

## RECONNAISSANCES GEOLOGIQUES

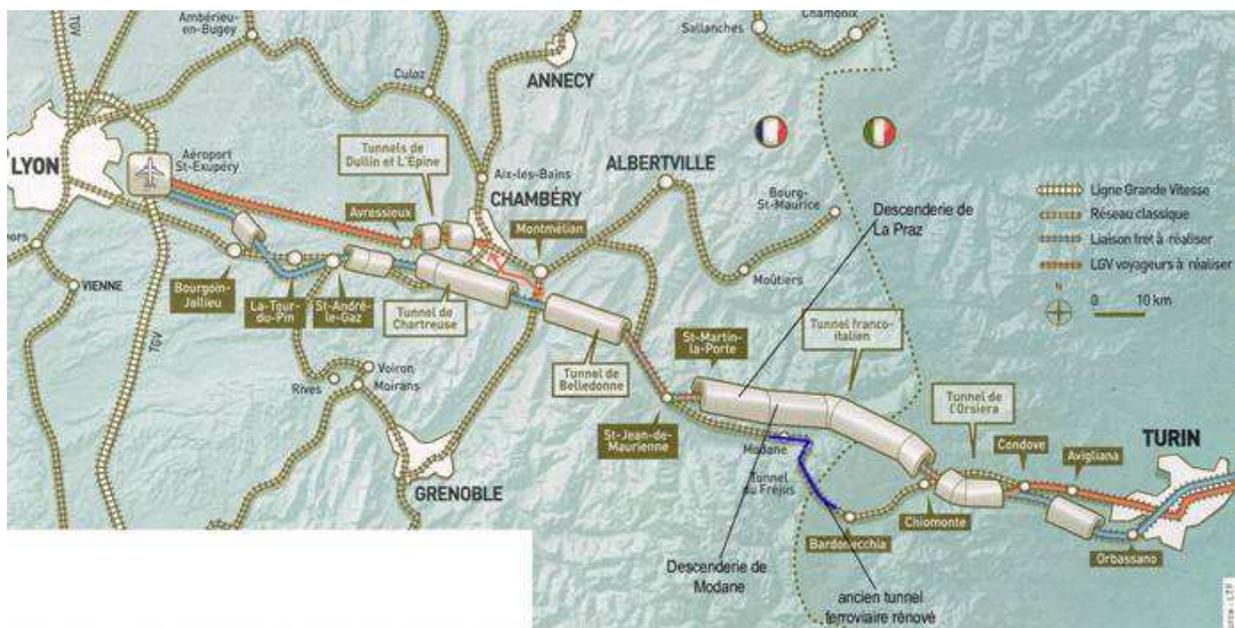
## TUNNEL FERROVIAIRE LYON TURIN

Gilles Ménard LGCA Chambéry UMR5025 CNRS

## I - LE PROJET et SON TRACE

La liaison ferroviaire Lyon Turin est constituée de deux lignes : une ligne fret et une ligne voyageurs. Les profils des deux lignes répondent à des impératifs différents, la ligne voyageurs étant une ligne grande vitesse. Ces deux lignes ont cependant des tronçons communs utilisant les principaux tunnels, ces tronçons de voies mixtes doivent correspondre aux besoins du fret et des TGV notamment en terme de rayon de courbure et de pente maximale.

Les médias ne mentionnent que le tunnel franco italien sous la Vanoise, ces lignes nécessitent néanmoins le creusement d'autres tunnels plus courts mais de longueur supérieure aux tunnels ferroviaires existants aujourd'hui en France.



La ligne voyageurs traverse le massif de l'Épine dans un tunnel vers Chambéry, la ligne fret traverse la Chartreuse dans un tunnel de 17km de long. La partie mixte traverse le massif de Belledonne dans un tunnel de 10 à 30km ( il existe encore plusieurs tracés) avant de traverser la Vanoise dans le tunnel principal de 50km. Le schéma ci-dessus est issue d'un journal de la région Rhone Alpes de Janvier, dans un autre journal de cette même région, le tunnel de Belledonne n'existe plus et les lignes fret et LGV se rejoignent à Montmélian pour emprunter les vallées de l'Isère et de l'Arc jusqu'au tunnel de base franco italien).

