

Historique comparé des tunnels sous les Alpes et les Pyrénées

Application au projet de traversée des Pyrénées centrales

Pierre DUFFAUT et Olivier VION - AFTES

Ce texte est dérivé de la présentation des auteurs au congrès de Saragosse sur la traversée centrale des Pyrénées "Evolution de la construction des tunnels en montagne. Application à la traversée centrale des Pyrénées" (29 octobre 2008), avec l'aimable autorisation des organisateurs.

Résumé :

Les deux chaînes des Pyrénées et des Alpes mettent des barrières physiques entre le cœur de l'Europe et les deux péninsules ibérique et italienne ; celles-ci ont été franchies avant celles-là alors que le volume des échanges est aujourd'hui du même ordre à travers les deux. Comme les Pyrénées sont aussi moins connues, l'article débute par une description de leurs cols et tunnels, avant de rappeler les trois phases successives des nombreux tunnels de circulation à travers les Alpes, ferroviaires d'abord, routiers ensuite, puis à nouveau ferroviaires. Ayant connu les deux premières phases, les Pyrénées attendent la troisième. Pour étayer les conditions des longs tunnels profonds, un chapitre est consacré aux nombreuses galeries hydroélectriques creusées au vingtième siècle, tant dans les Alpes que dans les Pyrénées, avant un retour sur une traversée future au centre de la chaîne pyrénéenne, ardemment souhaitée par l'Espagne. Les conclusions soulignent les progrès qui ont permis d'envisager maintenant davantage de tunnels longs et profonds, y compris pour mailler entre elles les vallées menacées d'isolement par des avalanches ou écroulements.

Abstract:

COMPARATIVE HISTORY OF LARGE TUNNELS UNDER THE ALPS AND THE PYRENEES

APPLICATION TO THE PROJECT OF A CROSSING THROUGH THE CENTRAL PYRENEES

Both mountain ranges, the Pyrenees and the Alps, place physical barriers between the core of Europe and the Iberian and Italian peninsulas ; the former have been crossed before the latter though the traffic be today about the same rate through both of them. As the Pyrenees range is less

known, the paper begins with a description of their passes and tunnels, before recalling the three phases of the many traffic tunnels through the Alps, first rail tunnels, then road tunnels, third rail tunnels anew. For having benefited the two first ones, the Pyrenees are waiting for the third one. In order to support the problems of long and deep tunnels, a chapter deals with the so many hydropower galleries bored along the XXth century, as well in the Alps as in the Pyrenees, before going back to a future crossing about the centre of the Pyrenees range, which is passionately wished by Spain. The conclusions underline the progresses which allow us to consider many more long and deep tunnels ahead, including for connecting together mountain valleys menaced of isolation by avalanches and rock slides.

INTRODUCTION

La chaîne des Pyrénées, comme celle des Alpes, constitue une barrière pour les échanges commerciaux modernes, un inconvénient aggravé à l'heure de la mondialisation des productions et des consommations. Plus peut-être que dans les Alpes, les habitants des deux versants ont entretenu des liens étroits, traduits d'ailleurs par l'établissement des communautés basque et catalane à cheval sur la ligne de partage des eaux et par des frontières qui ont entériné plusieurs écarts à cette ligne, dont les deux principaux sont, en sens opposés, le haut bassin du Sègre (plateau de Cerdagne), français, et le haut bassin de la Garonne (Val d'Aran), espagnol.

De même que les Alpes isolent la péninsule italienne de l'Europe (de l'ouest, du centre et de l'est), les Pyrénées isolent la péninsule ibérique (Espagne et Portugal) ; quatre pays font face à l'Italie au nord des Alpes, France, Suisse, Autriche, Slovaquie, et se partagent donc les franchissements, alors que la France est seule au nord des Pyrénées (et doit donc y acheminer la totalité du trafic terrestre avec l'Europe) ; en outre un trafic Europe-Afrique en forte croissance transite par l'Espagne ce qui n'a pas d'équivalent à travers les Alpes (depuis que l'avion a supplanté la « malle des Indes » du 19^e siècle). Le flux de transports et d'échanges entre la péninsule ibérique (60 millions d'habitants) et le reste de l'Europe (figure 1, 122 400 voitures et 43 000 poids lourds par an en 2005) est du même ordre que celui qui

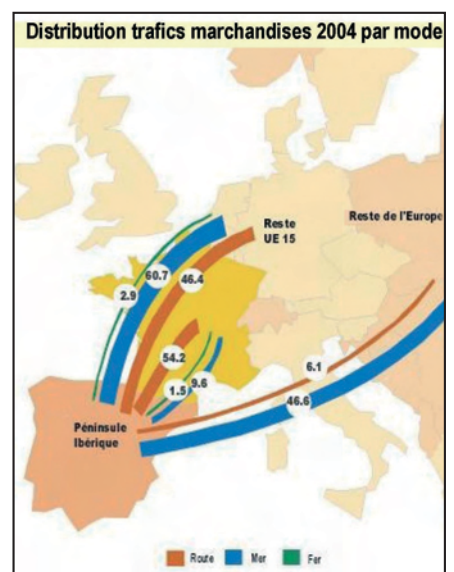


Figure 1 : Partage des flux de fret vers et de l'Espagne en provenance et à destination de la France, de l'Union européenne, et du reste de l'Europe.

traverse les Alpes. Jusqu'au 19^e siècle, les convois de mulets sur des cols élevés ont pu suffire aux trafics locaux, alors que les trajets à longue distance s'accommodaient de voies qui contournaient la chaîne. C'est pourquoi la demande de tunnels ferroviaires et routiers a été plus tardive que dans les Alpes.

Après une brève présentation des Pyrénées et de leurs tunnels et un rappel des trois étapes de franchissements alpins, un chapitre est consacré à la famille des galeries hydro électriques, dont l'expérience s'ajoute utilement à celle des tunnels de circulation. Après une présentation sommaire de la traversée en tunnel des Pyrénées centrales, les conclusions portent sur les défis de tunnels à la fois très longs et très profonds. Parmi leurs applications, en sus du franchissement des chaînes de montagnes, on cite le maillage des hautes vallées menacées d'isolement par des avalanches et des mouvements de terrain de grande ampleur.

1 - GÉOGRAPHIE DES PYRÉNÉES

Les Pyrénées forment une barrière continue d'environ 430 km entre l'océan Atlantique et la mer Méditerranée, plongeant dans ces mers au cap Higuer et au cap Creus, avec une grande largeur au centre, près de 200 km (figure 2). À l'ouest la chaîne Cantabrique les prolonge en Espagne jusqu'au cap Finisterra, alors qu'à l'est elles s'achèvent par un modeste chaînon entre de larges plaines côtières. Une cinquantaine de sommets dépassent 3000 m d'altitude sur la zone centrale qui culmine à 3404 m au pic d'Aneto.

