

ÉTUDE GÉOLOGIQUE
SUR LE
NOUVEAU PROJET DE TUNNEL COUDÉ
AU TRAVERS DU SIMPLON

(Pl. 1 à 4)



Le Comité qui poursuit la réalisation d'un grand tunnel de base au travers du massif montagneux du Simplon, a voulu joindre à ses études techniques une nouvelle étude géologique, basée plus particulièrement sur les derniers tracés proposés. Il a confié cette tâche aux trois experts, chargés des précédentes études en 1877¹, MM. les prof. CH. LORY de Grenoble, ALBERT HEIM de Zurich et moi-même, en nous adjoignant un quatrième collègue *italien*, M. T. TARAMELLI, professeur à l'Université de Pavie.

Chargé par mes collègues de préparer le rapport de cette expertise, j'ai présenté au *Comité du Simplon* le mémoire ci-après, qui résume nos observations collectives pendant l'été 1882, et a reçu l'approbation de mes trois collaborateurs.

Par suite d'une entente avec le Comité du Simplon, la *Société vaudoise des sciences naturelles* a bien voulu insérer ce travail dans son Bulletin.

Lausanne, le 20 mars 1883.

E. RENEVIER, prof.

Travaux antérieurs.

Vers la fin du siècle passé, *H.-B. de Saussure*, le grand explorateur des Alpes, avait déjà donné la relation d'un voyage scientifique par le Simplon, mais c'est à M. le prof. B. STUDER qu'on doit les premières notions un peu circonstanciées sur la géologie de cette partie des Alpes. En 1846 il publia dans les *Mémoires de la Société géologique de France* (2^e série, vol. I, p. 305) un important travail intitulé : *Mémoire géologique sur*

¹ Voir *Bull. Soc. vaud. sc. nat.* XV, p. 281. 1878.

la masse des montagnes entre la route du Simplon et celle du Saint-Gothard.

A ce mémoire est jointe une petite carte géologique à l'échelle de $\frac{1}{100\,000}$, qui représente déjà la distribution générale des principales roches de cette contrée.

Quelques années plus tard, en 1851, dans le 1^{er} volume de sa *Geologie der Schweiz*, p. 223, M. STUDER donne une coupe transversale, peu distante de nos tracés de tunnel, allant de Mörel à Trasquera. Cette coupe, malgré sa très petite échelle, représente assez nettement les traits orographiques principaux de ces massifs.

L'ingénieur H. GERLACH, de regrettable mémoire, fut chargé en 1859 de l'étude géologique des divers projets de percement de la montagne, dont se préoccupait alors déjà l'ancienne compagnie de la ligne d'Italie. Ce rapport, qui n'a jamais été publié mais dont la traduction française nous a été communiquée en manuscrit, étudie la géologie de trois tracés : I *Brigue-Iselle*; II *Bérisal-Campo*; III *Bim-Goglio*. Il contient, en particulier, une énumération raisonnée des roches observées le long de la route du Simplon.

Le même H. GERLACH publia en 1869, dans les mémoires de la Société helvétique des sciences naturelles (vol. XXII), sous le titre *Die Penninischen Alpen*, un travail classique, accompagné d'une carte géologique au $\frac{1}{200\,000}$ et de profils au $\frac{1}{100\,000}$. C'est là un ouvrage fondamental pour la contrée. La carte est d'une remarquable exactitude, eu égard à sa petite échelle. Malheureusement aucun des profils ne correspond à la direction du tunnel projeté; le plus rapproché est celui qui traverse de Viesch à Crevola, etc.

Enfin en 1877, lorsque la compagnie du Simplon reprit sérieusement le projet d'un grand tunnel alpin, elle chargea trois d'entre nous (MM. Lory, Heim et Renevier) d'une expertise géologique, ayant pour objectif spécial deux tracés débouchant l'un et l'autre au sud vers Balmare, un peu en amont d'Iselle, mais dont le premier (*tracé haut*) avait sa tête nord droit au-dessus de Brigue, tandis que l'autre (*tracé bas*) commençait au nord du Rhône, à peu de distance en aval des projets actuels. Chacun des trois experts présenta à la compagnie son rapport particulier, accompagné de profils au $\frac{1}{50\,000}$ le long des deux tracés éventuels.

Les trois experts concluaient en faveur du *tracé bas*, d'un

demi-kilomètre plus long, mais présentant, au point de vue géologique, divers avantages sur lesquels nous aurons l'occasion de revenir dans la suite du présent travail.

Aucun de ces trois rapports ne fut publié, mais l'un de nous en groupa les résultats plus spécialement scientifiques dans une notice, qui parut dans le *Bulletin de la Société vaudoise des sciences naturelles* (vol. XV, p. 281), sous ce titre : *Structure géologique du massif du Simplon*, par E. Renevier, prof.

Cette notice est accompagnée de deux profils géologiques détaillés, à l'échelle du $\frac{1}{50\,000}$, pris sur la verticale des deux tracés en présence. La compagnie du Simplon fit faire un tirage à part de ce travail, qui se trouve maintenant épuisé.

Nouvelles études sur le terrain.

Dans notre exploration de 1877 nous avons étudié le cours de la Saltine et du Kaltwasserbach, le versant N-O du Wasenhorn et la route du Simplon jusqu'à Iselle. De là nous étions revenus par Trasquera et la vallée de la Cherasca à l'Alpe Diveglia. Nous avons franchi la chaîne du Wasenhorn par un passage non marqué sur les cartes, entre le Bortelhorn et la Forchetta, pour retomber sur la vallée de la Ganther et Bérisal. Ensuite remontant par Eisten à Unterstaffel, nous étions redescendus au nord par Termenalp, pour venir étudier les berges du Rhône sous Termen, ainsi que le flanc opposé de la vallée entre La Massa et Naters. Nous avons exploré ainsi tout le pourtour du massif des Monte-Leone et Wasenhorn, mais en donnant la plus grande attention au côté du Simplon et de la Saltine inférieure.

En août 1882, au contraire, nous avons concentré toute notre étude sur le versant N-E du Monte-Leone et du Wasenhorn, les nouveaux projets déplaçant le tunnel dans cette direction. Accompagné de M. MEYER, ingénieur en chef de la construction, et de M. CRAUSAZ, ingénieur préposé aux études sur le terrain, nous avons étudié d'abord les environs de la tête nord du projet de tunnel, savoir la berge du Rhône entre Brigue et Termen, ainsi que le Brigerberg, les environs de Bach, Schlucht, etc. Puis nous avons franchi l'arête de Rosswald, en nous tenant, autant que possible, droit au-dessus du tracé, et sommes redescendus sur Bérisal, en explorant la vallée du Staffel et la montagne entre celle-ci et le Steinenthal. De Bérisal nous nous

sommes divisés en deux escouades pour explorer les deux versants de la vallée de la Ganther et les deux flancs de la pointe d'Avrona (Furggenbaumhorn).

Les uns passant au sud de ce massif ont traversé le cirque de la Ganther et le Passo d'Avrona. Les autres, suivant plus directement le nouveau tracé, sont montés par le glacier au nord du Furggenbaumhorn, pour traverser la chaîne, par le passage nommé sur la carte l'orchetta, dont la descente s'est trouvée assez difficile. Nous avons exploré tous ensemble une partie du beau cirque de l'Alpe Diveglia, spécialement le côté S-O, puis la Cherasca jusqu'à l'Alpe di Nembro. C'est là que devait se trouver le sommet d'angle du tracé coudé, déterminé d'après les anciennes cartes, très imparfaites. Les ingénieurs de la compagnie ayant fait faire un nouveau levé de cette contrée, nous avons constaté sur place qu'il fallait modifier l'emplacement du coude, et le rapprocher le plus possible du pied des cascades de Campo. C'est ce qui a donné lieu au second tracé coudé, du 2 août 1882, marqué sur la carte 3^e Etude.

