



HAL
open science

Plans, études géologiques et forages pour les tunnels des Alpes occidentales : Fréjus, Gothard, Simplon, Mont-Blanc (1787–1965)

Giorgio Vittorio Dal Piaz

► To cite this version:

Giorgio Vittorio Dal Piaz. Plans, études géologiques et forages pour les tunnels des Alpes occidentales : Fréjus, Gothard, Simplon, Mont-Blanc (1787–1965). Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie, 2022, 3ème série (tome 36), pp.97-116. hal-04646223

HAL Id: hal-04646223

<https://hal.science/hal-04646223>

Submitted on 12 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Plans, études géologiques et forages pour les tunnels des Alpes occidentales : Fréjus, Gothard, Simplon, Mont-Blanc (1787–1965)

Giorgio Vittorio DAL PIAZ

Società Geologica Italiana, Sezione di Storia delle Geoscienze

Résumé. Depuis l'époque romaine, les populations vivant de part et d'autre des Alpes ont cherché différents "passages nord-ouest", d'abord en enjambant les montagnes, puis en passant sous elles. La première idée d'un tunnel sous le Mont Blanc a été envisagée par de Saussure en 1787. Au XIX^e siècle, un réseau ferroviaire en pleine expansion a joué un rôle fondamental dans la révolution industrielle et la modernisation, mais a été entravé dans les pays du Sud par la barrière des Alpes, de sorte que les chemins de fer transalpins modernes sont devenus essentiels pour le royaume de Piémont-Sardaigne. Cette contribution est un résumé de l'article de Giorgio V. Dal Piaz et Alessio Argentieri (2021), une revue historique des premières suggestions, des projets, des études de terrain, des tentatives ratées et des travaux de forage réussis à travers les Alpes, depuis les tunnels ferroviaires du Fréjus (1871), du Saint-Gothard (1882) et du Simplon (1906) jusqu'aux tunnels autoroutiers du Grand-Saint-Bernard (1964) et du Mont-Blanc (1965), replacés dans le cadre des progrès de la géologie et de la cartographie régionales. Le Fréjus a été le premier tunnel ferroviaire au monde, le plus long et le plus innovant : le percement a commencé en 1857 et s'est achevé en décembre 1870, grâce à une nouvelle machine perforatrice à air comprimé ; son inauguration a eu lieu en septembre 1871. Alors que le forage du Fréjus était encore en cours, John Fell construisit un chemin de fer de montagne entre le Piémont et la Savoie, par le mont Cenis, en suivant la route napoléonienne, qui fut fermé lors de l'ouverture du tunnel ferroviaire du Fréjus. Les progrès géologiques et la cartographie des Alpes occidentales au milieu du XIX^e siècle ont fourni des informations et des outils fiables pour mieux planifier les grands travaux d'ingénierie, mais la conception des tunnels n'était pas toujours basée sur une étude géologique : les principales exceptions étaient représentées par Giordano (Saint-Gothard, 1881) et Baretto (Mont-Blanc, 1880). Le premier tunnel a été percé, le second n'a pas été réalisé, car d'autres projets de traversée des Alpes ont été préférés : Colle di Tenda (1898) puis Simplon (1906). Après de nouveaux espoirs, le projet de tunnels sous le Mont Blanc (Franchi et al., 1908) et d'autres déceptions, des démarches décisives pour réaliser la liaison souterraine entre Courmayeur et Chamonix ont été entreprises par Dino Lora Totino, sur la base d'un projet de Vittorio Zignoli (1965). Entre-temps, une étude géologique des minéraux radioactifs a été promue par le CNRN sur le versant italien du Mont Blanc et le meilleur résultat de l'étude sur le terrain a été la découverte de zones de cisaillement mylonitiques-cataclastiques traversant le tracé du tunnel. La recherche s'est poursuivie pendant le percement de la partie italienne du tunnel autoroutier du Mont-Blanc, de 1959 à 1962 : des données géologiques, structurelles et d'application systématiques ont été acquises par Mezzacasa pendant l'excavation et étudiées par Baggio, Elter et Malaroda, tandis que le côté français a été relevé par Gudefin et étudié par Vittel et d'autres après la fin de l'excavation.

Mots clés : histoire des tunnels des Alpes occidentales – Mont Blanc – Fréjus – Gothard – Simplon – géologie régionale

Abstract. Since Roman age, people living on both sides of the Alps had been seeking different 'north-west passages', first overriding the mountains and then moving under them. The first idea of a tunnel under the Mont Blanc was envisaged by de Saussure in 1787. In the 19th century a growing railway network played a fundamental role for the Industrial Revolution and modernisation, but was hampered for the southern countries by the barrier of the Alps, so that modern transalpine railways became essential for the Kingdom of Piedmont-Sardinia. This contribution is an extended summary of the paper by Giorgio V. Dal Piaz and Alessio Argentieri (2021), an historical review of first suggestions, projects, field survey, failed attempts and successful drilling works across the Alps, from the Frejus (1871), St Gotthard (1882) and Simplon (1906) railway tunnels to the Grand St Bernard (1964) and Mont Blanc (1965) highway tunnels, relived within the advances of regional geology and mapping. Fréjus was the first, longest and innovating railway tunnel in the world: drilling began in 1857 and ended in December 1870, thanks to a new drilling machine powered by compressed air; its inauguration took place on September 1871. When the Fréjus drilling was still in progress, John Fell built a mountain railway between Piedmont and Savoy, through the Mont Cenis, following the Napoleonic Road, and it was closed down when the Fréjus railway tunnel was opened. The geological advances and mapping in the Western Alps by the mid-19th century provided information and reliable tools for better planning of great engineering works, but tunnel designs were not always based on a geological survey: the main exceptions were represented by Giordano (St Gotthard, 1881) and Baretto (Mont Blanc, 1880). The former tunnel was drilled, the latter was not accomplished, as other projects were instead pre-

ferred across the Western Alps, Colle di Tenda (1898) and then Simplon (1906). After new hopes, project tunnels under the Mont Blanc (Franchi *et al.*, 1908) and further disappointments, decisive moves to achieve the underground connection between Courmayeur and Chamonix were made by Dino Lora Totino, based on a project by Vittorio Zignoli (1965). Meanwhile, a geological survey for radioactive minerals was promoted by CNRN on the Italian side of the Mont Blanc and the best result from the field survey was the discovery of mylonitic-cataclastic shear zones crossing the tunnel route. The research continued during the drilling inside the Italian part of the Mont Blanc motorway tunnel, from 1959 to 1962: systematic geological, structural and application data were acquired by Mezzacasa during excavation and studied by Baggio, Elter and Malaroda, whereas the French side was surveyed by Gudefin and studied by Vittel and others after the end of excavation.

Key words: History of W-Alpine Tunnels - Mont Blanc – Frejus – Gotthard – Simplon – regional geology.

Introduction

Mon ami Gaston Godard m'avait aimablement invité à présenter à la réunion de Cofrhigéo du 8 juin le mémoire "*150 years of plans, Geological survey and drilling for the Fréjus to Mont Blanc tunnels across the Alpine chain : an historical review*", publié en Italie avec Alessio Argentieri (Dal Piazz et Argentieri, 2021). Le coronavirus Covid-19 et surtout l'âge trop avancé m'ont empêché de saisir cette occasion pour revenir une dernière fois à Paris, mais la grande courtoisie de Gaston a résolu le problème en offrant lui-même de présenter notre mémoire à la réunion. La présentation que je lui avais envoyée contenait une cinquantaine de diapositives avec de brefs commentaires en français qui – m'a-t-on dit – Gaston a brillamment présenté et je lui en suis très reconnaissant.

Dans cette note, je voudrais résumer les projets, les tentatives et le forage des tunnels à travers la barrière des Alpes occidentales de 1787 à 1965, dans le contexte de l'évolution des connaissances géologiques, une histoire fascinante d'espairs, de déceptions et de victoires.

Soulevées dans les dernières étapes de l'orogénèse alpine, les Alpes ont longtemps constitué une barrière presque infranchissable pour l'homme, sauf pour certains chasseurs et commerçants. Un exemple populaire était Oetzi, le chasseur vivant en 3350 avant J.C., récemment émergé des glaces du val Senales dans les Alpes orientales. Au Moyen Âge, les Alpes étaient très redoutées, un pays de dragons et de monstres, dont l'existence avait été attestée par un médecin et naturaliste de la trempe de Johann J. Scheuchzer. L'approche des Alpes s'améliore nettement avec le siècle des Lumières, grâce notamment au naturaliste genevois Horace Bénédict de Saussure (1740-1799) : dans la seconde

moitié du XVIII^e siècle, la conquête du mont Blanc et les quatre volumes de ses *Voyages dans les Alpes* popularisent les Alpes, la recherche scientifique en altitude, l'alpinisme et le tourisme de montagne, avec un succès retentissant qui a fait la fortune de Chamonix et des autres vallées alpines.

L'idée de forer le granite du Mont-Blanc et de relier la Savoie et la vallée d'Aoste par un tunnel routier de Chamonix à Courmayeur semble être venue en premier à Horace B. de Saussure, au sommet du mont Blanc en 1787. Voici sa phrase prophétique devant le panorama grandiose : "*Je vois deux vallées où l'on parle la même langue, les peuples sont les mêmes. Un jour viendra où l'on creusera sous le Mont-Blanc une voie charretière, et ces deux vallées, la vallée de Chamonix et la vallée d'Aoste, seront réunies.*"

Cela pouvait sembler utopique, mais ce n'était pas le cas car, comme nous le verrons, un vrai tunnel sous le Mont-Blanc sera projeté un siècle plus tard par Baretta (1881), puis par Franchi, Kilian et Jacob (1908) et finalement construit en 1959–1965 comme tunnel routier.

Ensuite, il y aura les très longs tunnels ferroviaires et autoroutiers, rapidement percés avec les grandes machines rotatives (Tunnelier TMB), mais c'est une autre histoire.

De Hannibal à Napoléon

Tite Live raconte (*Ab urbe condita*, XXI, 35-37) qu'Hannibal, pour surprendre les Romains, quitta l'Espagne à la tête de 30.000 hommes et 37 éléphants, traversa les Alpes et les vainquit en quatre batailles : proche de Tessin (218 av. J.C.), Trebbia (218 av. J.C.), puis en Italie centrale, sur le lac Trasimène (217 av. J.C.) et enfin à Canne (217 av. J.C.). On ne sait pas vraiment où Hanni-

bal et son armée ont franchi la barrière des Alpes, mais des études récentes (MAHANEY *et al.*, 2018) suggèrent le col de Traversette (2950 m), dans les Alpes Cottiennes et près du Monviso, qui cependant semblerait trop haut pour une telle aventure. En tout cas, ce fut une traversée extrêmement difficile comme le rappelle Tite Live : « *Procedere inde incepit agmen, sed ceterum, inter per Alpes difficileus fuit. Omnis enim viapraeceptis, angusta, lubrica erat adeo ut milites prae nive geluque prolaberentur alii que super alios occiderent* », un chemin si imprévisible qu'il empêchera les Romains de le prévoir et de faire face à l'invasion.

Deux millénaires après l'exploit d'Hannibal, Napoléon Bonaparte et son armée traversent également les Alpes occidentales et ce ne fut pas une promenade facile. Il franchit en mai 1800 le col du Grand-Saint-Bernard (2473 m), entre le

Valais et la vallée d'Aoste, à dos de mulet comme l'a représenté Paul Delaroche (Fig. 1A), et non avec le beau coursier peint par Jacques-Louis David (Fig. 1B). La hauteur, le froid et les grandes difficultés à franchir le col du Grand-Saint-Bernard, encore recouvert de neige, avaient conduit Napoléon à préférer le col du mont Cenis (*Moncenisio* ou *Cenisio* en italien, 2083 m) pour des missions militaires ultérieures en Italie, après avoir facilité son transit par la construction d'une route nouvelle (en 1803-1805) qui, avec des virages et des pentes convenables, pouvait favoriser un passage facile et rapide de la cavalerie et de l'artillerie lourde. Le col du mont Cenis, traversé depuis des temps immémoriaux, était devenu populaire aussi grâce à de célèbres voyageurs comme Montaigne, Alfieri et Chateaubriand qui le traversa en 1803, quand commencèrent les travaux de la route napoléonienne.