Comme celle des Alpes, la chaîne pyrénéenne est nettement dissymétrique, le versant plus raide (et plus étroit) étant ici le versant nord français, là le versant est italien. Comme pour les Alpes, la zone axiale (et culminante) des Pyrénées est formée



Figure 2 : Carte hypsométrique d'ensemble des Pyrénées.

sur

surtout de roches cristallines entre des zones de terrains sédimentaires plissées (les deux chaînes dérivent de la collision de la plaque africaine avec la plaque eurasiennne).

Le relief a pour l'essentiel été sculpté par l'érosion en fonction des structures géologiques et des qualités des terrains. Si les glaciers pyrénéens sont relégués en haute altitude (où leur existence est désormais menacée), leurs ancêtres ont calibré de belles vallées, d'ouest en est, celles des Gaves d'Aspe, d'Ossau, et de Pau, de la Neste, la Pique, la Garonne, le Salat et l'Ariège sur le versant nord. À l'est du Puymorens, et donc sur le versant sud, la vallée du Carol montre les formes les plus pures. Du Val d'Aran au Gave d'Ossau, les grandes vallées du versant français sont reliées par une série de cols routiers élevés, rendus célèbres par le Tour de France cycliste.

Les cols des Pyrénées sont souvent appelés Ports, un mot qui souligne un point de passage naturel d'un versant à l'autre ; les principaux sont les suivants, d'ouest en est :

- Le col de Roncevaux ou d'Ibañeta à 1057m en Espagne (voie romaine par Saint-Jean-Pied-de-Port, devenue l'un des chemins de Compostelle) ; plusieurs cols voisins sont franchis par des routes secondaires.
- Les cols du Somport à 1632 m, entre la vallée d'Aspe et celle de l'Aragon, et du Pourtalet à 1794 m, entre les vallées d'Ossau et de la Tena).
- Les cols de Puymorens à 1921m et de la Perche à 1581m, donnant accès à la Cerdagne française (et de là à l'Espagne par la vallée du Sègre) à partir des vallées de l'Ariège (nationale 20) et de la Têt (à ce col, la voie romaine, la route et le chemin de fer sont passés sans tunnel). Au nord, le col de la Quillane, largement ouvert à 1713 m, fournit un débouché routier facile vers le plateau du Capcir et les gorges de l'Aude.
- Le col du Perthus à 290 m seulement : de la voie romaine à l'autoroute, aucun tunnel n'a été nécessaire, seul le TGV a demandé un tunnel (un bitube de 8,3 km déjà percé, pour une mise en service en 2010).

Dans la zone centrale où les cols sont beaucoup plus élevés, il y a néanmoins des routes à la Bonaigua (2072 m), qui rattache le Val d'Aran à l'Espagne et à Envalira (2409 m), entre l'Andorre et la vallée de l'Ariège. Les principaux passages de chemins muletiers anciens ont été le Port d'Ourdissetou (2403m), accessible par la Neste

d'Aure et le Rioumajou (marqué par un hospice et franchi sous Napoléon III par un câble transporteur de minerai d'Espagne en France), et surtout celui de Salau (2087m), accessible par la vallée du Salat, longtemps le plus fréquenté.

1.1 - Les chemins de fer transpyrénéens et leurs tunnels

Le 18 août 1904 une convention entre la France et l'Espagne prévoyait l'établissement de trois axes ferroviaires, le Somport à l'ouest, le Puymorens à l'est, et un axe central entre Sort et Saint Giron sous le col de Salau, qui sera abandonné (figure 3). Le tunnel international du Somport, long de 7875m, à l'altitude maximale 1183m, est percé en 1912, et la ligne inaugurée en 1928, avec 16 tunnels dont un hélicoïdal sur l'accès français (depuis 1970 la ligne n'est exploitée que sur le versant espagnol, à la suite de la rupture accidentelle d'un pont en vallée d'Aspe qui n'a pas été réparé).

Entreprise un peu plus tard, la ligne Toulouse Barcelone est terminée en 1929, elle traverse la chaîne plus haut, par le tunnel de Puymorens, long de 5410m à 1524m d'altitude, grâce à des rampes de 40% et de nombreux tunnels dont un en hélice dans la haute vallée de l'Ariège. Une gare au centre du tunnel a failli desservir par ascenseurs une station de ski aux environs du col, préfigurant le projet suisse Porta Alpina, au centre du nouveau tunnel du Gothard (et comme lui laissé de côté). De Puigcerda, la ligne espagnole passe sous le col de Tosses par un tunnel de 3904m atteignant la vallée du Rio Ter qu'elle descend avec de nombreux tunnels dont un en hélice.

1.2 - Les tunnels routiers

En négligeant ici le tunnel espagnol de Cadi (accès de la Cerdagne depuis Barcelone par la vallée du Llobregat), ils sont au nombre de cinq dont deux modernes en parallèle avec le rail sous les cols majeurs, celui du Puymorens est en service depuis dix ans, celui du Somport depuis cinq ans. Les trois autres, plus modestes traversent la zone centrale :

- Le Val d'Aran est raccordé à l'Espagne par le tunnel routier de Vielha long de 5200m à 1626m d'altitude (le plus ancien, dès 1948, remplacé il y a un an par un tunnel moderne, qui conserve le précédent comme galerie de secours).
- Un peu plus haut (1700-1800) mais nette-

ment plus court (3070 m), le tunnel routier Aragnouet-Bielsa est un monotube ouvert en 1976 entre la vallée d'Aure et celle du rio Cinca, à l'initiative du maire de Saint-Lary ; il apparaît comme un tunnel de façade, dont la faible longueur, 3 km, est balancée par une altitude élevée exigeant des lacets à forte pente pour son accès nord.

- et à 2000 m le tunnel routier d'Envalira vers l'Andorre, long de 2860 m.

Le Somport et Aragnouet-Bielsa sont à cheval sur la frontière, Vielha est en Espagne, Puymorens en France, et Envalira en Andorre.