Depuis là nous avons suivi le cours inférieur de la Cherasca par le pont San-Bernardo, jusqu'à Varzo, et contourné l'angle de rochers sous Trasquera, pour venir examiner l'entrée sud du tunnel en aval d'Iselle. Puis descendant le Val di Vedro jusqu'à Crevola, nous nous sommes rendu compte des lignes d'accès projetées, sur l'une et l'autre rive de la Diveria. Enfin nous avons examiné les conditions géologiques des divers tracés proposés, aux environs de Domo d'Ossola, en particulier le contour dans le val Bognanco, et fait une pointe dans le val d'Antigorio, à titre de terme de comparaison.

Dans la plus grande partie de ce parcours de Brigue à Domo d'Ossola, les conditions géologiques sont assez simples pour que notre exploration, quoique rapide, nous paraisse bien suffisante pour une expertise encore préliminaire. Mais il y a quelques points spéciaux sur lesquels en coordonnant leurs notes, les experts ne se sont pas trouvés d'accord. Nous aurions voulu pouvoir retourner sur le terrain pour trancher ces points en litige, mais cela n'était plus possible. Nous sommes donc obligés de donner ici nos appréciations incomplètes, telles qu'elles ressortent de cette courte exploration; mais nous aurons soin de signaler les points sur lesquels nous sommes en désaccord, lesquels du reste, un seul excepté, n'ont qu'une faible portée technique.

Nous devons faire observer d'ailleurs, que, pour se rendre compte d'une manière tant soit peu complète de la constitution géologique d'une région montagneuse aussi compliquée, il ne suffit pas d'une rapide exploration de quelques jours de durée, mais qu'il faudrait pouvoir séjourner sur les lieux pendant plusieurs semaines, de beau temps continu, et parcourir les crêtes et les vallées dans tous les sens. En second lieu il faut, pour un travail semblable, une base topographique sûre. Or, si les levés au $\frac{1}{30\,000}$ sont relativement assez passables sur le versant suisse, ils sont en revanche déplorablement defectueux sur la plus grande partie du versant italien, de sorte qu'il est souvent impossible de pouvoir déterminer exactement sur la carte le point où l'on se trouve. A côté de certaines divergences de vues théoriques, sur des sujets où les faits ne sont pas suffisamment patents, ce manque d'une bonne base topographique a été la principale cause de nos appréciations différentes.

L'exploration d'août 1882 nous a révélé divers faits géologiques qui nous avaient échappé en 1877, et dont l'un, entr'autres, l'existence des micaschistes sous la voûte du Gneiss d'Antigorio, peut avoir une certaine portée technique. Toutefois, dans l'ensemble, le grand tunnel se présente à nous avec les mêmes caractères géologiques généraux que nous lui avons reconnus précédemment, mais modifiés sur divers points par suite de la différence de tracé.

Sur toute sa longueur, la perforation aurait lieu dans le roc en place; nulle part elle ne traverserait les amas erratiques, soit glaciaires, soit torrentiels qui sont si fort à redouter pour de semblables travaux, en ce qu'ils exigent de forts boisages, créent des difficultés qui arrêtent la perforation mécanique et exigent des revêtements d'épaisseur considérable¹.

Le tunnel du Simplon se subdiviserait tout naturellement en trois sections de longueurs inégales (Pl. 1):

- a) *Section septentrionale*, la plus courte, formée essentiellement de schistes lustrés tendres;
- b) *Section centrale*, la plus longue, formée de schistes cristallins feuilletés, assez variés;
- c) *Section méridionale*, formée par la grande voûte de gneiss

¹ Voir Rapport de MM. Renevier et Heim et lettre de M. Lory sur le tunnel du Mont-Blanc, p. 33 et 44 du mémoire technique publié par le Comité du Simplon.

granitoïde, dit d'Antigorio, avec une calotte intérieure de schistes feuilletés.

Outre ces trois sections du grand tunnel, nous aurons à envisager encore :

- d) *Les conditions thermiques* ;
- e) *Les lignes d'accès nord et sud*.

Nous commencerons par la ligne d'accès nord, dans la vallée du Rhône, et suivrons continuellement, dans notre examen, la direction nord-sud.

Accès nord du tunnel.

Depuis la gare actuelle de Brigue, la ligne d'accès suit le cours du Rhône, et par conséquent se trouve sur les alluvions du fond de la vallée, jusqu'à l'entrée en tunnel, au bas du petit ravin sous Termen, lieu dit Im Rafien.

La berge sud de la vallée, depuis Brigue jusqu'un peu au-delà de ce ravin, est formée de schistes marno-calcaires d'un gris foncé presque noirâtre, plus ou moins micacés, très feuilletés et peu consistants, qu'on désigne généralement sous le nom de *schistes gris*, ou mieux *schistes lustrés*, à cause de la surface luisante des feuillets. Le plongement de ces schistes n'est pas absolument constant, car ils sont un peu ondulés. Nous avons mesuré, suivant les places, depuis 20° jusqu'à 35° et même 40°, toujours contre Schlucht, c'est-à-dire au S-S-E. Nous admettons comme moyenne un plongement général de 30° dans le bas, mais qui devient plus fort en montant la berge.

Sous Termen, à peu près vis-à-vis de l'embouchure de La Massa, on voit apparaître au bord du Rhône des bancs de gypse et de dolomie, sous-jacents aux schistes lustrés, qui ont le même plongement qu'eux et s'élèvent en écharpe au travers de la berge, dans la direction du N-E, pour disparaître un peu au-delà sous l'erratique du plateau de Termen. On les voit de loin réapparaître dans le profond ravin de Hohfluh, en dessous de Tunnetsch.

La carte de Gerlach marque en outre plusieurs affleurements de gypse dans le prolongement de cette même bande : 1° au-dessus de Mörel, sous Nasenbord ; 2° au-dessus de Grengiols ; et enfin 3° dans la vallée de Binn, vers Ausserbinn.

Droit en-dessous de Termen, ce complexe de couches blanches occupe presque toute la hauteur de la berge du Rhône, qui

présente de haut en bas la coupe suivante, relevée par nous en 1877 :

- k*) Erratique occupant tout le plateau de Termen.
- i*) Schistes lustrés grisâtres, formant le haut de la berge.
- h*) Dolomie saccharoïde, d'un beau blanc — circa 15 mètres.
- g*) Schistes lustrés, un peu plus foncés que *i* — 4 à 5 mètres.
- f*) Dolomie saccharoïde, identique à *h* — circa 20 mètres.
- e*) Gypse grenu, d'un beau blanc — circa 35 mètres.
- d*) Banc de quartzite blanc — 2 à 3 mètres.
- c*) Gypse identique au précédent — 20 à 25 mètres.
- b*) Schistes verdâtres — 10 à 12 mètres.
- a*) Schistes lustrés noirâtres, formant tout le bas de la berge, et disparaissant sous le talus d'éboulis.

Sur la rive opposée du Rhône, en arrière du pont de la Massa, on retrouve deux bandes de gypse, avec intercalation de schistes lustrés, surmontées de couches dolomitiques, qu'on voit affleurer au bord de la grande route. Ce nouveau complexe de couches gypseuses et dolomitiques paraît former toute la colline de Masseggen, contournée par la route, en face de l'entrée du tunnel. Ces couches sont fortement relevées au N-O, et s'appliquent contre les bancs de gneiss compacte, qui plongent en cet endroit de 70° au S-E.