Fig. 1. Paul Delaroche: Napoléon Bonaparte franchit le col du Grand-Saint-Bernard à dos de mulet dans un blizzard (A), alors que Jacques-Louis David préfère le peindre chevauchant un beau coursier (B).

La piste charretière du mont Cenis et le tunnel du Fréjus

Au cours de la première moitié du XIX^e siècle, voyages et transports ont été transformés grâce au développement ferroviaire, qui a joué un rôle fondamental dans la propagation de la révolution industrielle. Le premier chemin de fer était anglais, long de 42 km, et a été construit pour transporter le

charbon de la mine Darlington au port de Stockton-on-Tees : inauguré en 1825, il utilisait « le premier », la machine à vapeur construite par George Stephenson. La première ligne de passagers, reliant sur 48 km Liverpool à Manchester (1830), a été un succès et a favorisé le développement rapide des chemins de fer italiens. Avant l'unité de l'Italie, le royaume des Deux-Siciles avait construit un chemin de fer de Naples à Portici (7,64 km), inauguré le 3 octobre 1839 par Ferdinand II de

Bourbon, et suivi de Milan-Monza (1840), Padoue-Mestre (1842), Pise-Livourne (1844) et beaucoup d'autres, jusqu'aux 267 km de la *Lombardisch-Venetianische Staatsbahn* (Milan-Venise), achevée en 1857. Au milieu du XIX^e siècle, le voyage de Paris à Turin exigeait un minimum de trente-cinq heures, avec certaines parties du trajet en train, certaines en bateau, et encore d'autres en calèche (CIALDINI, 2011). Pour passer le col du mont Cenis, le train n'arrivait que jusqu'à Saint-Jean-de-Maurienne ; les passagers continuaient alors en diligence (Fig. 2) qui, si tout se passait bien, atteignait la ville de Suse en six heures, et de là les voyageurs prenaient le chemin de fer pour Turin.



Fig. 2. La diligence franchit le Col du Mont Cenis en 1861, gravure de Edward Whymper (1900).

Pour la modernisation du royaume de Piémont-Sardaigne puis de l'Italie, il était donc essentiel de relier son réseau ferroviaire à celui de l'Europe centrale, en surmontant l'isolement et la barrière des Alpes : un tunnel ferroviaire s'imposait et parmi les diverses propositions discutées, le choix s'est porté sur le Fréjus, à une vingtaine de kilomètres au sud du mont Cenis, entre Bardonnèche (Piémont) et Modane (Savoie), sur le tracé de la ligne Turin-Chambéry-Lyon-Paris.

Le tunnel du Fréjus a été le premier tunnel ferroviaire de haute montagne au monde, long de 12.233 m (Fig. 3), sans puits intermédiaires : début des travaux en 1857, fin de forage en 1870 et inauguration en 1871, soit douze ans de moins que

les prévisions initiales, grâce à l'efficacité d'un nouveau type de forage pneumatique (MORI *et al.*, 2021). Le tunnel fut immédiatement utilisé par la *Royal Indian Mail* pour accélérer et réduire à environ 25 jours le trajet Londres-Bombay à travers le canal de Suez, ouvert en 1869 (LESCA, 1998 ; ARGENTIERI *et al.*, 2023).

L'idée de percer les Alpes au niveau du Fréjus avait été initialement proposée par Jacques-François Médail en 1839-1841 ; puis un premier projet avait été élaboré par l'ingénieur belge Henri Maus et le géologue piémontais Angelo Simonda (MAUS, 1850 ; DAL PIAZ et URBANI, 2021) : il avait été approuvé par le gouvernement, mais fut ajourné en raison des émeutes insurrectionnelles de 1848.

Après l'abdication du roi de Piémont-Sardaigne Charles-Albert en 1849, le projet fut repris par Cavour et Victor-Emmanuel II, et réalisé avec des techniques innovantes par Germain Sommeiller, Sebastiano Grandis et Severino Grattoni, tous trois ingénieurs diplômés de l'université de Turin (COVINO, 1871 ; CIALDINI, 2011 ; DAL PIAZ et ARGENTIERI, 2021 ; MORI *et al.*, 2021). Les roches du tunnel furent décrites par MORTILLET (1858, 1872), LACHAT (1863), GIORDANO (1871) et ÉLIE DE BEAUMONT (1871a, b).

Lorsque le forage de Fréjus était encore en cours, l'anglais John Fell construisit un chemin de fer à voie étroite et sections à crémaillère (système Fell), long de 78 km, entre Suse (Piémont) et Saint-Michel-de-Maurienne, près de Modane (Savoie), passant par le col du mont Cenis et suivant la route napoléonienne (Fig. 4). Le convoi se composait d'une locomotive à vapeur, de trois voitures de passagers (pour un total de 36 places) et de trois wagons de bagages et marchandises. Le trajet durait cinq heures, à une vitesse moyenne de 15 km/h. Au cours de ses quatre années de service (1868-1871), il réussit à transporter environ 100 000 passagers, mais il fut contraint de fermer à l'ouverture du tunnel ferroviaire du Fréjus, puis démantelé et transféré en Amérique du Sud.

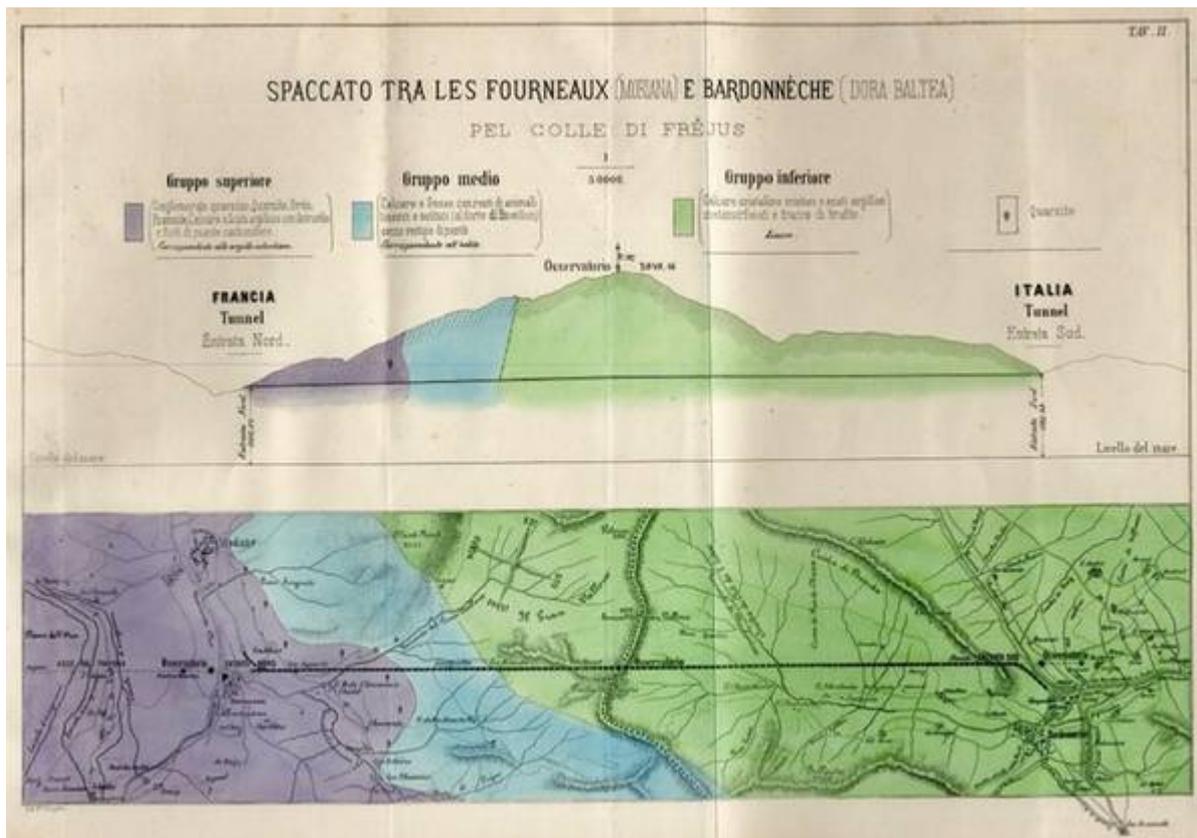


Fig. 3. Plan et coupe géologique à travers le col du Fréjus, avec le tracé du tunnel entre les Fourneaux et Bardonnèche (SISMONDA, 1867). Attention à l'erreur : la rivière Dora n'est pas la Baltea (Val d'Aoste) mais la Riparia (Vallée de Susa).



Fig. 4. La route napoléonienne du mont Cenis en 1861 et le chemin de fer construit par Fell (1868-71) en arrière-plan, active jusqu'à l'ouverture du tunnel (Whympfer, 1900).

Le tunnel ferroviaire du Saint-Gothard

En 1869, la Suisse et l'Allemagne signèrent un accord (Convention de Berne) pour réaliser le tunnel du Saint-Gothard, ou *Gottardo*. L'étude géologique en fut exécutée à l'été 1871 par Felice Giordano, inspecteur du Corps royal des mines, avec la collaboration de deux jeunes ingénieurs et l'assistance du professeur Bartolomeo Gastaldi pour l'analyse pétrographique des échantillons. Son rapport a été remis en 1872, puis publié en 1873, avec le titre (traduit) *Exa-*

men géologique de la Chaîne alpine de Saint-Gothard qui doit être traversée par le grand tunnel du chemin de fer italo-suisse (GIORDANO, 1873). Le rapport décrit en détail les roches prévues le long du tunnel (nature, âge, gisement, épaisseur, dureté, résistance des matériaux au forage, stabilité, infiltration d'eau, température) et contient, en annexes, une carte géologique à 1/50 000 (levée à environ 1/15 000), les sections et le plan de deux tracés de Goeschenen jusqu'à Airolo, de 15,07 et 15,75 km de long (Fig. 5).

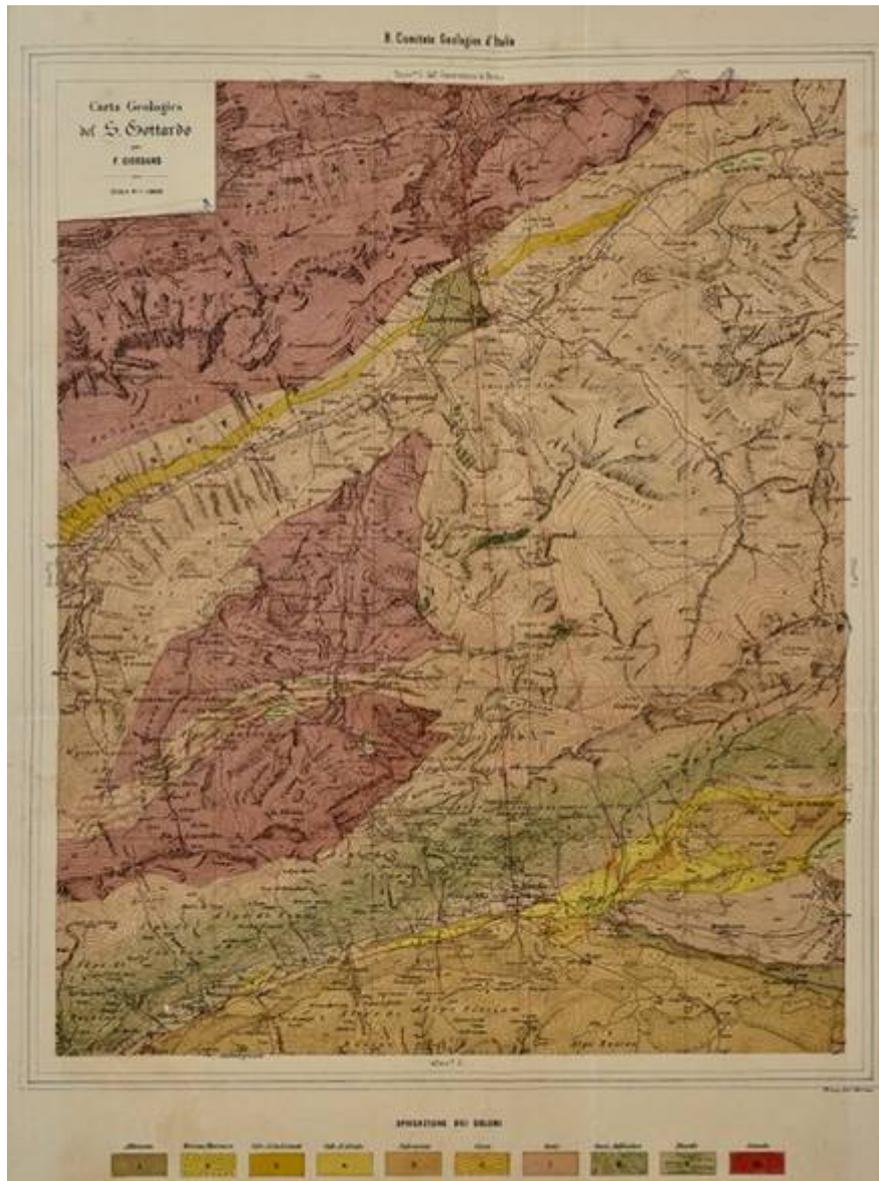


Fig. 5A. Felice GIORDANO (1873), *Projet géologique et technique du tunnel ferroviaire du Gothard sur la ligne Milan-Zurich* : carte géologique au 50 000^e et légende.