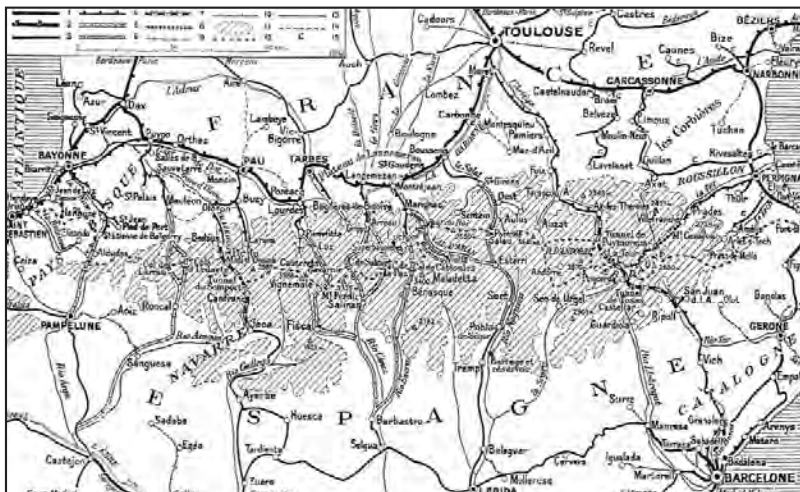
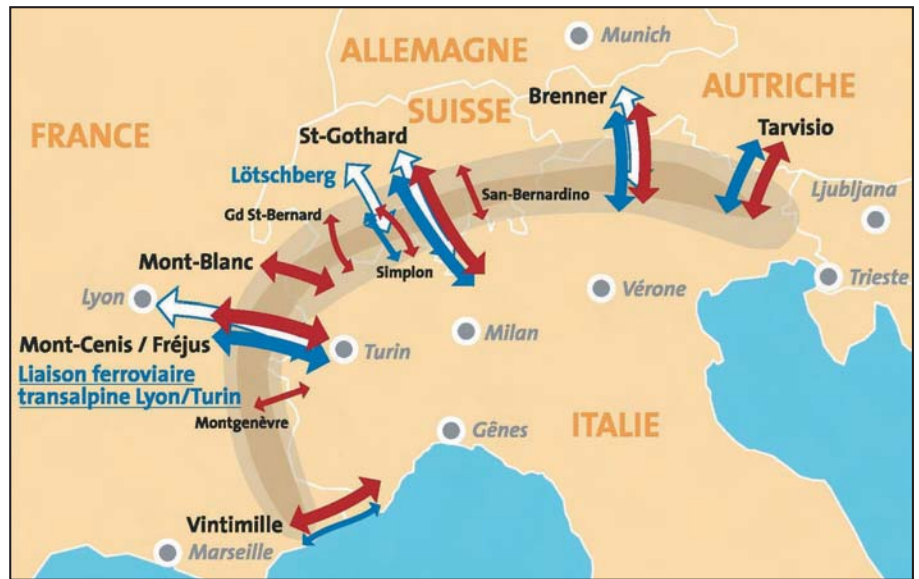


Figure 3 : Traversées ferroviaires envisagées en 1904 (seules celles en trait plein, au Puymorens et au Somport ont été construites dans les années 20).

Figure 4 : Traversées des Alpes (rail en bleu, route en rouge, nouveaux en blanc) (Karawanken et Tauerntunnel, sont plus à l'est).

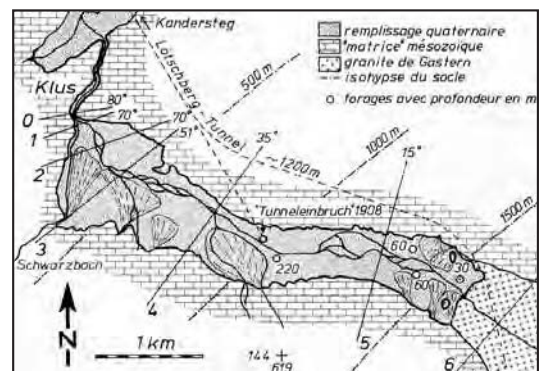


Figure 5 : Déviation du premier tunnel du Lötschberg sous le Kandertal après le déboufrage du 24 juillet 1908 (massif calcaire sur socle granitique).

2 - LES TUNNELS DE CIRCULATION À TRAVERS LES ALPES (COLLECTIF, 2004)

Premier franchissement de la ligne de crête des Alpes, la Traversette, au nom évocateur, n'est qu'un tout petit tunnel ouvert en 1480 pour faciliter le commerce du sel entre le Dauphiné et le Piémont. Long de 74 m, son gabarit minimal limitait son usage aux piétons et mulets. C'est un exemple extrême de tunnel de façade, à la cote 2 850 quand le col est à 2 914, exemple qui sera suivi par beaucoup de routes, par exemple sous le col de Rousset au sud du Vercors (1255 m) et sous le col du Galibier au nord de l'Oisans, à 2 645 m.

Les grands tunnels transalpins (figure 4) sont classés ci-dessous en trois périodes :

2.1 - Dans la première période, sur près d'un siècle à partir de 1857, ils sont tous ferroviaires :

Le Mont-Cenis est le premier vrai tunnel transalpin : dès les débuts des chemins de fer, un tunnel sous les Alpes s'impose et Sommeiller choisit de raccorder Modane à Bardonnèche sous le col de Fréjus (12 ans de travaux pour 12 km) sous une couverture maximale de 1600 m ; il est creusé pour l'essentiel dans la formation des « schistes lustrés » et c'est la mise au point des perforatrices à air comprimé qui a assuré le succès de l'entreprise en multipliant par dix la vitesse de creusement après les trois premières années.

Ce succès a conduit à engager le Saint

Gothard en Suisse, à l'altitude 1600 m, atteinte par plusieurs lacets et tunnels hélicoïdaux qui excluent les trains rapides et les trains lourds. L'Arlberg, en Autriche, qui le suit aussitôt ne traverse pas la chaîne mais relie de grandes vallées longitudinales, Inntal et Klostertal. En Suisse à nouveau, le Simplon est le premier bi-tube ; il est resté célèbre non seulement par les records de longueur (20 km) et de couverture (2200 m), mais aussi par les températures élevées (55,4°C), et les impressionnantes déformations de terrains à schistosité sub-horizontale. Après l'achèvement du deuxième tube, il est complété au nord par le Lötschberg, tristement célèbre à cause du déboufrage survenu en 1908 sous le Gasterntal (figure 5). Si le Simplon est pour longtemps le premier vrai tunnel de base,

Gothard et Lötschberg sont des tunnels de faite. Le tunnel des Karawanken qui assure une liaison vers Trieste (aujourd'hui entre Autriche et Slovénie) au prix de grandes difficultés, et le Tauertunnel entièrement autrichien sont nettement moins longs (7 864 m et 8 551 m).

