

N° du projet : 101'292 N° de contrat : 151'547	Programme Géothermie	Sous mandat de Office fédéral de l'énergie
---	----------------------	--

Rapport final Septembre 2006

Concept de drainage des tunnels en vue d'une optimisation de l'utilisation géothermique

(Valorisation du potentiel géothermique des tunnels – Recherche d'optimisation)

Préparé par
Jules Wilhelm
Ingénieur-conseil
Ch. du Fau-blanc 26
1009 Pully

RESUME

La valorisation énergétique de la chaleur rencontrée par les ouvrages souterrains remonte en Suisse à près de trente ans. La première application connue se situe au portail sud du tunnel autoroutier du St. Gothard où, dès 1980, on utilise la chaleur véhiculée par les eaux d'infiltration drainées par le tunnel pour chauffer les installations du centre d'entretien à Airolo. Les estimations indiquent qu'un potentiel de plusieurs dizaines mégawatts est encore disponible. Outre l'aspect purement énergétique, la contribution à la propreté de l'air peut contribuer à mettre en évidence l'image de marque écologique d'un ouvrage.

A l'heure actuelle l'utilisation du potentiel thermique des eaux drainées par les tunnels se limite à les capter au droit des portails et les conduire vers les points d'utilisation plus ou moins éloignés. Cette manière de faire peut être suffisante dans les cas où le potentiel d'utilisation est manifestement réduit. Cependant, lorsque l'on peut s'attendre à un potentiel d'utilisation plus marqué, que ce soit à moyen ou à long terme, il devient justifié d'examiner assez tôt dans quelle mesure le rendement thermique pourrait être amélioré, ou si une autre possibilité s'offre pour la valorisation de ce potentiel.

Le rendement thermique des eaux souterraines des tunnels est susceptible d'être améliorée par les voies suivantes :

- réduction des pertes de température de l'eau le long du tunnel : isolation de la conduite d'évacuation ;
- optimisation des débits d'eau disponibles : utilisation des eaux souterraines disponibles par activation au moyen de forages complémentaires ;
- drainage séparatif : captage et évacuation des eaux souterraines de températures différentes dans des conduites distinctes.

L'optimisation tiendra compte notamment des sujétions liées à la protection des eaux de l'émissaire extérieur face à la pollution thermique. Un préalable à ces améliorations est que des mesures ad hoc soient prises au niveau de la conception des ouvrages déjà, ce qui présuppose une bonne coordination entre toutes les parties intéressées dès le début de la planification.

Après un rappel de l'état actuel de développement et des exigences techniques et environnementaux, le présent rapport passe en revue les trois modes d'optimisation du rendement thermique énumérées ci-dessus. Par ailleurs, un chapitre est consacré à la présentation de nouvelles techniques de récupération de la chaleur souterraine. Il s'agit d'équiper en échangeur thermique des différentes parties constitutives d'un tunnel en contact avec le massif, tels les ancrages de soutènement, les gaines d'étanchéité, les revêtements et les divers éléments en béton au niveau du radier.

Le dernier chapitre fait mention de deux importants projets de tunnels, l'un en cours de lancement, l'autre encore à l'état de discussion préliminaire, où les procédures optimisées de valorisation du potentiel géothermique pourraient être envisagée.

Des propositions d'actions pour la mise en œuvre des améliorations évoquées sont présentées dans les conclusions. Une annexe est consacrée aux sources documentaires et aux références bibliographiques.

ZUSAMMENFASSUNG

Seit beinahe dreissig Jahren wird in der Schweiz bei Tunnelbauten das geothermische Potential genutzt. Die erste bekannte Anwendung wurde am Südportal des Gotthardstrassentunnels umgesetzt. Seit 1980 wird dort die Wärme des aus dem Tunnel abgeführten Bergwassers gefasst, um das Wartungszentrum in Airolo zu heizen. Es wird geschätzt, dass noch immer ein Potenzial von mehreren Dutzend Megawatt besteht.

Heute beschränkt sich die Nutzung des thermischen Potenzials von Tunnelwasser darauf, dieses bei den Portalen zu fassen und zu den mehr oder weniger weit entfernten Verwendungsorten zu leiten. Diese Vorgehensweise mag für Fälle mit verhältnismässig eingeschränktem Abnehmerpotenzial ausreichen. Wenn dagegen ein grösseres mittel- oder langfristiges Abnehmerpotential zu erwarten ist, lohnt es sich, frühzeitig abzuklären, in welchem Ausmass der thermische Nutzungsgrad verbessert werden könnte oder ob sich weitere Möglichkeiten zur Nutzung des Potenzials anbieten.

Der thermische Nutzungsgrad des Tunnelwassers kann auf folgende Arten verbessert werden:

- Verminderter Wärmeverlust beim entlang des Tunnels geführten Wasser : Isolation der Kanalisationsleitungen
- Nutzung einer grösseren Wassermenge : mehr Bergwasser durch zusätzliche Bohrungen verfügbar machen
- Getrennte Drainagesysteme : Fassung und Evakuierung von Bergwasser unterschiedlicher Temperatur in getrennten Leitungen

Die Verbesserung hat aber den Anforderungen des Gewässerschutzes zu genügen, insbesondere im Zusammenhang mit der thermischen Belastung des Nachfluters. Voraussetzung für solche Verbesserungen ist, dass bereits bei der Konzeption von Bauwerken geeignete Massnahmen ergriffen werden, was eine gute Koordination zwischen allen beteiligten Parteien ab Beginn der Planung bedingt.

Nach einem Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand und die technischen und ökologischen Anforderungen wird im vorliegenden Bericht auf die drei oben genannten Möglichkeiten zur Verbesserung des thermischen Nutzungsgrads eingegangen. In einem weiteren Kapitel werden die neuen Technologien zur Nutzung der Erdwärme vorgestellt. Dabei können die verschiedenen Bestandteile eines Tunnels, die mit dem Fels in Kontakt stehen, wie Felsanker, Dichtungsvliese, Auskleidungen und die verschiedenen Betonelemente im Bereich der Sohle, mit Wärmetauschern ausgestattet werden.

Das letzte Kapitel ist zwei grossen Tunnelprojekten gewidmet, bei denen die Massnahmen zur Verbesserung der Erdwärmenutzung in Betracht kommen. Eines dieser beiden Projekte befindet sich in der Lancierungsphase, zum zweiten finden noch Vorbereitungsgespräche statt.

Vorschläge zur Umsetzung der erwähnten Verbesserungsmöglichkeiten sind in der Schlussfolgerung aufgeführt. Der Anhang schliesslich besteht aus dokumentierenden Quellen und dem Literaturverzeichnis.

SOMMAIRE	Page
1. INTRODUCTION – ETAT DE LA QUESTION	2
2. DEVELOPPEMENTS ACTUELS	4
2.1 Estimation du potentiel	
2.2 Utilisation des eaux du tunnel de la Furka	
2.3 Projet de serre tropical à Frutigen	
2.4 Le potentiel des tunnels de base d'Alptransit	
2.5 Autres ouvrages	
3. ASPECTS DE VALORISATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE DES TUNNELS	10
3.1 Evolution des températures dans les souterrains	
3.2 Gestion des eaux souterraines drainées par les tunnels	
3.2.1 Cadre juridique et réglementation technique	
3.2.2 Concept d'étanchéité et exécution	
3.2.3 Système d'étanchéité et de drainage	
4. POSSIBILITES D'OPTIMISATION DU DRAINAGE DES EAUX CHAUDES DANS LES TUNNELS	18
4.1 Introduction	
4.2. Conduite de drainage avec isolation	
4.3 Optimisation du débit des venues d'eau	
4.4. Captage sélectif des eaux	
5. NOUVELLES METHODES DE CAPTAGE DE LA CHALEUR	26
5.1 Introduction	
5.2 Eléments capteurs de chaleur	
5.3 Géotextiles énergétiques	
5.4 Contexte d'application	
6. DEUX IMPORTANT PROJETS	29
6.1 Liaison ferroviaire Lyon-Turin	
6.2 Le tunnel de base Martigny-Aoste	
7. CONCLUSIONS	36
Sources documentaires et références bibliographiques	37

1. INTRODUCTION – ETAT DE LA QUESTION

La valorisation énergétique de la chaleur rencontrée par les ouvrages souterrains remonte en Suisse à près de trente ans. La première application connue se situe au portail sud du tunnel autoroutier du St. Gothard où, dès 1979, on utilise la chaleur véhiculée par les eaux d'infiltration drainées par le tunnel pour chauffer les installations du centre d'entretien à Airolo.

Avec la réalisation, à partir des années 1970/80, de souterrains de plus en plus importants, exécutés dans des conditions géologiques et géothermiques extrêmes, le facteur thermique a vu progressivement prendre une place significative, avant tout pour des raisons de sécurité d'exécution et d'exploitation des ouvrages, comme cela fut le cas pour les grandes traversées alpines du 19ème siècle. Cependant le potentiel géothermique en présence et les quantités de chaleur dégagées, ont conduit à des réflexions sur son utilisation en tant que source de chaleur propre et inépuisable. Ainsi, à coté de quelques projets épars, tel celui du tunnel ferroviaire de la Furka, à Oberwald, mis en œuvre dans le cadre d'initiatives ponctuelles, une campagne promotionnelle fut lancée en 1995, par l'Office fédéral de l'énergie, avec comme but de recenser le potentiel géothermique des tunnels existants et en projet et d'en définir la faisabilité technique et économique.

Cette étude s'est déroulée entre 1995 et 1998, selon les trois étapes suivantes :

1. Recensement du potentiel géothermique et du potentiel de consommation des tunnels suisses (février 1996)
2. Etudes préliminaires des tunnels sélectionnés et études de faisabilité des tunnels de Vispताल, Hauenstein, Mappo-Morettina et Ricken (juin 1997)
3. Etudes de faisabilité des tunnels de Vereina, Grenchenberg, AT Lötschberg / Frutigen (Oct.1998)



Fig. 1.1 Localisation des tunnels à potentiel géothermique selon le recensement de 1998 (ZEWI)

Il en est résulté plusieurs réalisations, dont en particulier les projets des tunnels de Ricken, de Hauenstein et de Mappo-Morettina.

En parallèle, l'attention s'est concentrée sur le bénéfice pouvant être tiré du potentiel géothermique des ouvrages souterrains d'Alptransit, aux quatre portails des tunnels de base du Lötschberg et du St. Gotthard. Les études réalisées à cet effet entre 2001 et 2003 ont mis en évidence des possibilités significatives et deux projets concrets, un centre de loisir et de pisciculture tropical à Frutigen, au portail nord du tunnel de Lötschberg, ainsi qu'un centre thermal dans la Basse-Léventine, avec utilisation des eaux souterraines s'écoulant au portail sud du tunnel du St. Gotthard, se trouvent aujourd'hui en phase d'études avancées.

Dans le cas d'un tunnel existant, on se contente de récolter les eaux drainées par le tunnel à proximité du portail, sans intervention au niveau des venues d'eau souterraines. En pratique, c'est cette même démarche qui a été adoptée pour les tunnels en construction, où la valorisation énergétique des eaux souterraines a à ce jour été conduites plus ou moins en parallèle avec les projets des ouvrages souterrains. Or, une planification intégrée de la gestion énergétique des eaux souterraines permettrait de mieux tenir compte des contingences d'exécution des ouvrages dans l'évaluation des potentiels disponibles. Elle permettrait aussi d'améliorer le rendement thermique en cas d'utilisation, tout en optimisant les ouvrages de refroidissement nécessaires avant le rejet des eaux dans l'émissaire.

Le but visé par la présente étude est une recherche des conditions dans lesquelles il serait possible d'améliorer le niveau de valorisation des eaux souterraines des tunnels, en procédant à un meilleur accompagnement, voire à l'intégration du processus de planification des ouvrages à un stade précoce, afin que le potentiel géothermique soit géré au mieux dans l'intérêt à la fois de l'exploitant du tunnel et des éventuels utilisateurs de la chaleur.

Après un bref rappel du développement actuel des projets, les chapitres suivants seront successivement traités :

- principaux aspects liés à la construction des tunnels, du point de vue de la valorisation du potentiel géothermique
- amélioration des conditions de drainage des eaux souterraines
- nouvelles techniques de captage
- le cas de deux projets de tunnel

Sur la base des considérations évoquées, on conclura avec une série de propositions visant à tirer bénéfice des expériences faites et des améliorations suggérées.

2. DEVELOPPEMENTS ACTUELS

2.1 Estimation du potentiel

Le tableau 2.1 indique l'état actuel de développement des projets d'utilisation de l'énergie géothermique des tunnels, tel que recensé en 2002.