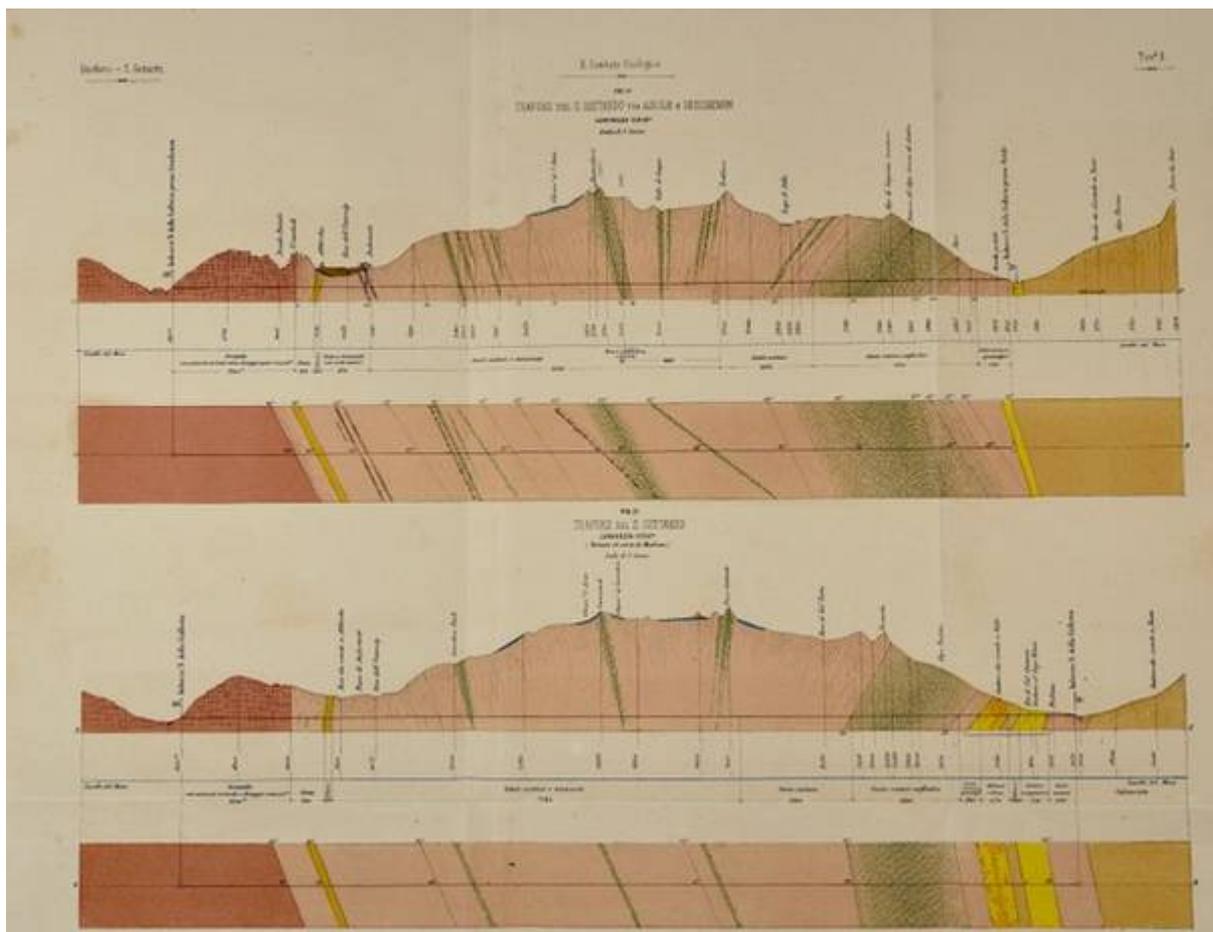


Fig. 5B. Felice GIORDANO (1873), *Projet géologique et technique du tunnel ferroviaire du Gothard sur la ligne Milan-Zurich* : section et plan de deux tracés de Goeschenen jusqu'à Airolo ou Madrano au 50 000^e, Mêmes légendes que pour 5A.

En 1872, le contrat fut attribué à l'entreprise du Grand Tunnel du Gothard de l'ingénieur genevois Louis Favre, avec une offre d'achèvement des travaux en huit ans pour un coût total de 47,8 millions de liras : un an et 12 millions de liras de moins que l'offre de la Société italienne de l'ingénieur Grattoni qui, soutenu par Quintino Sella, avait proposé de réemployer le personnel qualifié et les machines déjà utilisées pour le Fréjus.

Les travaux commencèrent le 7 août 1872 et s'achevèrent le 24 février 1880, lorsque la dernière paroi rocheuse fut percée. Le tunnel fut inauguré le 23 mai 1882, reliant ainsi les cantons du Tessin et d'Uri et ouvrant la ligne ferroviaire directe entre Milan et Zurich, le principal axe transalpin entre le nord et le sud de l'Europe. Le succès fut immédiat.

Les observations faites pendant le creusement du tunnel ont été réalisées en 1873 par C.

Robe et, lors des quatre années suivantes, par l'ingénieur-géologue Friedrich Moritz Stapff (1874-1877), responsable de l'échantillonnage et des rapports mensuels au Conseil fédéral suisse. Ce travail a été inclus dans la monographie de Stapff (1880) : *Profil géologique du St-Gothard dans l'axe du Grand Tunnel établi pendant la construction (1873-1880)*, notice explicative d'une coupe géologique à 1/25 000 qui confirme substantiellement les prévisions de Giordano, enrichies de détails sur la lithologie et la fracturation.

Le tunnel ferroviaire du Simplon

Alors que les tunnels ferroviaires du Saint-Gothard (1882) et du Col de Tende (1900) étaient déjà en service, les espoirs que les habitants de la vallée d'Aoste mettaient dans celui du Mont-Blanc étaient une fois de plus déçus. En effet, la concurrence entre le tunnel du Mont-Blanc, pro-

mis par Napoléon III aux Savoyards, et le tunnel du Simplon, entre le val d'Ossola (Piémont) et le canton du Valais, bénéficia à ce dernier grâce au puissant soutien d'intérêts milanais, suisses et allemands (CIALDINI, 2011).

La géologie du massif du Simplon, cœur de la chaîne alpine, avait fait l'objet de nombreuses recherches détaillées et d'interprétations contradictoires (voir RUSENBERG, 2020, pour une reconstruction historique exhaustive et une bibliographie complète).

L'étude géologique du tunnel avait été achevée en 1887 par trois éminents scientifiques : Renevier de Lausanne, Lory de Grenoble et Heim de Zurich. Le tunnel, conçu par l'ingénieur suisse Julius Dumur, passait sous le M. Leone (3552 m) et s'étendait, sur 19 803 m de long, d'Iselle (près de Varzo, 668 m) à Brig (633 m), avec un point culminant à 705 m. Les travaux, menés par l'ingénieur prussien Carlo Brandau, commencèrent en août 1898 avec le creusement d'un tunnel principal et d'une galerie de service secondaire, et prirent fin le 24 février 1905. La cérémonie d'inauguration eut lieu le 19 mai 1906, en présence de Victor-Emmanuel III, roi d'Italie,

et de Ludwig Forrer, président de la Confédération helvétique, tandis que. Les services ferroviaires réguliers débutèrent le 1^{er} juin 1906.

Des recherches détaillées effectuées avant, pendant et juste après le forage (Fig. 6), par RE-NEVIER (1899), LUGEON (1902), SCHARDT (1903a, 1903b, 1906, 1909), HEIM (1904) et STELLA (1906) et la section géologique révélée le long du tunnel ont clairement démontré la validité de la nouvelle théorie des nappes de charriage, développée merveilleusement par LUGEON et ARGAND (1905) puis par ARGAND (1909, 1911), y compris dans les unités du socle et des couvertures métamorphiques des Alpes Pennines et Lépointines (détails *in* MILNES, 1973 ; MASSON, 1983 ; DAL PIAZ et DAL PIAZ, 1984 ; ROSENBERG, 2020).

Pendant 75 ans, le Simplon a été le plus long tunnel ferroviaire du monde, mentionné aussi en raison des divers obstacles rencontrés lors de son percement, notamment des inondations soudaines, des températures de la roche supérieures à 50°C ainsi que la perte de nombreuses vies.

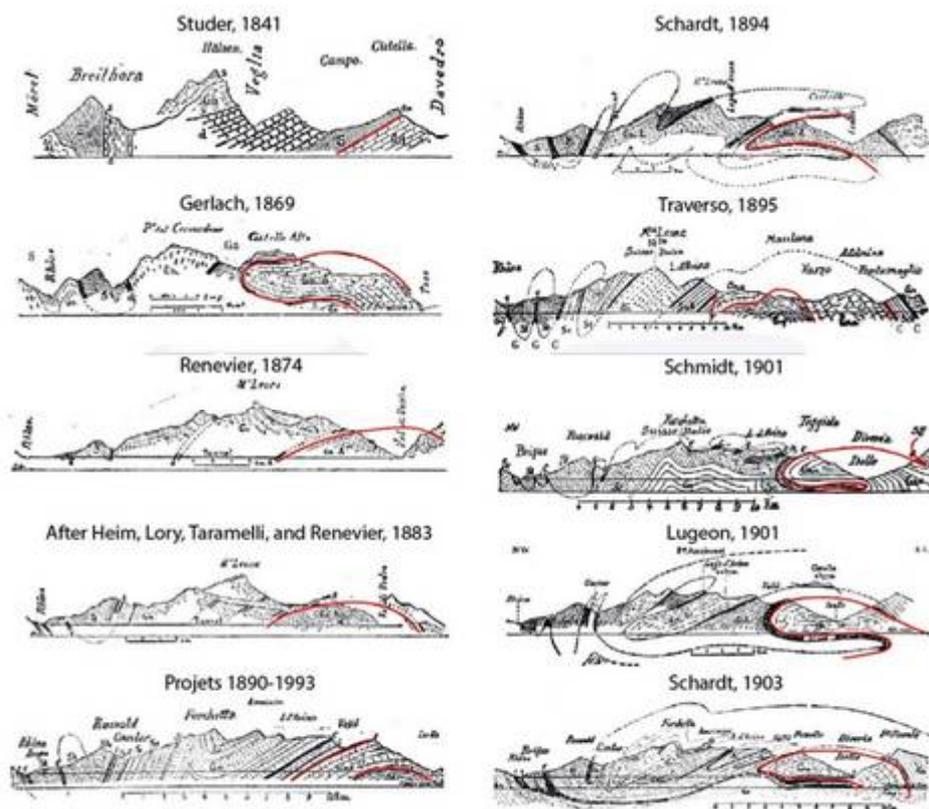


Fig. 6. Image comparative des différentes interprétations du massif du Simplon avant, pendant et après le percement du tunnel (SCHARDT, 1906 ; ROSENBERG, 2020).