L'optimisme des ingénieurs d'alors apparaît dans cet enchaînement : attaqué en 1872, deux ans après le percement du Mont-Cenis, le Saint Gothard est mis en service le 1^{er} janvier 1882, aussitôt suivi par l'Arlberg en 1884 ; le premier tube du Simplon, attaqué en 1898, est mis en service le 1^{er} juin 1906, suivi par le Karawanken le 1^{er} octobre, puis par le Tauern en 1909, et le Lötschberg, attaqué en 1907, ouvre le 28 juin 1913. La progression de la vitesse d'avancement, les deux attaques additionnées, est sensible ; la diminution de l'effectif des chantiers (et du nombre de tués) est spectaculaire (tableau 1 extrait de Kovari et Fectig, 2000) ; d'autres étapes seront pourtant franchies plus tard.

Exception qui confirme la règle, au col de Tende la route a précédé le rail, l'un de 3186 m creusé de 1878 à 1882, à la cote 1300, soit sous une couverture proche de 600 mètres (c'est le premier vrai tunnel transalpin routier), et 8 080m de 1889 à 1898 pour l'autre, 300 m plus bas (très loin de satisfaire aux normes modernes, le tunnel routier est en cours de renouvellement).

des vallées de part et d'autre du massif ; et s'il est aussi profond, c'est qu'il passe loin de tout col, sous le massif le plus haut des Alpes. L'écaillage explosif du granite y était attendu, mais la surprise est venue du très fort débit des venues d'eau du côté italien, et de leur basse température.

La route va désormais multiplier les passages, en commençant en Suisse (tunnels du Grand Saint Bernard, 5,85km à 1900 m d'altitude, et du San Bernardino, 6,6 km à 1650 m), et en Autriche (Felbertauerntunnel, 5,3 km à 1650 m). Nettement plus courts, ces tunnels de faite sont achevés à la même époque que celui du Mont Blanc.

Un peu plus tard, la route ose des tunnels plus longs, qui doublent les tunnels ferroviaires à peu près à la même altitude, donc avec une longueur très voisine ; le Saint Gothard 2 (17 km), l'Arlberg 2 (11 + 3 km), le Fréjus 2 (12 895 m). Des puits de ventilation ont pu trouver place dans des vallées proches, au prix parfois d'un léger détour (le Saint Gothard s'écarte pour cela du précédent; figure 6 de Lombardi, 2007). Le Karawanken est doublé à son tour en 1991 (7 864 m), donnant l'occasion de constater le complexe de supériorité des "modernes" qui font fi des leçons des "anciens" : comme au PuyMORENS (voir ci-dessous), mais en beaucoup plus grave, ils ont buté sans précautions convenables sur l'accident géologique qui avait longuement arrêté leur prédécesseur.

(10 173 m) ouvert en 1984 sous le point culminant de l'Apennin). Le traitement d'une faille aquifère sous haute pression a bénéficié de l'expérience gagnée par les entreprises spécialisées dans les galeries hydroélectriques des Alpes (ci-dessous).

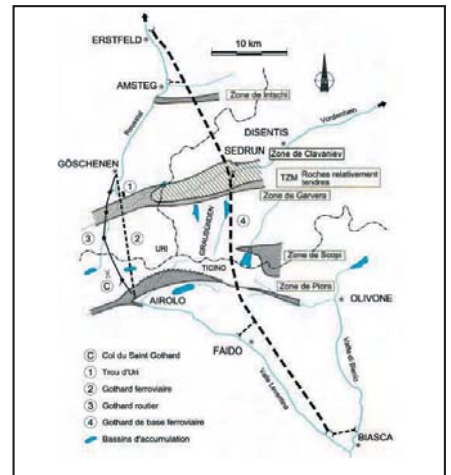


Figure 6 : Les trois tunnels successifs du Gothard (ferroviaires en tirets, routier en trait plein avec trois puits de ventilation, Lombardi, 2007) (Le Trou d'Uri n'est qu'un très court tunnel dans les gorges de la Reuss, loin en aval du col).

Dans la même période, la Suisse perce néanmoins deux tunnels de base ferroviaires, Furka et Vereina, celui-ci long de 19 km entre Klosters et Zerne, pour désenclaver la basse Engadine, celui-là, long de 15,4 km à 1500 m d'altitude, pour permettre la circulation hivernale de l'Express des Glaciers (Saint Moritz-Zermatt) qui passait auparavant dans un tunnel de faite à 2100 m d'altitude (il s'agit de lignes à voie unique étroite, une exception suisse justifiée par les conditions difficiles des tracés en haute montagne). Comme les deux Arlberg, les tunnels de la Furka sont parallèles à l'axe de la chaîne ; pour éviter le tracé en direction dans des roches schisteuses du tunnel de faite ancien, le tunnel de base est dévié dans des terrains plus favorables, un tracé qui rappelle le parcours des premières ondes en sismique réflexion (figure 7).

2.3 - Le retour du rail avec la grande vitesse et les trains de fret lourds

Ces travaux et projets sont largement décrits ailleurs ; la Suisse engage une nouvelle bataille du rail avec deux tunnels hors normes, le Lötschberg de base, 500 m plus bas que le précédent et une longueur plus que doublée, 35 km (mis en service en

| | Gothard fer 1872-1882 | Simplon fer 1898-1906 | Lötschberg fer 1907-1913 | Gothard route 1969-1980 |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Longueur | 14 982 m | 19 803 m | 14 605 m | 16 322 m |
| Section excavée | 56,8 m ² | 49,6 m ² | 57,6 m ² | 101,2 m ² |
| Volume excavé | 847 670 m ³ | 990 000 m ³ | 836 959 m ³ | 1 651 000 m ³ |
| Durée du chantier | 111 mois | 96 mois | 66 mois | 124 mois |
| Avancement moyen | 4,47 m/d | 6,9 m/d | 7,33 m/d | 5,7 m/d |
| Coût | 66,67 MFS | 78 MFS | 50,3 MFS | 686 MFS |
| Effectif maximal | 3 874 | 3 420 | 3 250 | environ 700 |
| Accidents mortels | 177 | 67 | 64 | 17 |

m/d : mètres par jour (à deux attaques), MFS : millions de francs suisses

Tableau 1 : Comparaison des quatre premiers percements suisses.