Tableau 2.1. Potentiel géothermique de 15 souterrains suisses

Tunnel	Canton	Type de tunnel	Débit d'eau [l/min]	Température de l'eau [°C]	Potentiel thermique ¹ [kWth]
Ascona	TI	routier	360	12	150
Furka ²	VS	ferroviaire	5400	16	3'758
Frutigen	BE	galerie de sondage	800	17	612
St. Gothard ²	TI	routier (N2)	7200	15	4'510
Grenchenberg (portail sud)	SO	ferroviaire	18000	10	11'693
Hauenstein ² (tunnel de base)	SO	ferroviaire	2500	19	2'262
Isla Bella	GR	routier	800	15	501
Lötschberg	VS	ferroviaire	731	12	305
Mappo-Moretina ²	TI	routier	983	16	684
Mauvoisin	VS	galerie de sondage	600	20	584
Polmengo	TI	galerie de sondage	600	20	584
Rawyl	VS	galerie de sondage	1200	24	1'503
Ricken ²	SG	ferroviaire	1200	12	501
Simplon (portail Brigue)	VS	ferroviaire	1380	13	672
Vereina	GR	ferroviaire	2100	17	1'608
Total					29'927

(1) Potentiel au portail du tunnel, avant la pompe à chaleur, l'eau refroidie à 6°C

(2) En service

Depuis lors certains projets ont été supprimés, faute d'intérêt ou de rentabilité, alors que ceux en relation avec les tunnels de base d'Alptransit, comme les projets de Frutigen et de Polmengo, ont été réévalués et intégrés dans des développements plus ambitieux (voir point 2.4).

Dans cette liste, deux projets méritent d'être cités à titre de référence, l'un réalisé et en service depuis près de 15 ans, l'autre, à l'état de projet, en raison de sa nouveauté. Il s'agit de l'utilisation des eaux du tunnel de la Furka, à Oberwald et du projet de centre tropical au portail nord à Frutigen.

2.2 Utilisation des eaux du tunnel de la Furka

Le tunnel de base de la Furka a été construit, sous le col du même nom, entre 1985 et 1991. Il relie les localités d'Oberwald en Valais à celle de Realp dans le canton d'Uri et permet d'exploiter le chemin de fer Furka-Oberalp durant toute l'année. Son tracé et les conditions géologiques sont visibles sur la figure 2.1 ci-dessous.

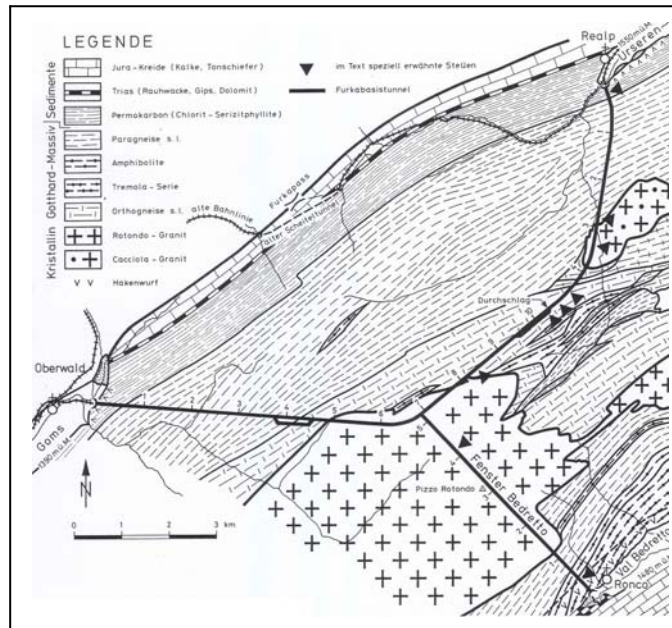


Fig. 2.1. Situation et géologie du tunnel de base de la Furka (SIA)

Sur un parcours de près de 7 km entre la fenêtre de Bedretto et la vallée du Rhône, à travers des formations cristallines, le tunnel draine depuis sa construction les eaux souterraines dont le débit est de 90 l/sec et la température de 16°C.



Fig. 2.2 Vue intérieure du tunnel (SIA)



Fig.2.3 Portail coté Valais. Le radier du tunnel se trouve 15 m au-dessus du niveau du village

Cette eau transite par un bassin de décantation à la sortie du tunnel avant d'être amenée vers les consommateurs par une conduite enterrée de 40 cm de diamètre. Sur la traversée du Rhône, la conduite est isolée et fixée au tablier du pont (figure 2.4). L'eau est distribuée aux pompes à chaleur individuelles de chaque consommateur à partir de la conduite principale (figure 2.5).



Fig. 2.4 Maisons d'Oberwald et conduite isolée fixée contre le tablier du pont sur le Rhône

La figure 2.6 indique l'évolution du nombre d'appartements raccordés et les quantités d'eau livrées entre 1993 et 2003. La puissance raccordée avoisine 1,5 MW, soit environ la moitié de la puissance disponible. Le prix de revient du kilowattheure produit se situe aux environs de 7 centimes. Ce montant ne comprenant pas le coût de la pompe à chaleur dont le prix, comparé au chauffage au mazout, est compensé par l'absence de citerne et de cheminée.



Fig. 2.5 Pompe à chaleur dans la maison de paroisse

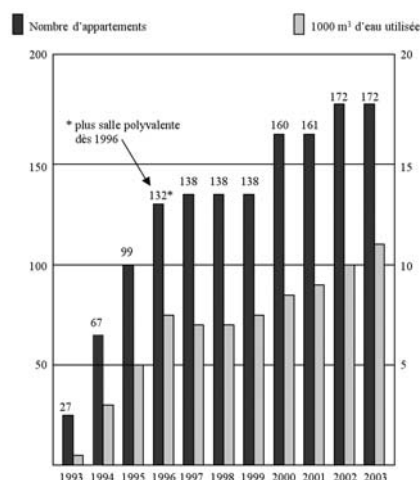


Fig.2.6 Evolution du nombre d'appartements chauffés avec l'eau du tunnel de la Furka et quantités d'eau utilisées annuellement

On constate qu'au cours des dernières années, le nombre d'appartements approvisionnés en énergie géothermique provenant du tunnel n'a pas augmenté et ceci en raison d'une stagnation de la construction. Le potentiel disponible est cependant suffisant pour fournir de l'énergie de chauffage à 200 appartements supplémentaires.

2.3 Projet de serre tropical à Frutigen

Le tunnel de base du Lötschberg fait partie du projet Alptransit de liaison ferroviaire à grande vitesse, et se situe sur le parcours entre Spiez et Rarogne (figure 2.7). Les travaux de percement du tunnel ont été achevés au printemps 2005. Les méthodes d'exécution utilisées ont été adaptées aux conditions géologiques, elles sont visibles à la figure 2.8.

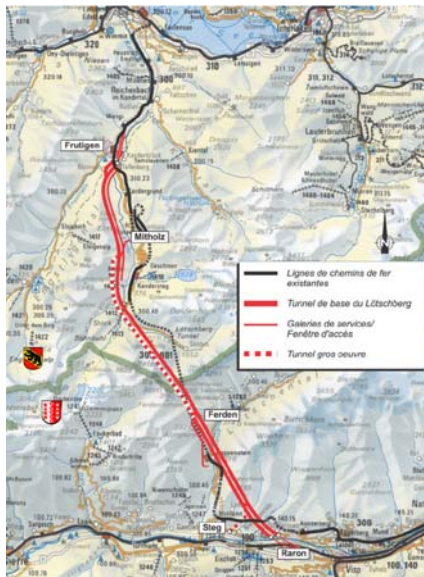


Fig. 2.7 Tunnel de base du Lötschberg
Situation générale (ATL)



Fig. 2.8 Tunnel de base du Lötschberg
Méthodes d'exécution (ATL)

Le débit des eaux souterraines drainées en direction du portail nord, à Frutigen, qui est de l'ordre de 130 l/sec, permet d'envisager leur utilisation soit pour le chauffage de bâtiments environnants, soit pour l'approvisionnement en énergie primaire de centres récréatifs ou agricoles.

La formule la plus prometteuse consiste en la création d'un centre de polyculture tropical (figure 2.9). L'eau du tunnel contribue à assurer, à l'intérieur d'une serre et durant toute l'année, une température de l'ordre de 25°C requise par la végétation et la pisciculture tropicale. L'eau ainsi refroidie peut être rejetée directement dans la rivière sans dégâts à la vie aquatique.

Ce projet a pris corps quelques années après le début de la planification et des travaux d'exécution du tunnel.

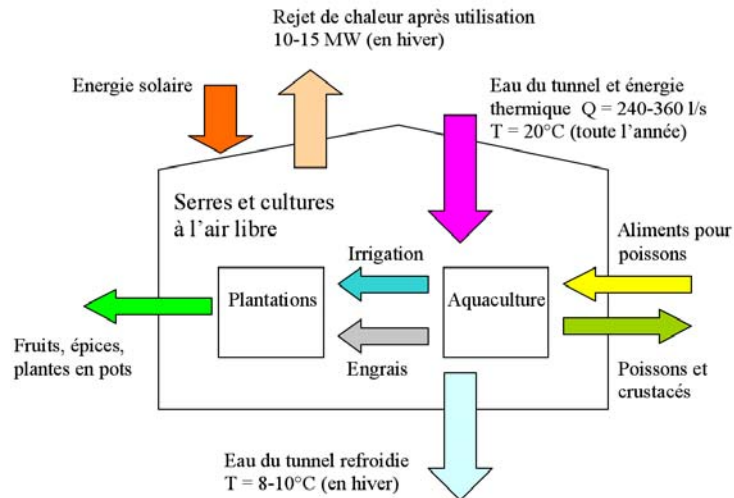


Figure 2.7 Schéma conceptuel du projet de polyculture utilisant les eaux souterraines du tunnel de base du Lötschberg à Frutigen. Les valeurs indiquées sont théoriques (EB)

2.4 Le potentiel des tunnels de base d'Alptransit

En raison des caractéristiques des tracés et des conditions d'exécution, les eaux souterraines des deux tunnels de base d'Alptransit sont toutes drainées vers les quatre portails des tunnels, toutes les fenêtres et points d'attaque intermédiaires ayant été exécutés avec une pente descendante en direction des tunnels.

Une série d'études de faisabilité a été réalisée entre 2003 et 2004 pour estimer le potentiel et les possibilités d'utilisation des eaux souterraines de ces ouvrages. Leurs conclusions peuvent être résumées comme suit.

2.4.1 Tunnel de base du Lötschberg

Au portail nord du tunnel, outre le projet de centre tropical décrit ci-dessus, les utilisations suivantes sont envisageables :

- Réseaux de chauffage à distance pour la desserte de consommateurs en énergie de chauffage et de production d'eau chaude
- Approvisionnement en énergie d'un complexe de sport et de loisir aquatique à construire
- Chauffage et eaux chaudes du centre d'entretien et des hangars destinés à l'exploitation d'Alptransit

Une comparaison avec des installations et des réseaux de chaleur exploitant le bois, bien implantés dans la région, on a pu démontrer que l'utilisation énergétique de l'eau du tunnel est intéressante. Compte tenu des sujétions conditionnant la réalisation des divers projets, comme le tracé de la conduite d'amenée, les démarches de promotion et de financement, ainsi que l'acquisition des terrains et les demandes d'autorisation, c'est la variante du centre tropical qui a le plus de chance de se réaliser.

Au portail sud, avec un débit d'eau de l'ordre de 110 l/sec à une température de 20°C, l'utilisation des eaux du tunnel est envisageable dans la zone industrielle de Rarogne Est. Le prix du kilowattheure est estimé à environ 10 centimes. Des alternatives suivantes sont envisageables :

- Réalisation d'un centre tropical à l'image du projet de Frutigen
- Utilisation pour le chauffage de chaussée (route cantonale, route nationale projetée)
- Fourniture d'eau à une installation de béton frais
- Approvisionnement énergétique au sein d'une pisciculture

Le cas échéant, le potentiel disponible est susceptible de satisfaire aux besoins énergétiques de plusieurs de ces projets, suivant l'ordre de leur réalisation.

2.4.2 Tunnel de base du St Gothard

Au portail nord on a estimé les venues d'eau possibles à plusieurs centaines de litres par seconde, à des températures pouvant atteindre 22 à 24 °C. Un important potentiel de consommation existe dans la région de la commune d'Erstfeld dans des conditions économiques intéressantes. Il s'agit en premier lieu d'énergie pour le chauffage et la production d'eau chaude domestique, mais de nombreuses autres potentialités ont été identifiées, telles les cultures maraîchères sous serres, la pisciculture, les champignonnières, etc.

Les eaux s'écoulant du portail sud, dont le potentiel estimé est du même ordre de grandeur qu'au portail nord, sont sensées être utilisées dans la région des localités de Bodio, Polleggio et Biasca, dans des installations similaires à celles des autres portails des tunnels de base, en particulier un centre tropical, un complexe de bains thermaux et des bâtiments d'Alptransit.

Comme pour le tunnel du Lötschberg, des démarches sont en cours pour clarifier les conditions de réalisation des divers projets non seulement sur le plan technique mais également en ce qui concerne les aspects administratifs et financiers.

2.5 Autres projets

Plusieurs dizaines de grands tunnels sont en phase de projet ou en cours de réalisation en Suisse, tant sur le réseau routier que dans le domaine ferroviaire, dont on peut citer comme exemple le tunnel de Zimmerberg ou le tunnel de base du Ceneri (figure 2.8).

