

La Furka: tunnel de base Oberwald-Realp

Autor(en): **Hünerwadel, Job / Häberli, Walter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **107 (1981)**

Heft 9

PDF erstellt am: **23.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74315>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

La Furka: tunnel de base Oberwald-Realp

par Job Hünerwadel et Walter Häberli, Sion

Bien avant les premières difficultés d'ordre géologique, le tunnel de base de la Furka était voué aux critiques impitoyables de certains milieux alémaniques: il y a plus de cinq ans, nous avons entendu des journalistes zurichois dénier péremptoirement toute justification à cet ouvrage à peine commencé. On peut imaginer combien les écueils rencontrés ont été les bienvenus pour eux: la campagne de dénigrement pouvait être lancée...

Aujourd'hui, on peut envisager l'ouverture prochaine d'une liaison directe permanente entre la Suisse occidentale et la Suisse orientale, aussi bien ferroviaire que routière, puisque les automobiles pourront franchir le tunnel grâce au chemin de fer. Au delà d'une mauvaise querelle d'Allemands, il subsistera pour les générations futures un ouvrage d'une grande hardiesse, témoignage du lien confédéral entre régions hautement dépendantes de la solidarité nationale. Nous autres Romands, nous nous réjouissons particulièrement de voir nos amis grisons dorénavant bien plus proches de nous et nous saurons tirer parti de cette nouvelle facilité.

Nous n'aurons garde d'oublier le haut magistrat et ingénieur civil, membre SIA, qui a rendu possible la réalisation du tunnel de base de la Furka: la reconnaissance acquise à M. Roger Bonvin sera durable.

Rédaction

1. Historique

Lors de la seconde moitié du dix-neuvième siècle et jusqu'à la Première Guerre Mondiale, la Suisse, comme la plupart des pays européens et quelques pays en dehors de l'Europe, a connu une euphorie des chemins de fer unique dans toute l'histoire de la technique. C'est en l'espace de quelques décennies que fut construit pratiquement l'ensemble du réseau ferroviaire suisse. Si on parle aujourd'hui de la «fièvre des chemins de fer» de cette époque, il ne faut pas oublier que ce phénomène reposait sur des données réelles aussi bien économiques que techniques et sociales. Le début de l'industrialisation, le déséquilibre économique entre le Nord et le Sud de l'Europe, la surpopulation, la motorisation à peine naissante, les débuts du tourisme et un réseau routier insuffisant, formaient les bases pour le nouveau moyen de transport qu'était le chemin de fer qui, dès le début, faisait valoir ses avantages: transport plus rapide, plus sûr et plus économique, aussi bien pour les hommes que pour les marchandises. Il semble qu'à cette époque, tout le monde construisait des chemins de fer: des industriels, des commerçants, des ingénieurs, sur initiative individuelle ou en sociétés. Des sommes immenses furent investies et risquées; les réalisations des nouvelles techniques furent admirables. Mais malgré tous les efforts et tout l'enthousiasme, on ne peut guère parler de planification des transports; des concepts comme les coûts et les besoins, les tonnages, les kilomètres-personnes ne semblaient pas encore connus.

Les ouvrages réalisés sont d'autant plus hardis, et le courage et l'énergie avec lesquels on a conçu et maîtrisé la traversée des Alpes d'autant plus exemplaires. Il y eut bien sûr aussi des contrecoups; certaines des jeunes sociétés ferroviaires ont connu des difficultés et se sont effondrées, beaucoup de projets grandioses ne furent jamais exécutés, quelques lignes tombèrent en ruine et furent de nouveau abandonnées. La croissance ferroviaire était trop rapide.

L'industrie et le tourisme, principaux clients des chemins de fer, se sont développés beaucoup plus lentement. En 1906, la Confédération nationalisa la majeure partie du réseau ferroviaire existant; c'est ainsi que prit fin l'époque «héroïque» de la construction des chemins de fer suisses et que commença une période plus calme.

2. Les premiers projets pour une ligne de chemin de fer dans la région de la Furka

Il est évident que beaucoup de voies ferrées projetées et construites dans la région alpine étaient destinées au tourisme, qui était alors dans sa phase naissante. Il en fut de même pour la ligne de la Furka.

Les premières idées pour la construction d'une voie ferrée dans la région de la Furka remontent à environ 1881.

En 1886, l'ingénieur Roman Abt demanda à Berne l'autorisation de construire une ligne de Brigue à Airolo: voie normale, 61 km, tunnel de faite de 6300 m, entre Gerental et Val Bedretto,

point culminant à 1718 m (!), pente maximale de 25‰ pour les tronçons à adhérence et de 60‰ pour les tronçons à crémaillère. Le projet de Abt prévoyait une liaison Nord-Sud avec une connexion à la ligne du Saint-Gothard, qui était alors en construction. Il obtint même une concession pour la ligne, mais le trafic Nord-Sud, aussi bien régional que pour toute l'Europe, devait prendre peu d'années plus tard la voie du Simplon.

L'intérêt pour la Furka baissa, et ce n'est qu'en 1902 que surgit un nouveau projet pour une liaison entre Brigue et Gletsch, cette fois avec voie étroite et déjà conçue pour une exploitation saisonnière (5 mois), avec des rampes allant jusqu'à 250‰ et d'une longueur de 41 km, dont 7 km de crémaillère.

Puis de nouveaux projets se succédèrent rapidement: en 1904, le premier projet d'une ligne électrifiée, elle aussi de Brigue à Gletsch en passant par Oberwald; la même année, une ligne à voie étroite et exclusivement à adhérence de Viège à Gletsch, également électrifiée. En 1905, la société des chemins de fer Rhin-Rhône présenta le projet d'une ligne à voie étroite entre Linthal-Col de Kisten (tunnel)-Brigels-Truns-Disentis-Sedrun-Tschamut-Unteralp (tunnel)-Andermatt-Hospental-Realp-Furka (tunnel de faite)-Gletsch; ici, elle devait rejoindre les projets connus.