2.2 - Le Mont Blanc ouvre l'ère des tunnels routiers

Remarquable par le record de profondeur en génie civil, 2500 m, toujours valide, le tunnel du Mont Blanc est en 1965 le premier tunnel routier de base ; il est relativement court (11,6 km) grâce à la grande profondeur

Il convient d'ajouter une série de tunnels de 5 à 10 kilomètres, en Autriche (Tauern et Katschberg entre Salzbourg et Villach en 1975, aujourd'hui en cours de doublement, Bosrück et Gleinalm entre Linz et Graz en 1978 (ces deux doublets témoignant du dédoublement de la chaîne), Platbusch en 2004, et en Italie, celui du Gran Sasso

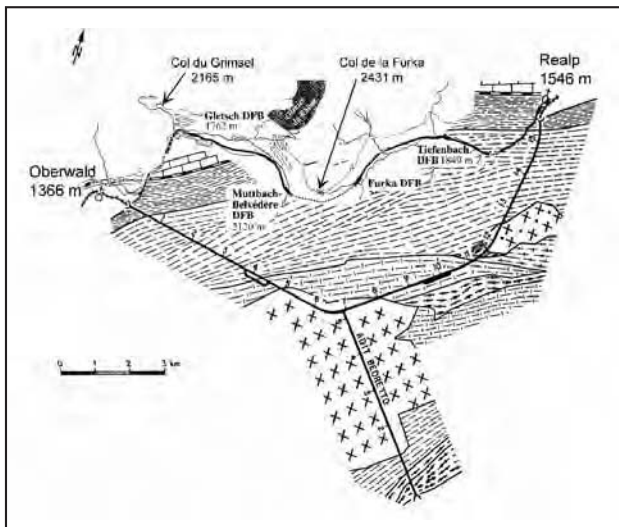


Figure 7 : Les deux tunnels de la Furka, et la fenêtre d'accès du second sur le val Bedretto, dans le canton du Tessin.

2007), et le troisième Gothard, dont la voie mérite d'être qualifié « de plaine » au prix d'une longueur record de 57 km, et de deux autres longs tunnels. On en retiendra seulement ici la mise au point d'un « béton » de soutènement qui présente la même propriété que les cintres coulissants dans les mines de charbon (accepter la déformation sans rompre, afin d'éliminer l'excès de contrainte).

L'Italie n'est pas en reste : la traversée de la chaîne de l'Apennin, entre Bologne et Florence, est un cas unique avec trois lignes ferroviaires successives: la première accède avec des lacets à un tunnel de faite sous le Passo da Collina ; la ligne est raccourcie une première fois par le célèbre tunnel de base de l'Apennin, 19 km, puis une troisième ligne vient d'être terminée pour le TAV (treno alta velocita, le TGV italien), passant au plus court, et souterraine à 85%, en 8 grands tunnels (figure 8). Avec la France, elle projette la liaison Lyon-Turin, avec l'Autriche le Brenner de base (sous le col homonyme, le plus bas de la chaîne des Alpes à 1 374 m d'altitude seulement, le seul qu'une voie ferrée importante franchit en surface (mais non sans tunnels sur les accès).

3 - LES GALERIES HYDRAULIQUES

Depuis la fin du XIX^e siècle, l'exploitation de l'énergie hydraulique, la "Houille Blanche", a donné naissance à une nouvelle famille de tunnels. Lorsque le relief est modeste, l'eau peut être acheminée par des canaux à ciel ouvert, mais là où les pentes sont fortes, les tunnels sont préférés, et ils sont la règle si l'écoulement est en charge sous le niveau d'un réservoir. Les galeries

d'amenée, pour la plupart, suivent le versant d'une vallée ; elles sont relativement superficielles, et il est facile de multiplier les accès pour réduire le délai du creusement, alors que celles qui passent d'une vallée à une autre peuvent rivaliser en longueur et couverture avec les tunnels de circulation. La croissance des grandes villes appelle aussi des galeries d'adduction d'eau, dont certaines traversent de vraies chaînes de montagne.

3.1 - Galeries hydroélectriques dans les Alpes

Dans les Alpes françaises (comme d'ailleurs en Suisse, en Italie et en Autriche), plusieurs aménagements majeurs impliquent la traversée d'importants chaînons (Figure 9), dont la dérivation du Bon Nant vers le lac réservoir de la Girotte, la galerie du barrage de Roselend à la centrale de La Bathie (où la zone aquifère des cargneules broyées du Chornais a permis aux entreprises spécialisées de forger leur expérience) ; celle du barrage du Mont-Cenis à la centrale de Villarodin, (où un long drainage a finalement permis le passage sous le torrent de Sainte Anne), et surtout les trois traversées

successives entre les deux grandes vallées de Savoie, la Maurienne (vallée de l'Arc) et la Tarentaise (Isère) :

- Isère-Arc : dans cette galerie de 11 km entre Notre-Dame-de-Briançon et Aiguebelle (usine souterraine de Randens, mise en service en 1955) l'écaillage explosif du granite apparu sous une couverture proche de 2000 m a été maîtrisé grâce à l'introduction en génie civil du boulonnage, une expérience qui servira au tunnel du Mont Blanc avec le même entrepreneur, non sans donner lieu à un important contentieux. La proximité des sources thermales de la Léchère avait suscité des craintes qui n'ont pas été confirmées (ces manifestations thermales existent aussi dans les Pyrénées).
- Arc-Isère amont, galerie de 10 km, entre Bonneval et Val d'Isère, pour compléter le remplissage du réservoir de Tignes ; les géologues déconseillent formellement cet ouvrage en raison de la « bande de l'Iseran », une zone de chevauchement majeure largement visible sur les photos aériennes dont la traversée était inéluctable sous un millier de mètres de couverture. L'avancement a été stoppé à l'approche de la zone pour faire des forages de reconnaissance, et ceux-ci n'ont rencontré aucun accident ! la Nature peut se montrer bonne fille, et le devoir du géologue est d'être prophète de malheur (Figure 10).

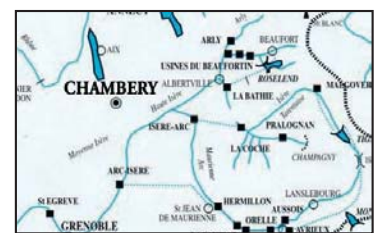


Figure 9 : Principales galeries hydroélectriques des Alpes de Savoie.



Figure 8 : Traversée de l'Apennin entre Bologne et Florence : ligne "direttissima" en vert grâce au tunnel de 19 km percé dans les années 30, et ligne nouvelle en noir, souterraine à près de 90 % (un long tunnel autoroutier est prévu à son tour).