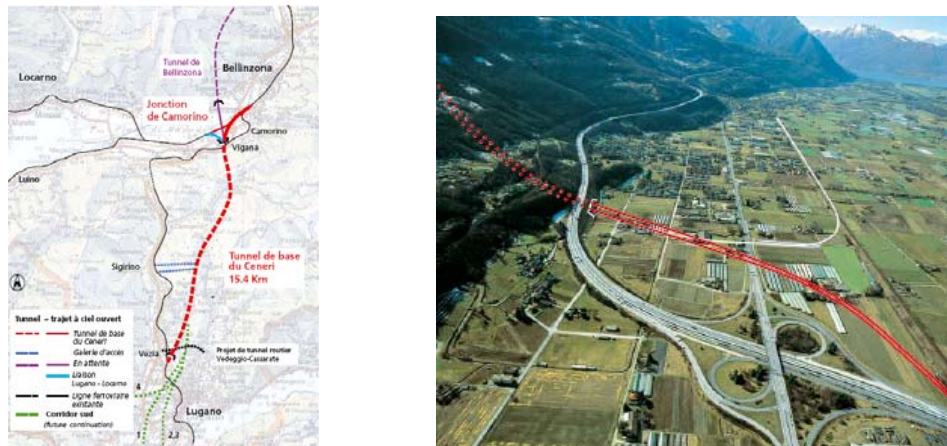


Fig. 2.8 Tunnel de base du Ceneri. Situation générale et vue de la plaine de Magadino avec la zone du portail nord à Vigana-Camorino (ATG)

Un recensement général de leur potentiel permettrait de mettre en évidence des ressources énergétiques qui devrait atteindre plusieurs dizaines de mégawatts thermiques. Il est judicieux de lancer les démarches le plus tôt possible et de façon coordonnée, afin de pouvoir optimiser la valorisation tant en ce concerne l'énergie disponible que les capacités et les modes d'utilisation, en particulier en ce qui concerne les ouvrages en voie de planification.

Les principales réalisations sont toujours le fait des lignes ferroviaires et des routes nationales, mais le rôle de ces dernières a tendance à diminuer en faveur des tunnels urbains, souvent considérables, et des souterrains construits sous l'égide des cantons.

3. ASPECTS DE VALORISATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE DES TUNNELS

Lors de la planification et de l'exécution d'un tunnel, l'objectif est de réaliser un ouvrage remplissant au mieux les critères économiques, de sécurité et d'exploitation. Les aspects liés aux conditions thermiques et hydrauliques sont traités en conséquence et ne sont pas considérés d'emblée sous l'angle d'une possible valorisation thermique. Or, dans certains cas, il peut être bénéfique de prendre des mesures au niveau de la construction déjà, pour améliorer le rendement thermique des eaux souterraines. Les conditions cadres de telles démarches et les modalités pratiques seront examinées ci-après.

3.1 Evolution des températures dans les souterrains

Les températures régnant à l'intérieur des grands tunnels ont depuis longtemps fait l'objet d'une attention particulière de la part des constructeurs de tunnels, avant tout pour des raisons de sécurité et de condition d'exécution des ouvrages, qui déterminent la nature et l'importance des installations de ventilation et de refroidissement. Comme le montrent les quelques exemples réunis dans le tableau 3.1, les températures observées ou estimées dans les grands souterrains depuis plus d'un siècle peuvent atteindre des valeurs considérables.

Tableau 3.1 - Températures maximales du rocher dans des grands tunnels
(Fabre 2001, Wilhelm 2003)

Tunnel	Couverture maximale [m]	Température maximale [°C]	Nature du rocher
Simplon	2'135	55,4	Gneiss
Lötschberg	1'673	34	Granite, schistes
St-Gothard	1'752	30,4	Granite, gneiss
Fréjus (ferroviaire)	1'600	29,5	Schistes lustrés
Ricken	530	23,5	Grès
Tauern	1'567	23,9	Gneiss
Arlberg	715	18,5	Gneiss, micaschistes
Albula	750	15	Granite
Mont-Cenis (ferroviaire)	1'610	29,5	Grès
Karawanken	370	17,9	Schistes, grès
Appennin (ferroviaire)	2'000	63,0	Calcaires, marnes
Mont-Blanc (routier)	2'500	30,5	Granite
Arc-Isère	2'100	42	Granite, gneiss
Isère-Arc	1'850	37	Granite, gneiss
Furka	1'520	24	Granite
St-Gothard (routier)	1'480	32	Granite, gneiss
Lötschberg AT	1'950	43	Granite
St-Gothard AT	2'600	45*	Granite, gneiss
Maurienne-Ambin	2'500	48,5*	Gneiss, schistes

* pronostic

Des cas particuliers sont constitués par les tunnels ferroviaires du Simplon et du St Gothard, construits en Suisse à la fin du 18^{ème} et au début du 19^{ème} siècle, en raison des conditions thermiques particulières qui ont été rencontrées, mais aussi grâce à l'observation détaillée et documentée qui nous en est parvenue à travers les rapports et les publications de l'époque.

Une comparaison des profils en long géométriques et thermiques des deux tunnels, tirés d'un document d'époque, est visible à la figure 3.1.

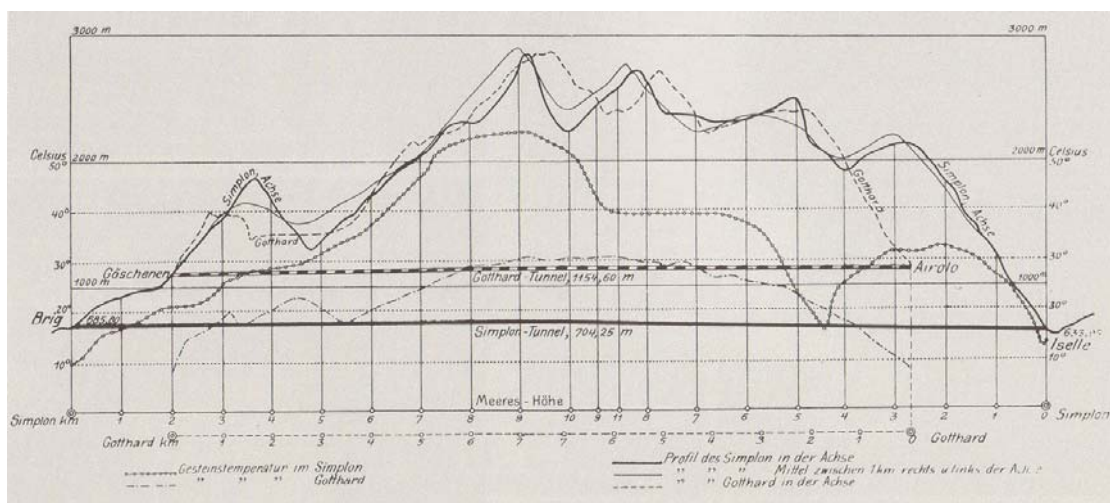


Figure 3.1 - Températures dans les tunnels du St-Gothard (1873-1881) et du Simplon (1888-1906) (Kovári 2000).

Au Simplon les observations de longue durée ont montré que, sous l'influence du courant d'air froid engendré entre les portails, les températures extrêmes de l'ordre de 55°C, mesurées pendant la construction sur la paroi du rocher, ont rapidement décru au cours des années. L'effet du refroidissement se fait sentir sur une distance de quelques dizaines de mètres à l'intérieur du massif, au-delà la température se maintient à son niveau initial.

L'expérience tirée des tunnels existants et les méthodes d'évaluation récentes permettent d'estimer l'évolution des températures à l'intérieur du massif avec une assez bonne précision (fig.3.2), même sur des très longues périodes.

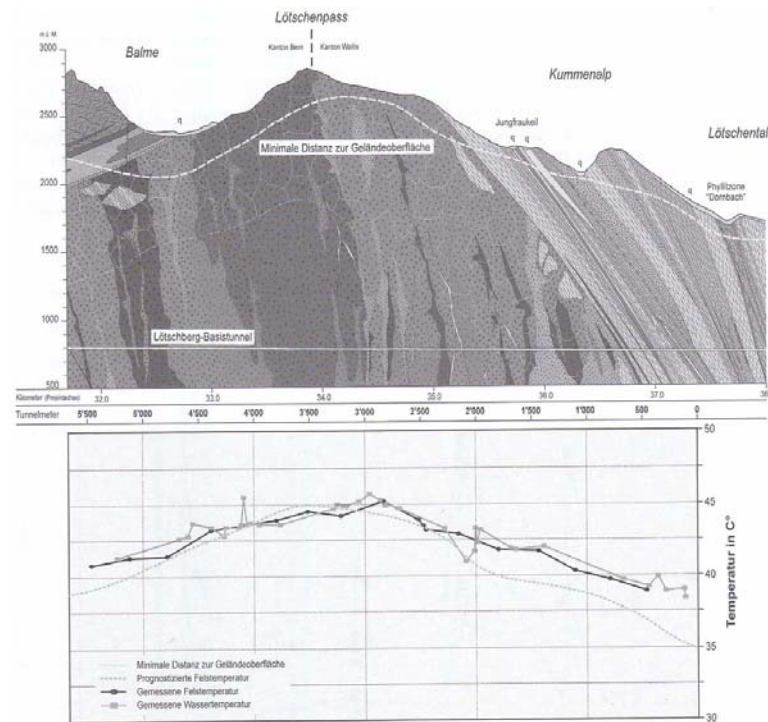


Fig. 3.2 Tunnel de base du Lötschberg. Températures du massif pronostiquées et mesurées dans la région du Lötschenpass (Ziegler, 2005)

Il est cependant plus difficile de prévoir le processus de refroidissement à l'intérieur du tunnel, sous l'effet des conditions d'exploitation. En tout état de cause, il n'existe aucun moyen pratique permettant d'influencer la température du massif, si bien que ce paramètre doit être considéré comme une donnée de base dans l'estimation du potentiel géothermique.

3.2 Gestion des eaux souterraines drainées par les tunnels

Sur le plan pratique, des interventions en vue de l'optimisation du débit des eaux souterraines drainées par le tunnel et la sauvegarde de leur température offrent une plus grande latitude pour en augmenter le rendement thermique. Avant d'en examiner les possibilités pratiques il convient toutefois de rappeler les aspects réglementaires et les questions liées aux exigences imposées par le projet et les conditions d'exécution des ouvrages.

3.2.1 Cadre juridique et réglementation technique

La gestion des eaux souterraines des tunnels est soumise aux exigences de la **réglementation** sur la protection des eaux et aux contingences découlant de l'**exécution** et l'**exploitation** de l'ouvrage.

Du point de vue de la **protection de l'environnement**, c'est la Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux) qui prévaut en matière de législation applicable aux ouvrages souterrains, tant en ce qui concerne le maintien des ressources en eaux souterraines que la préservation de leur qualité.

Les « Instructions pour l'application de la protection des eaux souterraines aux ouvrages souterrains », publiées en 2001 par l'OFEFP, constituent un guide pour la mise en pratique de la législation dans le domaine des tunnels. Ce document, préparé à la suite d'un rapport de l'OFEFP de 1994, intitulé « Grundwasserschutz bei Tunnelbauten », contient les recommandations à considérer en particulier lors de l'établissement du rapport hydrogéologique et de l'étude d'impact sur l'environnement.

Dans le sens des prescriptions ci-dessus, le débit d'eau soutiré d'un massif ne peut dépassé celui des apports naturels.

Sur le plan **technique**, la gestion des eaux souterraines drainées par les tunnels est régie par les règlements édités par la SIA, en particulier les normes et recommandations suivantes :

- SIA 197 Projets de tunnels – Bases générales
- SIA 197/1 Projets de tunnels – Tunnels ferroviaires
- SIA 197/2 Projets de tunnels – Tunnels routiers
- SIA 198 Constructions souterraines - Exécution
- SIA 118/198 Conditions générales pour constructions souterraines
- SIA 272 Etanchéité des ouvrages souterrains
- SIA 199 Etude du massif rocheux pour les travaux souterrains

3.2.2 Concept d'étanchéité et exécution

Selon ces spécifications, on déterminera le **concept d'étanchéité** d'un profil de tunnel en fonction du degré d'étanchéité imposé à l'ouvrage, compte tenu des critères suivants :

- conditions hydrogéologiques (débit, pression, composition chimique et répartition des venues d'eau ;
- sujétions relevant de l'exploitation (possibilités de maintenance, durée d'utilisation) ;
- contraintes écologiques ;
- considérations économiques.

En fonction de ces critères, les concepts suivants peuvent être envisagés (SIA 197) :

I. *Concept d'évacuation des eaux.*

Les eaux de drainage s'écoulent librement vers un ou plusieurs points de la section en empruntant la couche de drainage située derrière l'étanchéité. Elles seront ensuite captées dans une conduite de drainage se trouvant au point bas du profil.

II. *Concept de retenue des eaux*

Les eaux du massif ne sont pas captées, mais sont tenues à l'écart du profil par le système d'étanchéité.

III. Evacuation partielle

Elle peut intervenir pour un drainage non continu, comme par exemple des cunettes de drainage derrière une couche de béton projeté, des perforation de drainage dans un radier ou des forages de drainage.

IV. Etanchéité partielle dans le massif

Des mesures particulières peuvent être nécessaires dans des cas particuliers, comme par exemple d'importantes venues d'eau sous haute pression. La perméabilité peut être réduite par obturation des cheminements d'écoulement au moyen d'injections. Des forages de décharge permettent ensuite de créer une zone drainée autour du tunnel.