Nous ne saurions dire d'une manière absolue quelle est la relation de ce complexe gypseux de la rive droite, avec celui de la rive gauche du Rhône. Ils ne paraissent pas pouvoir être la continuation directe l'un de l'autre, car droit en aval du confluent de la Massa, on les voit simultanément sur les deux flancs de la vallée du Rhône. Ils ne paraissent pas former une anticlinale, car la série des couches n'est pas renversée, puisque chaque fois la dolomie se trouve au-dessus du gypse. Il y a donc répétition de la série des couches dans le même ordre; mais cette répétition peut provenir soit d'une superposition réelle, soit d'une faille coïncidant avec le fond de la vallée.

Quoi qu'il en soit, il est intéressant de constater que par l'emplacement de son entrée nord, le tunnel éviterait complètement ces complexes de couches gypseuses et dolomitiques, qui sont d'entre les roches les plus désavantageuses qu'un tunnel puisse rencontrer, ainsi qu'en témoigne le rapport présenté par deux d'entre nous sur le tunnel du Mont-Blanc ¹.

¹ Voir rapport de MM. Renevier et Heim, p. 36 et 37 du mémoire technique, déjà cité.

Sauf cette colline de Masseggen, composée des roches susmentionnées, en partie recouvertes d'erratique, tout le flanc N-O de la vallée, aussi bien du côté de Mörel que de celui de Naters, est formé de gneiss assez compacte, qui fournirait d'excellents matériaux de construction, pour les travaux d'art de la ligne et les revêtements du tunnel.

Section septentrionale.

Cette première section du grand tunnel serait presque entièrement comprise dans les *schistes lustrés* que nous avons fait connaître au chapitre précédent. Ces schistes, en effet, forment en totalité la première chaîne parallèle au Rhône, celle qui comprend le Tunnetschhorn, le Klenhorn ou Kleinhorn, le Glishorn, etc., et qui serait traversée par le tunnel, sous Rosswald.

Ce sont des schistes feuilletés grisâtres, plus ou moins calcifères, et souvent micacés, passant parfois au *calcschiste micacé* (par exemple au sud de Rosswald). Certaines couches ressemblent exactement aux *schistes des Grisons* types de la Via-Mala. Exceptionnellement, ils contiennent des bancs qui passent au *grès micacé*, et d'autres assez analogues au gneiss (par exemple Alpe de Termen).

Au point de vue du travail de perforation, ces schistes seront tout à fait similaires à ceux qu'on a rencontrés au Gothard sous la vallée d'Urseren et qu'on y a désignés du nom de *schwarze Glanzschiefer*¹. Ils seront plus semblables encore aux schistes lustrés de Bardonnèche, dans lesquels le tunnel du Mont-Cenis a été percé sur les trois quarts de sa longueur, et qui y ont présenté les meilleures conditions de solidité et d'avancement rapide des travaux.

Il faut remarquer toutefois que ces schistes sont parsemés de veines blanches de *calcite* et surtout de *quartz*, prenant souvent la forme lenticulaire, et quelquefois assez épaisses; sur le Brigerberg, nous en avons constaté dont l'épaisseur atteignait un mètre. Les veines de calcite ne seront pas un obstacle à la perforation, mais les veines quartzzeuses opposeront plus de résistance; toutefois, ce ne sera jamais qu'une résistance tout à fait locale et passagère, qui n'est pas à comparer avec celle des

¹ Echantillons n^{os} 42, 67, 73 et 75 de la collection des roches trouvées au Gothard, côté nord.

quartzites en bancs, plus ou moins massifs. Ces derniers joignent souvent à la dureté une certaine ténacité qui les rend beaucoup plus difficiles à perforer, tandis que les veines quartzieuses, toujours beaucoup plus minces, sont, en outre, d'une nature aigre et cassante, qui facilite, au contraire, la perforation.

Au Simplon, comme à Bardonnèche, les schistes lustrés sont généralement secs, et l'on peut s'attendre à ce qu'ils se comportent mieux que leurs similaires du Gothard, qui reçoivent d'abondantes infiltrations des alluvions de la plaine d'Andermatt, fonctionnant comme une vaste éponge. Au Simplon, au contraire, la configuration du sol, au-dessus du tracé coudé, exclut toute crainte d'infiltrations. On n'aura donc pas à prévoir pour cette section de revêtements de dimensions exceptionnelles, sauf peut-être sur de très faibles longueurs.

Il en serait tout autrement si l'on devait atteindre, sur une certaine étendue, les couches de gypse qui accompagnent ailleurs les schistes gris. Heureusement que la grande bande gypseuse de la berge du Rhône, sous Termen, vient plonger sous le sol alluvial du Rhône, à 250 mètres en amont de la tête nord, et passe de cette façon bien en dessous du niveau du tunnel.

Il existe, il est vrai, dans les gorges de la Saltine, en dessous de Lingwurm, un affleurement gypseux, qui appartient évidemment à une autre bande, laquelle, prolongée dans sa direction naturelle, pourrait affleurer dans le tunnel en dessous de Schlucht, ou à peu près. Mais nous n'en avons retrouvé aucune trace aux environs de Schlucht, et il se peut parfaitement que ce petit pointement de gypse, qui présente à Lingwurm l'apparence d'une anticlinale, ne se continue pas assez loin pour être rencontré dans le tunnel. Nous n'avons malheureusement aucun moyen de déterminer si le tunnel percerait ce gypse ou non ; mais ce que nous pouvons dire avec certitude, c'est que s'il y est rencontré, ce ne sera pas dans les conditions dangereuses du premier tracé soumis à notre examen en 1877 (projet de la Compagnie du Simplon, longueur 18,507 mètres), lequel passait presque en dessous du torrent de la Saltine, et à une très faible distance verticale. Sous Schlucht, au contraire, le tunnel serait déjà à 300 mètres environ en dessous de la surface, et dans une région où les infiltrations sont beaucoup moins à craindre. C'est déjà la raison qui nous avait porté, en 1877, à nous prononcer catégoriquement en faveur du tracé bas (dit tracé bleu), dont

l'entrée nord était peu distante de celle des nouveaux projets de 1881-1882.

L'inclinaison des couches est assez variable dans cette première section. A la tête nord du tunnel, nous avons vu les schistes lustrés plonger en moyenne de 30° au S-S-E. L'inclinaison augmente à mesure qu'on s'élève, et sur la partie culminante du Brigerberg elle se rapproche sensiblement de la verticale. Au versant sud du Brigerberg, dans le petit vallon de Bach, nous avons trouvé un plongement inverse, variant de 25° à 50° au N-O, c'est-à-dire contre le Rhône. Au bord de la grande route du Simplon, en dessous de Schlucht, les couches sont de nouveau inclinées au S-E. Au-dessus de Schlucht, au bas de la montée de Termenalp, le plongement est de 40° au S-E. Il s'accroît en montant la côte, et atteint 46° aux chalets de Termenalp. De l'autre côté de Rosswald, sur le versant qui regarde Bérisal, le plongement est de nouveau inverse, soit contre le N-O. (Pl. 1.)