Mise en service du tronçon Brigue-Gletsch

A peine une année plus tard, une demande de concession fut soumise pour une ligne à voie étroite électrifiée de Viège à Gletsch, et presque en même temps, le même groupe proposa une ligne de Gletsch à Disentis par la Furka et l'Oberalp: la pierre fondamentale pour le futur chemin de fer de la Furka était ainsi posée, mais on était encore loin de la réalisation effective. Par la suite, on procéda à des modifications techniques du tracé, du matériel roulant, du système de traction, à des remaniements dans la structure de la société et à un nouvel examen du tracé (on envisagea p. ex. la possibilité d'un tunnel de base entre Realp et Gletsch). En 1910, on élaborait les plans définitifs et on commanda le matériel roulant. En 1911, les travaux débutèrent en deux étapes: d'abord Brigue-Gletsch, puis Gletsch-Disentis; sur ce dernier tronçon, les travaux furent de nouveau abandonnés en 1916. Cette partie ne devait être terminée qu'en 1925. Durant les années 1912-1913, on était cependant encore en pleine activité de construction sur la ligne entière longue de 97 km: pas moins de 3000 ouvriers furent simultanément à l'œuvre. Les travaux étaient pénibles et n'avançaient que lentement; le terrain, la roche, les avalanches et le froid — on travaillait aussi en hiver — causaient d'énormes difficultés. Cepen-

Toutes ces difficultés et insuffisances du trafic durant deux tiers de l'année étaient supportables aussi longtemps que le tourisme se limitait aux mois d'été. Le développement du phénomène économique et sociologique qu'est le tourisme prit cependant des voies nouvelles dès la fin de l'entre-deux-guerres, donc à peine une décennie après l'ouverture de la ligne directe Brigue-



Disentis, et ce développement devint d'une importance capitale pour le chemin de fer de la Furka. En fait, il s'agit de changements dans deux directions différentes, qu'on peut décrire brièvement sous les termes de «tourisme de masse» et de «tourisme d'hiver».

Tourisme de masse — Tourisme d'hiver

Tourisme de masse: à la fin du dix-huitième et durant le dix-neuvième siècle jusqu'après la Première Guerre Mondiale, le tourisme restait le privilège d'un petit nombre de personnes: voyages d'affaires et voyages culturels ont été les motifs principaux des déplacements; l'état des moyens de transport et des voies de communication permettaient à peine de parler de plaisir. Les voyages de Goethe, Byron et de Mark Twain sont devenus des célébrités littéraires; ils ont tous été en relation avec la Suisse et ont contribué à son développement en tant que pays touristique. Mais on voyageait toujours en petits groupes ou en famille, et si possible durant la «belle» saison. Ce ne fut qu'après la Première Guerre Mondiale que débuta ce qui devait devenir le tourisme des grands groupes durant la Seconde Guerre Mondiale («Va et découvre ton pays») et dans les années qui suivirent, développement qui semble continuer de nos jours. La société de consommation s'est emparée de cette branche de l'économie et tout le monde connaît son impact sur l'économie de la Suisse.

Tourisme d'hiver: Ce n'est que relativement tard, au début du vingtième siècle, que fut découvert ce genre de sport et en même temps les avantages des pentes alpines. Là encore, ce fut à l'époque de la Seconde Guerre Mondiale qu'on assista à sa popularisation («tout le peuple fait du ski»), qui, ça et là, a pris des formes bizarres.

Développement parallèle à celui d'autres régions de montagne

Ainsi, il n'est pas étonnant que la société des chemins de fer de la Furka se soit demandée, elle aussi, si la conception d'un trafic limité à cinq mois de l'année était toujours d'actualité. En effet, la région traversée par cette ligne de chemins de fer, constituée par les trois vallées de Conches, Urseren et Tavetsch, se prête à merveille au tourisme durant l'été et principalement aussi en hiver. Elle est facile à atteindre non seulement à partir des zones très peuplées du Plateau suisse, mais aussi à partir de la Lombardie, de l'Allemagne du Sud et se situe à une distance raisonnable des aéroports de Zurich et de Genève-Cointrin. Sur le tronçon Est (Tavetsch/Oberalp/Andermatt), une exploitation hivernale pourrait être réalisée moyennant relativement peu d'investissements; cette région a d'ailleurs su garder le contact avec le développement d'autres régions de montagne, la dépopulation a pu être stoppée dans ces vallées et on a

même assisté à l'implantation de quelques industries. L'assainissement de la branche Ouest (Realp/Furka/Gletsch/Oberwald) a posé par contre beaucoup plus de problèmes; les conditions topographiques et climatiques y étaient trop dures; le tunnel de faite, à une altitude d'environ 2150 m et long de 1850 m entre la Furka et Muttbach-Belvédère, était en mauvais état et sa section ne permet pas le transport de voitures automobiles. De plus, le tronçon Oberwald-Realp, en grande partie conçu avec crémaillère, traverse de nombreuses zones d'avalanches et les vitesses qu'il permet sont insuffisantes. Le projet d'un tunnel de base entre Oberwald et Realp était donc le bienvenu. En se basant sur des expertises économiques d'exploitation — malgré toute l'incertitude en ce qui concerne le développement du volume des transports — on pouvait en espérer une réduction sinon une disparition du déficit d'exploitation chronique. S'y ajoutait l'importance militaire, inexprimable en francs, d'une liaison Ouest-Est au centre des Alpes suisses, assurée pendant toute l'année.

4. La géologie du tunnel de la Furka¹

L'emplacement des portails et des courts tronçons de liaison aux gares existantes ne permirent qu'un choix limité. Le tracé de la ligne lui-même semble, par contre, avoir donné lieu à certaines discussions qui nous amènent à examiner de plus près la tectonique de la région de la Furka. Les conditions géologiques connues lors de la phase de planification ainsi que les expériences faites surtout lors de la construction d'ouvrages souterrains pendant la Seconde Guerre Mondiale, de même que d'autres raisons, firent abandonner un tracé rectiligne entre Oberwald et Realp.

a) Géologie

Le tunnel est situé sur toute sa longueur dans le massif du Saint-Gothard, composé de roches cristallines et qui s'étend avec son manteau de sédiments du mésozoïque de l'ouest de Brigue jusqu'à l'est d'Ilanz. Le massif du Saint-Gothard, long d'environ 100 km, présente sa largeur maximale d'environ 12 km dans la section Disentis-Lukmanier. Il est compris entre le massif de l'Aar au Nord — également constitué de roches cristallines —, resp. le massif intermédiaire de Tavetsch au Nord-Est, et les marnes noires des Grisons ainsi que les gneiss de la masse du Lukmanier au Sud. Les roches du massif du Saint-Gothard sont pratiquement verticales au Nord, c'est-à-dire à fort pendage vers le Sud, et au Sud, elles ont un pendage de

plus en plus faible vers le Nord. Le massif a donc une structure en éventail quelque peu asymétrique. Schématiquement, on distinguera un certain nombre de séries de zones rocheuses.