La liaison ferroviaire existante qui part de Modane jusqu'à Bardonecchia utilise un tunnel plus court mais avec une pente maximale de la voie de 3,3% alors que la pente maximale acceptable pour la nouvelle ligne est de 1,25%. Pour l'ancien tunnel, il faut doubler la motrice pour le tronçon le plus pentu ce qui ne serait plus le cas: gain de temps et de

flexibilité). Ceci oblige à créer l'entrée dans le tunnel beaucoup plus bas dans la vallée et de ressortir aussi plus bas donc plus loin dans la vallée italienne. Cette contrainte de pente est associée à la ligne de fret : pour que cette liaison puisse être rentabilisée, il faut pouvoir y faire passer des trains normaux venant de loin sans être obligés de doubler les motrices avant de passer le tunnel ou remonter la vallée. La conséquence principale est bien sûr l'allongement de la longueur du tunnel ce qui fait que l'Arc se trouve 300m au-dessus du tunnel avec tous les problèmes que cela entraîne: infiltrations, pompage de débits importants...

La contestation contre le tunnel coté italien ne remet en cause que le tracé coté italien, une possibilité étant un déplacement de l'entrée coté italien. Du fait de ces incertitudes, les reconnaissances côté italien sont stoppées.

Le tunnel principal, qui est traité dans la suite de l'exposé, est constitué de deux tubes et de trois descenderies côté français (St Martin de la Porte, La Praz, Modane). Une « gare » souterraine est prévue au niveau de Modane uniquement pour permettre le croisement des trains (ou pour que le fret laisse passer les TGV). La reconnaissance géologique a débuté par une cartographie de surface. Dans un deuxième temps, les forages puis les galeries de reconnaissance permettent de connaître la géologie en profondeur. Le creusement des galeries de reconnaissance a été remplacé par le creusement direct des descenderies. Comme l'Arc se trouve 300m au-dessus de la descenderie de Modane, le débit d'eau d'exhaure à évacuer s'est révélé très important sans qu'il y ait possibilité d'évacuation gravitaire. A terme, ces descenderies doivent servir d'attaques intermédiaires pour le creusement des deux tubes définitifs. En exploitation, elles seront utilisées pour la sécurité et la ventilation des tubes.

Au 01/02/08, le percement de la descenderie de Modane commencé en 2002 est terminé avec 4030m de galerie. De grosses difficultés techniques ont été rencontrées à St Martin de la Porte dont le percement a débuté en 2003, la longueur percée est de 1740 et 2280m. A La Praz (2006) 1508 et 2570m de galerie ont été percés.

Coté italien, le creusement n'a pas débuté d'autant qu'avec les incertitudes de gestion politique du dossier, le tracé peut changer.

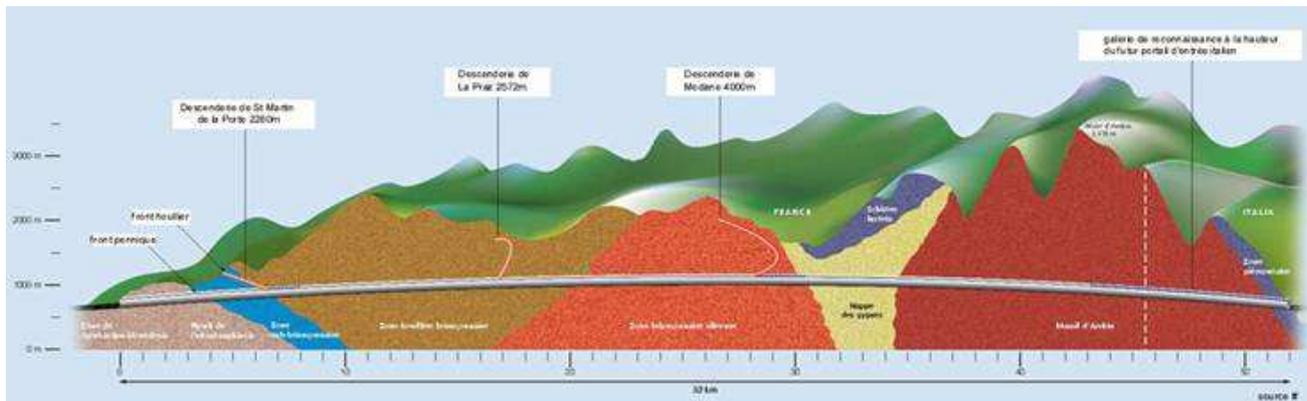
A Saint Martin de la Porte, la galerie traverse un terrain houiller peu métamorphisé avec la schistosité dans le sens de la galerie, il en résulte lors du creusement, une forte décompression de terrain instable nécessitant des renforcements plus importants que prévu.