Nous avons là, évidemment, une succession de plis anticlinaux et synclinaux, qui se manifesteront sans doute aussi dans le tunnel, sans que nous puissions préciser sous quelle inclinaison les schistes lustrés s'y présenteront. Quelques observations toutefois peuvent nous faire prévoir qu'on les y rencontrera généralement plus fortement inclinés qu'à la surface, et se rapprochant souvent de la verticale. Dans le ravin, à l'est de Termenalp, on voit les couches se redresser de plus en plus, à mesure qu'on se rapproche de l'arête de Rosswald, et affecter ici une disposition en *éventail* ou mieux en *gerbe*. La même disposition s'observe sur la continuation de la dite chaîne, le long de la route du Simplon, entre Bleiche-Kapelle (1241 mètres) et Schallberg (1321 mètres); là on peut voir la gerbe complète, et l'on passe, presque sans s'en apercevoir, de l'inclinaison de 70° S-E au plongement inverse de 60° N-O. En dessous, dans les gorges de la Saltine, *les schistes lustrés paraissent presque constamment verticaux*. — C'est déjà ce que nous avons constaté en 1877 et ce qui se trouve représenté dans nos coupes ¹. Or, les divers tracés de tunnel se trouvent de deux à trois cents mètres plus bas que le niveau de la Saltine; ils atteindraient

¹ *Bulletin de la Société vaudoise des sciences naturelles*, vol. XV, pl. 20 et 21.

ces couches dans la partie inférieure de la gerbe, et, selon toute probabilité, le plus souvent presque entièrement verticales, sauf à proximité de la tête nord.

Cette verticalité des couches est un grand avantage pour le tunnel. Elle donne aux schistes une beaucoup plus grande résistance à l'écrasement, et permettrait d'adopter des revêtements d'une moindre épaisseur que ce ne serait le cas si les mêmes couches étaient horizontales.

La longueur totale de cette première section, percée au travers des schistes lustrés, serait d'environ 4 kilomètres. Il n'y a aucune différence dans nos estimations à ce sujet. Ce chiffre est un maximum qui ne serait pas dépassé, mais qui, suivant le plongement des couches, plus ou moins vertical, à la limite sud, au niveau du tunnel, pourrait se trouver quelque peu diminué.

Section centrale.

La section centrale du tunnel serait entièrement comprise dans les schistes cristallins feuilletés, très variés et irrégulièrement entremêlés, qui ne présentent pas de différences importantes au point de vue technique.

Nous avons constaté au moins sept bancs calcaires, interstratifiés avec ces schistes cristallins, lesquels varient de 20 à 50 mètres d'épaisseur chacun et dont la puissance totale doit être de 300 mètres au moins. Plusieurs sont des *dolomies* assez tendres, comme les deux assises constatées sur le sentier de Eisten à Unterstaffel, qui ne sont séparées l'une de l'autre que par une centaine de mètres de gneiss. Elles équivalent pour la dureté aux dolomies d'Airolo ¹. D'autres sont des *marbres saccharoïdes*, passant au *cipolin*, comme le banc calcaire du pont de la Saltine, sous Bérisal, et celui de Casparione, au-dessus de Campo, que traverse la Cherasca. Ces roches calcaires correspondent tout à fait, au point de vue technique, au marbre cristallin trouvé dans le tunnel du Gothard sous Altkirch (Andermatt), dans lequel le percement a eu son maximum d'avancement ².

Voici les endroits où nous avons constaté des affleurements de ces bancs calcaires, à peu près sur l'axe du tunnel (Pl. 1):

¹ Echantillons nos 4 et 8 de la série sud des roches rencontrées au Gothard.

Echantillons nos 45, 47, 48 et 51 des roches du Gothard, *série nord*.

1° A Unterstaffel, deux bancs dolomitiques qui commencent cette section centrale et ont ensemble de 80 à 100 mètres d'épaisseur. Nous avons constaté en ce point la coupe suivante, allant du nord au sud :

- a) Schistes lustrés, variété calschistes micacés.
- b) Dolomie saccharoïde, circa 40 mètres.
- c) Gneiss, de 60 à 80 mètres.
- d) Dolomie saccharoïde, circa 40 mètres.
- e) Complexe de 40 à 60 mètres de micaschiste dolomitifère, dolomie micacée, schistes minacés et cipolin.
- f) Gneiss.

2° Au pont de la Saltine, sous Bérissal, banc calcaire non loin de la route, au bord du torrent, que nous avons retrouvé plus haut intercalé au milieu des gneiss, lorsque nous traversions de Unterstaffel au Steinenthal. Entre deux, dans la forêt, sous les huttes, ce marbre est accompagné d'un lambeau de micaschiste calcaire, ressemblant exactement à certaines variétés de schistes lustrés.

3° Au fond du cirque de Diveglia, au pied de la pointe d'Avrona, où nous avons observé en 1877 deux bancs calcaires ayant ensemble environ 35 mètres. Nous ne les avons pas revus cette année en descendant des passages d'Avrona et de la Forchetta. Ils étaient sans doute cachés sous les éboulis du bas de la côte.

4° Vis-à-vis de Camporavero, sur la rive droite du ruisseau de Vîno, où se trouve un fort gisement de dolomie saccharoïde jaunâtre, avec intercalations de micaschistes plus ou moins calcari-fères. Ce gisement est marqué sur la carte de Gerlach comme croisant la Cherasca et se continuant du côté de Ciamporino.

5° A Casparione, sur Campo, se voit la bande que nous avons déjà étudiée en 1877, et qui mesure au moins 30 mètres. C'est très probablement ce même banc qui se retrouve vis-à-vis, au sommet du Teggiolo, et qui, de là, se continue à l'ouest jusqu'à la caserne n° 8 de la route du Simplon, comme cela est marqué sur la carte géologique de Gerlach.

6° Au-dessus de Prevalesco, au pied nord du Teggiolo, nous avons trouvé un grand nombre de blocs éboulés de calcaire et de dolomie saccharoïdes; ceux-ci ne paraissaient pas pouvoir provenir du sommet du Teggiolo, mais bien d'une paroi inférieure qui dominait le point où nous nous trouvions. Cela indi-

querait donc une nouvelle bande calcaire encore inférieure aux précédentes, mais qui ne serait pas visible du côté de Campo, où elle doit passer sous les alluvions de la vallée, comme l'indique notre profil.

Parmi les schistes cristallins qui constituent le sol de cette section du tunnel, les plus tendres sont les micaschistes, plus ou moins *calcarifères* ou *granatifères*, ainsi que d'autres schistes feuilletés, *sériciteux* ou *chloriteux*, qui ont leurs analogues de même nom dans le tunnel du Gothard ¹.

D'autres, au contraire, sont un peu plus résistants et tenaces, comme les *gneiss schisteux* qui ont leurs analogues dans le *Sellagneiss* du Gothard ² et les *schistes amphiboliques*, tout à fait semblables aux *Hornblendeschiefer* ³.

Les gneiss schisteux sont assez variés, depuis les types glandulaires (*Augengneiss*) jusqu'à ceux qui se distinguent à peine des micaschistes. Leur dureté ne sera pas toujours la même, et en général bien moindre que celle des gneiss granitoïdes. Les schistes amphiboliques sont souvent très tenaces, et constitueront sans doute les parties les plus dures de cette section centrale, mais ils ont en somme peu d'épaisseur, et ne forment guère que des intercalations accidentelles au milieu de leurs congénères.

Ces divers schistes cristallins feuilletés sont si variables d'aspect et de distribution et se répètent si souvent sans régularité apparente, qu'il nous serait tout à fait impossible d'estimer même approximativement l'espace que chacun d'eux pourrait occuper dans le tunnel, et cela d'autant plus que nous ne sommes pas encore bien fixés sur leurs allures dans l'intérieur de la montagne. Du reste, au point de vue technique, cela n'a pas grande importance, car, à part quelques bancs exceptionnels plus durs, ce grand ensemble présente toujours à peu de chose près la même consistance.