Au Nord, vers le mésozoïque, s'étend une série de roches dont la puissance et la composition sont extrêmement variées, et qu'on classe parmi les permocarbonifères. Il s'agit de schistes à séricite et chlorite à schistosité très prononcée et de gneiss biotitiques à épidotes riches en carbonate. L'origine sédimentaire de ces roches est souvent encore clairement visible.

Les roches cristallines elles-mêmes peuvent être regroupées en trois zones allongées.

La zone nord est composée surtout de paragneiss riches en mica et des gneiss mélangés avec des passages à amphibolites ainsi que des lentilles de serpentine. L'âge de ces roches a été récemment évalué à 440 millions d'années.

La zone centrale comprend, en plus des paragneiss et des amphibolites, des gneiss striés, surtout sous forme de gneiss à feldspaths alcalins à caractère orthosique. Ces roches sont entrecoupées par les intrusions massives plus récentes, comme par exemple les granites de Rotondo. Alors que l'âge des gneiss striés (436 ± 18 millions d'années) fait remonter l'origine chimique à l'époque calédonienne, la détermination sur les muscovites des gneiss striés (285 ± 11 millions d'années) renvoie à la fin du métamorphisme herzynien. Les roches les plus récentes du massif du Saint-Gothard sont les granites de Rotondo, avec une isochrone sur roche totale de 277 ± 11 millions d'années. Malgré les indications d'âge, la discussion sur l'époque de l'intrusion du granite de Rotondo reste ouverte. La zone centrale est traversée par des artères claires et foncées, c'est-à-dire des Aplites et des Lamprophyres.

La zone sud, appelée la série de Tremola, comprend des roches fortement métamorphosées comme les schistes et les gneiss granitiques avec des schistes à hornblende et des amphibolites, ainsi que des quartzites, etc. Ces roches proviennent d'argiles, de calcaires, de dolomites ou de sables. En soi anciennes, elles ont été modifiées lors de la formation plus récente du massif alpin d'il y a environ 18 à 40 millions d'années. Les nombreuses fissures de traction qui ont créé un réseau de cavités très dense dans certaines zones ont à peu près le même âge. La schistosité ainsi que l'augmentation des cataclases et de la mylonisation, liées à des décompositions et à la formation de fissures et de crevasses, sont des processus qui continuent de nos jours.

b) La tectonique

Les massifs du Saint-Gothard et de l'Aar sont situés dans une grande zone perturbée des Alpes. Il semble qu'ils

¹ L'auteur de ce chapitre est M. Walter Huber, dr ès sc., Zurich

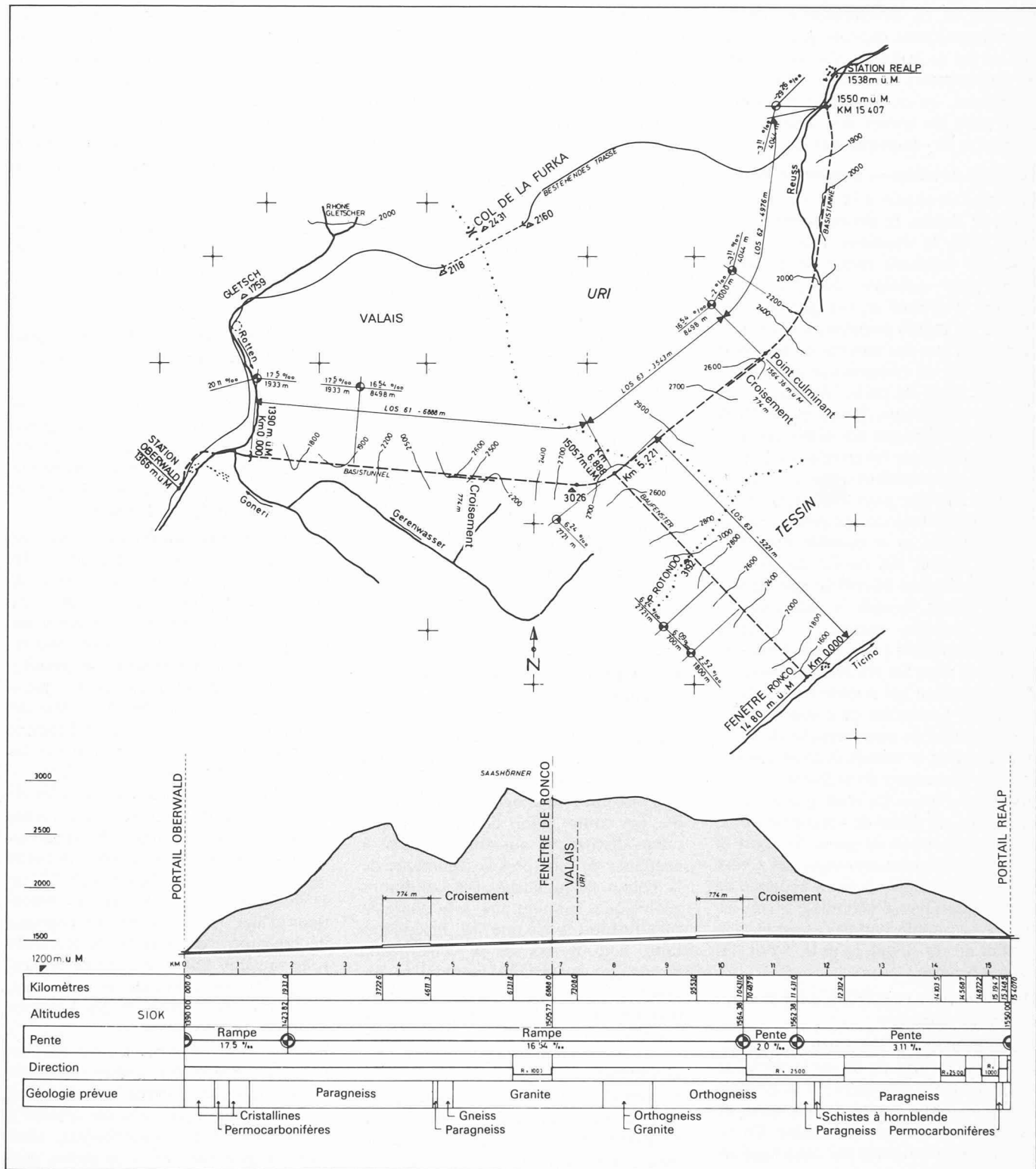


Fig. 2. — Situation et profil du tunnel de base.