Le projet de tunnel a véritablement été lancé en 1990 avec deux tracés initiaux. C'est le tracé Nord qui a été retenu pour des questions de creusement de la gare intermédiaire et pour des questions de facilités d'accès aux descenderies. En 1996, le tracé a été modifié pour éviter une grosse masse de gypse karstifié (fort taux de vide nécessitant la construction d'un véritable viaduc souterrain)!

Par ailleurs, des circulations d'eaux superficielles étaient attendues, il s'est avéré qu'elles circulaient sur une épaisseur bien plus importante que prévue. Pour résoudre ce problème de débit important d'eaux superficielles (>100m<sup>3</sup>/sec) le début du tracé des galeries des descenderies a été sub horizontal pour permettre l'écoulement gravitaire du débit très important d'eaux superficielles venant des terrains sus jacentes, cette modification de profil a généré un retard à Modane. Cette grande épaisseur de la nappe d'eaux superficielles peut s'expliquer par des roches cristallines donc étanches mais très fracturées dans sa partie supérieure. A Saint Martin de la Porte, le même profil de galerie a été choisi en tenant compte de l'expérience de Modane et cela s'est révélé inutile.

Une autre modification du tracé a été faite à l'E de Saint Julien. Une épaisseur de 800m de cône de déjections d'un torrent a été rencontrée sur le tracé du tunnel avant d'entrer dans la roche dure. Un report du tracé vers le N a été nécessaire pour rester dans cette roche et ne plus ressortir dans ces terrains de couverture.

## II – GEOLOGIE des TERRAINS traversés par le TUNNEL



En parcourant l'itinéraire du tunnel d'W en E les terrains rencontrés se répartissent en 8 zones. A l'intérieur d'une zone, il peut y avoir des secteurs plus réduits au sein desquels les enchevêtrements de roches peuvent être nombreux.

- des terrains appartenant aux unités externes constituées de flysch des aiguilles d'Arves avec des bancs gréseux et des schistes noirs. Il comporte à St Julien Montdenis un cône de déjection composé de matériaux meubles et très hétérogènes. Cela imposera des travaux de consolidation lors du premier creusement.

2 - Une zone interne sub briançonnaise avec des plis isoclinaux dans des calcaires, des dolomies et des calcaires marneux (Croix des Têtes) se caractérisant par leur dureté. La présence éventuelle de poches d'eau générera des contraintes techniques d'évacuation.

- Le contact avec la zone houillère se fait par une couche de gypse. Ce gypse a été déshydraté par le métamorphisme et cette anhydrite est remontée en surface suite à l'érosion et s'est trouvée réhydratée. Ce gypse est soluble ce qui n'est pas favorable à sa tenue dans le temps.

