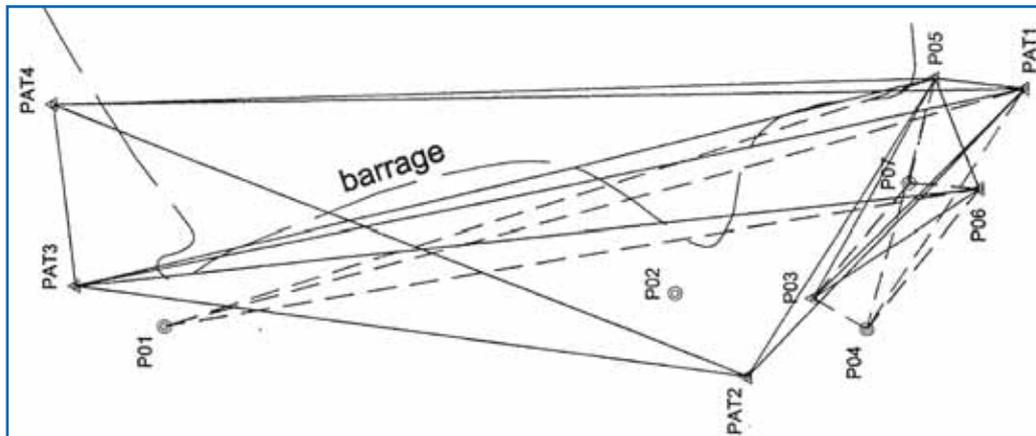
Mesures intérieures



- Dans un premier temps, les mesures sont réduites
- Ensuite, les dénivelées relatives sont calculées (moyennes AR)
- La détermination des mouvements relatifs Z (par tronçon, entre 2 culées) prend en compte les seuils de confiance retenus.

Figure 15. Exemple de graphe de mouvements altimétriques cumulés - par tronçon

Le réseau du barrage de Plan d'aval



- Dans un premier temps, les mesures sont réduites
- Les coordonnées finales XYZ sont obtenues par un ajustement en bloc du réseau, avec utilisation d'altitudes de référence issues du nivellement direct et des coordonnées de référence en XY des 2 points EDF fixés en local (PAT2 et PAT3)
- La détermination des mouvements prend en compte les seuils de confiance retenus.

Figure 16. Figure du réseau du barrage de Plan d'Aval.

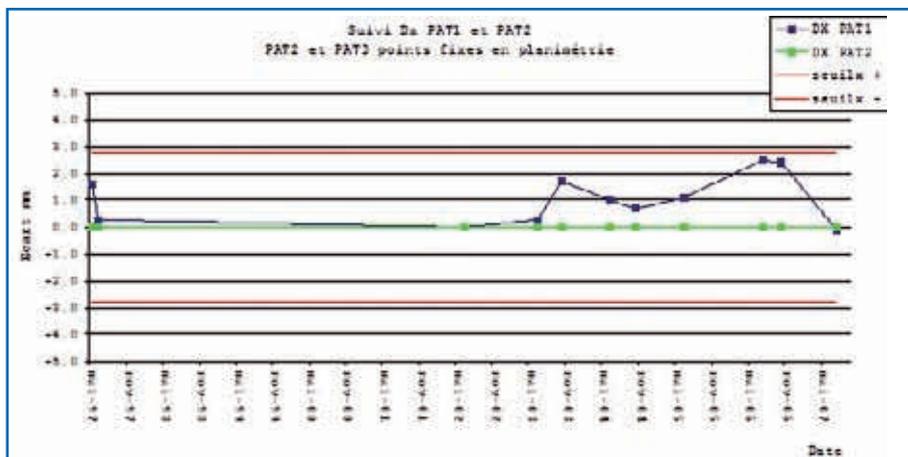


Figure 17. Exemple de graphe de mouvements dX - PAT1 et PAT2 (fixe) avec report d'un intervalle de confiance retenu de 2.8 mm.



Figure 18. Tachéomètre sur pilier P1.

DATA BASE ARCHIVAGE DES DONNÉES

Une base centralisant toutes les données provenant des études, reconnaissances et investigations géodésiques a été mise en place.

Elle comprend :

- Etudes et suivis géologiques, hydro-géologiques : plans / mesures chimiques et physiques...
- Etudes et suivis environnementaux : plans et cartes thématiques
- Travaux : Sondages / relevés de front / convergences
- Suivi topométrique et géologiques : mesures et rapports avec cartes de déplacements

Conclusion

Cette volonté de la part de LTF consistant à mener, préalablement à la réalisation du futur tunnel de base, des investigations topométriques et géodésiques destinées à mettre en évidence et à quantifier les mouvements de terrains et d'infrastructures, constitue une approche novatrice et résolument responsable.

Ces investigations entreprises, à grande échelle et à long terme, répondent à un objectif à la fois local et global de contrôle de stabilité, concernant aussi bien les interférences des travaux de percement pouvant survenir vis-à-vis des ouvrages existants que l'évolution des couches de terrains alpins traversés par un long tunnel souterrain, de direction Est-Ouest, croisant plusieurs structures géologiques et tectoniques.

Les éventuelles déformations en surface causées directement par les travaux souterrains seront ainsi identifiées et suivies. L'évolution récente, de type naturelle, des ouvrages et des terrains, sera, quant à elle, mieux connue. ●

Contact

Franco GALLARA – LTF
franco.gallara@ltf-sas.com

Stefano LIONE – LTF
stefano.lione@ltf-sas.com

Michel BOISSENOT – Géode
bourg@geode.cc

Fabrice COL – GGC
f.col@wanadoo.fr

Piero NURISSO – Geoworks
info@geoworks.it

Ilario PREVITALI – Sintegra
ilario.previtali@sintegra.fr

ABSTRACT

Within the studies undertaken for the project of railway between Lyon and Turin, by Lyon Turin Ferroviaria (LTF), various topometric and geodetic survey works were undertaken. The carried out investigations have as main aims the follow-up of the movements of grounds and infrastructures relating to the boring of the three French scouting galleries. They are also intended to characterize the tectonic deformations existing before the construction of the main tunnel. This second objective is innovator in this context of a great civil engineering project. Various types of measurements such as positioning GPS, direct or indirect levelling and tachymetry were required. LTF decided to carry out, before the realization of the future main tunnel, topometric and geodetic investigations. Their goals were to quantify the movements of the soils and of the infrastructures. This decision constitutes an innovative approach.

These investigations undertaken, large scales and long-term, meet an at the same time local and total aim of control of stability, relating to as well the interferences of work of boring which can occur with respect to the existing works as the evolution of the layers of alpine grounds crossed by a long underground tunnel, of East-West direction, crossing several geological and tectonic structures. The possible deformations on the surface caused directly by underground work will be thus identified and followed. The recent evolution, of natural type, the works and the grounds, will be, as for it, better known.



Figure 19. Village de Saint Martin La Porte.