aient été poussés l'un contre l'autre ou l'un sur l'autre. Ces poussées et relèvements ont très fortement sollicité les roches, qui furent exposées non seulement à des contraintes et tensions énormes, mais aussi à de hautes températures. Puis les roches du massif du Saint-Gothard furent exposées à de nouvelles sollicitations à différentes époques. Les influences des phases de métamorphisme ont ainsi été en grande partie remaniées. Alors que ces sollicitations ont conduit à de larges transformations des minéraux, la dernière phase alpine s'est surtout manifestée par des

schistosités, des mylonitisations, etc., et la formation de failles, de crevasses et de fissures dans la roche. La formation de failles est démontrée pour la période jusqu'à la fin du pléistocène, et certains mouvements ne se sont vraisemblablement pas encore stabilisés de nos jours. Bien que de telles zones sollicitées soient moins accentuées que dans le massif de l'Aar situé plus au Nord, elles ne sont quand même pas négligeables et ont une grande influence sur le comportement géotechnique de la roche. On connaissait dès le début la géologie générale de la région de la Furka, soit

les types de roches à la surface du terrain, et on a aussi pu prédire avec une précision remarquable la succession des couches en profondeur. Le comportement mécanique de la roche profonde était moins bien connu, surtout celui du granite de Rotondo dans les zones périphériques. Les propriétés d'un massif rocheux peuvent être totalement différentes des propriétés des roches qui le composent. Les joints entre les couches, les joints de schistosité et les différents systèmes de failles jouent un rôle particulier. Ces failles provoquent un réseau de fissuration plus ou moins dense selon

le degré de cassure. Le type et la formation de ce réseau constituent une donnée essentielle pour le comportement du massif. Un massif perméable peut parfaitement être constitué de roches imperméables.

Un second facteur important, outre ces propriétés du massif, est l'orientation de l'axe du tunnel par rapport à la direction de la structure et de la texture. L'axe du tunnel, entre-temps presque complètement excavé, est sur de longues distances pratiquement parallèle aux directions de schistosité et de fissuration très prononcées. De plus, une grande partie du tunnel est située sous la vallée du Witenwasser, après avoir passé sous les vallées de Tälli, de Sass et de Geren à l'Ouest. Dans ces zones, on a eu affaire à d'importantes venues d'eau, ce qui a largement contribué aux difficultés rencontrées durant la construction du tunnel.

5. Tracé de la ligne

Les analyses d'exploitation ayant montré que la solution idéale pour le chemin de fer de la Furka était la construction d'un tunnel de base à une altitude d'environ 1500 m entre Oberwald et Realp, il se posa la question du tracé de la ligne. La liaison en ligne droite mesure environ 14,5 km et n'offre aucune possibilité de fenêtre latérale; on n'aurait donc pu travailler qu'à partir de deux fronts, ou alors créer de nouveaux fronts d'attaque par l'intermédiaire de puits verticaux très coûteux. Mais avec un tracé rectiligne, on aurait avant tout dû percer l'ensemble du tunnel dans des couches verticales, parallèles à l'axe du tunnel. Selon les expériences faites par la suite, on doit reconnaître qu'un tel tracé n'aurait guère été réalisable. Les ingénieurs responsables à cette époque ont tiré les conclusions correctes des connaissances géologiques à disposition: ils ont incurvé la ligne vers le Sud-Est, d'une part afin de pouvoir attaquer les couches en biais — et non pas parallèlement —, et d'autre part pour rester aussi longtemps que possible dans le granite de Rotondo dont on attendait beaucoup à l'époque. De plus, la proximité de la vallée de Bedretto permettait de créer deux nouveaux fronts d'attaque grâce à une galerie-fenêtre d'environ 5,2 km. On pouvait d'ailleurs aussi envisager l'aménagement futur de la galerie de Bedretto comme tunnel ferroviaire, ce qui permettrait une liaison entre le Tessin et la Suisse romande ouverte toute l'année et indépendante de l'étranger — une réflexion sur le plan de la politique nationale suisse qui n'est pas non plus exprimable en francs.

C'est ce tracé qui fut retenu pour l'appel d'offres et qui a aussi été présenté le 1^{er} juin 1970 aux Chambres fédérales, qui devaient décider de la participation

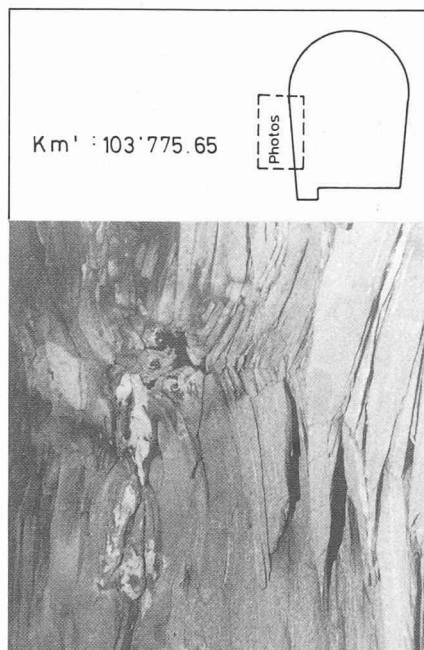


Fig. 3. — Lot d'Oberwald, km 3,775: flambage dans le stross d'une zone de schistes de homblende à fine schistosité.