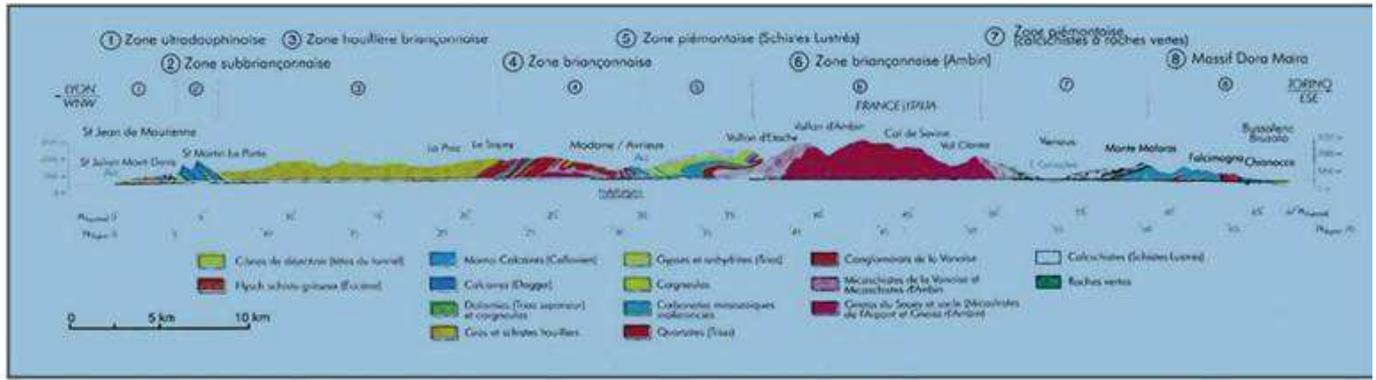
- Les plissements houillers complexes de la vaste zone briançonnaise avec une alternance de grès et de schistes noirs parfois métamorphisés. Vers le pic des Encombres, ces schistes sont peu métamorphisés et peu stables. L'on y trouve du charbon, ce qui entraîne la présence éventuelle de grisou et donc, des risques d'explosion. Le grès, également très présent, est moins dur que dans la zone précédente mais plus abrasif.

- Une zone briançonnaise typique de la Vanoise de 10km d'épaisseur avec une base siliceuse surmontée en surface de terrains carbonatés. Le tunnel passe dans la partie siliceuse: quartzite roche dure et abrasive et les micaschistes, plus faciles à travailler. Ces 2 types de terrains sont parfois séparés par des failles contenant de l'eau.

- Zone de calcschistes et de schistes lustrés du piémontais. Le tunnel passe juste sous cette couche dans des roches dures comme les dolomies et les calcaires, alternant avec des roches plus tendres, les anhydrites et sans eau.

- Dans l'Ambin nous trouvons des gneiss et des micaschistes. C'est la zone où la couverture est la plus importante (2500m) : il en résulte les problèmes liés à la contrainte notamment sur le tunnelier (pression exercée par les terrains sus-jacents) A ce risque de coincement du tunnelier est associé la décompression des terrains vis à vis de la structure du tunnel. A ce niveau, la reconnaissance a donc pour but de savoir si le choix d'un tunnelier est pertinent : un tunnelier est plus rapide que le creusement traditionnel avec des explosifs mais cet avantage s'inverse si des problèmes de coincement apparaissent. Par ailleurs, un tunnelier est adapté à un type de terrain et lorsque les terrains rencontrés changent trop souvent, il perd de son efficacité. Pour ce tunnel, le choix n'est pas encore fait. La température dans cette zone est élevée, elle peut atteindre 50°.

- Sortie de ce massif coté italien dans des schistes lustrés avec un fort taux d'ophiolites dans des calcschistes: suture insubrienne ? La métamorphisation de ces ophiolites en présence d'eau donne de l'amiante, amiante qui est à l'origine de la contestation coté italien. Une fois identifié, on sait traiter ce problème mais cela a bloqué médiatiquement le dossier coté italien.



Coupe géologique interprétative simplifiée établie en mai 2000 (Source : Synthèse géologique par secteurs, Alpetunnel GEIE, juin 2000).

### III - Problèmes identifiés, importance de l'HYDRAULIQUE.

L'aboutissement de ces reconnaissances est de faire une coupe géologique longitudinale du tunnel, elle est bien sûr prévisionnelle. Elle doit permettre de connaître les zones homogènes, leurs caractéristiques et épaisseur. Elle doit aussi identifier les terrains problématiques tels que les cargneules. Ces dernières résultant de la dissolution de la dolomie par des eaux souterraines étaient connues comme roches de surface or sous le Rateau d'Aussois il en a été trouvé à plusieurs centaines de mètres de profondeur ; ces roches sont difficiles à traiter à l'explosif .