Tunnels sous le Mont-Blanc, rêve ou réalité ?

La prophétie d'un tunnel sous le Mont-Blanc formulée par Saussure connut une première velléité de réalisation au début du XIX^e siècle lorsque, après la défaite de Napoléon, le Congrès de Vienne (1814) restitua le Piémont et la Savoie au roi de Piémont-Sardaigne. De nouveau en possession de l'intégralité de ses États, Charles-Félix demanda aux villes du royaume de signaler leurs besoins de modernisation et Courmayeur exprima le désir d'un tunnel sous le Mont-Blanc pour être relié à Chamonix. Mais cette demande ne fut suivie d'aucun projet concret. L'idée fut reprise par l'avocat Laurent Martinet qui, dans la Feuille d'annonces d'Aoste, en 1844, proposa à nouveau de creuser un tunnel sous le Mont-Blanc, entre les Bossons, près de Chamonix, et Entrèves, près de Courmayeur, le long d'un tracé qui, plus d'un siècle plus tard, sera repris pour le tunnel routier.

Après l'achèvement de la ligne de chemin de fer Turin-Gênes, en 1858, l'ingénieur Joseph Bonelli présenta au gouvernement un projet de prolongement de la ligne jusqu'à Genève, avec un tunnel sous le Mont-Blanc. Deux solutions étaient proposées : l'une de Pré-Saint-Didier à Taconnaz, au sud-ouest de Chamonix (18,5 km de long), l'autre de Courmayeur à Taconnaz (16 km), toutes deux jugées techniquement simples par Godin de Lépinay, ingénieur des ponts et chaussées (BONELLI, 1880 ; ZIGNOLI, 1965). Cependant, en ce qui concerne leurs détails, aucune étude spécifique n'est connue.

En bref, considérons le problème des tunnels dans le contexte géologique. Vers le milieu du XIX^e siècle, la connaissance du territoire avait progressé, notamment l'exploration des Alpes occidentales, comme en témoignent les études et les cartes géologiques à petite échelle de DUFRÉNOY et ÉLIE DE BEAUMONT (1840-1841), LORY (1858, 1860), FAVRE (1862), SISMONDA (1862-1866), GERLACH (1869) avec des notes explicatives et, en particulier, la *Carte géologique des Alpes piémontaises* produite par BARETTI *et al.* (1860-1879), composée de 29 feuilles à 1/50 000, dessinées à la main, bien connue aussi sous le nom de *Gran Carta degli Stati Sardi in terraferma* » (CAMPANINO et POLINO, 2002). On est en présence d'un grand pas en avant ; même si la pétrographie alpine était encore très

primitive, l'orogénèse était interprétée selon la théorie fixiste des dislocations surtout verticales et la structure du Mont-Blanc et de ses environs était dessinée comme une succession d'éventails et plis ronds, physiquement continus, avec des renversements limités et sans chevauchement (DAL PIAZ, 2001).

Martino Baretto et un innovant tunnel de base

Martino Baretto (1841-1905), licencié ès sciences naturelles à Bologne (1866), professeur de sciences naturelles à Bari (1867-1870) et de géologie à l'Institut industriel de Turin (1871-1878), avait obtenu en 1879 la chaire de géologie de l'université de Turin, succédant à son maître Bartolomeo Gastaldi. Habile alpiniste, il avait exploré la plus grande partie des Alpes occidentales, effectuant plusieurs premières ascensions. En 1871-1872, avec Gastaldi, Baretto réalise l'étude géologique de la vallée de Suse (Dora Riparia), puis étend seul, à partir de 1873, ses recherches au groupe du mont Emilius et, en 1878-1880, à celui du massif du Mont-Blanc et à la cartographie de toute la province de Turin.

Pour le compte des autorités provinciales de Turin et sous les auspices du Comité local d'Aoste, Baretto publie en 1881 la monographie *Aperçu géologique sur la Chaîne du Mont Blanc en rapport avec le trajet probable d'un tunnel pour la nouvelle ligne de chemin de fer*. Le plan est un précurseur des tunnels ferroviaires de base modernes, s'étendant de Morgex à Taconnaz (Chamonix), à 1 000 m d'altitude, avec des courbes et des pentes dans les limites prévues pour une ligne ferroviaire de l'époque : au total, 24 810 m de longueur, dont 20 710 m dans trois tunnels et une couverture rocheuse dépassant les 3 000 m sous le Mont-Blanc. Le rapport est illustré par trois documents à 1/50 000 : un schéma géognostique, la coupe longitudinale de Morgex à Taconnaz et une projection horizontale, montrant la ligne de chemin de fer en surface et en profondeur, ainsi que les 130 points du sol où Baretto avait décrit les roches et mesuré avec précision l'orientation des couches, confirmant la structure en éventail du granite. Le texte est complété par des données géologiques, structurales et techniques très détaillées sur l'amas rocheux et concernant le forage, la stabilité et l'hydrologie. Pour le forage, les caractéristiques suivantes sont prévues : i) 10175 m dans des

roches très solides (gneiss et granite protogine), ne nécessitant probablement pas de couverture de maçonnerie, ii) 5335 m de schistes lustrés, presque aussi solides que les roches précédentes ; iii) 7 115 m de calcaire, ardoises, schistes et quartzites, très solides, sauf exceptions occasionnelles ; iv) 185 m de roches altérées, qui nécessitent des travaux particuliers. Aucune infiltration d'eau importante n'est attendue, grâce à l'énorme pression de la charge rocheuse qui comprime les couches et ferme les fractures

(en réalité, lors du forage, 80 ans plus tard, les infiltrations seront abondantes du côté italien).

En conclusion, les conditions géologiques et techniques générales auraient été favorables à la réalisation du projet, et voici les mots de Baretti : « *Nous nous répétons que le but de ce rapport est d'apaiser l'opinion publique sur les difficultés géologiques que nous pourrions rencontrer dans ce grand travail faussement exagéré par les opposants au projet* ».

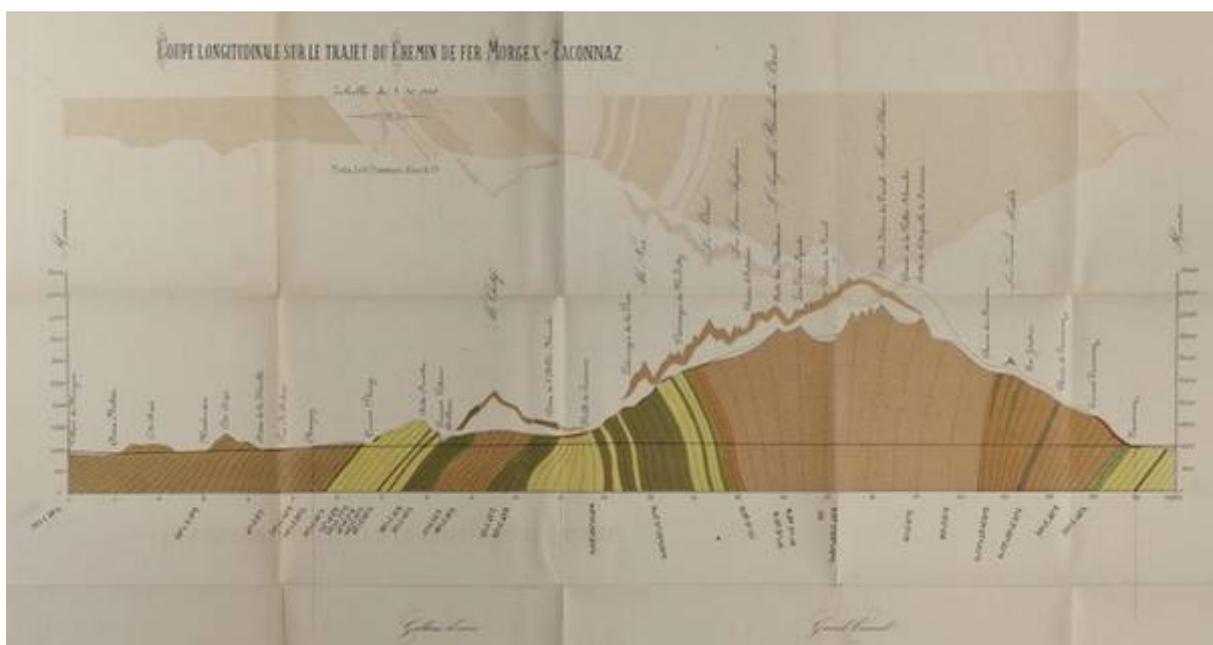


Fig. 7. Martino BARETTI (1881) : coupe géologique longitudinale sur le trajet du chemin de fer Morgex-Taconnaz, du domaine Briançonnais (zone houillère) au massif helvétique en éventail du Mont-Blanc.

Un projet de géologie avancée

L'idée d'un tunnel ferroviaire sous le Mont-Blanc fut relancée en 1908 par le député valdôtain Francesco Farinet et l'ingénieur français Arnold Monod qui avait présenté un projet de quatre parcours à une délégation de parlementaires français et italiens, lesquels s'étaient rencontrés à Aoste lors d'une visite de Giolitti et Clémenceau. Le projet Monod était fondé sur l'étude géologique préparée par Franchi, Kilian et Jacob (Fig. 8) pour le Syndicat d'études du tunnel du Mont-Blanc et de ses voies d'accès, et subdivisée en trois documents inédits : i) *Rapport géologique sur les projets de tunnel*, par les trois auteurs ; ii) *Étude géologique de la zone des rampes d'accès d'Aoste aux tunnels du Mont*

Blanc, par Franchi; iii) *Étude sur la rampe d'accès des tunnels du Mont Blanc entre Oex et Chamonix*, par KILIAN et JACOB (FRANCHI et al., 1908).

Le premier rapport, le plus important de tous les documents, présente un tableau géologique du massif du Mont-Blanc, avec la trace et la coupe géologique à 1/50 000 de quatre tunnels inclus dans une bande de direction NE-SW et large de 2 km (Fig. 7 in DAL PIAZ et ARGENTIERI, 2021): A) long de 17 km, de Pré-Saint-Didier (comme le tunnel de Baretti) à Taconnaz (Chamonix); B-C) longs de 15 et 14,7 km, de la base sud du Mont Chétif aux Granges Neuves, sur le flanc gauche du glacier du Bosson, aujourd'hui fortement régressé ; D) le plus court (12,5 km), d'Entrèves aux Granges Neuves.