Couverture: env. 1200 m. Les photos ont été prises cinq jours après excavation.

de la Confédération (95% du budget), 3% des coûts étant financés par le canton du Valais, 1% par le canton d'Uri et 1% par le canton des Grisons. Le coût total du tronçon Oberwald-Realp, y compris le matériel roulant supplémentaire, était initialement prévu à 74 millions de francs. Le projet fut ratifié par le Parlement durant la session d'automne 1970, non sans oppositions d'ailleurs. Par la suite, les cantons concernés ont également accepté leur part des crédits.

6. Organisation des travaux et construction

Par la suite, on fixa l'organisation des travaux et on prépara la planification des détails et la soumission. Le projet approuvé par les Chambres fédérales

connut de légères modifications aux portails de Realp et d'Oberwald: la fenêtre de Bedretto fut maintenue et la ligne du tunnel principal fut encore davantage incurvée vers le Sud. Le souhait d'écourter les tronçons de croisement fut respecté. On garda la conception première du tunnel de base et son tracé, la traversée du massif de Rotondo ainsi que la fenêtre de Bedretto.

En été 1972, on procéda à la reconnaissance des lieux et à la mise en soumission des travaux, et en automne 1972, à la discussion des dossiers de soumission. Les offres ont été recueillies le 15 décembre 1972: il y en eut 16 au total. Finalement, les travaux ont été répartis entre 3 consortiums pour les 3 lots d'Oberalp, de Realp et de Bedretto. Les travaux d'installation débutèrent en juin 1973, et l'excavation le 1.10.1973 à Oberwald, le 1.10.1973 à Realp et le



Fig. 4. — km 1,570: état le 23 février 1978, trois ans après l'excavation. On voit la gunité de sécurité nécessaire à l'avancement, les ancrages, le flambage et l'écaillage des paragneiss à fines couches. Couverture: env. 500 m.

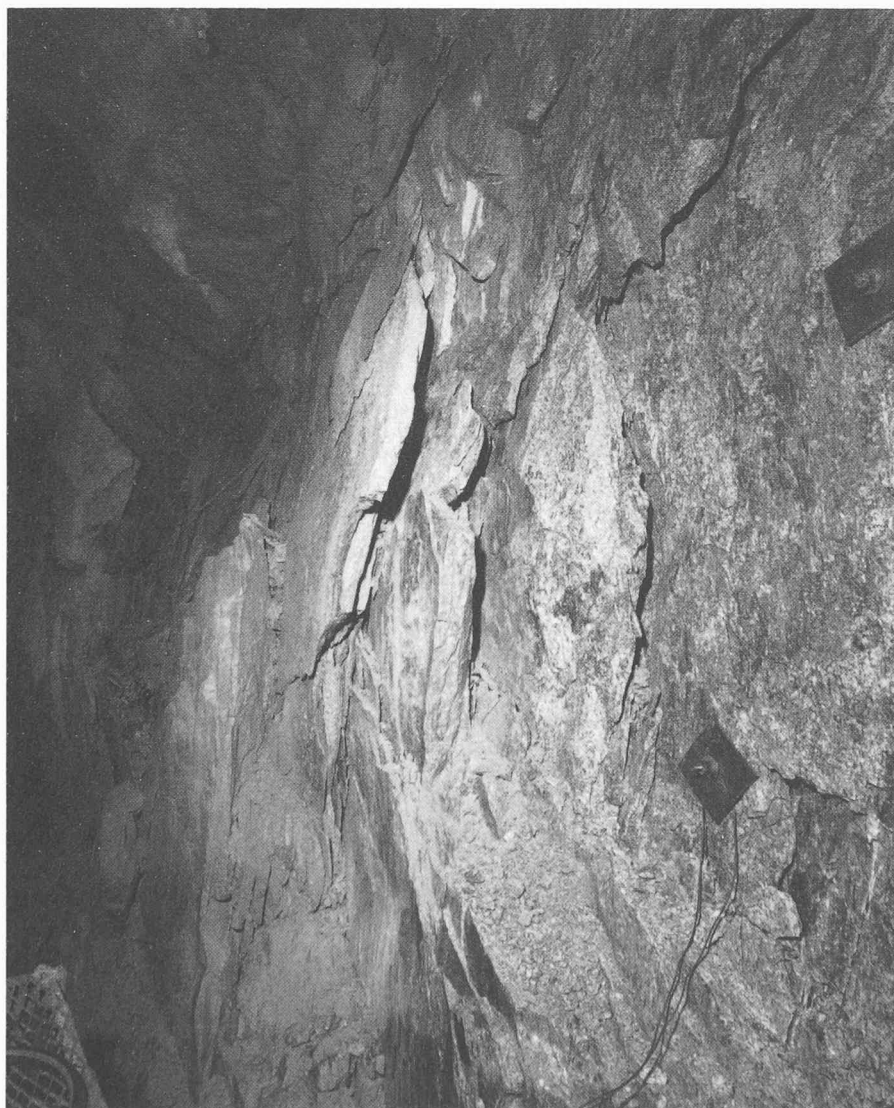


Fig. 5. — km 7,518: détachements de pierres typiques, pareils à des éboulements, dans le granite de Rotondo sous une couverture d'environ 1350 m.

1.9.1973 à Bedretto. Les dés étaient jetés, une entreprise fut entamée dont aucun des participants ne pouvait se douter comment elle allait finir.

Premières difficultés au lot Realp

Au début, tout se déroulait selon le programme: une géologie telle qu'on l'avait prévue, une vitesse d'avancement selon les calculs, si l'on tient compte des difficultés de mise en route, des coûts conformes aux prévisions. Mais l'harmonie ne devait pas durer longtemps. Tandis que les travaux avançaient bien à Oberwald et à la fenêtre de Bedretto, les premières difficultés survinrent à Realp déjà après 150 m: par une couverture pourtant relativement faible, il y eut un grand effondrement dans une zone fortement mylonitisée et conduisant de l'eau. Les venues d'eau transformèrent la masse de mylonite en sable et en boue. Cette zone extrêmement mauvaise et difficile devait s'étendre sur une longueur de 80 m et a pu être maîtrisée grâce à un avancement avec galerie de faite, excavation de la calotte par étapes, puis du noyau et aménagement des parois. Il n'en reste pas moins qu'on est venu à bout de ces difficultés, qui n'étaient guère supérieures à celles habituellement rencontrées lors de la construction d'un tunnel dans une zone critique des Alpes.