Parmi les terrains rencontrés, il y a des quartzites très fracturées jusqu'à des profondeurs de 300, 400 voire 800m de profondeur et qui sont très aquifères.

Les schistes houillers peu métamorphisés assurent une faible tenue des parois, ces zones sont aussi identifiées.

L'hydrogéologie pose plusieurs problèmes :

- évaluer les débits d'eau à évacuer. C'est secondaire quand une évacuation gravitaire est possible, c'est primordial dans les attaques intermédiaires où cette eau doit être pompée.
- La qualité chimique de l'eau est aussi importante. Les terrains traversés renferment des sulfures et l'eau souterraine est très minéralisée avec la présence de métaux lourds. Le rejet dans l'Arc peut être problématique.
- Certaines de ces eaux sont chaudes (vers 40°C et sont viables pour une exploitation en géothermie). Des études sont donc à faire en ce sens.
- Le tunnel draine en profondeur ce qui peut avoir un impact sur les sources en surface. En cas de tarissement de sources utilisées, il faut rechercher des captages de remplacement.
- Le drainage massif des eaux souterraines dans un massif peut avoir des conséquences mécaniques en surface. Cela peut même modifier la tectonique locale : par exemple l'allègement d'un massif relâche la contrainte horizontale dans un régime compressif. Pour suivre cette évolution et ne pas attendre d'en avoir les conséquences en termes de glissement ou déplacements de terrains par exemple, il est nécessaire de créer un réseau de capteurs géodésiques le plus tôt possible avant le début des travaux.

Dernier sujet qui est à traiter suite aux reconnaissances géologiques: comment seront gérés les déchets, quel sera leur stockage, quels sont ceux qui peuvent être réutilisés.

### IV – MOYENS de reconnaissance mis en œuvre.

La première action est bien sûr une carte géologique de surface . Elle utilise les résultats connus, des reconnaissances complémentaires sur le terrain et aériennes sont faites.

Ces études ont permis en 2002 une nouvelle interprétation de la zone briançonnaise (voir plus loin).

De nombreux forages sont réalisés avec des diagraphies (enregistrement de paramètres physiques lors du forage). En 1995 ces techniques utilisées (images de parois ou BHTV) par les pétroliers sont adaptées aux forages de reconnaissance géologiques (diamètres de forage plus petits). Cette mise au point a même justifié la ré-exploitation de forages plus anciens.

La sismique a donné des résultats mitigés. Le développement de la sismique en forage a permis de mettre en évidence des failles invisibles depuis la surface.

Un réseau géodésique important a été mis en place dès 1995. de nombreuses mesures avaient été faites bien avant cette date. Les réseaux déjà existants tels que celui de l'IGN sont mis en cohérence avec les quelques 450 capteurs rajoutés depuis 2002 et les anciennes mesures de différents réseaux sont intercalibrées. Les campagnes de mesures sont annuelles sur tout le réseau et mensuelles à proximité des descenderies.

Des forages dirigés ont été réalisés à Avrieux et à Etache (W du massif d'Ambin). Ils ont permis de travailler dans l'axe du tunnel. Cette technique utilise des boues épaisses sans rinçage ce qui est très pénalisant vis à vis des résultats géologiques que l'on peut en retirer.

Les forages ont révélé l'existence d'une paléo vallée de l'Arc en hauteur sur le flans S de la vallée actuelle, recouverte par des schistes lustrés elle n'est pas visible en surface.

Les forages ont été réalisés à grande échelle ce qui est une source unique de données pour la géologie alpine (144 forages soit une longueur cumulée de 51km). Ces forages étaient prévus destructifs en partie haute et avec des carottages en profondeur. Ce choix ne permet pas de recueillir toutes les informations géologiques sur les couches supérieures (recueil de boues et de copeaux). Le choix des italiens de carotter sur toute la hauteur était plus judicieux car pour comprendre les structures des couches inférieures il est parfois bien utile de savoir comment sont configurés les terrains sus jacents et de pouvoir faire les raccordements entre les couches supérieures et inférieures.