La stratification de ces schistes est, en général, assez uniforme, et leur plongement presque toujours dirigé au N-O. Les

¹ *Glimmerschiefer* : Echantillons n^{os} 19, 21, 23 et 24, *série sud* ; *Kalkglimmerschiefer* : Echantillons n^o 57, *série sud* ; n^{os} 50 et 53, *série nord*. *Sericitschiefer* : Echantillons n^{os} 65, 68, 69, 70 et 71, *série nord*.

² Echantillons n^{os} 140 à 150, *série sud*.

³ Echantillons n^{os} 26, 28, *série sud* ; n^o 119 b, *série nord*.

gneiss depuis la dolomie d'Unterstaffel jusqu'à Steinenthal, ont une inclinaison très forte, d'au moins 50° au N-O. Sur la rive gauche de la Saltine, en amont de Bérisal, au passage du second affluent, nous avons constaté des schistes amphiboliques presque verticaux. Un peu plus au sud ces mêmes schistes ne plongent plus que de 38° au N-O. Plus loin, dans la même direction, ce sont des micaschistes très variés, dont l'inclinaison est de plus en plus faible à mesure qu'on s'élève contre l'arête d'Avrona, d'abord 26°, puis sous le glacier 15° seulement, toujours au N-O (Pl. 1).

La seule partie de cette section centrale où nous ayons constaté un plongement inverse, est précisément l'arête culminante de Avrona-Wasenhorn. Au col même d'Avrona, l'inclinaison est de 30° au S-E, puis, sur le revers sud, elle devient plus forte, et atteint 75°. A la descente du col, on voit les schistes amphiboliques, gneiss, etc., fortement contournés dans divers sens; puis les couches descendent à peu près parallèlement à la pente de la montagne et s'enfoncent sous les éboulis, qui empêchent de voir dans quel sens elles se recourbent plus bas. Cette observation, qui n'est pas sans importance au point de vue orographique, devra être contrôlée plus tard sur d'autres points de la chaîne, pour voir si le repli est local, ou s'il se continue tout le long de l'arête. Nous n'avons rien vu de semblable jusqu'ici, au N-E de la pointe d'Avrona, pas plus cette année qu'en 1877.

Plus bas, le plongement N-O recommence. D'abord des schistes amphiboliques inclinés de 10° seulement, recouvrant des gneiss gris, à plongement un peu plus accentué, qui forment tout ce côté du cirque de Diveglia, et constituent dans cette direction le soubassement du Monte-Leone. Au-delà de Camporavero, sur la rive droite du ruisseau de Vino, alternance de bancs dolomitiques et de micaschistes, plongeant de 20° à 25° au N-O. Plus bas, sur le chemin de Nembro, l'inclinaison s'accroît jusqu'à 30°, dans les micaschistes intercalés de schistes amphiboliques, et jusqu'à 35° dans le marbre saccharoïde de Casparione, lequel recouvre encore 200 mètres environ de micaschistes, avec intercalation de gneiss glandulaire (*Augengneiss*).

Cette grande variation d'inclinaison, le plongement inverse au passage d'Avrona, la répétition multiple des mêmes roches, et en particulier des bancs calcaires, etc., ont fait penser à une partie des membres de l'expertise que nous ne serions pas ici en

présence d'une superposition continue, mais de plis fortement déjetés au S-E, qui simuleraient seulement une superposition régulière.

Cette idée avait déjà été suggérée dans la notice géologique sur le *Simplon*, publiée par l'un de nous en 1878¹.

Les nouvelles observations de cette année sont venues renforcer cette manière de voir, qui n'était au premier abord qu'une simple hypothèse, mais qui tend dès lors à prendre plus de consistance. Pendant un moment d'éclaircie, quelques-uns de nous ont pu observer à la lunette la paroi Est du Monte-Leone qui leur a paru présenter de semblables plis déjetés, indiqués par la répétition des mêmes couches plus ou moins convergeantes ou divergeantes. C'est ce que M. Taramelli a représenté par son croquis et M. Renevier par la coupe hypothétique du Monte-Leone, jointe à son profil général théorique.

Mais nous sommes loin d'être unanimes sur cette question de plissement. M. Lory repousse absolument cette idée et croit à une superposition continue réelle. M. Heim admet la possibilité de plissements, mais sans être assuré de leur réalité. MM. Taramelli et Renevier sont l'un et l'autre persuadés qu'il doit exister de semblables plis, dans cette région centrale aussi bien que sur le parcours de la section septentrionale, mais ils s'en représentent les allures d'une manière différente, comme le font voir leurs profils respectifs. Il est évident qu'une question aussi compliquée ne saurait être résolue que par une étude prolongée et approfondie de la contrée.

Heureusement que c'est là une question essentiellement scientifique, qui n'a qu'une importance secondaire au point de vue technique. Sa solution ne peut influer, en effet, que sur le plus ou moins d'inclinaison suivant laquelle les schistes cristallins seront rencontrés dans le tunnel, et très légèrement sur la longueur totale de cette section centrale, mais en aucune manière sur la nature et la consistance des terrains traversés. Or ces schistes cristallins ont tous suffisamment de solidité pour qu'il importe peu sous quel angle le tunnel les coupera. Ce sont, en somme, d'entre les roches siliceuses cristallines, les types les plus favorables au percement, ni trop durs ni trop tendres, intermédiaires sous ce rapport entre les roches des sections nord et sud.

¹ RENEVIER. *Bull. Soc. vaud. sc. nat.*, vol. XV, p. 300.

Quant aux infiltrations permanentes, elles sont peu à craindre dans cette section centrale, en raison, soit de la nature des roches, soit de la grande profondeur du tunnel, soit enfin de l'écoulement facile des eaux superficielles.

La longueur totale de cette section centrale serait d'environ 9 à 9 $\frac{1}{2}$ kilomètres.

Section méridionale.

La troisième section, qui commencerait un peu avant le *coude* du tunnel, près de Campo, et irait jusqu'à la sortie sud, serait encore comprise tout entière dans des roches siliceuses cristallines, partiellement plus massives et plus dures que les schistes de la section centrale. C'est ici que nos observations de cet été nous amènent à un résultat un peu différent de celui que nous avions précédemment annoncé.

Dans nos rapports de 1877 et 1878, nous avons considéré cette section méridionale du tunnel comme devant traverser uniquement le gneiss granitoïde que Gerlach a désigné sous le nom de *gneiss d'Antigorio*. Nous admettions que ce gneiss formait une large voûte, ou anticlinale régulière, surmontée, de droite et de gauche, par les schistes cristallins feuilletés contenant vers leur base la bande inférieure de marbre saccharoïde ¹.

Cette année, en suivant le cours de la Cherasca, nous avons constaté, au-dessous de l'épaisse masse des *gneiss d'Antigorio*, de nouveaux *schistes micacés* feuilletés, plus ou moins calcari-fères, qui forment toute la partie encaissée du cours inférieur de la Cherasca et s'étendent jusqu'aux environs de Varzo. Ces schistes, il est vrai, avaient déjà été figurés par Gerlach dans sa carte géologique des Alpes pennines, mais comme les tracés que nous avons précédemment étudiés devaient déboucher en amont d'Iselle, nous n'avions pas eu l'idée d'aller chercher des documents dans le bas de la vallée de la Cherasca. Encore maintenant il nous paraît fort douteux qu'avec les tracés de 1877 de la Compagnie du Simplon, le tunnel eût atteint ces micaschistes inférieurs; tout au plus les eût-il effleurés.