Contretemps dans le granite de Rotondo

Comme la fenêtre de Bedretto était située sur 80% de sa longueur, soit sur 4080 m, dans le granite de Rotondo et que sa faible section devait pouvoir mieux résister aux pressions du terrain, on s'y attendait à un rendement supérieur. Mais il y eut également des problèmes dans les 360 premiers mètres, c'est-à-dire dans la série de Tremola et dans la zone d'amphibolites. Une forte fissuration et des venues d'eau allant jusqu'à 138 l/sec rendaient l'avancement difficile. Le granite de Rotondo à traverser, plus récent que le granite du Saint-Gothard, renfermait des systèmes de fissures, des zones perturbées très développées, des veines de lamprophyre. Dans les zones moins fissurées, les venues d'eau furent plus faibles, mais, par contre, on assista à des chutes de pierres pareilles à des éboulements, et même à des éboulements proprement dits. Directement sous le Pizzo Rotondo, la couverture atteignait 1700 m, ce qui n'est pas négligeable.

Interruption de l'avancement

La galerie de Bedretto ne devait pourtant donner qu'un avant-goût; dans le tunnel principal, à plus grande section, les problèmes furent encore incomparablement plus importants lorsque, le 30 juin 1977, l'avancement du lot Realp atteignit le km 3,385 dans la zone des paragneiss avec une couverture de seu-

lement 400 m. Cette zone était qualifiée par les géologues comme du granite hydrothermiquement altéré et bloqua pratiquement l'avancement durant 6 mois. Bien que ce temps ait été utilisé pour exécuter des travaux d'isolation, de soutènement et d'aménagements, le programme a forcément connu des perturbations importantes. La fenêtre de Bedretto permit ainsi de gagner du temps par l'adaptation du programme: grâce à un avancement accéléré en direction de Realp, ce tronçon en retard a ainsi pu être excavé et aménagé à partir de la fenêtre de Bedretto, sans perturber le tronçon d'Oberwald.

En plus de ces importantes difficultés qui ont réduit l'avancement à 164 m pendant une année et causé une interruption de 6 mois, le soutènement a dû être très souvent modifié dans ces conditions géotechniques très changeantes avec de nombreuses zones perturbées, ce qui a ralenti la vitesse d'avancement. Pour les 4650 m de tunnel excavés jusqu'à ce jour (début 1981) dans le lot de Realp, pas moins de 23 soutènements en acier ont dû être mis en place sur une longueur totale de 811 m. A Oberwald, l'avancement était relativement rapide, mis à part quelques parties difficiles nécessitant des soutènements en acier. Par contre, il s'avéra que dans les zones de paragneiss et de granite de Rotondo en fines couches, les fortes pressions du terrain, dues à une hauteur de couverture jusqu'à 1500 m, provoquaient de grandes déformations dans les parois verticales qui restaient instables pendant des années. Les déformations résultantes se sont répercutées directement sur les soutènements en acier ainsi que sur le revêtement de gunite nécessaire à l'avancement. Il en résulta un feuilletage et un flambage des couches ainsi que le détachement de plaques de granite et de pans de gunite allant jusqu'à 1 m², et ceci durant des années.

Enormes venues d'eau

Aux difficultés causées par la roche vinrent s'ajouter les venues d'eau. Les quantités d'eau étaient beaucoup plus importantes que prévu, aussi bien dans le tunnel principal que dans la fenêtre de Bedretto. Cela peut être dû à l'importante fissuration, à la stratification verticale, à la forte couverture et au passage sous des glaciers qui favorisent la formation de grands réservoirs d'eau entrant fatalement en communication avec le tunnel. Les venues d'eau étant 3 à 4 fois supérieures à ce qui était attendu, il fallut renforcer l'isolation sur pratiquement toute la longueur et agrandir les tuyaux d'évacuation d'eau. La qualité de l'eau correspond à la composition chimique du massif: elle a un faible degré de dureté et attaque le béton à certains endroits. Ici, les mesures particulières sont restées modestes.



Fig. 6. — km 3,380: entrées d'eau, de boue et de roches dans la zone du granite de Rotondo (29 juin 1977). L'avancement en a été retardé de six mois.

Emission de radon

L'émission de grisou a été tenue pour possible, mais n'est pas survenue. En été 1977, on a par contre découvert du radon — un gaz rare radioactif — aussi bien dans le tunnel principal que dans la fenêtre de Bedretto. Si sa concentration avait été quelque peu supérieure, un renforcement de la ventilation pratiquement impossible à réaliser aurait été nécessaire. La concentration en radon se révéla heureusement inférieure à la limite tolérée, et des mesures coûteuses et durables ont pu être évitées.

Température

Dans un seul domaine, les conditions se sont avérées plus favorables que prévu: les températures maximales de la roche tournaient autour de 20°C dans le tunnel, alors qu'elles avaient atteint le double lors de la construction des tunnels voisins du Saint-Gothard et du Simplon. Cela peut également être dû à la

forte fissuration, aux couches verticales et aux importantes circulations d'eau, autant de facteurs favorisant un échange thermique entre les profondeurs et la surface. De plus, le tunnel de base a une direction Est-Ouest, et, malgré l'importante couverture par endroits, il suit l'axe des deux grandes vallées de Conches et d'Urseren où la Furka, comme l'Oberalp, ne constituent qu'un verrou relativement court: cela offre un meilleur refroidissement géothermique que les larges massifs compacts du Simplon ou du Saint-Gothard qu'il fallut traverser dans la direction Nord-Sud.

Malgré toutes les difficultés de ce chantier, qui semblent avoir été quelque peu supérieures à la moyenne, nous pouvons constater avec soulagement qu'aucun accident grave n'est à déplorer. Les quelques cas mortels avaient plutôt le caractère d'accidents de la circulation dans la galerie et ne sont pas la faute de tiers. Voilà qui parle en faveur



Fig. 7. — Effets de la poussée des terrains sur les soutènements en acier. Les déformations atteignirent par endroits 40 à 50 cm.

de l'entreprise, de la direction des travaux et du maître de l'ouvrage et montre qu'ils étaient conscients de leur devoir et de leur responsabilité et qu'ils ont pris leurs décisions sans tomber sous le coup des émotions parfois violentes qui ont accompagné ce chantier.