Par ailleurs, les forages ne sont pas vraiment verticaux, une déviation non contrôlée allant jusqu'à 30 ou 40° est possible. Le forage suit l'anisotropie des couches et notamment, la tête se positionne perpendiculairement à la schistosité principale ; dans d'autres cas, c'est la contrainte locale ou la présence d'une faille qui dévie le forage (ces cas se sont surtout rencontrés dans le houiller). Une aiguille aimantée est introduite dans le puits, à une certaine profondeur cette aiguille est bloquée et remontée. La lecture fine de son orientation permet de connaître la déviation du forage.

La structure des couches géologiques est tellement complexe dans cette région que la corrélation n'a pas toujours été possible (ou est incertaine) entre les couches de forages distants de 400m.

Diagraphies . Les paramètres physiques mesurés en continu lors du forage sont la radioactivité (celle ci provient principalement des phyllosilicates, micas), la vitesse du son (ondes P et S, ces vitesses sont caractéristiques des terrains mais aussi de leur état de contrainte et de leur fracturation), le BHTV (imagerie de la paroi). Le fluide de forage est aussi objet de diagraphie : température, conductivité, flux. La mesure du flux permet de connaître les circulations entre nappes, cette mesure est ponctuelle et elle est réalisée en quelques points du puits car elle nécessite d'arrêter le forage (micro moulinet en faisant une courbe à la montée et une courbe à la descente).

Pour la mesure de la conductivité, le puits doit être préalablement rincé. Il y a ensuite un temps de repos avant de faire la mesure (en général 12h). La mesure de la température est importante vis à vis des circulations d'eau dans les terrains, cette mesure peut être perturbée par le forage. Pour améliorer la mesure il faut multiplier le nombre de relevés tout au long du forage. Par exemple, 5 étapes de mesures permettent d'avoir une bonne restitution du profil thermique naturel. Des mesures de pression hydraulique sont faites à différents niveaux.

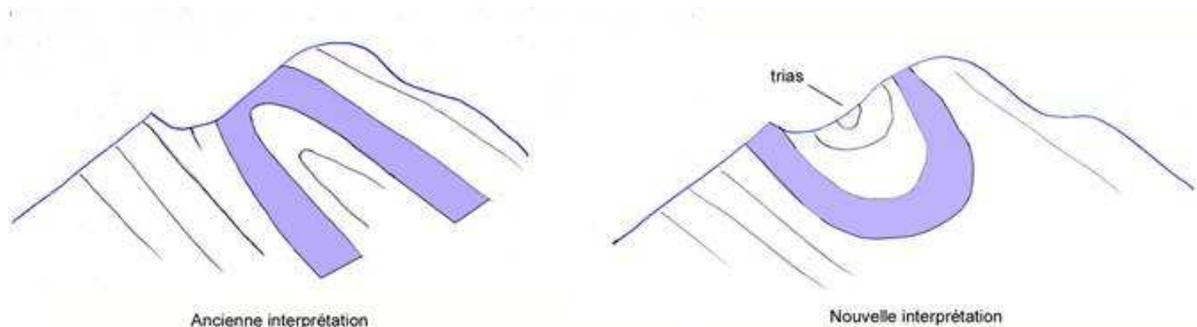
Les mesures de conductivité sont accompagnées d'analyses chimiques. Suivant une gamme croissante de valeurs de conductivité, on identifie si on est en présence d'ions  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Dans certains cas la conductivité

augmente avec la durée du temps de minéralisation, il y a alors dissolution progressive de la paroi. L'analyse de la minéralisation permet de mettre en évidence les arrivées d'eau intermédiaires, la température est représentative des gros débits entrants ou sortants.

## V – Résultats obtenus pour le creusement du tunnel.

Les schistes lustrés sont absents à la profondeur du tunnel coté français.