Mais il en est tout autrement du tracé coudé de 1882, qui a servi de base à nos dernières études. Celui-ci passant presque sous la Punta del Teggiolo, à moins de deux kilomètres du thalweg de la Cherasca, et à un niveau d'une soixantaine de mètres

¹ Voir pl. 20 et 21 du *Bull. Soc. vaud. sc. nat.*, vol. XV.

plus inférieur, rencontrerait probablement ces schistes micacés inférieurs dans le centre de la voûte, sur un parcours plus ou moins long. Pour déterminer la longueur probable de ce parcours souterrain, il nous faudrait connaître exactement le niveau où cessent les gneiss granitoïdes dits d'Antigorio, et où commencent les schistes feuilletés inférieurs. Malheureusement il y a sur ce point une divergence dans nos notes.

Nous avons parcouru ensemble la rive droite de la Cherasca, de Vinia jusqu'au pont de San-Bernardo, sous Gebbo. Jusquelà, la vallée est entièrement creusée dans le gneiss d'Antigorio, et forme une gorge resserrée, mais à partir de ce point elle s'élargit du côté d'aval. Là M. Heim quitta ses collègues pour explorer une paroi de rocher en remontant sur la rive gauche, tandis que nous suivions du côté de Varzo.

Dans ce parcours, les trois experts restants, MM. Lory, Taramelli et Renevier, n'ont plus vu trace de gneiss d'Antigorio sur leur chemin. Il leur a paru que les deux parois formées de ce gneiss s'écartaient de droite et de gauche, pour aller passer d'une part au-dessus de Varzo, de l'autre en dessus de Trasquera. En dessous de ces parois se trouvaient des pentes douces, gazonnées et cultivées, qui ne montraient pas d'affleurement de roc en place. Un peu plus bas, vers Maulone, en dessous du second pont indiqué sur la carte (actuellement détruit), la Cherasca commence à creuser son lit en gorge profonde dans une roche assez homogène, que nous rencontrâmes bientôt aussi au bord du chemin et que nous reconnûmes pour des schistes micacés plus ou moins calcarifères, tendres et feuilletés. Nous en conclûmes tous trois que la limite inférieure du gneiss d'Antigorio se trouvait à peu près au pont de San-Bernardo, et que tout ce qui était en dessous appartenait aux micaschistes inférieurs plus tendres. Plus tard, nous pûmes constater que c'est bien ainsi que le représente Gerlach sur sa carte. — M. Heim, au contraire, qui nous rejoignit ensuite en parcourant ce même chemin, croit avoir vu le gneiss d'Antigorio en place, beaucoup plus loin en aval, à peu de distance de l'affleurement des schistes micacés, au bord du chemin, avec un banc de dolomie de 1 mètre d'épaisseur recouvrant ces derniers. Il se trouve ainsi conduit à placer beaucoup plus bas que nous la limite inférieure du gneiss d'Antigorio, soit à l'origine des gorges inférieures de la Cherasca.

Ce litige ne pourra être tranché que par de nouvelles études

sur les lieux, que la saison ne nous permet pas d'entreprendre maintenant. Sa solution présenterait un certain intérêt pour la perforation du tunnel, vu la consistance bien différente des deux roches superposées.

En construisant une coupe transversale, presque perpendiculaire à l'axe du tunnel, passant par le pont de San-Bernardo et l'arête du Teggiolo, on peut se rendre compte de la position qu'occuperaient sur l'axe du tunnel les micaschistes inférieurs dans l'une et l'autre hypothèse. Dans le premier cas, ils formeraient une large voûte, dépassant le niveau du tunnel et percée par lui sur une longueur de 3 à 3 1/2, peut-être 4 kilomètres, comme cela est représenté sur notre profil (Pl. 1). Dans le second cas, la voûte de micaschistes feuilletés viendrait à peine affleurer dans le tunnel, ou n'y serait rencontrée que sur une courte distance, ainsi que l'a représenté M. Heim dans son profil particulier. La section méridionale du tunnel serait dans ce cas comprise presque exclusivement dans le gneiss d'Antigorio.

Ces deux roches sont fort différentes de nature minéralogique et surtout de dureté. Les *micaschistes inférieurs*, de grain très uniforme, régulièrement feuilletés, en général plus ou moins calcaireux, seraient très favorables à la perforation. Ils seraient certainement moins durs à percer que la plupart des roches de la section centrale, mais probablement un peu plus résistants que les schistes lustrés de la première section.

Le *gneiss d'Antigorio* est, au contraire, une roche beaucoup plus dure. Pour sa résistance à la perforation il pourrait être comparé au gneiss granitoïde du Gothard (*Granit-gneiss*¹). Il serait, nous paraît-il, un peu moins dur que ce dernier. C'est un gneiss à cristallinité bien accusée, peu schistoïde, plutôt tabulaire en bancs épais, avec quelques intercalations de parties plus feuilletées. Il est de couleur claire, riche en feldspath blanc (*Orthose*) et en quartz finement grenu; il contient habituellement deux espèces de mica, blanc et noir, et accessoirement du Sphène (*Titanit*).

L'une et l'autre de ces roches sont d'ailleurs assez compactes et solides pour ne point nécessiter de forts revêtements. Le gneiss d'Antigorio serait de toutes les roches du Simplon, celle qui en aurait le moins besoin.

¹ Échantillons n^{os} 8, 15, 17, 26 de la série nord du Gothard.

Au pont de San-Bernardo, près de Gebbo, nous avons constaté un petit lambeau de *gypse*, pulvérulent sur un point, cristallin et micacé sur un autre. La question doit naturellement se poser : Ce gypse forme-t-il une couche constante, au contact du micaschiste et du gneiss d'Antigorio, et par conséquent se retrouverait-il dans le tunnel ? ou n'existe-t-il là que par l'effet d'une cause tout à fait locale ? La faiblesse de ce lambeau de gypse, et l'absence dans le voisinage d'autres affleurements semblables, pourraient faire pencher pour la seconde alternative.

L'un de nous, M. Heim, est très affirmatif à ce sujet. Dans la petite exploration qu'il a faite seul, sur la rive gauche de la Cherasca, il s'est, dit-il, convaincu que ce lambeau de gypse doit être le résultat d'une altération locale de la roche. Nous lui laissons la parole pour l'exposé de ses observations individuelles sur la berge Est de la Cherasca, en amont du pont San-Bernardo.

Cette paroi de rochers, qui de loin déjà nous avait frappés par sa teinte blanchâtre avec taches de rouille, est formée de gneiss d'Antigorio, assez fortement altéré sur place. Ce gneiss est fendillé dans tous les sens, se brise facilement, et sur quelques points il est décomposé en kaolin friable, contenant des grains de quartz. Au pied du talus de ses détritiques, on voit sourdre un certain nombre de sources, qui s'écoulent directement dans la Cherasca.

Dans le haut de la paroi, en dessous du village de Fontana, on voit le gneiss, de plus en plus micacé, passer au *micaschiste granatifère*, entremêlé de schistes amphiboliques. Celui-ci forme un ensemble de couches presque horizontales, de couleur foncée, contrastant avec le gneiss altéré qui le supporte. Ce complexe, qui ne présente aucune trace d'altération, paraît régulièrement interstratifié au milieu du gneiss d'Antigorio.

» La partie altérée du gneiss a environ cent mètres de longueur, parallèlement à la Cherasca. Au-delà, en amont, on voit les mêmes bancs de gneiss reprendre petit à petit leur texture normale ; ce gneiss partiellement kaolinisé passe graduellement au gneiss solide. Sur la rive droite de la Cherasca, le gneiss reste intact ; je n'y ai trouvé aucune trace de cette décomposition, sauf toutefois le lambeau gypseux, tout près du pont. Ce dernier se présente donc comme un *nid de gypse* à la base d'une masse de gneiss altéré, qui peut atteindre 100 à 120

mètres d'épaisseur à partir du niveau de la Cherasca. Je n'ai aucun doute que ce gypse ne résulte de la même action de décomposition locale, qui peut être attribuée à la filtration de l'eau des sources susmentionnées.