Ce dernier cas prédomine dans les formations karstiques ou pseudokarstiques, comme indiqué sur la figure 3.1, et se trouve associé à un nombre élevé de sujétions, dont les risques d'effondrement de la voûte ou du radier et des irrptions brutales d'eau susceptibles de charrier des matériaux.

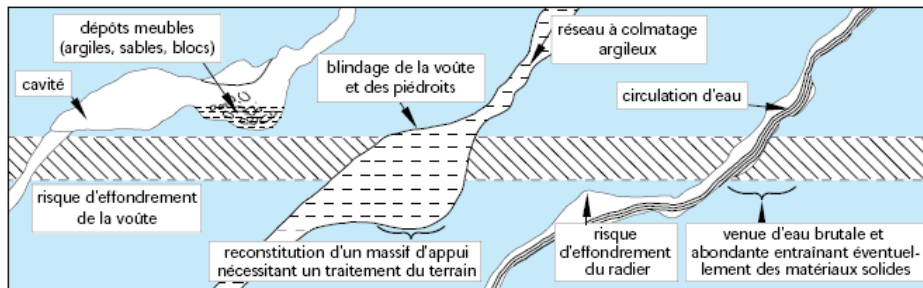


Fig. 3.1 Sujétions dues au karst (Dossier pilote des tunnels, Aftes 1998)

Un suivi très serré de l'avancement dans des terrains perméables est requis car même les constatations faites par les ouvrages d'investigation peuvent être contredites par la réalité. Ainsi, au tunnel de base du Lötschberg, sur la traversée du Jungfrau keil, les venues d'eau rencontrées par les deux forages de reconnaissance exécutés depuis la surface, ont donnés des indications exactement inverses par rapport à ce que l'on a rencontré lors de l'excavation du tunnel (figure 3.2).

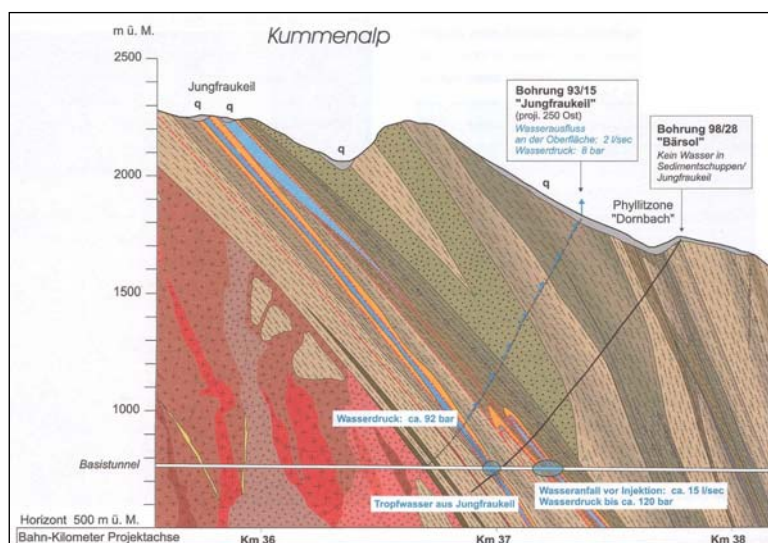


Fig. 3.2 Tunnel de base du Lötschberg. Profil géologique de Ferden (Ziegler 2005)

Alors que dans le premier forage (93/15) une zone de forte perméabilité fut identifiée, dans le deuxième (98/27) la perméabilité s'est montrée très faible tant dans le Jungfrau keil que dans le secteur d'intercalation des couches sédimentaires, située au sud. Lors de l'excavation on a dû affronter d'importantes venues d'eau dans les intercalations sédimentaires, alors que l'eau était absente dans le secteur du Jungfrau keil même. Cela prouve une fois de plus, que les caractéristiques d'un massif sont susceptibles de varier fortement sur de très courtes distances.

Comme au niveau des prévisions il est extrêmement difficile de localiser les discontinuités ouvrant des voies d'eau d'une façon précise, le chantier doit être équipé pour pouvoir adapter rapidement ses méthodes aux conditions réelles tant en ce qui concerne les travaux d'étanchement que les perforations et les drainages.

Dans de tels cas, diverses mesures préventives peuvent être envisagées lors des travaux de percement, dont les principales se trouvent résumées dans le tableau de la figure 3.3 tel que préconisé par les Instructions pour la protection des eaux souterraines dans les tunnels, de l'OFEFP.

		Perméabilité	
		Faible	forte
Pression hydrostatique	faible	<ul style="list-style-type: none"> pas de mesures spécifiques concernant les eaux souterraines 	<ul style="list-style-type: none"> abaissement temporaire du niveau de la nappe autorisé et rentable: <ul style="list-style-type: none"> -> maîtrise des eaux à l'aide de puits filtrants abaissement temporaire du niveau de la nappe non autorisé ou non rentable: <ul style="list-style-type: none"> -> isolement du périmètre de percement par injection, jetting, congélation, etc. -> tunnelier à bouclier pour les longs tunnels
	forte	<ul style="list-style-type: none"> pas de mesures spécifiques concernant les eaux souterraines (suintements) 	<ul style="list-style-type: none"> forage drainant en tête/galerie drainante injections d'étanchement en tête (étanchement de la roche) étanchement longitudinal du tunnel (injections) lors de solutions combinées

Fig. 3.3 Mesures possibles en relation avec la protection des eaux souterraines durant le percement du tunnel (Instructions pour la protection des eaux souterraines aux ouvrages souterrains, OFEFP, 2001)

En dépit de son coût et des inconvénients inhérents à un arrêt prolongé des travaux d'avancement, la méthode avec forage drainant en tête, combinée avec des injections s'est peu à peu imposée au cours des dernières années, en particulier grâce au développement des installations de forage, ainsi que des méthodes et des matériaux d'injection. Un avantage supplémentaire est la grande flexibilité des schémas d'injection, facilement adaptables sur place en fonction des résultats intermédiaires, tant en ce qui concerne la densité que la disposition des écrans d'étanchéité. Ces procédés ont été utilisés avec succès notamment dans les tunnels de base d'Alptransit.



Fig.3.4 Installation de forage de reconnaissance et de drainage dans l'axe d'un tunnel (ATL)

Une autre méthode d'avancement dans des terrains de faible portance est celle de la voûte parapluie. Elle consiste en une combinaison de tubes métalliques posés dans des forages exécutés autour de la future excavation, suivis d'injections du massif réalisées à partir des ces tubes (figure 3.5).

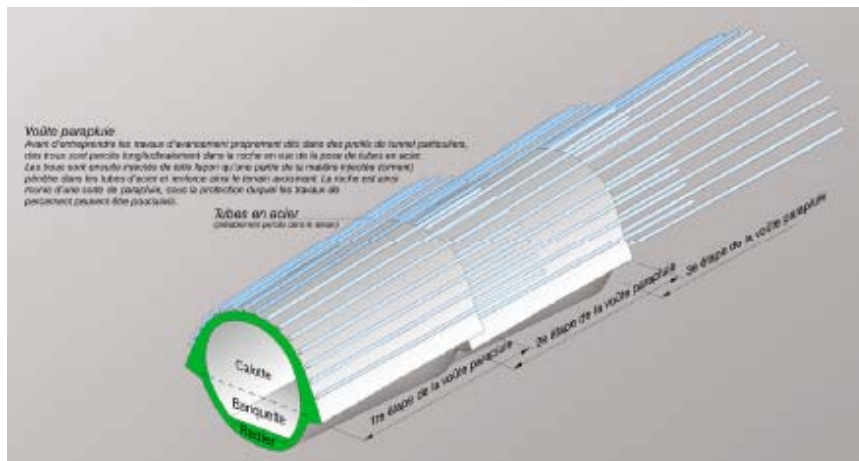
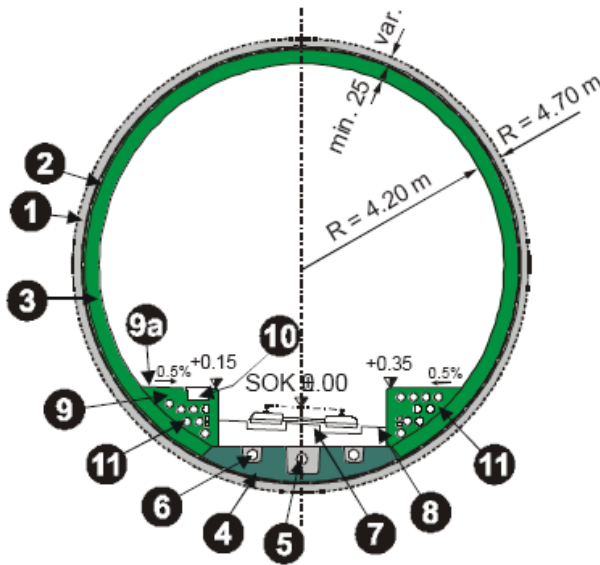


Fig.3.5 Schéma de principe d'un avancement sous la protection d'une voûte parapluie (ATL)

3.2.3 Système d'étanchéité et de drainage

Compte tenu des prescriptions légales, des conditions d'exécution évoquées ci-dessus, ainsi que des exigences d'exploitation, en Suisse c'est un profil de tunnel muni d'une membrane d'étanchéité en sandwich, pourvu d'un système d'évacuation des eaux du type séparatif qui, d'une façon générale, s'est imposé (figure 3.6).



Légende

1. Anneau extérieur
2. Etanchéité
3. Revêtement intérieur en béton
4. Voussoirs
5. Drainage principal
6. Conduite d'eau usée
7. Dalle de support de la voie
8. Rigole
9. Banquette
- 9a. Trottoir
10. Caniveau à câbles
11. Batterie de câbles

Fig. 3.6 Profil de tunnel ferroviaire à une voie, creusé au tunnelier (ATL)

Le système de drainage est du type séparatif, les eaux souterraines s'écoulent vers le drainage principal (5) alors que les eaux usées provenant de l'intérieur du tunnel sont collectées par des conduites séparées (6). Le radier et le revêtement intérieur en béton peuvent être préfabriqués ou coulés sur place. Les figures 3.7 et 3.8 montrent respectivement le profil d'un tunnel avec la membrane d'étanchéité, avant bétonnage de l'anneau intérieur et un autre profil après bétonnage de cet anneau.



Fig. 3.7 Membrane d'étanchéité avant bétonnage de l'anneau intérieur



Fig. 3.8 Anneau intérieur en béton et radier du tunnel terminés

4. POSSIBILITES D'OPTIMISATION DU DRAINAGE DES EAUX CHAUDES DES TUNNELS

4.1 Introduction

Comme indiqué ci-dessus, dans le système de drainage séparatif, de règle de nos jours, les eaux souterraines d'un tunnel, considérées comme propres, sont récoltées dans des canalisations distinctes de celles engendrées en cours d'exploitation, eaux météoriques amenées par les véhicules, évacuation ou fuite de liquides de ces mêmes véhicules, eaux de lavage, etc.

Dans la pratique actuelle de valorisation thermique des eaux souterraines, celles-ci sont captées à la sortie du tunnel, sans tenir compte des effets subis entre leur point d'origine et le portail. Or, divers facteurs contribuent à une perte de potentiel de l'énergie originelle. Il s'agit essentiellement du mélange des venues d'eau de différentes températures, ainsi que du refroidissement de l'eau s'écoulant dans le collecteur, entre l'intérieur du tunnel et le portail.

En effet, les eaux souterraines rencontrées s'écoulent par gravité, par un cheminement naturel ou par un système de drainage du profil, vers le collecteur d'évacuation posé au niveau du radier, qui les conduit vers le portail. Toutes les eaux aboutissant dans le même collecteur, leur température résultera du mélange des eaux provenant de zones chaudes avec celles plus froides.

Par ailleurs, les eaux acheminées dans le collecteur, parfois sur de très longues distances, se refroidissent sous l'effet de la température ambiante du tunnel.

Lorsque le potentiel de consommation le justifie, il peut être intéressant de chercher des solutions permettant de réduire les pertes ou d'augmenter le potentiel géothermique disponible.

Plusieurs possibilités s'offrent pour améliorer le rendement thermique du système, soit l'isolation des conduites de drainage, l'adoption d'un système de drainage séparatif et l'activation des écoulements entre le massif et le tunnel. Ces trois aspects seront passés en revue ci-après.