Les différentes mesures dans la basse vallée de la Maurienne ont conduit à réinterpréter les plissements bien connus de la Croix des Têtes. Vu de la vallée ou du versant opposé, le plissement ressemble à un anticlinal. Le travail fait pour le tunnel a fourni les éléments pour une nouvelle interprétation et il s'agit en fait d'une succession de plis isoclinaux. Le pli visible sur le flanc de la Croix des Têtes est en fait une gouttière ayant un axe très incliné vers la vallée (pente de l'axe plus forte que celle de la vallée ce qui lui donne cette vision d'un anticlinal). Voir les schémas ci dessous, ( j'ai personnellement du mal à faire le lien entre ces schémas et ce que j 'ai ramené de notre voyage en Maurienne ou avec ce qu'il y a sur le site de Gidon). Comme nous avons eu une très mauvaise météo lors de notre voyage en Maurienne nous pourrions envisager de s'y arrêter à l'occasion .



L'accident de Chavière a été réinterprété. Ce n'est plus un enfoncement du socle sous la zone houillère ( ce qui serait un sous charriage), il s'agirait plutôt d'une structure fortement écaillée et renversée sur le flanc E de cette zone houillère : un synclinorium écaillé dans la quartzite le tout sur une épaisseur de 1000m ( remarque : il sera intéressant d'aller en septembre avec JM Bertrand dans cette zone pour voir ).

Le flux thermique est proche de la valeur régionale hormis localement dans la zone houillère. Il est à remarquer que les eaux souterraines de la zone houillère sont carbonatées alors que ces terrains sont principalement siliceux, il y a même des tufs en surface.

Les zones de gypse (anhydrite) ont une conductivité thermique plus importante ce qui se retrouve sur le flux thermique apparent (région de Modane). Le flux de chaleur est associé à un gradient de température plus ou moins important et il est moins important dans les gypses qui ont une meilleure conductivité. La mesure du flux thermique permet de dimensionner la ventilation en exploitation. Le gradient thermique au niveau du tunnel est imposé par les circulations fluides dans le massif.

La sismique réflectivité est variable avec le temps et les contraintes. Dans les zones peu ouvertes, elle varie avec les contraintes, cette variation est importante dans les zones de circulation d'eau. Une variation de contrainte peut interrompre la circulation d'eau ce qui induit une forte variation du signal. Il n'a pas été possible de vérifier s'il y avait bien des communications verticales entre les circulations d'eau.

Géodésie : Les différents réseaux IGN, ONERA, tunnel routier du Fréjus, planimétrie du barrage du Plan d'Aval ont été mis en concordance. Les mesures en x et y ont été améliorées par les mesures GPS, les mesures en z du GPS ne sont pas

très bonnes à cause de l'importance des perturbations atmosphériques.

Les mesures ont été faites pour caractériser les terrains avant les travaux. Ce suivi a permis de mettre en évidence une crise tectonique asismique entre 1995 et 2003. Un affaissement s'est produit sur une largeur de 25km dans la zone houillère aux environs de Modane puis une inversion du mouvement (surrection). Aucune sismicité notable n'a été observée dans cette région à cette période. Les mesures GPS n'ont pas révélé de déplacements horizontaux. L'enfoncement au niveau de Bramans est de 5cm/an entre 95 et 2003 avec un maximum de 7. Puis retour au niveau de 1998 en 2003 et stabilisation en 2004. Ce mouvement n'a pas été expliqué mais pour ce qui est de mesurer le niveau stable avant les travaux afin de détecter des mouvements ultérieurs associés aux travaux, ce n'est pas un franc succès ! Il a fallu élargir la zone pour trouver les zones restées stables lors de cet épisode

Référence : Le texte est la transcription des notes de cours que j'ai complété avec des éléments du dossier d'enquête publique du tunnel

[http://www.ltf-sas.com/pages/articles.php?art\\_id=325](http://www.ltf-sas.com/pages/articles.php?art_id=325)

[Vers : Comptes-rendus des conférences](#)

[Vers : Calendrier](#)