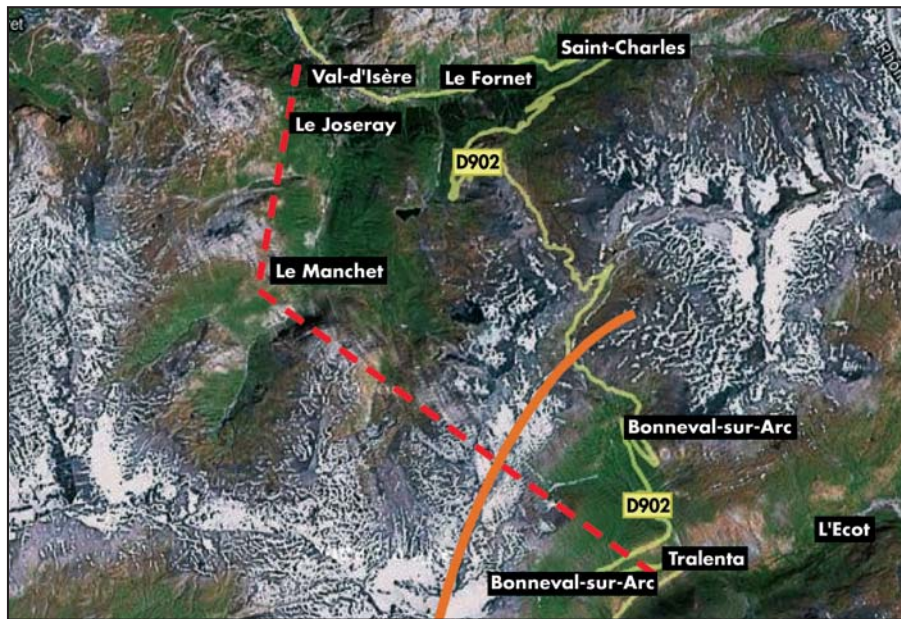


Figure 10 : Vue satellite du massif de l'Iseran, et tracé de la galerie Arc-Isère.

• Arc-Isère aval, galerie de 18 km sous la chaîne de Belledonne avec 2200 m de couverture, quasi équivalent à l'époque du Simplon. Une moitié a été creusée à l'explosif, l'autre avec un tunnelier : à trois reprises le tunnelier s'est engagé dans une zone broyée aquifère ; la première fois, il a fallu contourner le tunnelier par une petite galerie afin de déblayer la tête et de sécuriser la

zone qu'il allait traverser avant de reprendre un avancement normal, d'où un délai d'environ sept mois ; pour les deux autres, l'intervention a été mise en œuvre beaucoup plus rapidement. Malgré ces quelque 12 mois d'arrêts, cette attaque au tunnelier a progressé à la même vitesse moyenne que l'attaque à l'explosif, de l'ordre de 6 m par jour travaillé.

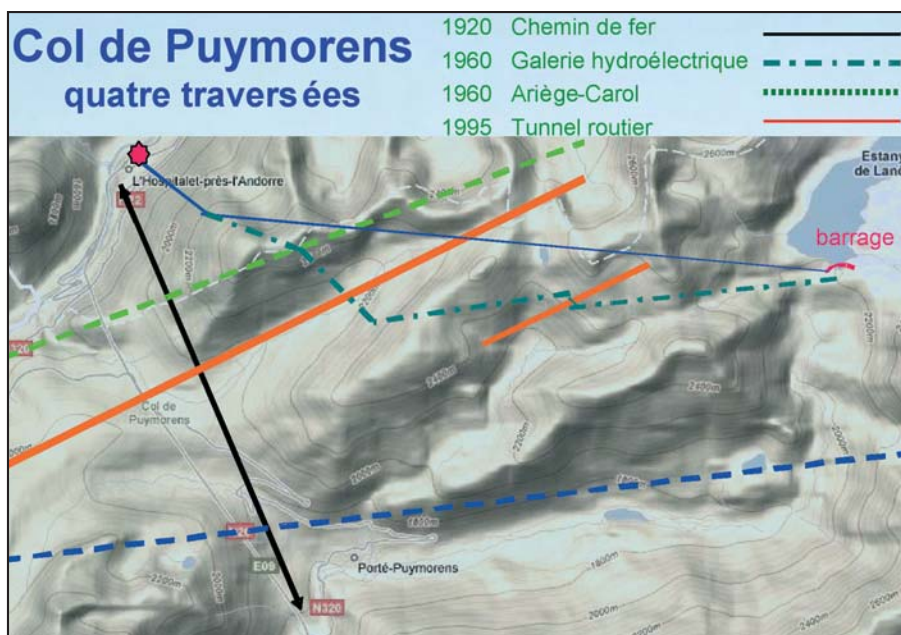


Figure 11 : Quatre traversées souterraines au col de Puymorens : en noir, tunnel ferroviaire en 1920, en tirets bleus et en pointillés verts, deux galeries hydrauliques en 1960, en rouge, le tunnel routier de 1995 entre deux des précédents ; les traits orangés représentent des failles majeures (d'où la baïonnette visible sur la galerie Lanoux-L'Hospitalet).

3.2 - Galeries hydroélectriques dans les Pyrénées

Les Pyrénées sont moins riches que les Alpes en longues galeries profondes, dont plusieurs ont toutefois donné lieu à des difficultés, avec des granites altérables (Olette, et plus tard Nentilla, respectivement dans les vallées de la Têt et de l'Aude), avec des inclusions de calcaires karstifiés dans les granites du Néouvielle (galerie de 10 km entre le lac surélevé de Cap de Long, du côté Neste, et la centrale de Pragnères sur le Gave de Pau). Mais c'est l'histoire des transferts entre Ariège et Carol qui a apporté les enseignements les plus originaux (pour l'époque, Duffaut, 1981, figures 11 et 12) : la galerie d'amenée de L'Hospitalet (en charge d'une centaine de mètres sous le niveau de l'étang Lanoux), traverse la ligne de partage des eaux au nord du col et un peu plus haut, passant en conduite sur le sol le vallon d'En Garcie. Sa particularité est un tracé presque exactement en direction dans des schistes ardoisiers à fort pendage, affectés de flambement systématique dès 300m de couverture ; soutenus par cintres ou boulons, les schistes ont poursuivi leur déformation, provoquant la rupture de boulons et le flambement de cintres. Cette évolution ayant engagé le gabarit du coffrage, on a craint que le réalésage nécessaire ne se heurte à de grandes difficultés ; bien au contraire, il s'est effectué aisément : la déformation avait limité la contrainte à ce qui était supportable.



Figure 12 : Déformation des schistes ardoisiers dans la galerie d'amenée en charge Lanoux-L'Hospitalet, au-delà de 300 m de couverture.