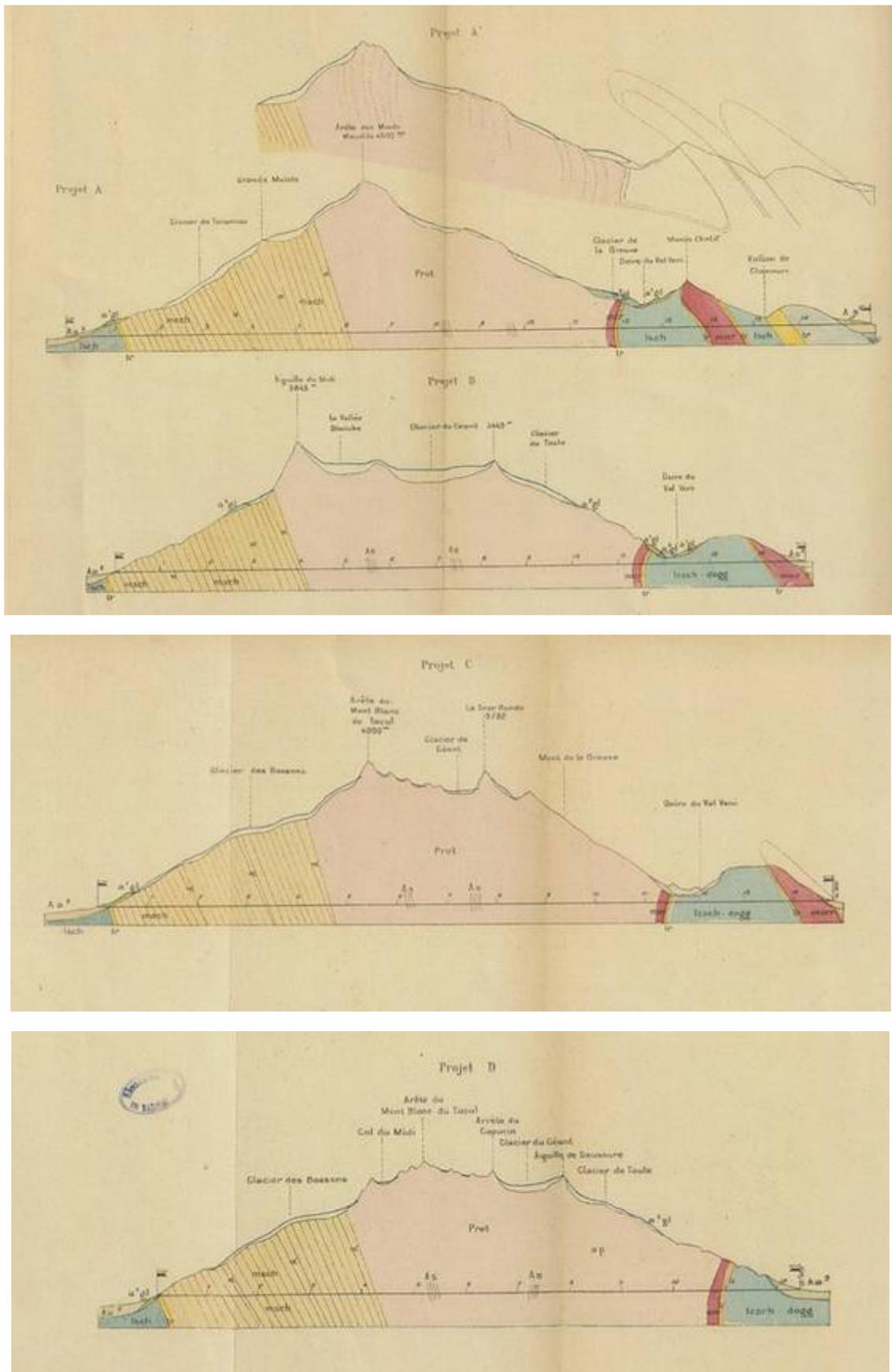


Fig. 8 A-B-C. FRANCHI, KILIAN & JACOB (1908, rapport non publié) : quatre coupes géologiques (A-B-C-D) pour un tunnel ferroviaire sous le Mont Blanc. 8D : légende et détails des entrées françaises.

La description géologique du côté italien suit le tracé qui, près de Pré-Saint-Didier, traverse le Quaternaire non consolidé et très perméable (750 m), capable de produire « *les plus grandes difficultés* » et nécessitant des techniques spéciales. Viennent ensuite les « *schistes lustrés* » des géologues français ou la « *zone de roches vertes* » des Italiens, avec une ceinture antiformale de calcaires dolomitiques, dolomies vacuolaires, corps crayeux et anhydritiques d'âge triasique moyen-supérieur dans la région de Chercruit-Chapy-Dolonne. C'est une très mauvaise zone pour le forage, impliquant des difficultés techniques et d'éventuels *watershoots*. Au nord, d'autres calcschistes, bordés d'une fine ceinture de calcaire cristallin, souvent riche en crinoïdes, avec des bancs de quartzite et de barytine, mettant fin aux successions mésozoïques de Courmayeur, le synclinal de Franchi.

Ces terrains mésozoïques s'étendent en concordance sur la dorsale proéminente du Mont Chétif-La Saxe (entrées des projets B et C) qui est formée d'un porphyre massif ou laminé avec des intercalations de granite à grain fin : ce sont des roches très dures à percer, mais elles ont l'avantage de ne pas nécessiter de maçonnerie. Deux interprétations sont proposées pour sa structure : « *écaille, pli déchargé ou lame de charriage* » pour Kilian et Jacob, selon la nouvelle théorie des nappes, tandis que Franchi ne partage pas cette hypothèse, considérant qu'elle est contraire à la structure régulière des couches autour de la masse porphyrique. Plus généralement, Franchi préfère le plissement sans défauts ou failles, c'est-à-dire le cadre autochtone qu'il a fermement soutenu, avec ses collègues du Service Géologique, pour interpréter la structure et la genèse des Alpes occidentales (FRANCHI, 1907 ; STELLA, 1927).

Au nord et sous le porphyre du Mont Chétif-La Saxe, les tracés A-B-C traversent les couches mésozoïques du synclinal Veny-Ferret (Entrèves) sur près de 2 km, en s'approchant du contact avec le granite protogène, les couches deviennent progressivement verticales, puis se renversent vers le nord-ouest, sous le cristallin du Mont-Blanc : c'est la fameuse structure en champignon ou en éventail du Mont-Blanc. Les couches sédimentaires sont faciles à forer, bien que peut-être moins stables, très perméables et imprégnées d'eau, une situation particulièrement

critique sous la confluence des rivières Doire de Veny et de Ferret. La situation s'améliore dans le dernier kilomètre du synclinal mésozoïque, avec les calcschistes du mont Frety, essentiellement secs et faciles à percer.

Le socle cristallin du Mont-Blanc commence par un faciès marginal de granite à grain fin, des porphyres et des aplites cataclastiques, cimentées par des imprégnations de quartz hydrothermal, généralement très dures et imperméables. Le corps granitique axial, riche en phénocristaux de feldspath potassique (protogène), est essentiellement massif, avec de nombreuses diaclases produites par contraction (refroidissement) de la masse ignée et par l'orogénèse alpine. À l'intérieur, les coupes dessinent des zones schisteuses et ciselées, riches en veines et en imprégnations de quartz, suivies par l'ensemble des micaschistes, regroupant gneiss, micaschistes et schistes à séricite avec des intercalations lenticulaires d'amphibolites ; le complexe plonge vers le SE d'environ 60°, comme la limite avec le granite sur le versant français du massif. Les micaschistes et le granite sont généralement considérés très résistants, avec dureté et résistance similaires à celles des gneiss du tunnel du Gothard et les gneiss d'Antigorio au Simplon.

L'étude géologique était très avancée, mais le projet était techniquement trop audacieux pour cette époque et ne fut donc pas réalisé.

De l'oubli à un renouveau de l'intérêt pour le tunnel du Mont-Blanc

Après la première guerre mondiale, l'épidémie de grippe espagnole et la grande crise économique ont fait que la recherche, les initiatives et les travaux se déroulèrent très lentement.

En ce qui concerne la région du Mont-Blanc, on peut rappeler la carte géologique à 1/20 000 et les études de Corbin et Oulianoff dans les années 1920–1935, reprises et achevées entre 1952 et 1959 ; l'étude de Parejas (1922) sur le synclinal de Chamonix et celle de Collet (1924, 1927) sur la relation tectonique entre le Mont-Blanc et les Aiguilles Rouges ; les notes pétrographiques sur le socle du Mont-Blanc de LIECHTI (1934) et du Mont Chétif de MICHEL-LÉVY (1928), CORBIN et OULIANOFF (1930) et SANERO (1938, 1940), ainsi que sur la tectonique et la protogénèse de LIECHTI (1934).

Un regain d'intérêt pour le tunnel du Mont-Blanc fut signalé en 1933 par le journal italien *Corriere della Sera*, dans un article de Carlo Ciucci intitulé *Une idée qui devient réalité. L'autoroute du Mont-Blanc*. Cette nouvelle mentionnait le sénateur italien Piero Puricelli, constructeur de l'innovante autoroute Milan-Lacs, et Antoine Broon de Genève, qui avait convaincu Monod de revenir à son projet et d'en présenter un nouveau, non plus ferroviaire mais routier. En 1934, lors d'un congrès à Bonneville des autorités françaises, italiennes et suisses, Monod lui-même avait illustré le nouveau plan : un tunnel routier de 12 620 m de long, légèrement plus long que celui en service aujourd'hui, avec des entrées à 1 220 m à Chamonix et 1 382 m à Entrèves (Courmayeur).

Comme alternative, en 1936 l'ingénieur piémontais Emilio Chauvie avait relancé l'idée irréaliste de GONELLA *et al.* (1906) d'un lien avec la vallée le long des hautes vallées de la Dora de Ferret (Entrèves) et de la Drance de Ferret (Valais), et avait présenté un projet de route entre Courmayeur et Orsières, avec un tunnel sous le col Ferret, 6 250 m de long et une entrée à 1 790 m amsl (JELMONNI, 1948). Le projet fut examiné à nouveau en 1944 par Chauvie, avec les ingénieurs Ferdinando Cena et Henry Chenaud (Cena, 1952). Une fois encore, les propositions ne furent pas acceptées.

Les relations entre l'Italie et la France, initialement bonnes, puis altérées par la chute du gouvernement de Laval, remplacé en 1936 par le Front populaire, se détériorèrent en raison de la guerre en Éthiopie, des sanctions contre l'Italie et, plus tard, du déclenchement de la seconde guerre mondiale. La prédiction de Saussure paraissait de plus en plus improbable.

Le tunnel du Mont-Blanc

Dans les dernières années de la guerre, l'idée d'un tunnel sous le Mont-Blanc fut reprise par le comte Secondino (Dino) Lora Totino (1900-1980), un jeune et éclectique entrepreneur de Biella, diplômé en ingénierie à l'École polytechnique de Turin. En 1944, il avait demandé à Vittorio Zignoli, son professeur d'ingénierie, le plan d'une liaison routière permanente entre Courmayeur et Chamonix, c'est-à-dire un tunnel destiné dans ses premières intentions à attirer les touristes. En

1946, ce projet, de 12 km de long et 5 m de large, pour une circulation en sens unique, fut modernisé en tunnel routier bidirectionnel de 7.5 m de large et équipé d'une ventilation forcée (ZIGNOLI, 1965).

La même année, Lora Totino fonde la *Compagnie pour le Tunnel* et commence à creuser le granite du côté italien, avec une entrée à La Palud, près d'Entrèves. En 1947, le tunnel avait atteint 160 à 200 m de long (selon diverses sources), mais les travaux furent bloqués par l'administration locale et les autorités militaires, et ne furent jamais poursuivis. C'était en fait une entreprise utopique, mais elle eut pour effet de relancer l'éternelle question d'une liaison permanente entre Courmayeur et Chamonix.

Lora Totino avait deviné et cru au développement touristique de sa magnifique région et, déjà avant la guerre, entre 1934 et 1939 avait construit les deux premiers téléphériques de Cervinia (2 050 m) à la Testa Grigia-Plateau Rosà (3 480 m) et au Furggen (3 486 m), et avait initié l'urbanisation la zone vierge de Breuil, déjà très controversée. Juste après la guerre, il avait acquis des autorités militaires le téléphérique d'Entrèves à la Cabane Torino (3 375 m), plus tard étendu à pointe Helbronner (3 462 m) et enfin le service de télécabines de la vallée Blanche, entre la pointe Helbronner et l'aiguille du Midi (3 778 m), toujours selon le projet de Vittorio Zignoli: c'était un travail techniquement spectaculaire, de 5 093 m long, qui, en 1957, a complété la liaison en téléphérique entre Courmayeur et Chamonix, peu avant le début du forage du tunnel routier.

Le projet de Vittorio Zignoli

Le premier projet réalisé par Zignoli avait été préparé en 1946 surtout comme base des négociations intergouvernementales, des accords et des décrets pour les concessions et l'exploitation future du tunnel (ZIGNOLI, 1965). En même temps, les techniciens des deux pays avaient révisé le projet original et des modifications allaient être introduites au cours des travaux.