» Il m'est impossible de prévoir quelles sont les dimensions souterraines de la masse de gneiss en décomposition, ni s'il peut en exister d'autres masses semblables, entièrement cachées sous le sol. En aval du pont San-Bernardo, je n'en ai observé aucune trace.

La question de savoir si le tunnel risquerait d'atteindre ce gneiss en décomposition, a naturellement une grande importance technique. Si cela était, le cas serait encore plus grave que si le gypse de San-Bernardo n'était que l'affleurement d'une couche, se prolongeant jusque sur l'axe du tunnel. Si le cas devait se présenter, il faudrait voûter le plus rapidement possible les parties altérées, par de très fortes maçonneries en anneaux fermés, c'est-à-dire avec radier, pour éviter le glissement plastique de la masse, qui une fois commencé est bien plus difficile à vaincre. C'est pourquoi nous avons envisagé très sérieusement cette éventualité et *nous pouvons dire qu'elle nous paraît excessivement improbable.*

En effet, sur la rive droite de la Cherasca, nous avons tous pu observer qu'à une très faible distance de la rivière, le gneiss est parfaitement intact et normal. Or le tunnel passerait à 1700 mètres au moins au S-O du pont de San-Bernardo, et à 400 mètres environ en contrebas de celui-ci. Le tunnel ne peut donc pas rencontrer la petite masse de gneiss altéré que M. Heim a étudiée sur la rive gauche de la rivière.

Mais pourrait-il peut-être se rencontrer sur l'axe même du tunnel d'autres masses analogues, de gneiss en voie de décomposition? Cette hypothèse nous paraît en dehors de toute prévision raisonnable.

En effet, la décomposition locale du gneiss à l'est du pont San-Bernardo est attribuée, par M. Heim, à la filtration des eaux, qui jaillissent en plusieurs sources au bas de la berge. Or, sur l'axe du tunnel, ainsi qu'à plus d'un kilomètre à l'orient, et indéfiniment à l'occident, le gneiss d'Antigorio forme une voûte régulière massive qui doit intercepter toute infiltration, sans compter que le Teggiolo doit être un massif très sec. Ajoutons que ni en 1877, ni en 1882 nous n'avons observé, sur aucun autre point du gneiss d'Antigorio, des traces d'altération.

Il n'est donc nullement question d'une tendance de cette roche à la décomposition, mais bien d'une altération toute locale, due à des causes qu'on ne peut pas s'attendre à rencontrer sur l'axe du tunnel.

Enfin à supposer que l'on vînt à trouver dans le tunnel quelque partie de gneiss altéré, ou que le gypse du pont San-Bernardo dût s'y rencontrer, formant une couche régulière à la base du gneiss d'Antigorio, il n'y aurait pas à s'en effrayer; car la disposition même des couches est une sérieuse garantie. La voûte régulière de gneiss d'Antigorio, en bancs massifs d'une épaisseur totale d'au moins mille mètres, doit évidemment diminuer beaucoup la poussée du sol. D'autre part la montagne du Teggiolo est très sèche, et les infiltrations sont peu à craindre. Si l'un ou l'autre cas se présentait, il n'y aurait donc à contenir que la petite étendue de gneiss altéré, ou une faible couche de gypse, obliquement coupée. Pour cela il suffirait de quelques anneaux d'un revêtement plus fort, rapidement maçonnés.

La longueur totale de cette section méridionale du tunnel serait, d'après nos estimations, de 6 à 6 $\frac{1}{2}$ kilomètres, qui, si la manière de voir de M. Heim est la vraie, pourraient être presque intégralement percés au travers du gneiss d'Antigorio; tandis que, suivant l'avis des trois autres experts, cette longueur se décomposerait, comme le représente notre profil (Pl. 1), en 2 $\frac{1}{2}$ à 3 kilomètres de *gneiss d'Antigorio*, et 3 $\frac{1}{2}$ à 4 kilomètres de *micaschistes inférieurs* feuilletés.

Question thermique.

L'on ne possède pas encore un nombre suffisant d'observations sur la température souterraine des régions de montagne pour nous permettre de déterminer d'avance d'une manière exacte le degré de chaleur qu'on rencontre sur les différents points d'un tunnel à construire.

Après l'étude attentive et approfondie des observations y relatives, de la bibliographie du sujet, et des autres documents inédits que nous avons eu à notre portée, nous avons acquis la conviction que les nombreuses tentatives, qui ont été faites jusqu'ici, pour déterminer exactement par avance la température du sol dans la profondeur, reposent sur des bases trop incertaines pour inspirer confiance; que parfois même leurs résultats

sont erronés. En effet, la température n'est pas une fonction de la profondeur seulement, ni de la plus courte distance de la surface; mais bien plutôt de la forme générale du relief du sol, combinée avec les conditions de conductibilité des roches qui composent la montagne.

En outre les conditions de la température du sol superficiel pour les diverses altitudes au-dessus de la mer, sont encore très mal connues. Or ces températures du sol superficiel devraient servir de point de départ à l'estimation des températures profondes. D'autre part, les conditions de propagation de la chaleur dans les roches schisteuses sont différentes suivant la direction de la schistosité. Enfin les infiltrations aqueuses influent aussi sur la température de la roche. L'influence de ces divers facteurs n'est pas encore suffisamment étudiée.

A toutes ces raisons générales qui rendent déjà notre tâche très difficile, il faut encore ajouter l'extrême inexactitude, sur territoire italien, de la carte topographique au $\frac{1}{50\,000}$. Dans de pareilles conditions il est impossible de déterminer d'une manière exacte, soit la moyenne distance, soit la plus courte distance, d'un point du tunnel à la superficie.

Toutefois, si nous ne croyons pas possible de baser sur ces données des calculs exacts, nous pouvons néanmoins estimer la température probable qu'on rencontrera dans le tunnel du Simplon, avec une erreur possible de $\pm 3^\circ$ centigrades, cela grâce aux observations faites au tunnel du Mont-Cenis et surtout à celui du Gothard. Ceci est d'autant plus réalisable que les roches du Simplon sont, comme nous venons de le voir, très semblables à celles du Gothard, et devront avoir, par conséquent, beaucoup d'analogie au point de vue de leur conductibilité.

Les conditions thermiques du tunnel du Simplon seront sans doute plus défavorables que celles du Gothard, où la température rencontrée a atteint le maximum de $30^{\circ},75$ centigrades. Toutefois si l'on choisit le tracé coudé, qui nous a été soumis en dernier lieu (août 1882, longueur 20 kilomètres), ces conditions se trouvent moins défavorables qu'on ne l'avait prétendu, et en tout cas bien meilleures que dans le projet du Mont-Blanc, où, sur une longueur de 3 kilomètres, on dépasserait selon toute probabilité le chiffre de 50° centigrades ¹.

¹ Voir le rapport de MM. Heim et Renevier, de décembre 1881, p. 43 du mémoire technique.