Comme l'aménagement turbine vers l'Ariège une eau qui s'écoulait naturellement vers l'Espagne, une galerie passe sous le col pour restituer à l'Espagne le même volume d'eau (décalé d'une

semaine). Pendant l'étude préliminaire, les archives du tunnel ferroviaire (déjà cité) ont montré une zone broyée importante, que la galerie ne pouvait éviter. Malgré la section très réduite de cette galerie, le franchissement s'est heurté à des convergences considérables : les schistes écrasés s'extrudaient entre les cintres, l'entreprise a essayé de monter des anneaux de blocs de béton, qui ont été écrasés, puis un ancien mineur de charbon a suggéré d'intercaler des planchettes de bois entre les blocs, assurant ainsi la stabilité ; en vérité cet artifice est bien l'équivalent des cintres coulissants classiques dans les mines, et du béton à grande capacité de raccourcissement introduit au Lötschberg de base par K. Kovari en 2005 : comme ci-dessus, la déformation éteint la contrainte, pourvu que l'intégrité du milieu soit préservée. (figure 13 de Duffaut, 1974).

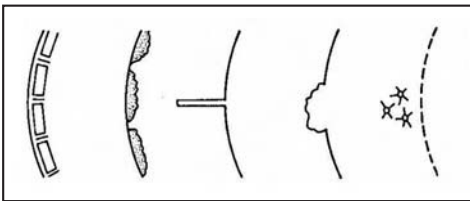


Figure 13 : Divers artifices employés pour maîtriser l'excès de contrainte à la paroi d'un tunnel profond, des planchettes entre blocs de béton (aujourd'hui des éléments de béton compressible) aux génératrices libres entre placages de béton projeté (Tauern), à la saignée, au hors profil, ou simplement aux tirs en avant du front pour pré-fissurer le massif (dans chaque cas, lui "donner du mou").

Situé entre le tunnel ferroviaire et cette galerie, le tunnel routier de Puymorens, creusé trente ans plus tard, ne pouvait éviter de croiser la même faille ; en raison d'une méthode d'avancement plus rapide, elle a été traversée sans trop de précaution, et a donné lieu peu après à un important éboulement.

3.3 - Galeries hydrauliques hors de France

Chaque pays de montagne peut fournir des exemples douloureux de failles et terrains broyés. Ainsi, par exemple en Suisse, le chantier exceptionnel de congélation dans la galerie joignant le barrage sur l'Hongrin à la centrale souterraine de Veytaux ; au Liban, la galerie du Litani qui a dû maîtriser une charge de 700 m d'eau ; dans l'Himalaya, le creusement de la galerie de Dul-Hasti a abandonné le tunnelier face aux failles aquifères

et surtout à un considérable ancien lit insoupçonné ; et dans les Pyrénées les quartzites broyés aquifères d'une galerie de Fabrèges en ont longuement stoppé l'avancement comme auparavant dans les Alpes ceux de la fenêtre 13 de Malgovert à l'aval du barrage de Tignes.

Parmi les aqueducs des grandes métropoles, New York et Johannesburg par exemple, celui de Chingaza apporte à Bogotà de l'eau provenant du versant amazonien bien arrosé de la Cordillère orientale par 37,7 km de tunnels et conduites. Le premier tunnel à l'amont est un véritable transandin de 28,4 km avec une couverture dépassant 600m, complété par trois tunnels de 0,3 à 3 km. Il s'agit de reliefs très jeunes taillés dans des formations sédimentaires peu consolidées, parcourues de nombreuses failles et chevauchements. Les galeries ont été creusées de 1972 à 1982 suivant la NATM, nouvelle méthode autrichienne, par des entreprises novices en la matière, qui n'ont pas pu ou su tenir le rythme de projection du béton dès la mise à nu du terrain, et de graves désordres, survenus dès les premières années, ont mobilisé force experts internationaux pour définir des réparations durables. Non loin de là, et un peu plus tard, les entreprises françaises ont rencontré aussi de sérieuses difficultés sur les galeries de l'aménagement hydroélectrique du Guavio dans des terrains analogues.

4 - RETOUR SUR LA TRAVERSÉE DES PYRÉNÉES CENTRALES

Après les deux mêmes phases de construction de tunnels que dans les Alpes, ferroviaires d'abord, routiers ensuite, les Pyrénées attendent l'arrivée de voies ferrées performantes à l'image des "nouvelles traversées" en Suisse, du Lyon-Turin ferroviaire et d'un Brenner de base. L'Espagne (et la province d'Aragon) exercent une forte pression sur la France pour la réalisation d'une liaison ferroviaire lourde, destinée surtout au fret, entre Saragosse et le piémont nord-pyrénéen (Pau, Tarbes, Toulouse ?). Une telle liaison impose un long tunnel profond, comparable donc aux grands tunnels transalpins évoqués plus haut.

Il est facile de comprendre que l'utilisation des grandes vallées perpendiculaires à la chaîne permet les tunnels les plus courts, comme elle donne accès aux cols

les plus bas avec un minimum de tracé en haute montagne (le problème est le même pour un gazoduc, une autoroute, ou une ligne électrique à haute ou très haute tension) ; c'est le cas des ports cités plus hauts de Salau et Ourdissétou. De Tarbes vers Saragosse, la vallée du Gave de Pau paraît s'imposer, et l'un des projets part de Pierrefitte-Nestlas (altitude 450 m) en direction de Biescas (875 m), puis Huesca, en passant sous le massif du Vignemale, et en bénéficiant ainsi d'un massif de granite dans sa partie française.

Devant l'inquiétude des habitants de la vallée de Lourdes à Gavarnie, une proposition lancée en 2005 par une association locale a donc éveillé beaucoup d'intérêt : l'idée est de profiter du plateau de Lanne-mezan pour gagner sans difficulté l'altitude de 660m au front de la chaîne, sur la commune de Hèches et de percer un tunnel vers Bielsa (1050 m). Mais l'accès sud devrait alors emprunter une vallée sinueuse et encaissée, en partie noyée par des barrages, alors que le portail français, proche de l'autoroute A64 à Lanne-mezan, peut se raccorder au réseau par une voie ferrée moderne quasi rectiligne, en direction d'Auch, Agen et Limoges (le tronçon aujourd'hui manquant, de Lanne-mezan à Auch, était en pointillés sur une carte du réseau en 1930), sans troubler les aires urbaines ni encombrer les gares de Tarbes ou Toulouse.

La coupe géologique est complexe mais du moins la direction générale est perpendiculaire aux failles et chevauchements (dont la faille majeure nord-pyrénéenne) ce qui réduit au minimum la longueur des zones problématiques. La proximité de la vallée de la Neste pourrait faciliter la reconnaissance préalable de ces zones et leur traitement s'il est jugé nécessaire (comme on l'a fait autrefois à la fenêtre du Chornais pour la galerie Rose-lend-la Bathie citée plus haut).