4.2. Conduite de drainage avec isolation

Le refroidissement de l'eau s'écoulant dans une conduite enterrée ou posée dans du béton est donné par la relation suivante :

$$T_e (L) = T_t + (T_{e0} - T_t) \exp [- (K \times L) / (Q \times c_p)]$$

où

T_e	:	température de l'eau à l'intérieur de la conduite à une distance L de la section de référence [°C]
T_t	:	température extérieure (température dans le tunnel, constant sur L) [°C]
T_{e0}	:	température à l'intérieur de la conduite, dans la section de référence [°C]
Q	:	débit de l'eau [l/sec]
c_p	:	chaleur massique de l'eau = 4'187 [J/kg/K]
L	:	distance du profil considéré depuis la section de référence [m]
K	:	coefficient de transmission de chaleur de la conduite isolée [W/mK]

Le coefficient de transmission de chaleur est l'inverse de la résistance thermique et peut être calculé au moyen de la relation suivante :

$$R = (2 \pi \lambda_{isol})^{-1} \{ \ln [(d + 2s) (d)^{-1}] \} + (2 \pi \lambda_{sol})^{-1} \{ \ln [(4 H) (d + 2s)^{-1}] \} = K^{-1}$$

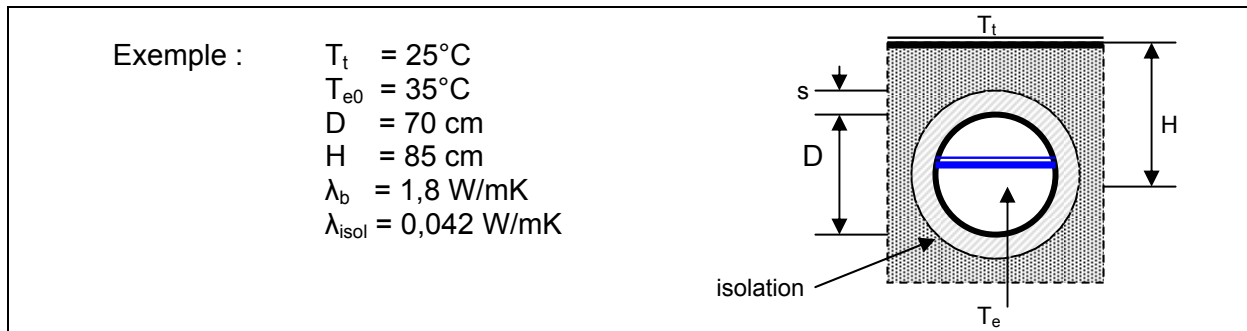
où

R	:	résistance thermique [mK/W]
K	:	coefficient de transmission de chaleur [W/mK]
λ	:	coefficient de conductivité thermique [W/mK]
s	:	épaisseur de l'isolation [m]
d	:	diamètre de la conduite [m]
H	:	profondeur de l'axe de la conduite [m]

Pour une conduite sans isolation, l'équation devient :

$$R = (2 \pi \lambda_{isol})^{-1} \{ \ln [(4 H) (d)^{-1}] \}$$

L'exemple ci-dessous indique les taux de refroidissement comparés d'une conduite avec et sans isolation. Il s'agit d'une conduite en PE, de 70 cm de diamètre, posée dans du béton, dont l'axe se trouve à une profondeur de 85 cm axe en dessous du radier du tunnel. L'isolation est en laine de pierre avec un coefficient de conductivité thermique de 0,042 W/mK, celui du béton étant de 1,8 W/mK.



La figure 4.1 ci-après indique la variation de la résistance thermique et celle du coefficient de transmission de chaleur, en fonction de l'épaisseur de l'isolation, qui elle varie entre 0 et 15 cm.

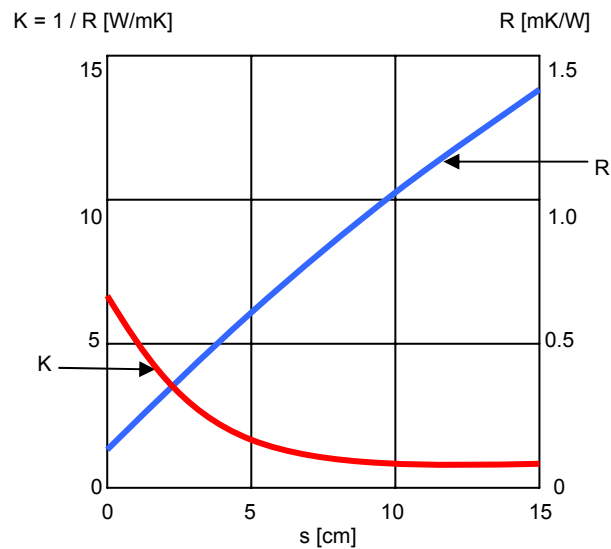


Fig. 4.1 Conductibilité et résistance thermique en fonction de l'épaisseur de l'isolation

La figure 4.2 représente le taux de refroidissement comparé de l'eau s'écoulant dans le collecteur ci-dessus, en fonction du débit d'eau et de la distance parcourue, pour une conduite avec ou sans isolation (laine de roche de 50 mm d'épaisseur). La température de départ de l'eau est admise à 35 °C, la température régnant dans le tunnel à 25°C.

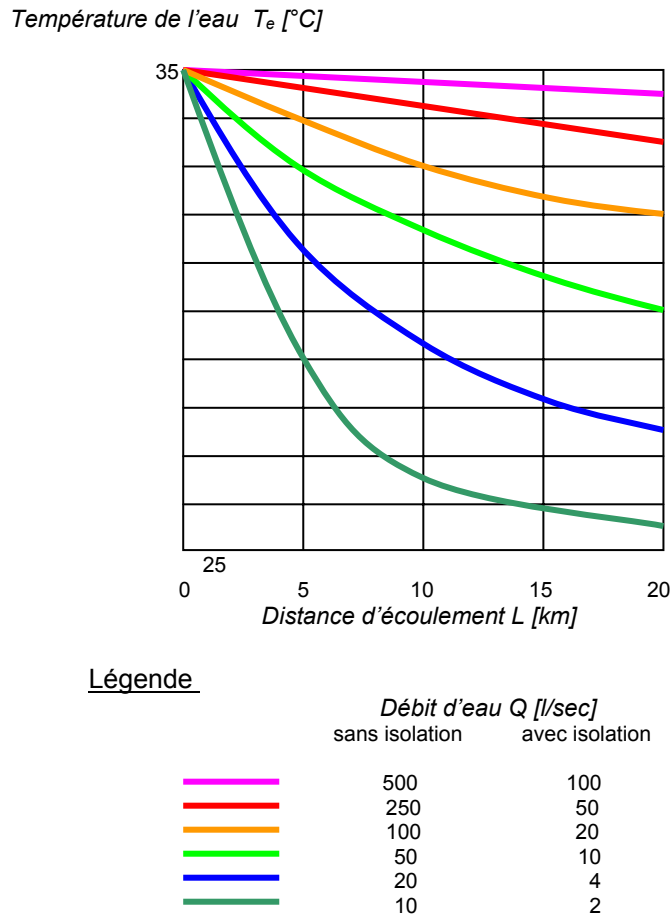


Fig. 4.2 Refroidissement de l'eau s'écoulant dans une conduite enterrée avec ou sans isolation

On constate que pour un faible débit de 10 l/sec, la température de l'eau s'écoulant dans la conduite non isolée rejoint pratiquement celle du tunnel après un parcours de 20 km. Dans ce cas de figure, le rapport du taux de refroidissement en fonction des débits est de 5, c'est-à-dire qu'il est de même importance par exemple pour un débit de 50 l/sec dans la conduite non isolée, que pour 10 l/sec avec isolation.

En l'occurrence, pour un débit de 50 l/sec, le gain de température au bout de 20 km est de 3,5°C environ.

La puissance thermique délivrée par l'eau peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$P = c \times Q \times \Delta T$$

où

c	:	chaleur massique de l'eau (= 4.18×10^{-3}) [J / L °C],
Q	:	débit d'eau [l/sec]
ΔT	:	différence de température soutirée [°C]

La figure 4.3 donne les valeurs de puissance délivrée par l'eau en fonction du débit d'eau et du taux de refroidissement.

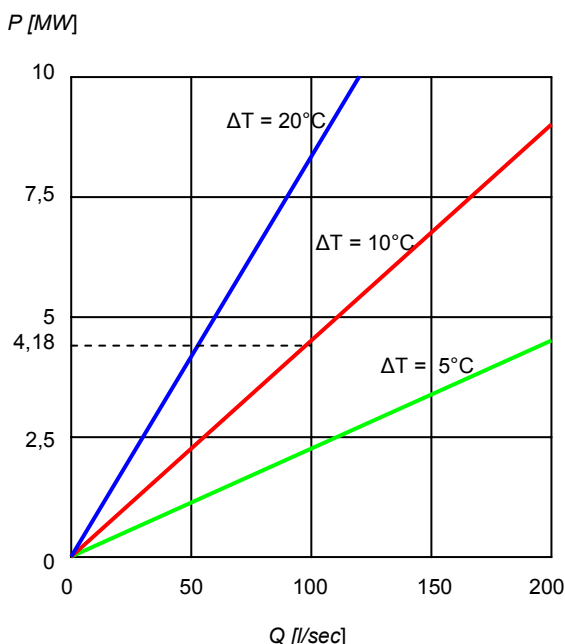


Fig. 4.3 Puissance thermique délivrée par l'eau en fonction du débit et du taux de refroidissement (exemple : pour $Q = 100$ l/sec et un $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, la puissance sera de 4,18 MW)

Les gains de puissance thermique dans la conduite isolée par rapport à la conduite dépourvue d'isolation, à 5, 10 et 20 km du point d'origine, pour différents débits et avec les paramètres de l'exemple ci-dessus, sont indiqués dans le tableau ci-dessous. Ils sont également visualisés sur la figure 4.4.

Tableau 4.1 Gain de puissance thermique dans une conduite isolée par rapport à une conduite sans isolation (voir aussi la figure 4.4).

Q [l/sec]	à 5 km		à 10 km		à 20 km	
	ΔT [°C]	ΔP [kW]	ΔT [°C]	ΔP [kW]	ΔT [°C]	ΔP [kW]
10	4,3	180,17	5,2	217,88	4,4	184,36
20	2,9	243,02	4,1	343,58	5,2	435,76
50	1,5	314,25	2,3	481,58	3,7	775,15
100	0,8	335,20	1,6	670,40	2,4	1005,60

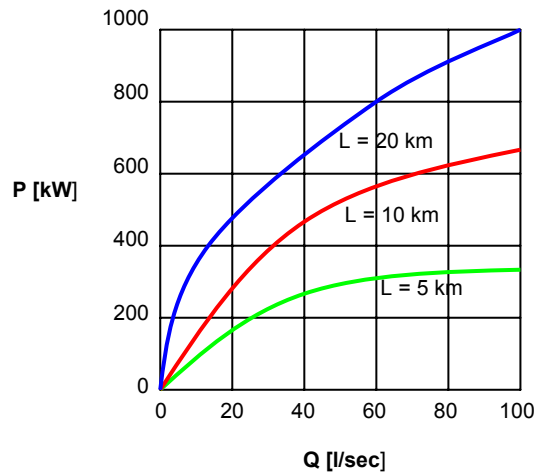


Fig. 4.4 Gain de puissance thermique P de l'eau s'écoulant dans une conduite isolée, enrobé de béton, par rapport à une conduite sans isolation, en fonction du débit d'eau, pour trois distances L parcourues

En vue d'une évaluation économique, prenons l'exemple d'un débit d'eau de 50 l/sec. A 20 km, le gain de puissance atteint 775 kW ce qui, sur une période de 20 ans, représente une quantité d'énergie de

$$E \text{ [kWh]} = 20 \times 4'000 \times 775 = 62 \text{ MWh},$$

en comptant 4'000 heures d'utilisation par an, pour une installation de chauffage. Dans le cas d'une utilisation plus régulière, piscine, serre, pisciculture, on peut compter 50% de plus, soit l'ordre de 100 MWh. Avec un prix moyen de 10 centimes le kilowattheure et avec un coefficient énergétique de 0,75, l'économie réalisée sur cette période autorise un investissement de l'ordre de 4 mio de francs pour l'isolation de la conduite. Cela représente environ 200 francs par mètre de conduite, soit le double du coût réel, estimé à 100 francs.

Dans les conditions données, une telle opération trouve donc toute sa justification et mérite d'être évalué dans tous les cas similaires.

4.3 Optimisation du débit des venues d'eau.

Les procédés de consolidation évoqués au chapitre ci-dessus confèrent au tunnel et au massif qui l'entoure, un degré d'étanchéité aléatoire. Dans la pratique, les travaux de drainage et d'étanchéité seront poursuivis jusqu'au moment où l'on juge que la sécurité du souterrain est suffisante tant pour la suite de l'excavation que du point de vue de la stabilité du tunnel. Ensuite la nappe d'eau souterraine sera reconstituée autour du tunnel jusqu'à l'équilibre entre les apports extérieurs et les venues d'eau dans le souterrain. Dans ces conditions, les infiltrations d'eau dans le tunnel demeurent en général très réduites.

Or, dans la mesure où l'on se trouve dans une zone à potentiel géothermique intéressant, et si le potentiel de consommation escompté de cette forme d'énergie devait le justifier, on pourrait examiner l'opportunité d'augmenter les apports par un drainage complémentaire de la nappe. En l'occurrence il s'agit de percer des trous à travers la gaine d'étanchéité constituée par les injections et de les raccorder sur les drains du tunnel. Des forages de ce genre n'ont rien d'exceptionnels et sont souvent exécutés pour réduire la pression extérieure de l'eau sur le revêtement du tunnel. Les conséquences sur les travaux du tunnel sont en principe réduites, car le but est de réaliser les forages complémentaires avec les installations déjà sur place, comme par exemple le Jumbo multibras de la figure 4.5, ou les perforatrices montées sur les tunneliers.