7. Explosion des coûts

Même si lors de la construction du tunnel de base de la Furka les problèmes techniques s'avèrent de beaucoup supérieurs aux prévisions, on a fini par les surmonter, au prix d'énormes efforts. Les difficultés financières, par contre, ont plus fait parler d'elles et étaient apparemment aussi plus délicates à maîtriser. La Furka devint pratiquement du jour au lendemain une affaire politique! Ceci n'est d'ailleurs pas étonnant si on rappelle quelques faits — *sine ira et studio* — illustrant les causes des coûts de l'entreprise. Il faut d'abord remarquer

que l'avancement fut beaucoup plus lent que prévu, du fait des problèmes déjà cités. Alors que les devis des entreprises étaient calculés sur la base d'une vitesse d'avancement moyenne de plus de 10 m par jour de travail, l'avancement journalier — variable selon les étapes — n'a jusqu'à maintenant jamais atteint la valeur escomptée. Ce retard a conduit à une prolongation considérable de la durée du chantier et entraîné le renchérissement correspondant.

En outre, le devis initial se basait sur des hypothèses estimant les différents degrés de difficultés et les types de profils s'y rapportant de façon trop optimiste, cependant toujours en accord avec diverses expertises et projets semblables. Alors que le devis prévoyait des types de soutènements légers sur la majeure partie de la longueur du tunnel, des soutènements lourds à très lourds se sont révélés nécessaires sur de longues distances durant l'exécution, tandis que les tronçons à revêtement simple se rédui-

saient à très peu de choses. Si l'on sait que le coût des profils lourds est de 12:1 par rapport aux profils légers, on comprend que cette seconde conséquence a aussi largement contribué au renchérissement.

En troisième lieu, une importante partie de la durée du chantier tomba dans une période où le taux du coût de la vie, l'augmentation des salaires et du coût des travaux étaient très élevés: ce dernier a atteint par moments un renchérissement annuel de presque 15%.

Ces trois facteurs — on n'en a nommé que les plus importants — ont conduit à ce que quelques mois avant la fin du percement, le coût total a été évalué à environ 300 millions de francs (tunnel de base, fenêtre de Bedretto, accès Realp et Oberwald, deux stations de chargement d'automobiles, travaux ferroviaires, superstructure, aménagements de sécurité, matériel roulant et de traction). Le crédit accepté en 1970, par contre, était de 74 millions, ce qui correspondait alors à des projets semblables, et avait eu la bénédiction d'expertises.

Comparaison avec d'autres tunnels alpins

Si l'on compare aujourd'hui les coûts du tunnel de base de la Furka avec ceux d'autres grands tunnels alpins construits à la même époque, on constate que toutes ces constructions ont finalement coûté au moins le double de ce qui avait été prévu par le devis. Ces comparaisons sont cependant trompeuses, car elles se réfèrent à des tunnels routiers du réseau des routes nationales suisses où la part des aménagements et des installations (ventilation, éclairage, revêtement) est beaucoup plus importante. Leurs prix sont donc beaucoup mieux prévisibles que ceux d'un tunnel ferroviaire, où les coûts du gros œuvre sont très incertains et représentent la part du lion dans la somme totale. Si on ne comparait que les coûts du gros œuvre (excavation, soutènements et isolation), les sommes supplémentaires se révéleraient sans doute du même ordre de grandeur, en pourcentage, pour les trois grands tunnels alpins des années 70. Une comparaison internationale montre en fait que la Furka n'est nullement un tunnel particulièrement cher.

Mais les dernières incertitudes concernant le massif n'ont été écartées qu'une fois le percement fini. Lorsque les derniers mètres de ce tunnel difficile et riche en péripéties furent franchis, les maîtres de l'ouvrage, la direction des travaux, les entrepreneurs, les travailleurs et les politiciens concernés ont pu se réjouir ensemble d'un bon travail, propre et sincère.

Le percement du tunnel vient d'être achevé, au début du printemps 1981, et la mise en service est attendue pour l'été 1982.

8. Tronçons d'accès et installations annexes

Les tronçons d'accès sont modestes, comparés au tunnel de base d'une longueur de 15,4 km: à Realp, à peine 580 m séparent la gare du portail du tunnel et à Oberwald ce sont 1700 m.

A Realp, les installations se composent de la station de chargement d'automobiles et d'un pont enjambant la Furka-reuss (à double voie, avec une portée de 24 m). Les dépôts de matériel excavé prennent beaucoup de place (env. 270 000 m³) et une petite partie seulement a pu être utilisée pour la construction du remblai, vu la faible longueur du tronçon d'accès.

L'accès à Oberwald est devenu plus important, suite à une plainte de la commune d'Oberwald qui obligea à contourner le village. Le tracé de la ligne soumis à l'approbation prévoyait une digue allongée et le passage entre les deux parties du village Oberwald et Unterwassern. Ce tracé s'est heurté à la résistance de la protection des sites et de la nature, et a conduit à la plainte citée et finalement à la modification du projet en un tunnel de contournement du village par le Nord.

Ce tunnel de contournement et sa rampe d'accès à l'Ouest sont en majeure partie situés dans une zone d'éboulis, de moraines et de roches similaires, avec une couverture maximale de 35 m; le devis prévoyait un coût de 10 millions de francs qui ne furent pas dépassés à son achèvement au printemps 1980.

A part le tunnel de contournement, le tronçon d'accès d'Oberwald comprend la station de chargement d'automobiles, une entrée et une sortie pour la route de la Furka qu'il a fallu déplacer, les nouvelles installations de voies ferrées avec un passage souterrain pour piétons sous 4 voies, une digue construite avec le matériau excavé (jusqu'à 13 m de hauteur) reliant le pont du Rhône au portail du tunnel principal, et enfin un pont à voie unique sur le Rhône (59 m) et le pont de Göneri (60 m).