Les caractéristiques finales du tunnel sont les suivantes : longueur, 11 600 m ; largeur de la chaussée double, 7 m , pente de la section italienne, 0,25% ; celle de la partie française, 2.4-1.8% ; altitude de l'entrée italienne : 1 381,80 m au-

dessus du fond de la vallée ; altitude de l'entrée française : 1 274,260 m au-dessus du fond de la vallée ; puits de ventilation sous la chaussée ; couverture en béton ; zones latérales élargies pour le stationnement d'urgence chaque 300 m, alternant droite et gauche ; niches tous les 100 m avec téléphones et extincteurs, et appareils de sécurité pour le contrôle du CO₂ et de la visibilité.

Le premier projet était accompagné d'une note géognostique d'Aldo Bibolini (1946, inédite et vainement recherchée), collègue de Zignoli à l'École polytechnique, sans aucune référence aux trois rapports détaillés de FRANCHI *et al.* (1908). La société française concessionnaire avait choisi un rapport géotechnique de l'ingénieur Bastien, fondé sur une étude géologique de Lugeon et Oulianoff (inconnue). Le rapport associé au projet final de ZIGNOLI (1965) consacre un peu plus d'une page à la géologie, notant que les prévisions des géologues étaient « *très rassurantes* », avec référence à la note de Bibolini qui, semble-t-il, se limitait à répéter l'opinion positive de Baretti (1881).

Creusement du tunnel et géologie en parallèle

Le forage a commencé le 8 janvier 1959 et s'est achevé le 14 août 1962, quand les mineurs français et italiens se sont rencontrés. Le tunnel

a été creusé avec une série de perceuses à air installées sur une machine de forage Jumbo, qui pouvait travailler sur deux ou trois mines par jour, ou avec des techniques en cas de perçage en demi-section ou dans les cavités ; les débris étaient enlevés par camion.

La fin des fouilles fut célébrée le 15 septembre 1962 par les chefs de gouvernement français et italien, Georges Pompidou et Amintore Fanfani, tandis que l'inauguration officielle du tunnel eut lieu le 16 juillet 1965 en présence du président de la République italienne Giuseppe Saragat et du président de la République française Charles de Gaulle.

Peu avant la mise en place du chantier et le début du forage, le flanc italien du Mont-Blanc avait fait l'objet de prospections géologiques et géophysiques détaillées, à la recherche de minéraux radioactifs (uranium et thorium) (Fig. 9). Celles-ci avaient conduit à la découverte, le long du tracé du tunnel, de nombreuses zones de cassure qui étaient mises en évidence par des bandes de granite cataclastique et mylonitique, parfois avec minéralisation métallifère. Les recherches ont été effectuées par le groupe Alpha de la *Divisione Geomineraria* du *Comitato Nazionale Recherche Nucleari* (CNRN), dirigée par Paolo Baggio, diplômé en géologie à l'université de Pa

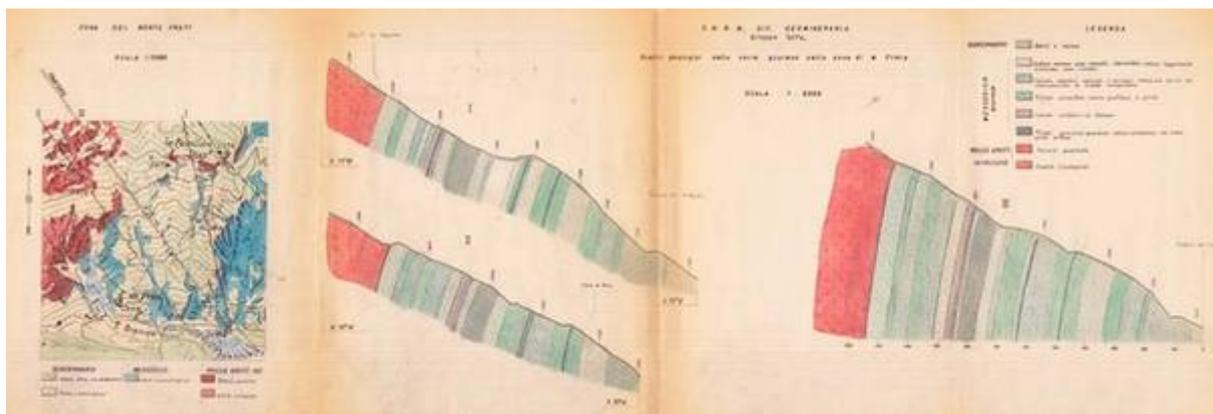


Fig. 9. Mont Blanc, versant italien : carte géologique dessinée à la main de la région du Mont Frety et profils I-II-III à travers la série jurassique : Rapport non publié, Divisione Geomineraria, Gruppo Alfa, CNRN, 20 juin 1959 (DAL PIAZ & ARGENTERI, 2021).

Géologie dans le secteur italien - Quand le tunnel du Mont-Blanc devint enfin une réalité, le Comité pour la géologie, géographie et minéralo-

gie du CNR, sous les auspices de l'Académie nationale des Lyncées et après proposition d'Angelo Bianchi et Giambattista Dal Piaz,

finança un « Programme d'études sur le tunnel », et chargea l'Institut de géologie de l'université de Turin (directeur Roberto Malaroda) et le Laboratoire du CNRN, puis CNEN, de Turin (directeur Paolo Baggio), de l'exécuter.

Le relevé géologique et structural dans la galerie et l'échantillonnage systématique sur toute la partie italienne du tunnel (5 800 m) ont été réa-

lisés par Giuseppe "Gè" Mezzacasa – expert minier de l'Institut technique d'Agordo et appartenant au Groupe Alpha – qui avait été transféré de Turin à Courmayeur pour effectuer les observations quotidiennes de l'avancement des fouilles, depuis le début des travaux (8 janvier 1959) jusqu'à leur fin (14 août 1962), sous la direction de Baggio et la collaboration pétrographique de Malaroda (Fig. 10).

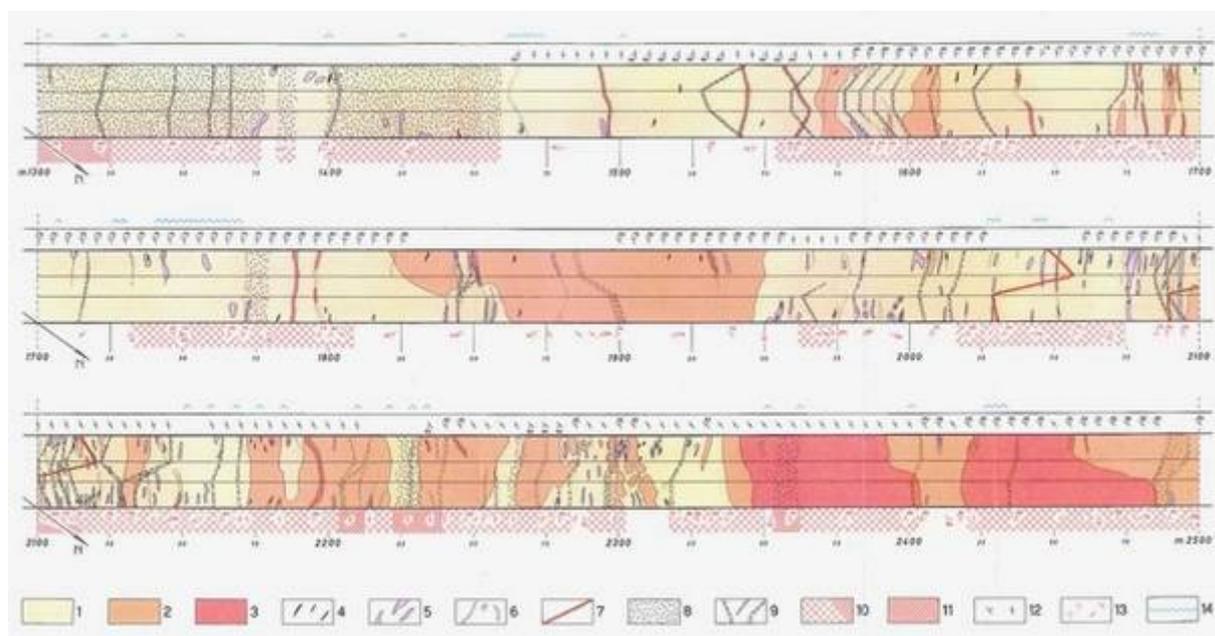


Fig. 10. Graphes géologiques de la voûte et des flancs de la deuxième avancée (1 300-2 500 m) du creusement du Mont Blanc, côté italien, relevé par Giuseppe Mezzacasa et décrit par BAGGIO *et al.* (1960) et BAGGIO & MALARODA (1961). Légende simplifié: 1- protogine et embrechites ocellées ; 2- faciès d'aplitisation de la protogine ; 3- granite aplitique microgranulaire; 4- reliques de gneiss biotitique (septa) ; 5- essaims de feldspathisation ; 6- essaims biotitiques tardifs; 7- filons de granite leucocratique microgranulaire et d'aplite ; 8- cataclasites et blastocataclasites ; 9- mylonites et blastomylonites; 10 et 11- grilles rouges : imprégnation de veines de quartz faible, moyenne à forte ;12 et 13) mesures structurales ; 14- gouttes et infiltrations inférieures à 10 l/sec. (DAL PIAZ & ARGENTIERI, 2021).

Les principaux résultats de la recherche dans le tunnel et en laboratoire sont décrits dans six notes des *Rendiconti Lincei* (BAGGIO *et al.*, 1960 ; BAGGIO & MALARODA, 1961, 1962, 1963, 1964a, 1964b). Elles décrivent les cinq étapes successives d'avancement de la perforation représentées par graphiques 3D de la voûte et des côtés du tunnel, en noir et blanc pour la première note et en couleurs pour les autres. Mezzacasa ne figure pas parmi les auteurs de ces notes, mais à cette époque le personnel technique était rarement impliqué dans des publications scientifiques, même lorsque, comme dans ce cas, il s'agissait d'un travail vraiment exceptionnel.

La première section (0–1300 m) traverse une succession sédimentaire du Crétacé inférieur (Zone helvétique) et, dans les vingt derniers mètres, le contact avec le granite cataclastique du Mont-Blanc, souvent imprégné de veines de quartz et calcite. Les quatre autres sections de la galerie traversent le socle cristallin formé par la protogine normale (granite porphyrique), ses variantes leucocrates et variétés gneissiques, interprétés et décrits selon la théorie métasomatique et sa nomenclature aberrante. Les datations radiométriques ont fourni pour le granite un âge Rb/Sr de 313 Ma (Ferrara, *in* Baggio *et al.*, 1967).

L'excavation du granite a généralement progressé régulièrement, mais le 10 décembre 1960, à 3 665-3 670 m de l'entrée, un gigantesque courant d'eau, provenant d'un système de fractures ouvertes, inonda le tunnel. L'accident avait été pressenti par une diminution de la température de la roche depuis un kilomètre. D'autres difficultés furent quelques explosions soudaines de roche (*rockburst*), se produisant surtout dans la voûte de granite massif et généralement 2 à 3 jours après l'explosion de la mine.

Le secteur français – Du côté français, les fouilles débutèrent le 30 mai 1959, quatre mois après le côté italien, et furent confiées à la célèbre Société des Entreprises de Travaux Publics André Borie. À la demande de Borie, le forage était supervisé depuis 1959 par une équipe permanente de géologues du BRGM. Le levé lors de l'excavation du tunnel fut confié à l'ingénieur H. Gudefin, auteur du rapport inédit « *Études géologiques* » dans le tunnel sous le Mont-Blanc (versant français) par le BRGM (1959–1962), avec graphiques à l'échelle 1/100, réalisés en continu pendant l'excavation – le prétendu « *film scienti-*

fique du tunnel ». Ce rapport a été résumé et complété par VITEL (1963), GUDEFIN (1967), GUDEFIN & VITEL (1971) et BLÈS (1983).