Fig. 4.5 Jumbo de perforation à bras multiple (ATG)

La mise en place d'un tel système de drainage demande bien sûr des investigations préalables tant en ce qui concerne les aspects de la protection des eaux que la réalisation des ouvrages. Le principe devrait en être décidé dès le début de la planification, d'entente entre les concepteurs du tunnel et les utilisateurs de la chaleur.

Il est évident que des économies substantielles peuvent être faites en procédant à temps à des études d'optimisation pour démontrer la faisabilité technique et économique d'un système de drainage complémentaire.

4.4. Captage sélectif des eaux

Dans le système de captage séparatif des eaux des tunnels l'ensemble des eaux souterraines est conduit dans un collecteur puis évacué vers les portails. Comme l'indique la figure 4.6, les eaux souterraines s'infiltrant en direction du tunnel s'écoulent autour du profil, sur l'extrados de la couche d'étanchéité, vers une conduite posée au bas de chaque piédroit (drainage de la coque). Ces conduites sont reliées tous les 30 à 50 mètres au collecteur principal (collecteur d'eau d'infiltration) dans lequel sont ainsi mélangées toutes les eaux captées le long de l'ouvrage sans distinction de qualité ni de température.

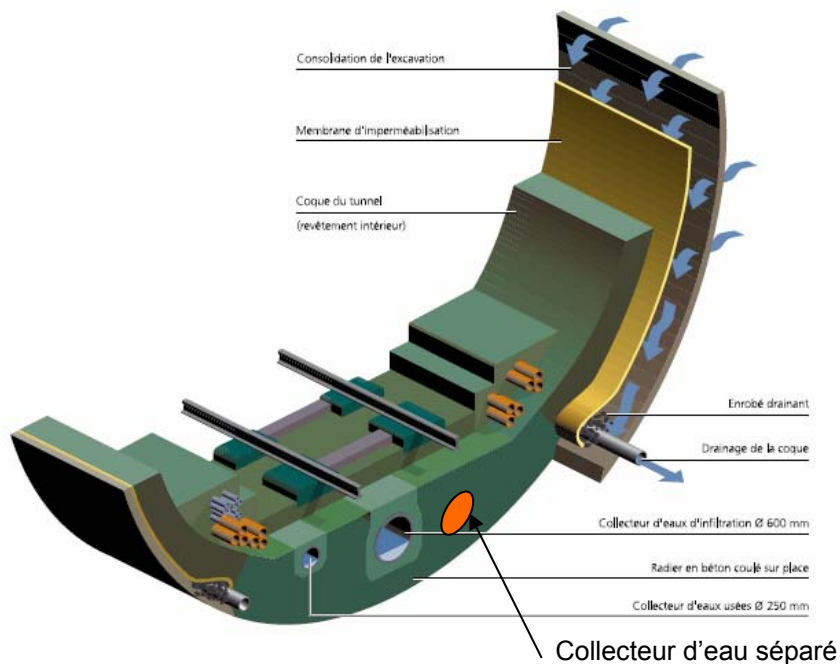


Fig. 4.6 Schéma de principe du système de drainage (ATG)

Or les températures du massif et par conséquent celles des eaux souterraines varient souvent de façon significative le long d'un tunnel. Dans certains cas, et dans la mesure où le potentiel de consommation attendu le justifie, il pourrait être intéressant de séparer les infiltrations chaudes des venues d'eau plus froides et de les amener vers le portail au moyen d'un collecteur séparé, comme indiqué en rouge sur la figure 4.6. Suivant la différence de température et de débit entre les eaux froides et les eaux chaudes, d'appréciables quantités d'énergie, susceptibles de compenser largement l'investissement consenti, peuvent être sauvegardées.

Comme dans les autres cas, l'adoption d'un tel système doit être décidée et son concept mis au point au niveau de la planification déjà, tant en ce qui concerne la consommation d'énergie que les détails constructifs. Une autre condition est le suivi rigoureux des conditions hydrologiques et géothermiques pendant les travaux. La figure 4.7 montre le système de drainage en cours de pose dans un tunnel et la place disponible pour un collecteur secondaire à côté du collecteur principal.



Fig. 4.7 Système de collecteur d'eau en cours de pose dans un tunnel

5. NOUVELLES METHODES DE CAPTAGE DE LA CHALEUR

5.1 Introduction

En l'absence d'eau souterraine agissant comme agent caloporteur, la chaleur d'un tunnel peut être récupérée au moyen de capteurs ad hoc.

Partant du principe que tout élément en contact avec le sol ou le massif est susceptible d'être équipé en échangeur de chaleur, on a entrepris des recherches pour développer de tels systèmes en adaptant les diverses parties du tunnel à cet emploi. Le principe consiste à les aménager pour y faire circuler de l'eau en circuit fermé, à l'exemple des sondes géothermiques.

Ces travaux sont menés essentiellement en Autriche, dans le cadre de la construction de lignes ferroviaires et de métro, avec l'implication des autorités, des bureaux d'étude, des instituts de recherche et des entreprises de construction.

5.2 Eléments capteurs de chaleur

Les éléments de tunnel faisant partie des investigations concernent aussi bien les parties en béton, comme le revêtement, le radier, les bordures, que les systèmes de soutènement et d'étanchéité (figure 5.1).

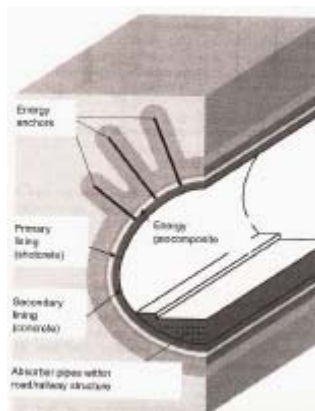


Fig. 5.1 *Eléments d'ouvrage d'un tunnel susceptibles d'être équipés en échangeur de chaleur*

- Ancrages de soutènement énergétiques
- Tubes absorbeurs posés dans le radier
- Revêtement préliminaire (béton projeté)
- Anneau de béton intérieur (béton coffré ou béton projeté)
- Géotextile énergétique

Il s'agit en particulier des ancrages de soutènement posés dans le rocher, largement utilisés dans la méthode autrichienne de construction. Posés radialement autour du profil, leur longueur est variable, et peut atteindre 10 mètres, voire plus. A raison de 15 ancrages par mètre de tunnel, et en fonction du nombre d'ancrage actif et de la

puissance spécifique exploitable, on estime que plusieurs dizaines de watts par mètre de tunnel seraient disponibles.

Des réseaux de tubes absorbeurs peuvent être incorporés dans la couche de béton projeté extérieur, ou dans l'anneau de béton intérieur, qui fonctionnent dans ce cas comme les géostructures énergétiques. Il en est de même en ce qui concerne les autres éléments en béton du profil, comme le radier, les banquettes et les trottoirs.

5.3 Géotextiles énergétiques

Les géotextiles énergétiques sont des nappes de capteurs posées entre le revêtement extérieur du tunnel, le plus souvent du béton projeté, et l'anneau de béton intérieur (figure. 5.2).

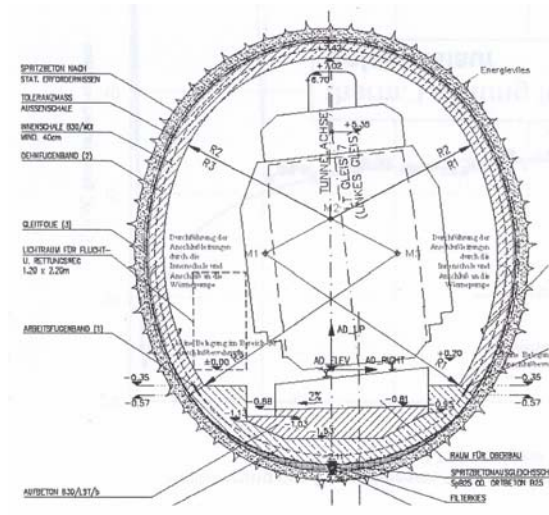
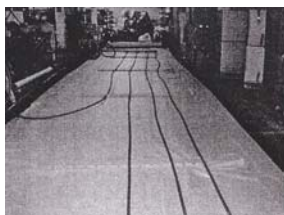


Fig. 5.2 Coupe en travers du Lainzer Tunnel à Vienne muni d'une couche de géotextile énergétique

Ils sont constitués par un réseau de tuyau pris en sandwich entre deux couches de feuilles synthétiques, assemblés en usine. Ils sont transportés sur leur lieu de pose en rouleau, et sont mis en place de la même façon que les feuilles d'étanchéité, qu'elles peuvent être à même de remplacer, le cas échéant (figure 5.3).



Fabrication en usine



Transport en rouleau



Montage contre la voûte

Fig.5.3 Fabrication et montage de géotextile énergétique

Une section expérimentale équipée de géotextile énergétique est en cours de test sur un tronçon du Lainzer Tunnel, près de Vienne, en Autriche (figure 5.4). Les mesures effectuées à ce jour confirment les résultats des calculs en ce qui concerne le bilan énergétique. En particulier la puissance de soutirage s'est révélée être de l'ordre de 10 à 15 W/m², ce qui représente entre 200 et 300 W par mètre de tunnel. Le bilan économique dépend notamment de la longueur de tunnel équipée ainsi que du lieu et du profil de consommation.



Fig. 5.4 *Vue du tronçon d'essai dans le Lainzer Tunnel*

5.4 Contexte d'application

Une fois la phase de mise au point terminée, il est à prévoir que ces diverses technologies trouveront un large champ d'application, avant tout dans des tunnels où le lieu de consommation ne se trouve pas trop éloigné du lieu de récupération.

La mise en œuvre de ces ouvrages présuppose que toutes les données nécessaires à une planification adéquates et à une exécution bien coordonnée soient réunies dès le début du processus de planification et qu'une parfaite entente existe entre l'ensemble des intervenants dans le projet. Il s'agit là de démarches volontaires et ciblées, demandant un certain effort de coopération qui cependant vaut la peine d'être consenti au regard du bénéfice obtenu. Ces développements méritent d'être suivis de près et leur application soutenue dans le cadre d'ouvrages appropriés à ce genre d'utilisation, donc également dans le cas de tunnels de moyenne importance.

6. DEUX IMPORTANTS PROJETS

6.1 Liaison ferroviaire Lyon-Turin

La publication, au printemps 2006, d'une expertise intitulée « Analyse des études faites par LTF sur le projet Lyon-Turin », sous mandat de la Commission Européenne, donne un aperçu de la façon dont certains aspects critiques, liés notamment aux conditions hydrogéologiques et géothermiques, ont été abordés au cours de la première phase du projet.

Le projet de ligne nouvelle Lyon-Turin fait partie du projet prioritaire N°6 Lyon-Budapest des réseaux transeuropéens (TEN-T). Le projet est soutenu par l'Union Européenne depuis 1994, notamment par le cofinancement des études et des travaux préliminaires, menées sous la responsabilité du GEIE Alpetunnel, en particulier des forages exploratoires et des descenderies (galeries de reconnaissance et d'accès à pente descendante) du tunnel de base pour la section Saint-Jean de Maurienne – Bruzolo, appelée section internationale. Depuis 2001, la responsabilité du programme d'étude de faisabilité et de travaux préparatoires incombe à LTF (Lyon Turin Ferroviaire).

Schéma général de la partie commune franco-italienne

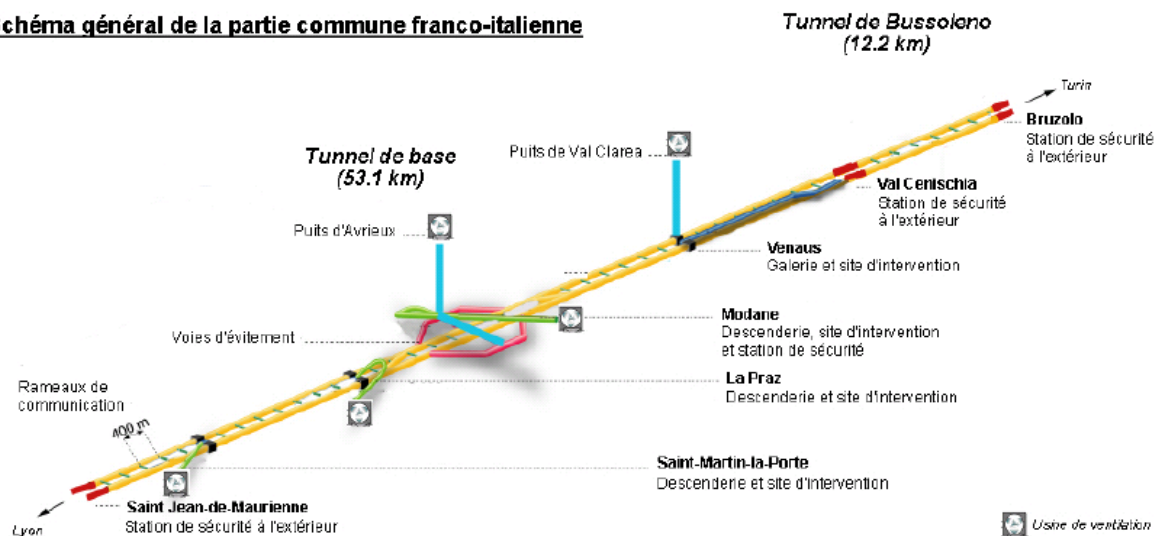


Fig. 6.1 Schéma général du tunnel de base et du tunnel de Bussoleno (LTF)

La section de franchissement des Alpes est constituée par un tunnel de base de 53.1 km, entre St. Jean –de-Maurienne sur France et Venaus dans le Val Cenischia, en Italie, et par le tunnel de Bussoleno, de 12.2 km de long, entièrement sur l'Italie (figure 6.1). Le tunnel de base, constitué de deux tubes parallèles de 8.4 mètres de diamètre intérieur chacun, sera réalisé en huit attaques, à partir des deux portails et de trois fenêtres intermédiaires (descenderies de St. Martin-la-Porte, La Praz et Modane, longues respectivement de 2050, 2572 et 4000 mètres). Le tunnel est ainsi subdivisé en quatre sections de 7'167, 9'550, 12'208 et 23'863 m. Cinq attaques, dont les deux extrémités, seront excavées au tunnelier, les trois restants par minage

(figure 6.2). Une galerie de reconnaissance de 7000 mètres, qui servira également d'accès, avec une option de 3000 mètres supplémentaires, est prévue à Venaus, dans la vallée de Susse. Des rameaux de communication relieront les deux tubes tous les 400 m. Des stations et deux puits de ventilation, des stations de sécurité, des sites d'intervention et des ouvrages d'évitement compléteront les tunnels.