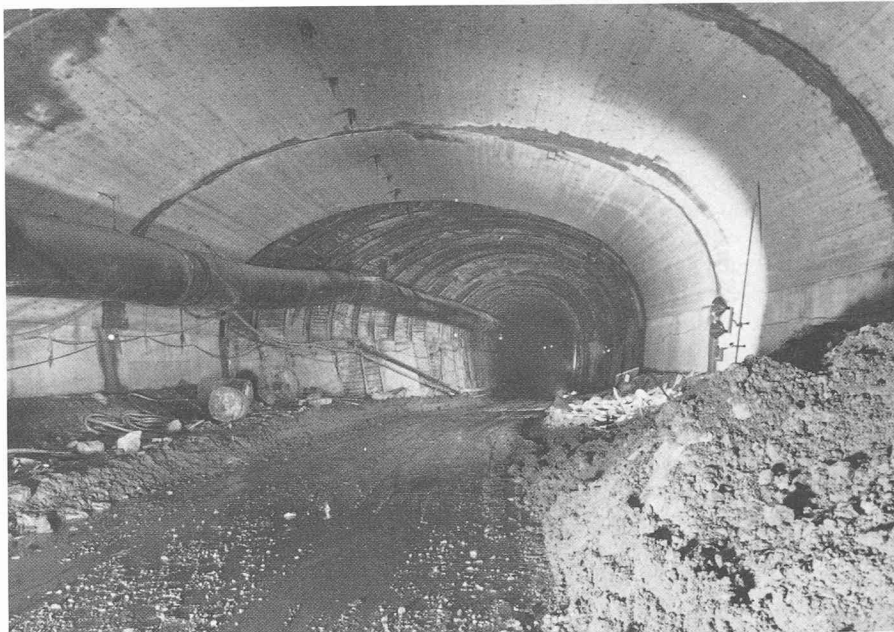


Fig. 8. — Tunnel de contournement d'Oberwald. Transition entre la voie unique et la voie double (60 m²), réalisé par un avancement en calotte.

Maître de l'ouvrage: Chemin de fer Furka-Oberalp SA, Brigue.

Actionnaires: Confédération Helvétique: 95%; Canton du Valais: 3%; Canton d'Uri: 1%; Canton des Grisons: 1%.

Supervision: Office fédéral des transports.

Expert chargé du Conseil d'administration: Ing. Rudolf Amberg, Sargans.

Avant-projet et devis: Albert Coudray, ing. dipl.

Projet: Association d'ingénieurs Coudray et Hünerwadel + Häberli SA, ainsi que Hünerwadel + Häberli SA et mandataires.

Direction des travaux: Job Hünerwadel, Sion

Direction locale des travaux: Lot Oberwald: Hünerwadel + Häberli, Sion; Lot Realp: Bureau d'ingénieurs, Bysaeth,

Brunnen; Lot Bedretto: Bureau d'ingénieurs Mueller + Ceresa, Airolo.

Entreprises:

Lot Oberwald, tunnel de base: Consortium C.S.C., Costruzioni Stradali e Civili SA, Lugano; Evéquo + Cie, Pont-de-la-Morge; Gebr. Arnold AG, Bürglen, et Gebr. Bonetti AG, Andermatt.

Tunnel de contournement: Consortium Losinger SA, Sion; U. Imboden, Viège; Bürgi + Anthamatten SA, Brigue; A. Weber, Münster et W. Anderegg, Biel/VS.

Lot Realp: Consortium H. R. Schmalz, Berne; Kopp Bauunternehmung AG, Lucerne et Socosa SA, Lausanne.

Lot Bedretto: Consortium C.S.C. Costruzioni Stradali e Civili SA, Lugano; Evéquo + Cie, Pont-de-la-Morge; Gebr. Arnold AG, Bürglen, et Gebr. Bonetti AG, Andermatt.

Adresse des auteurs:

Job Hünerwadel, ing. dipl. EPF
Walter Häberli, ing. dipl. EPF
Walter Huber, dr. ès sc.

Hünerwadel + Häberli
Rue du Scex 4
1950 Sion

Bibliographie

Elimination de déchets spéciaux, industriels ou dangereux

Un vol. A5, 258 pages, publié par l'Office fédéral de la protection de l'environnement, 3003 Berne, 1980.

D'importantes quantités de déchets sont produites en Suisse: dans le manuel intitulé «Exploitations de récupération et d'élimination des déchets» qu'il vient de publier, l'Office fédéral de la protection de l'environnement (OFPE) en distingue 80 sortes différentes. Cette variété de dé-

chets va du simple papier inoffensif (env. 900 000 t annuellement) en passant par les huiles usées problématiques (env. 60 000 t) jusqu'au dangereux sel de trempe, dont quelque 500 t sont produites annuellement. Pour faciliter l'élimination de ces déchets ne pouvant être traités dans l'entreprise ni être évacués simplement avec des déchets urbains, l'OFPE a établi un recueil complet de données sur les possibilités de récupération et d'élimination en Suisse.

Un chapitre a été consacré aux déchets dans le projet de loi sur la protection de l'environnement actuellement en consultation auprès des Chambres fédérales. Il accorde aux «déchets dangereux» une grande importance. Leur récupération et leur élimi-

nation convenable ainsi que le contrôle qui y est lié doivent être pris très au sérieux dans le cadre des efforts de protection de l'environnement.

En Suisse, beaucoup d'installations et de services ont été créés ces dernières années aux fins d'éliminer les déchets industriels et artisanaux ne pouvant être traités dans l'entreprise même. Le présent manuel a pour but de fournir une vue d'ensemble des services extrêmement variés qui sont disponibles et de combler ainsi une lacune en matière d'information. Il est avant tout destiné aux entreprises industrielles et artisanales qui produisent des déchets, dont la récupération et l'élimination nécessitent l'intervention d'installations et de services extérieurs.

Selon l'Office fédéral de la protection de l'environnement, cet ouvrage de référence — en allemand, français et italien — sera mis à jour en principe tous les deux ans, raison pour laquelle les principales données sont enregistrées sur ordinateur. Toute sa conception se base sur les besoins pratiques, c'est-à-dire qu'il rendra service essentiellement aux entreprises qui produisent des déchets, mais également aux autorités qui trouveront rapidement les adresses d'exploitations appropriées de récupération et d'élimination. Ce manuel peut être obtenu soit auprès de l'Office central fédéral des imprimés, 3003 Berne, sous le numéro de commande 319 700 ou directement en librairie, au prix de Fr. 19.—.