George Vitel avait été chargé par le BRGM de décrire la pétrographie de la série cristallophyllienne et cristalline le long de la partie française du tunnel et de la compléter avec des analyses chimiques au CRPG de Nancy. Cette étude constitue la partie principale de sa thèse de doctorat de 3^{ème} cycle (1965) de l'université de Grenoble. Vitel avait commencé sa recherche à l'été 1963, quand la majeure partie du tunnel avait déjà été recouverte d'un béton gaine, de sorte qu'il a été forcé d'effectuer son travail de terrain le long de la voie d'accès de surface dans la partie française du tunnel, entre la Mer de Glace et les Houches. Le travail de terrain a été schématisé sur des fiches (Fig. 11), à la même échelle de 1/20 000 que les cartes géologiques de Duparc & Mrazec, avec les observations lithologiques recueillies par Gudefin pendant la progression du forage, et une courte description, principalement déduite de relevés graphiques de la galerie (GUDEFIN & VITEL, 1971).

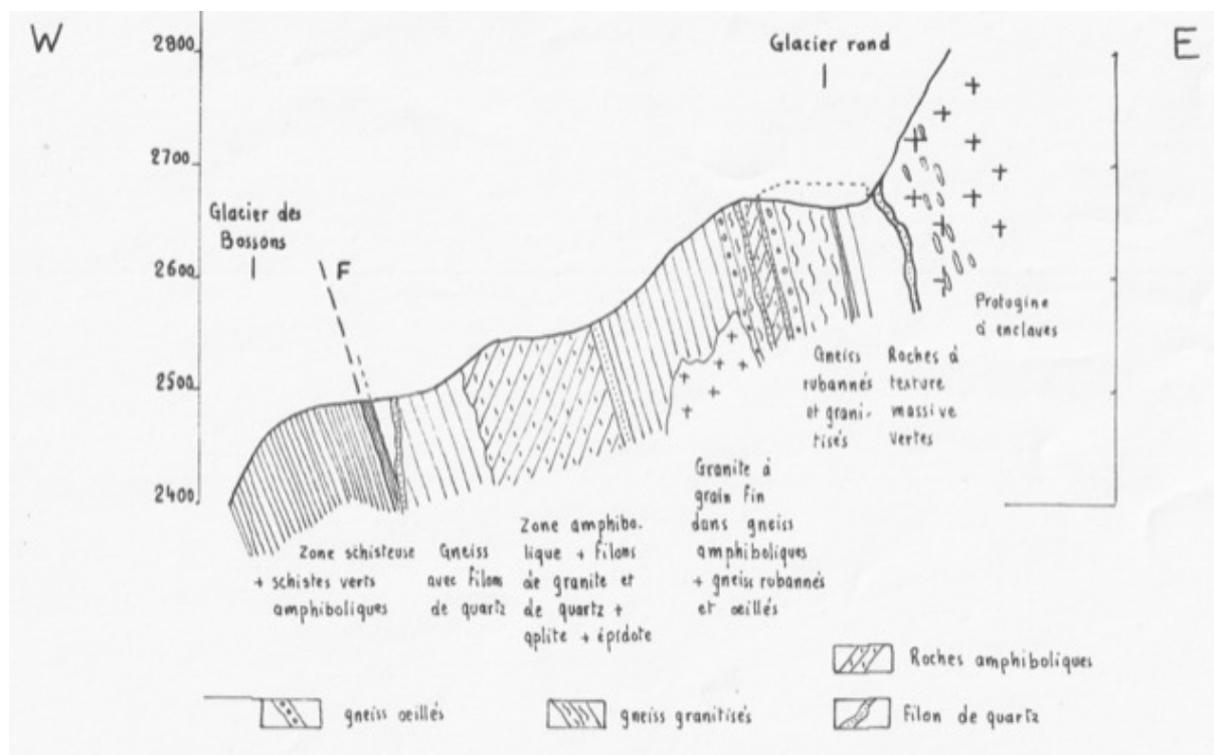


Fig. 11. Coupe schématique de la zone de transition entre les paraschistes et la protogine côté français, dessin de George Vitel (1965, thèse).

En allant du tronçon italien au tronçon français, le granite porphyroïde continue jusqu'à environ 3 100 m de l'entrée nord, où il passe, par une zone de transition, à la série cristallophyllienne, un ensemble prégranitique de gneiss et micaschistes quartzo-feldspathiques à grains fins qui, dans la vallée de Chamonix, sur le bord extérieur du massif cristallin, est renversé au-dessus des formations triasiques.

L'excavation dans les schistes n'a pas posé les problèmes particuliers qui ont eu lieu dans le granite en raison de l'exfoliation fréquente et soudaine de la masse rocheuse, un problème résolu par l'installation de filets fixés par 180 000 boulons.

Épilogue

Parmi tous les épisodes que nous avons brièvement retracés en résumant le mémoire de 2021, certains méritent une mention spéciale :

i. Les projets géologiques innovants conçus dans les dernières décennies du XIX^e siècle par Felice Giordano et Martino Baretta et, au tournant du siècle, par Franchi, Kilian et Jacob, pour les tunnels ferroviaires du Saint-Gothard et du Mont-Blanc, le premier aussitôt percé, les autres non réalisés.

ii) Les contributions de Paolo Baggio et Roberto Malaroda pour le tunnel routier du Mont-Blanc, sur la base du magnifique relevé de la galerie par Giuseppe Mezzacasa pendant les travaux d'excavation, en laissant de côté l'interprétation métasomatique pour la genèse du granite.

Il est à noter que le progrès des tunnels transalpins a accompagné l'évolution des compréhensions géologiques des Alpes, avec des avantages mutuels. Géologie de base et applications sont des outils fondamentaux pour la réalisation de grands travaux d'ingénierie souterraine, guidant l'aménagement du territoire et la conception des projets. Les faits résumés ici montrent combien de temps, d'argent et de vies humaines peuvent souvent dépendre de choix politiques et techniques insuffisamment étayés par des études et des enquêtes géologiques sur le terrain.

Nous espérons que ces articles pourront lever le voile de l'oubli sur l'histoire géologique des tunnels alpins et rendre hommage aux mineurs et à tous les scientifiques et techniciens qui, à travers des études géologiques, des cartes et des coupes, ont permis aux montagnes d'être métaphoriquement transparentes, rendant plus facile et plus sûr de les traverser.

Bibliographie

ARGAND, E. (1909). L'exploration géologique des Alpes pennines centrales. *Bull. Soc. Vaudoise Sci. nat.*, **45**, p. 217-276.

ARGAND, E. (1911). *Les Nappes de recouvrement des Alpes Pennines et leur prolongement structuraux*. Mat. Carte géol. Suisse, N.S. 31-26.

ARGENTIERI, A., DAL PIAZ, G.V. et DE CATERINI, G. (2023). La geologia rende il sottosuolo trasparente: storie di canali navigabili. *Mem. Descr. Carta Geol. D'It.*, **110**, p. 131-150.

BAGGIO, P. et MALARODA, R. (1961). Il traforo del Monte Bianco: prime osservazioni sul trattodalla progressiva 1300 alla progressiva

2500 (parte italiana). *Rend. Acc. Naz. Lincei*, **30**, p. 909-929.

BAGGIO, P. et MALARODA, R. (1962). Il traforo del Monte Bianco: prime osservazioni sul tratto dalla progressiva 2500 alla progressiva 3700 (parte italiana). *Rend. Acc. Naz. Lincei*, **33**, p. 149-152.

BAGGIO, P. et MALARODA, R. (1963). I tipi litologici incontrati nella parte italiana del traforo del Monte Bianco tra la progressiva 2500 e 3700. *Rend. Acc. Naz. Lincei*, **34**, p. 293-298.

BAGGIO, P. et MALARODA, R. (1964a). Il traforo del Monte Bianco: prime osservazioni geologiche sul tratto dalla progressiva 3700 alla progressiva 4900 (parte italiana). *Rend. Acc. Naz. Lincei*, **36**, p. 858-864.

- BAGGIO, P. et MALARODA, R. (1964b). Il traforo del Monte Bianco: prime osservazioni sul tratto dalla progressiva 4900 alla progressiva 5800. *Rend. Acc. Naz. Lincei*, **37**, p. 118-122.
- BAGGIO, P., ELTER, G. et MALARODA, R. (1960). Il traforo del Monte Bianco: prime osservazioni geologiche sul tratto dall'imbocco alla progressiva 1300. *Rend. Acc. Naz. Lincei*, **28**, p. 470-476.
- BAGGIO, P., FERRARA, G. et MALARODA, R. (1967). Results of some Rb/Sr age determinations of the rocks of the Mont Blanc tunnel. *Boll. Soc. Geol. It.*, **86**, p. 193-212.
- BARETTI, M. (1881). *Aperçu géologique sur la Chaîne du Mont Blanc en rapport avec le trajet probable d'un tunnel pour la nouvelle ligne de chemin de fer*. Mem. Comité local d'Aoste promoteur de la percée du Mont Blanc, J. Candelletti Éditeur-Imprimeur, Turin, 38 pp., esquisse géognostique.
- BARETTI, M., BRUNO, C., BRUNO, I., GASTALDI, B. et GERLACH, H. (1860-79 ca.). *Carta Geologica delle Alpi Piemontesi. Gran Carta degli Stati Sardi in terraferma alla scala 1/50 000*. 29 fogli manoscritti.
- BLÈS, J.L. avec la collaboration de BONIJOLY, D. (1983). *Contrat n. 148-80-7 WAS-F (RS) Fracturation profonde des massifs rocheux granitiques. Etude documentaire. Rapport B.R.G.M. 83 SGN 858 GEO*, 53 pp.
- BONELLI, J. (1880). *Projet d'un chemin de fer international à faibles pentes à travers les Apennins et les Alpes par la chaîne du Mont-Blanc offrant le double avantage de relier la Ligurie à Genève ou directement l'Italie à la France*. Imprimerie franco-italienne, Torino, 56 pp., avec planimétrie, profil général de la ligne et coupe transversale du groupe du Mont-Blanc.
- CAMPANINO, F. et POLINO, R. (2002). *Carta geologica delle Alpi Piemontesi (1860-1879 ca.)*. Fotomosaico al 1/380 000 dei 29 fogli al 1/50 000 rilevati da M. Baretto, B. Gastaldi, H. Gerlach, con la collab. di C. Bruno, L. Bruno e G. Michelotti. Regione Piemonte, Museo Regionale Sci. Nat. di Torino, Litografia Geda, Nichelino.
- CENA, F. (1952). Galleria autostradale sotto il Col Ferret. *Cronache Economiche, Camera di Commercio, Industria e Agricoltura di Torino*, **120** (12), p. 23-29.
- CIALDINI, P. (2011). *Frejus. Storia del primotraforo delle Alpi e degli uomini che lo realizzarono 1871-2011*. Ministero Infrastrutture e Trasporti, 79 pp.
- COLLET, L.W. (1924). *Description générale du Massif du Mont-Blanc 2 : Aperçu sur la géologie du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges*. Librairie Fischbacher, Paris, 51 pp.
- COLLET, L.W. (1927). *The Structure of the Alps*. Edward Arnold & Co., London, 289 pp.
- CORBIN, P. et OULIANOFF, N. (1927-1959). *Carte géologique du Massif du Mont-Blanc à l'échelle du 1/20 000, avec notes explicatives : Feuilles Servoz-Les-Houches (1927), Chamonix (1928), Les Tins (1929), Vallorcine (1930), Le Tour (1931), Argentières (1932), Mt. Dolent (1934), Talèfre (1935), Mt Blanc sommet (1952), Aiguilles du Midi (1954), Miage (1959)*.
- COVINO, A. (1871). *Guida al Traforo del Cenisio da Torino a Chambéry, ossia le valli della Dora Riparia e dell'Arc e la galleria delle Alpi Cozie*. Luigi Beuf, Libraio Torino, 174 pp.
- DAL PIAZ, G.B. et DAL PIAZ, G.V. (1984). *Sviluppo delle concezioni faldistiche nella interpretazione tettonica delle Alpi (1840-1940)*. Soc. Geologica Italiana, vol. giubilare 1° centenario, Pitagora-Tecnoprint Bologna, p. 41-70.
- DAL PIAZ, G.V. (2001). History of tectonic interpretations of the Alps. *J. Geodynamics*, **32**, p. 99-114.
- DAL PIAZ, G.V. et ARGENTIERI, A. (2021). 150 years of plans, geological survey and drilling for the Fréjus to Mont Blanc tunnels across the Alpine chain: an historical review. *Ital. J. Geosci.*, **140**, 169-204,
- DAL PIAZ, G.V., ARGENTIERI, A. et SELLA, M. (2021). Il Traforo del Frejus e l'abbattimento dell'ultimo diaframma il 25-26 dicembre 1870, con resoconto di Felice Giordano a Quintino Sella e Costantino Perazzi. *Geologicamente*, **4**, p. 78-80.
- DAL PIAZ, G.V. et URBANI, C. (2021). Il Canale di Suez e il Traforo del Fréjus nei resoconti in parallelo di Luigi Torelli all'Istituto Veneto nella seconda metà dell'Ottocento. *La Polifora, Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti*, **14**, Agosto 2021, 8 pp.
- DUFRENOY, A. et ELIE DE BEAUMONT, L. (1840). *Carte géologique de la France 1/500.000*. Serv. Carte géol. France.
- DUFRENOY, A. et ELIE DE BEAUMONT, L. (1841). Explication de la Carte géologique de la France. *Serv. Carte géol. France*, vol. 1.