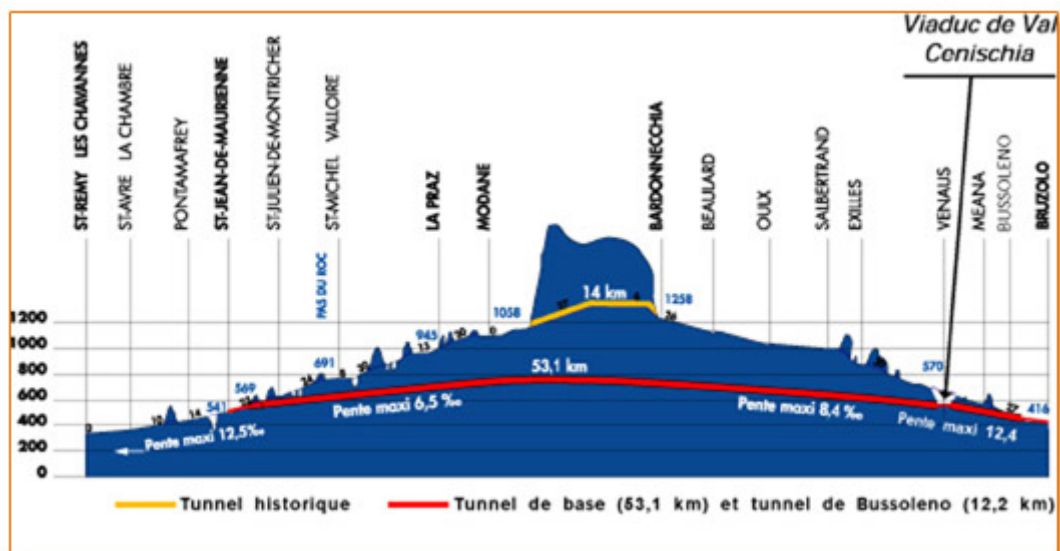


Fig. 6.2 Profil en long du tunnel de base et du tunnel de Bussoletto (LTF)

Du point de vue géologique, le tunnel de base traversera des formations fort variées et complexes. Il s'agit d'ouest en est tout d'abord d'un important cône de déjection composé de matériaux meubles et très hétérogènes, suivi des nappes sub-briançonnaise, briançonnaise, du massif d'Ambin et de la nappe piémontaise. Les roches sont constituées de calcaires, marnes et dolomies, de grès, de quartzites et micaschistes, puis de schistes lustrés, d'anhydrites et de calcschistes. Sur la plus grande longueur du parcours, la région est tectonisée et parcourue de failles. Des venues d'eau d'intensité variables sont attendues sur pratiquement toute la longueur du tunnel et la température, sous 2500 mètres de couverture, pourrait atteindre les 50°C.

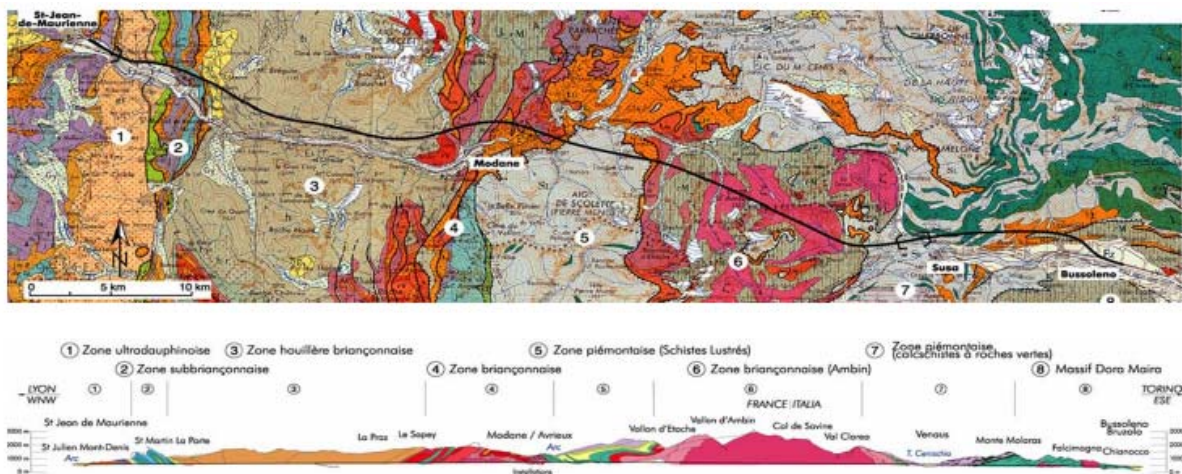


Fig.5.3 Modèle géologique (LTF)

Ce projet rencontre une forte opposition de la part de la population locale et de leurs représentants qui, s'étant amplifiée au cours des années, a conduit les autorités politiques à la décision de lancer une expertise sur les divers aspects des réalisations prévues.

Les oppositions se sont cristallisées sur un certain nombre d'arguments, qui sont analysés dans le rapport d'expertise. Il s'agit en substance des questions suivantes :

1. Justification de l'ouvrage face aux facilités existantes
2. Risques d'inondations dans les vallées
3. Présence de postes et de lignes électriques
4. Pollutions liées aux travaux (bruit, trafic, déblais, implantation, etc.)
5. Manque de clarté quant à l'application des textes légaux des deux pays impliqués et de l'EU, au sujet des procédures d'autorisation et d'incidence sur l'environnement.
6. Risques sanitaires dus à la présence d'amiante et de radon dans les souterrains
7. Risque de tarissement des sources
8. Effets sismiques
9. Hydrologie souterraine et risque d'altération de la qualité et du réchauffement des eaux de surface.

Ce dernier point a été précisé de la façon suivante par un des opposants : « les conséquences de l'effet géothermique sur l'eau présente à 2'500 m de profondeur ne sont pas assez connues ».



Fig. 6.4 Travaux de reconnaissance (LTF)

Au cours de plus de 15 ans qui se sont écoulés depuis le début du projet, on a procédé à de nombreuses études et investigations, notamment au niveau de la recherche des conditions du sous-sol et des incidences sur l'environnement (EIE). En particulier près de 700 sources d'eau situées le long du tunnel et des descenderies ont été recensées et analysées du point de vue du risque d'atteinte par les travaux du tunnel, dont 200 font l'objet de suivi sur le long terme. Par ailleurs environ 80 sondages, d'une longueur totale de 50 km ont été réalisés, accompagnés de près de 300 tests hydrauliques (figure 6.4).

Le système de drainage des eaux est du type séparatif, les eaux souterraines étant captées et évacuées séparément des eaux polluées provenant de l'intérieur du tunnel en cours d'exploitation. Le concept d'étanchéité des tunnels est du type à écoulement libre, c'est-à-dire qu'il n'est pas prévu de système d'étanchéité pour retenir les eaux souterraines au sein du massif (figure 6.5). De telles mesures ne sont prévues que dans les zones à fortes venues d'eau, et pour autant qu'ils s'avèrent nécessaires pour assurer la sécurité et la bonne marche des travaux de construction.

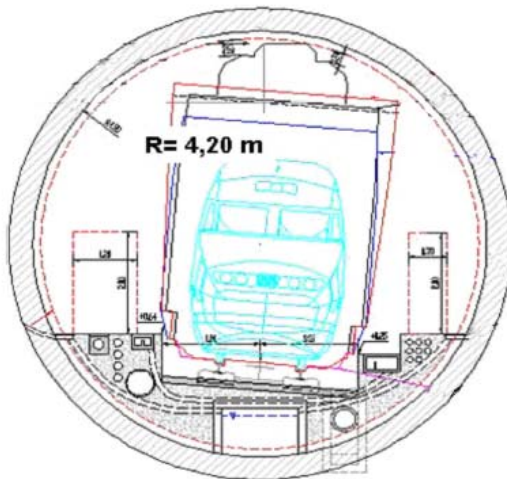


Fig. 6.5 Coupe-type du tunnel (LTF)

On s'attend à ce que les infiltrations d'eau souterraines atteignent, après stabilisation, des valeurs entre 30 et 60 l/sec par km de tunnel sur le tronçon drainé en direction de St. Jean-de-Maurienne et entre 12 et 25 l/sec par km en direction du portail de Venaus. Pour le tunnel de Bussoleno, les débits spécifiques attendus se situent entre 20 et 40 l/sec par km de tunnel. Ces valeurs sont considérées comme plutôt élevées en comparaison des débits observés au tunnel du Pont du Mont Ventoux, avec un maximum de 33 l/sec par km et une moyenne pondérée de l'ordre de 10 l/s/km. Dans les descenderies en cours d'exécution, les venues d'eau se situent bien autour de la limite inférieure des la fourchettes ci-dessus.

En ce qui concerne les irruption d'eau ponctuelles, leur débit stabilisé devrait se situé autour des 50 à 75 l/s, après les travaux de consolidation à l'avancement.

On considère que moyennant des mesures appropriées, sondages de reconnaissance à l'avancement, travaux de consolidation pour assurer la sécurité du chantier, canalisations d'évacuation bien dimensionnées, les problèmes posés par les eaux souterraines pourront être surmontés sans accroc.

La température des eaux souterraines au droit des portails du tunnel de base est estimée à 30°C à Venaus et à 22°C à St. Jean-de-Maurienne. Avant leur rejet dans l'émissaire naturel, ces eaux transiteront par des bassins de rétention afin de les refroidir au niveau de la température ambiante. Le concept de refroidissement et les ouvrages qui en découleront restent encore à préciser.



Fig. 6.6 *Vue de St-Jean-de-Maurienne en direction de Modane avec, au centre, la zone du portail du futur tunnel Maurienne-Ambin*

La valorisation énergétique des eaux au droit des portails ne semble pas avoir été envisagée. Or, une première évaluation des conditions locales laisse penser que dans un rayon de 1 à 2 km autour du futur portail de St Jean de Maurienne se trouve un secteur de développement industriel et de logements, susceptible d'être approvisionné en chaleur à partir des eaux drainées par le tunnel. Le développement d'installations balnéaires pourrait également être prévu.

Entre le point haut de Modane et le portail de St Jean de Maurienne, le tracé est en pente unique en direction du portail. Sur cette longueur de 30 km en chiffre rond, le débit d'eau récolté pourrait atteindre, suivant les prévisions ci-dessus, plusieurs centaines de litres par seconde, représentant un potentiel thermique disponible de 5 à 10 MW. En utilisant cette énergie pour le chauffage de bâtiments ou d'installations proches, tant les constructeurs du tunnel que les habitants de la région en tireront un bénéfice notable, sous les aspects suivants :

- réduction de la taille, voire suppression pure et simple, des bassins de refroidissement prévu dans le projet du tunnel
- suppression des inconvénients causés par la formation de brouillard dans la vallée
- réduction de la pollution de l'air engendrée par l'utilisation d'une énergie exempte d'agents à effet de serre
- tous autres avantages liés au recours à une source d'énergie indigène et renouvelable
- arguments en faveur du projet

Ces mêmes considérations sont valables du côté de Venaus. Bien que le tronçon de tunnel drainé soit plus court, et les débits spécifiques plus faibles, avec une température attendue au droit du portail de 30°C on peut s'attendre à disposer d'un potentiel de même ordre de grandeur qu'à St Jean de Maurienne. Reste là aussi à estimer le potentiel de consommation à moyen terme.