« Au moment où le centre de gravité de l'Europe se déplace vers le nord-est, nous ne pouvons pas rester le cul-de-sac du continent. Nous avons besoin pour le XXI^e siècle d'un débouché moderne sur l'Espagne, d'une liaison efficace pour le fret comme pour le transport de voyageurs entre Midi-Pyrénées et l'Aragon. Seul ce tunnel ferroviaire central peut protéger la chaîne pyrénéenne d'une invasion programmée des camions » a déclaré Martin Malvy, président de la région Midi-Pyrénées au Conseil régional du 28 juin 2008.

5 - CONCLUSIONS SUR LES TUNNELS TRANS-MONTAGNES

L'évolution la plus flagrante dans le creusement des tunnels est celle de la vitesse moyenne de creusement, passée en 150 ans de moins d'un mètre par jour, au début du Mont-Cenis, à près d'un hectomètre par jour dans certains tronçons du Tunnel sous la Manche, un facteur supérieur à 100 qu'il faut tempérer par des périodes de préparation, d'entretien, parfois de grosses réparations, et par la rencontre de conditions de terrain défavorables, prévues ou non en dépit de reconnaissances toujours plus perfectionnées.

En conditions constantes, la grande longueur permet de profiter au mieux de l'apprentissage (du terrain, des machines, etc.) : au Tunnel sous la Manche la vitesse n'a cessé d'augmenter en dépit de l'allongement des transports. Si la distance au front reste une contrainte forte, surtout dans les tunnels de petite section, la grande longueur n'est plus taboue, dès lors que la section du tunnel permet d'employer au front des machines performantes. C'est en effet la mécanisation qui a permis cette évolution, du marteau à air comprimé aux tunneliers modernes. La dureté de la roche est aisément surmontée grâce à des outils adaptés, alors que l'évacuation des déblais et l'acheminement des hommes, des matériaux et des matériels sont limités par la performance des transports.

La puissance des machines s'est traduite aussi par la diminution des efforts à demander aux hommes, l'effectif des chantiers en a été très fortement réduit et avec lui le nombre des accidents ; les métiers ont évolué des tâches pénibles et dangereuses vers la mécanique de précision et la commande électronique ; en conséquence la qualification et le coût de la main d'œuvre ont beaucoup augmenté, directement sur la feuille de paie et indirectement par de meilleures conditions de vie sur les chantiers.

Si la grande profondeur n'a ému que le géologue Albert Heim, pour qui la pression de la roche devait finir par écraser le Simplon, la confiance en la plasticité (Maillard, dès 1922), puis les approches théoriques modernes de l'interaction entre terrain et soutènement ont peu à peu redonné confiance aux ingénieurs inquiets (rappelons que les fissures du béton apparues lors de la mise en service du Tunnel du Mont Blanc étaient purement thermiques, Panet, 1969).

Toutefois le terrain a toujours un rôle essentiel dans un projet de tunnel, singulièrement dans le choix et l'adaptabilité des méthodes : de même qu'il est incorrect d'évoquer de méchants sauvages ou de mauvais élèves, de même doit on bannir le concept de mauvais terrains : il y a seulement des ingénieurs médiocres et/ou des méthodes inadaptées (un proverbe norvégien assure ainsi qu'il n'y a pas de mauvais temps, seulement de mauvais vêtements).

Tout particulièrement (et comme en météorologie d'ailleurs), l'eau est un élément-clé du terrain, le seul sans doute susceptible de condamner un projet : au Tunnel sous la Manche, les tunneliers ont pu travailler de façon suffisamment étanche sous 100 m d'eau, mais on n'entrevoit aucun espoir de les équiper contre une charge plusieurs fois supérieure. L'étanchement par injections a fait d'abord ses preuves pour traverser des failles isolées, puis elles ont été employées de façon systématique sur de grandes longueurs au Japon dans le tunnel sous-marin du Seikan, permettant d'atteindre une vitesse de 3 m par jour (multipliée par le nombre d'attaques, grâce à l'avance prise par la galerie pilote). L'autre méthode de lutte contre les terrains aquifères, la congélation, n'aurait trouvé qu'une application importante en tunnel de montagne

(exemple suisse évoqué ci-dessus) alors qu'elle a permis au tunnel routier sous le fjord d'Oslo de traverser un sillon sous-glaciaire.

Trop souvent la prise en compte du terrain est tardive, alors que le tracé est supposé définitif (mainte galerie d'amenée d'eau a connu des déviations, celle du Lötschberg a été évoquée, le Seikan a été dévié après la première faille majeure ; c'est impensable aujourd'hui pour des tunnels de TGV (et plus encore pour les anneaux des accélérateurs de particules).

Enfin, si les chaînes de montagnes du monde promettent un grand avenir aux longs tunnels profonds, pour le franchissement ferroviaire et pour les transferts d'eau d'un bassin à un autre, une demande nouvelle devrait apparaître dans les chaînes d'Europe : les grandes stations touristiques des hautes vallées sont en général tributaires d'une seule voie de desserte, susceptible d'être coupée par des avalanches ou de grands écroulements. Ce qui est arrivé à Zermatt en 1994 (aux Eaux-Bonnes en août 1982, et à Aulon en novembre 2008) se reproduira un jour à plus grande échelle dans mainte vallée. Une élémentaire précaution exigera que les accès aux grandes stations soient maillés grâce à de longs tunnels vers les vallées voisines. ●

▶ RÉFÉRENCES

Collectif 2004, Tunnels transalpins, Géochronique, 82, 18-50.

Duffaut P., 1974, Le soutènement des tunnels creusés à la machine, Ann. ITBTP, 322, 128-133.

Duffaut P., 1981, De la géologie à la mécanique des roches dans le tunnel hydroélectrique Lanoux-L'Hospitalet ; in Hommage à Léon Calémbert, éd. G. Thone, Liège, 87-97.

Kovari K., Fechtig R., 2000, Percements historiques de tunnels alpins en Suisse, Stäubli, Zurich.

Lombardi G., 2007, Evoluzione della costruzione di opere sotterranee, Politecnico de Milano.

Maillard R., 1922, De la construction de tunnels sous pression intérieure, Bull. tech. Suisse Romande, 28 octobre, 11 et 25 novembre.

Panet M., 1969, Quelques problèmes de mécanique des roches posés par le tunnel du Mont Blanc, Bull. Lab. Ponts et Chaussées.

Les auteurs remercient Jean Piraud dont les multiples conseils et contributions ont porté autant sur les techniques qu'il domine (comme président du Comité technique de l'AFTES) que sur les Pyrénées où il a gardé des attaches familiales fortes.