- ELIE DE BEAUMONT, L. (1871a). Sur les roches qu'on a rencontrées dans le creusement du tunnel des Alpes occidentales, entre Modane et Bardonnèche. *C.R. des séances de l'Académie des Sciences, t. LXXI et LXXIII, séances 4 juillet 1870 et 18 septembre 1871*, 42 pp.
- ELIE DE BEAUMONT, L. (1871b). *Géologie des Alpes et du tunnel des Alpes*. Actualités scientifiques publiées par M. l'Abbé Moigno, M. Gauthier-Villars, Imprimeur-Libraire, Paris, 1-70.
- FAVRE, A. (1862). *Carte géologique des parties de la Savoie, du Piémont et de la Suisse, voisines du Mont-Blanc par Alphonse Favre Professeur de Géologie à l'Académie de Genève, échelle 1/150 000*. Gravure et impression J. Wurster et C. ie, Winterthur.
- FRANCHI, S. (1907). Relazione sulle escursioni in Valle d'Aosta (12-13 settembre 1907) della Società geologica italiana. *Boll. Soc. Geol. It.*, **26** (1), p. 157-187.
- FRANCHI, S., KILIAN, W. et JACOB, CH. (1908). *Chemin de fer international à travers le Mont-Blanc*. Projets présentés par le syndicat d'études du tunnel du Mont-Blanc et de ses voies d'accès. I) *Rapport géologique sur les projets de tunnels (...)* par M.M. Secondo Franchi, W. Kilian et Ch. Jacob, II) *Etude géologique de la zone des rampes d'accès d'Aoste aux tunnels du Mont Blanc* par M. Secondo Franchi. III) *Etude sur la rampe d'accès des tunnels du Mont Blanc entre Oex et Chamonix* par W. Kilian et Ch. Jacob.
- FRANCHI, S., KILIAN, W. et LORY, P. (1908). Sur les rapports des Schistes lustrés avec les facies dauphinois et briançonnais du Lias. *B.S.G.F.*, **119** (1907-1908), p. 135-141.
- GASTALDI, B. (1872). Brevi cenni intorno ai terreni attraversati della galleria delle Alpi Cozie. *Bull. Com. geol. Ital.*, **2**, **2**, p. 193-207.
- GERLACH, H. (1869). Die Penninischen Alpen. *N. Denkschr. allg. schweiz. Ges. Naturwiss*, **23**, 1-132, mit Karte der Penninischen Alpen, 1/200 000.
- GIORDANO, F. (1871). Sulla temperatura della roccia nella Galleria delle Alpi Cozie (detta volgarmente del Cenisio). *Boll. R. Comitato geologico d'Italia*, **2** (1-2), *Gennaio-Febbraio 1871*, p. 1-63
- GIORDANO, F. (1873). Esame geologico della catena alpina del San Gottardo che deve essere attraversata dalla grande galleria della ferrovia italo-elvetica. *Mem. per servire alla descrizione della Carta Geol. d'Italia, a cura R. Comitato Geol. del Regno*, **2** (1), p. 63-93, avec carte géol 1/50 000.
- GONELLA, F., SILVANO, E. et COGGIOLA, E. (1906). *Da Courmayeur a Martigny, strada rotabile*. Tipografia G.U. Cassone, succ. G. Candeletti, Torino aprile 1906, 36 pp.
- GUDEFIN, H. (1967). Observations sur les venues d'eau au cours du percement du tunnel sous le Mont-Blanc. *Bull. B.R.G.M.*, **4**, p. 95-107.
- GUDEFIN, H. et VITEL, G. (1970). *Observations géologiques et géotechniques sur la partie française du tunnel sous le Mont-Blanc (Alpes occidentales)*. Rapport B.R.G.M. n° 70 SGN 322 JAL, 67 pp.
- HEIM, A. (1904). Ueber die geologische Voraussicht beim Simplontunnel. *Eclogae Geol. Helv.*, **4**, p. 365-384.
- JELMONI, F.A. (1948). *La Galleria del Gran San Bernardo per l'itinerario Svizzera-Torino-Mare. Relazione tecnica orientativa. Compagnia Aosta-Martigny*. Unione Tipografica, Milano, 47 pp.
- LACHAT, H. (1863). Note sur les terrains qui avoisinent le tunnel des Alpes. *Ann. P. Ch.*, **4**, 1^{er} semestre 1863, p. 42-47, avec carte et coupe géologiques.
- LESCA, C. (1998). *Tre ingegneri per un traforo. La storia della ferrovia del Frejus*. Editrice Melli, Borgone di Susa-Torino, 181 pp.
- LIECHTI, H. (1934). Sur la tectonique de la 'protogine' du massif du Mont-Blanc. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **14**, 176-195.
- LORY, C. (1858). *Carte géologique du Dauphiné (Isère, Drôme, Hautes-Alpes) 1:250.000, par M. Ch. Lory, professeur de géologie à la Faculté des sciences de Grenoble*. A. Merle et Cie Libraires-Editeurs, Grenoble. Bibl. patrim. numé-rique de l'École nationale supérieure des mines de Paris (Mines ParisTech).
- LORY, C. (1860). *Description géologique du Dauphiné (Isère, Drôme, Hautes-Alpes) pour servir à l'explication de la Carte géologique de cette province*. Savy, Paris, 747 pp.
- LUGEON, M. (1902). Sur la coupe géologique du massif du Simplon. *Comptes-rendus séances de l'Acad. d. Science., Paris 24 mars*.
- LUGEON, M. et ARGAND, E. (1905). Sur les grandes nappes de recouvrement de la Zone du Piémont. *C.R. Acad. Science Paris*, **140**, p. 1364-1367.

- MAHANEY, W.C., SOMELAR, P., WEST, A., DIRSZOWSKY, R., ALLEN, C.C.R., REM-MEL, T.K. et TRICART, P. (2018). Reconnaissance of the Hannibalic route in the upper Po valley, Italy: correlation with biostratigraphic historical archaeological evidence in the upper Guil valley, France. *Archaeometry*, **61** (2016), p. 242-258.
- MASSON, H. (1983). La géologie en Suisse de 1882 à 1932. *Eclogae Geol. Helv.*, **76**, p. 47-64.
- MAUS, H.J.M. (1850). *Relazione del Cavaliere Enrico Maus sugli studi da lui fatti della strada ferrata da Chambéry a Torino e sulla macchina da lui proposta per il perforamento dell'Alpi fra Modane e Bardonnèche (p. 1-34), e Rapporto dell'Ispettore Cavaliere Pietro Paleocapa fattane alla Commissione incaricata dell'esame (p. 35-50) coi Processi verbali della Commissione medesima (p. 51-56)*. Stamperia Reale, Torino, original from Harvard University.
- MICHEL-LEVY, M. (1928). Séricitoschistes des chaînes du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges qui sont des mylonites recristallisées postérieures au granite. *Bull. Soc. géol. France*, (4), **28**, p. 255-260.
- MILNES, A.G. (1973) - Structural interpretation of the classic Simplon Tunnel section of the Central Alps. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **64**, p. 269- 274.
- MORI, M., CHIORINO, M.A., DAL PIAZ, G.V., PELIZZA, S. et SELLA, M. (2021). 150 anni: il traforo ferroviario del Fréjus è la più antica galleria montana del mondo. *Gallerie e grandi opere sotterranee*, **138**, p. 9-16.
- MORTILLET, G. de, (1858). Géologie et Minéralogie de la Savoie. *Annales de la chambre royale d'agriculture et de commerce de Savoie*, **4**, 481 p., 4 pl. (contient p. 397 à 405 une annexe intitulée *Études géologiques sur la percée du mont Cenis* rédigée le 12 décembre 1856).
- MORTILLET, G. de (1872). Géologie du tunnel de Fréjus ou percée du Mont-Cenis. *Revue savoisiennne*, n°3, 20 mars 1872, p. 17-19 ; et *Bull. Soc. géol. Fr.*, (2), **29**, p. 11-16.
- PARÉJAS, ED. (1922). Géologie de la zone de Chamonix comprise entre le Mont-Blanc et les Aiguilles Rouges. *Mém. Soc. Phys. Hist. nat. Genève*, **39** (7), p. 373-442.
- RENEVIER, E. (1899). Etude géologique du Tunnel du Simplon. *Eclogae Geol. Helv.*, **6**, p. 31-35
- ROSENBERG, C. (2020). Alpine sections through time: a mirror of evolving observations and thoughts on the tectonics of the Alps. In BELLAHSEN, N. et ROSENBERG, C. (Eds): *Geodynamics of the Alps*, ISTE Editions.
- SANERO, E. (1938). Studi petrografici sulle formazioni granitiche e porfiriche del Monte Chetif. *Periodico di Mineralogia*, 1938, p. 161-214.
- SANERO, E. (1940). Studi petrografici sul Massiccio del Monte Bianco. Il granito. *R. Accademia d'Italia, Rend. Cl. Sci. fis. mat. nat.*, (7), **1** (11), p. 1-4.
- SCHARDT, H. (1903). Note sur le profil géologique et la tectonique du Simplon comparés aux travaux antérieurs. *Eclogae Geol. Helv.*, **8**, p. 173-200.
- SCHARDT, H. (1905). Les résultats scientifiques du percement du tunnel du Simplon : géologie-hydrologie-thermique. *Bull. technique Suisse romande*, **31**(10), p. 125-128.
- SCHARDT, H. (1906). Die modernen Anschauungen über den Bau und die Entstehung des Alpengebirges. *Actes, St Gallen*, p. 308-346.
- SISMONDA, A. (1862-66). *Carta geologica di Savoia, Piemonte e Liguria*. Governo di S.M. Vittorio Emanuele II, Re d'Italia.
- STAPFF, F.M. (1880). *Geologisches Profil des St. Gotthard in der Axe des grossen Tunnels waehrend des Baues (1873-1880) aufgenommen. Maasstab 1:25 000*. Rapports du Conseil général Suisse, Annexe spéciale, Imprimerie C. J. Wiss, Berne, 59 pp.
- STELLA, A. (1906). *Cenni geologici sulle nuove linee di accesso al Sempione, etc. In Relazione sugli studi e lavori eseguiti dal 1897 al 1905. Soc. Italiana per le Strade Ferrate del Mediterraneo*. Tipografia D. Squarci, Roma, 390 pp., album 74 tav.
- STELLA, A. (1927). *Sezioni geologiche attraverso l'alta Valle d'Aosta*. R. Ufficio Geologico, Roma.
- VITEL, G. (1965). *Etude pétrographique du tunnel du Mont-Blanc (Partie française) et recherches géologiques complémentaires dans le massif Mont-Blanc - Aiguilles-Rouges*. Thèse doct. 3^e cycle, Univ. Grenoble, 89 pp.
- ZIGNOLI, V. (1965). Il Traforo del Monte Bianco. *Autostrade*, **6**, Giugno 1965, 39 pp.