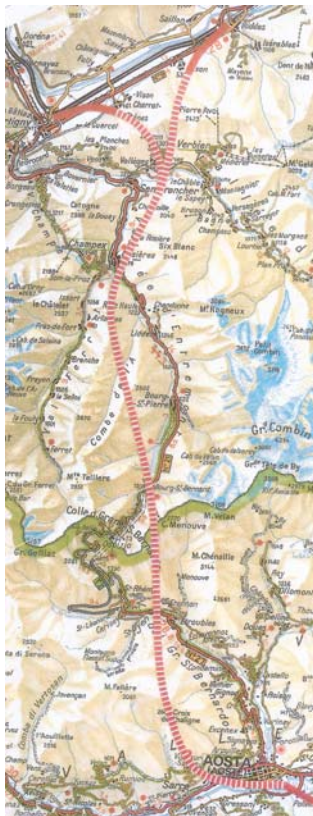
Pour pouvoir tirer le meilleur profit de cette situation, des mesures sont à prendre très tôt au cours de la planification, mais aussi pendant la réalisation de l'ouvrage, par toutes les parties impliquées. Pour ce faire, les responsables de la construction du tunnel et les autorités locales, chargées du développement régional, devront agir en étroite collaboration tout au long du projet.

Cet exemple d'actualité, même s'il se situe dans un autre pays, met en évidence tout le bénéfice que l'on pourrait tirer, tant sur le plan énergétique, que pour la valorisation de l'image de marque du projet pour répondre à certaines préoccupations quant à la justification du projet.

6.2 Le tunnel de base Martigny-Aoste

Cet ouvrage, long de 48,5 km, fait partie d'une liaison ferroviaire projetée entre le Valais et Santhia, en Italie. Les conditions de viabilité ont été mises en évidence en 2006, dans une étude réalisée dans le cadre du programme européen Interreg IIIA. Les experts estiment que cette transversale serait un complément aux axes du Gothard, du Brenner, du Fréjus et du Mont-Blanc. Il devrait permettre de relier Martigny à Aoste en 20 minutes. Un second tronçon, à ciel ouvert, relierait Aoste à Chiavasso, sur la transversale Turin-Milan. Coté suisse, une jonction serait opérée avec le Simplon et le Lötschberg.

Il reste à évaluer les aspects socio-économiques et environnementaux d'une telle réalisation, ainsi que les implications sur l'équilibre entre les modes de transport rail/route.



Potentiel géothermique et possibilités d'utilisation

En ce qui concerne les conditions du sous-sol, le long de son tracé, dont une des variantes est visible sur la figure 6.1, le tunnel traverse une grande variété de formations géologiques et de types lithologiques. Les conditions météorologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques de la région permettent de penser que le tunnel rencontrera des venues d'eau relativement importantes. Sous une couverture atteignant entre 2'000 et 2'500 mètres, la température du massif pourrait atteindre, voire dépasser les 40°C, par analogie avec ce qui est observé dans les souterrains similaires.

Figure 6.7 *Projet de liaison ferroviaire entre Martigny et Aoste. Situation générale*

Pour des raisons topographiques, les eaux d'infiltration du tunnel seront conduites en grande partie vers le nord, en direction du portail de Martigny. Elles pourraient ainsi constituer à moyen terme un apport énergétique significatif dans le secteur qui s'étend entre Martigny et Charrat, voire, Saxon, tant en ce qui concerne d'éventuelles zones d'habitations que des utilisations dans le domaine industriel ou agricole.

Selon toute vraisemblance, le projet de liaison Martigny-Aoste n'est pas appelé à être réalisé avant les années 2020. Toutefois, c'est au niveau de la planification du concept de drainage et de celui de l'approvisionnement énergétiques des zones de développement autour du portail, c'est-à-dire à un stade très précoce, que les possibilités d'une utilisation énergétique des eaux du tunnel devraient être examinée, et ceci de concert entre les promoteurs du projet et les autorités locales.

7. CONCLUSIONS

En plus des ouvrages existants ou en cours d'exécution, un nombre élevé de tunnels sont prévus d'être réalisés en Suisse, mais aussi dans les pays voisins, au cours de ces prochaines années. D'une façon générale, ces ouvrages recèlent un potentiel géothermique considérable, dont la mise en valeur contribue à la sauvegarde de la propreté de l'air.

Au cours de la dernière décennie, des développements importants sont intervenus dans la mise en évidence et la prise en compte de cette richesse. Néanmoins, des progrès peuvent être réalisés au niveau de la gestion de cette énergie en particulier en ce qui concerne l'évaluation précoce du potentiel géothermique et du potentiel d'utilisation. Une telle démarche permet de prendre à temps des dispositions ad hoc pour en tirer le meilleur profit.

Les mesures s'inscrivant dans le domaine de l'aménagement du territoire, en relation avec le potentiel d'utilisation, et les prévisions aussi précises que possible du potentiel géothermique permettent, dans le cadre des travaux de planification déjà, de concevoir les ouvrages de captage et de drainage souterrains de manière optimum, tout en respectant au mieux les exigences de la protection de l'environnement et celles imposées par la réalisation et le fonctionnement du tunnel.

Parmi les possibilités existant pour **améliorer le rendement thermique** des eaux souterraines figurent l'aménagement des conduites de drainage en vue de réduire les pertes de température le long du tunnel, la gestion optimale du débit soutiré du massif, et le captage sélectif des eaux de températures différentes le long de l'ouvrage.

Par ailleurs, de **nouvelles technologies** de valorisation sont en voie de développement. Elles envisagent de concevoir les diverses parties constructives d'un tunnel, ancrages de soutènement, couche d'étanchéité, revêtement ou bordure en béton, comme des éléments aménagés dès le départ en capteurs de chaleur.

Dans tous ces cas, les options quant à la forme de valorisation de l'énergie géothermique et des moyens à mettre en oeuvre doivent être prises dès le début de la planification des ouvrages, en toute connaissance de cause et en collaboration entre toutes les parties intéressées.

Au vu de ce qui précède, il conviendrait de prendre les mesures suivantes :

1. **Actualiser le recensement des tunnels projetés et leur potentiel géothermique ;**
2. **Arrêter des critères quant à la définition des potentiels utilisables ;**
3. **Examiner la faisabilité concernant l'amélioration du rendement thermique des systèmes de drainage et l'introduction de nouvelles technologies ;**
4. **Déterminer les conditions administratives et techniques pouvant conduire à l'élaboration de zones potentielles d'utilisation à proximité des portails ;**
5. **Rechercher les conditions de collaboration précoce entre les divers intervenants.**

La clarification et la mise sur pied de ces mesures demande beaucoup de temps, si bien qu'il apparaît urgent de les initier dans les meilleurs délais.

- 37 -

SOURCES DOCUMENTAIRES ET REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbreviations

- Sources documentaires

ATG Alptransit St Gothard
ATL Alptransit Lötschberg
LTF Lyon-Turin Ferroviaire
Les photos sans indication sont de l'auteur

- Références bibliographiques

ATT Alptransit-Tagung, Luzern
IAS Ingénieurs et architectes suisses
STL Swiss Tunnel Congress Luzern
SGAZ Symposium Geologie Alptransit, Zürich
TOS Tunnels et Ouvrages Souterrains
ZEWI AG Zschokke/Elektrowatt

Références bibliographiques

Adam, D., Markiewitz, R. (2006) : Erdwärme aus Eisenbahntunnels, U-Bahnen und Verkehrsinfrastrukturbawerken. 4. Wiener Eisenbahnkolloquium, 9-10.03.2006.

AFTES (2000) : Etanchéité et drainage des ouvrages souterrains. Recommandations du Groupe de travail No 9. TOS.

Baggenstoss, R. (2002) : Gotthard_Basistunnel. Hauptlos Faido/Bodio aus der Sicht der Arbeitsgemeinschaft. ATT 2002.

Böckli, O. (2005) : Gotthardachse – Bodio – Erfahrungen nach der Vortriebshälfte. Alptransit Schweiz. Swiss Tunnel Congress 2005, Luzern.

Busslinger, A. et al. (2001) : Geothermische Prognose im Tunnelbau. Geothermie CH No 30, Juin 2001.

BUWAL (1994) : Grundwasserschutz bei Tunnelbauten, Bern.

Drack, E. et al. (2005) : Status of the Ceneri Base Tunnel project and outlook. SGAZ 2005.

Fabre, D. (2001) : Prediction of temperature for deep tunnel projects. Proc. Int Symp Geonics. Temperature and its influence on geomaterials. Ostrava pp. 67-75.

Goy, L. et al. (1996) : Modelling of rock temperature for deep alpine tunnel projects. Rock Mechanics and Rock Engineering, vol.29.

- 38 -

Kovari, K., Fechtig, R., (2000) : Percements historiques de tunnels alpines en Suisse. Société pour l'art de l'ingénieur civil, Zurich.

Ehrbar, H. et al. (2005) : Gotthardachse – Geologische Risiken und Massnahmenplanung am Beispiel des Teilabschnitts Sedrun. SGAZ 2005.

Flüeler, P (2002) : Lötschber-Basistunnel – Abdichtungssysteme. ATL 2002.

Frei, B. et al. (2005) : Gotthardachse – Geologisch-geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse im Vortrieb Amsteg : Vergleich zwischen Prognose und Befund. SGAZ 2005.

Geissmann, M. (2002) : Das Projekt Tunnelnutzung AlpTransit und das Programm EnergieSchweiz. Proc. 13. SVG/SSG Symposium, Mitholz 2002.

Gorhan, H. (2002) : Tunnelwassernutzung Basistunnels Alptransit. Bedeutung eines koordiniertes Vorgehen. Proc. 13. SVG/SSG Symposium, Mitholz 2002.

Graf, F., Kohl, T., Mégel, T., Rybach, L., Fuchs, R., (2001) : Hydraulic-geothermal modelling of Koralm Tunnel. Felsbau, 19 54-59.

Grune AG (2003-2005) : Machbarkeitsstudie Wärmenutzung Tunnelwasser. Basistunnel Lötschberg u. Gotthard. Basel.

Guntli, P. (2005) : Vortrieb Gotthard-Basistunnel, Teilabschnitt Sedrun : Geologisch-geotechnische im Tavetscher Zwischenmassiv und in der Urseren-Garvera-Zone . SGAZ 2005.

Henke, A. (2002) : Gotthard_Basistunnel. Hauptlos Faido/Bodio aus der Sicht des Projektingenieurs. ATT 2002.

Keller, F. (2005) : Gotthardachse – Geologie – Geologische Erkenntnisse aus einem weiteren Vortriebsjahr. ATT 2005.

Kellerhals, P. & Isler, A. (1998) : Lötschberg-Basistunnel : Geologische Voruntersuchungen und Prognose. Geologischer Bericht, 22 LHG Bern.

Klemenz, W., et al. (1999) : Hydrogeologische Prognose Gotthardtunnel. SGAZ 1999.

Kovári, K., Fechtig, R. (2000) : Percements historiques de tunnels alpins en Suisse. Société pour l'art de l'ingénieur civil, Zurich.

Lehner, W. (2002) : Lötschberg-Basistunnel – Herausforderung bei den einzelnen Losen. Mitholz, Vorauskundung. ATT 2002.

Matsch, S. et al. (2005) : Entwicklung von Abdichtungssystemen für die AlpTransit-Tunnel in der Schweiz. Felsbau, 3/2005 pp. 14-22.

Nanzer, K. (1999) : Warmwassernutzung aus dem Furkatunnel. Proc. 3. European Geothermal Conference, EGC 99, Basle, 1999.

- OFEFP (2001) : Instructions pour la protection des eaux souterraines aux ouvrages souterrains, Berne.
- Pahud, D., Vuataz, F.-D., Bianchetti, G. (1993) : Refroidissement de la roche dans le tunnel du Simplon. Modélisation par calcul analytique. IAS No 25, 1993.
- Rybach, L., Wilhelm, J. (1995) : Potential and use of warm water from deep Alpine tunnels. Proc. World Geothermal Congress 1995, Florence, Vol. 3.
- Rybach, L., Wilhelm, J. (2002) : Geothermal energy of some Swiss Alpine tunnels. Proceedings Geothermal Energy Congress, Reykjavik, 2002.
- Schneider, T.R. (1999) : Gotthard-Basistunnel : Strategie der geologischen Untersuchungen. SGAZ 1999.
- SETu (1998) : Dossier pilote des tunnels. Ministère de l'équipement et des transports.
- SIA (2004-2005) : Normes relatives à la construction des tunnels, Zurich.
- Teuscher, P. (2005) : Lötschberg-Basistunnel – Stand Projekt Lötschberg-Basistunnel 2002, Luzern.
- Vuilleumier, F., Collomb, D. (1999) : Tunnel de base du Lötschberg : interprétation de la géologie pour le projet. SGAZ 1999.
- Wilhelm, J. (2002) : Potentiel géothermique des tunnels de base d'Alptransit. Rapport OFEN, Berne.
- Wilhelm, J.; Rybach, L. (2003) : The geothermal potential of Swiss Alpine tunnels. Geothermics 32, pp. 557-568.
- Wilhelm, J. (2004) : La géothermie des tunnels et la valorisation de l'énergie géothermique. Dans Géochronique, Magazine des géosciences, SGF Société géologique de France et BRGM Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Paris, No 92, Décembre 2004, pp. 47-50.
- ZEWI (1995-1996) : Gewinnung geothermischer Energie aus Tunneln. BFE, Bern.
- Ziegler, H.-J. (2005) : Lötschbergachse – Geologie – Die wichtigsten Erkenntnisse. ATT 2005.
- Ziegler, H.-J. (2005) : Lötschbergachse – Vorauserkundung im Karst der Doldenhorn-Decke. SGAZ 2005.