Températures probables dans le Tunnel du Simplon,
par A. HEIM

DISTANCES dès la TÊTE NORD	Projet de la Compagnie du Simplon. Tracé haut de 1877 long ^r 18,507 ^m	1 ^{re} Etude 1881 Tunnel droit long ^r 19,639 ^m	2 ^e Etude 1882 Tunnel coudé long ^r 19,795 ^m	3 ^e Etude Août 1882 Tunnel coudé long ^r 20,000 ^m
à l'entrée	9°,5	9°,5	9°,5	9°,5
à 1 kilomètre	—	20°	—	20°
2	20°	—	—	—
3	—	28°	29°	30°
4	—	—	—	33°
5	—	30°	—	—
6	30°	—	—	32°
7	—	—	—	—
8	40°	35°	—	—
9	—	38°	37°,5	34° à 35°
10	—	—	—	34° à 35°
11	48°	38° à 39°	37°	34° à 35°
12	—	—	—	33°
13	—	—	—	—
14	38°	34°	32°	30°
15	—	33°	—	—
16	30°	—	—	32°
17	—	29° à 30°	—	30°
18	18° à 20°	27° à 30°	—	27° à 30°
19	—	18° à 20°	18° à 20°	18° à 20°
à la sortie.	10°	10°	10°	10°

En cherchant, par comparaison avec les résultats obtenus dans les tunnels du Mont-Cenis et du Gothard, à évaluer les températures que l'on rencontrerait dans le tunnel du Simplon, suivant les divers tracés soumis à notre examen, nous trouvons des différences assez considérables, qui résultent tout naturellement des formes orographiques du sol sur la verticale de ces

tracés. Pour plusieurs de ceux-ci on trouve un maximum considérable, mais sur une faible longueur seulement; pour le dernier au contraire (tracé coudé d'août 1882), on peut constater avec évidence une répartition plus uniforme de la température, avec un chiffre maximum beaucoup moins élevé.

L'un de nous, le professeur Heim, a résumé ces résultats dans le tableau ci-dessus, et a représenté graphiquement la disposition probable des chthonisothermes, sur deux coupes longitudinales et deux coupes transversales annexées à ce rapport (voir Pl. 2 à 4).

L'incertitude des chiffres, pouvant aller jusqu'à $\pm 3^\circ$, se rapporte à la détermination de la température dans l'un quelconque des projets, mais elle se trouve éliminée si l'on compare entr'eux ces divers projets, qui sont dans des conditions semblables. Il en résulte que si les chiffres donnés, de même que les courbes des planches annexées, ne sont pas justes d'une manière *absolue*, ils permettent pourtant une comparaison *quasi exacte* des divers projets en présence.

Il n'y aurait aucune utilité, et cela nous entraînerait trop loin, de faire une énumération détaillée de toutes les raisons et appréciations comparatives, qui nous font envisager ces résultats comme de beaucoup les plus probables, et même comme s'éloignant fort peu de la réalité, comparés à d'autres calculs antérieurs. Nous nous abstenons donc de faire cette énumération, et nous contentons de résumer ainsi qu'il suit l'analyse comparative des résultats numériques et graphiques ci-dessus mentionnés.

De tous les tracés proposés jusqu'ici pour le tunnel du Simplon, le plus favorable, au point de vue thermique, est incontestablement celui d'août 1882, c'est-à-dire le tracé coudé de 20 kilomètres. Avec ce tracé, le maximum de température ne paraît pas devoir dépasser 35° centigrades. Ce maximum aurait été de 4° plus élevé avec le tunnel droit (projet de 1881) et bien plus considérable encore avec les autres projets antérieurs, qui passaient plus directement sous le grand massif du Monte-Leone. L'avantage du tracé coudé d'août 1882 vient de ce que ce dernier bénéficie, d'un côté, du thalweg de la Ganther ou Saltine supérieure, de l'autre côté, de la grande vallée de la Cherasca, avec son magnifique cirque de l'Alpe Diveglia.

Ce tracé permettrait, en outre, de forer deux puits de ventilation. Par ce moyen et par d'autres procédés artificiels, il

nous paraît hors de doute qu'on pourrait abaisser encore sensiblement la température maximum à l'intérieur du tunnel. Si, de plus, on y introduisait fréquemment des wagons de glace, on parviendrait, non-seulement à rafraîchir l'air intérieur de la galerie, mais surtout à le dessécher, grâce à la propriété que possède la glace, de condenser les vapeurs, à sa surface.

Dans ces conditions, et avec les précautions dictées par l'expérience, il est à peu près certain que, malgré les quatre à cinq degrés d'excès de température naturelle, le travail pourrait devenir plus facile, dans le tunnel du Simplon, qu'il ne l'a été dans celui du Gothard.

Avantages du tracé coudé.

Le nouveau tracé d'août 1882 (longueur 20 kilomètres) nous paraît, quoique légèrement plus long, bien supérieur aux divers projets qui nous ont été précédemment soumis.

Il leur est préférable au point de vue géologique, surtout par les raisons suivantes :

a) Passant autant que possible sous les vallées, et évitant le massif du Monte-Leone, il présenterait des conditions thermiques bien plus favorables, dans les limites desquelles le travail humain est parfaitement praticable.

b) La température générale du tunnel pourrait être encore abaissée artificiellement, mieux que dans aucun autre tracé, par le moyen de deux puits d'aération, qui réduiraient le tronçon central, compris entr'eux, à 9 ou même 8 kilomètres environ.

c) Il présente le maximum de garanties possibles, relativement à la rencontre éventuelle d'amas gypseux. Il évite certainement le gypse des berges du Rhône, sous Termen. Il évite peut-être le pointement gypseux des gorges de la Saltine, sous Lingwurm, ou, s'il le rencontre, ce serait dans des conditions infiniment moins défavorables au point de vue des infiltrations. Il évite l'affleurement gypseux de Grund. Enfin s'il venait à rencontrer le gypse du pont San-Bernardo, ce serait encore dans les conditions les meilleures, tandis que les deux tracés, haut et bas, de 1877, de la Compagnie du Simplon, risqueraient de rencontrer précisément le sommet de la voûte des micaschistes inférieurs, et par conséquent d'avoir un beaucoup plus long trajet dans ce gypse, si toutefois celui-ci forme un banc continu sous le Teggiolo.

d) La traversée du *gneiss d'Antigorio*, roche la plus dure et la plus résistante au percement, se trouverait sensiblement abrégée; elle serait probablement de 2 $\frac{1}{2}$ kilomètres environ, au lieu de 6, et le surplus serait remplacé par des schistes cristallins plus tendres à percer. Ceux-ci néanmoins seraient assez résistants pour qu'on n'ait pas à craindre des pressions trop considérables et par là des revêtements d'épaisseur exceptionnelle, surtout avec la voûte régulière de *gneiss compacte d'Antigorio* qui les recouvre.

e) Quant aux infiltrations ordinaires au travers des terrains non gypseux, les chances de les voir se produire sont à peu près les mêmes dans le projet coudé, que dans le tracé bas de 1877, c'est-à-dire bien plus favorables que pour le tracé haut (longueur 18,507 m.) de même date. Si le nouveau tracé suit autant que possible les *thalweg*, il le fait cependant à une profondeur qui varie de 625 à 1000 mètres, ce qui réduit singulièrement les chances d'infiltration. Au contraire dans sa partie nord, où la profondeur est bien moindre, il s'éloigne beaucoup de la *Sal-tine*, dont les infiltrations, au travers des schistes lustrés presque verticaux, eussent été à redouter.

Voilà quels nous paraissent être les avantages du nouveau tracé coudé. Quant à ses désavantages, sauf son petit excédent de longueur, nous n'en connaissons aucun.

Ligne d'accès sud.

A partir de la tête sud du tunnel, la voie ferrée suivrait la *Diveria*, sur l'une ou l'autre rive jusqu'aux environs de *Crevola*. Elle y serait constamment tracée soit sur le *gneiss d'Antigorio*, soit sur les éboulis de cette roche. Du reste les éboulis sont relativement peu nombreux sur les deux rives. Il serait difficile de rencontrer, au pied d'une haute paroi de rocher, des conditions plus favorables à la construction d'une ligne de chemin de fer, soit au point de vue des matériaux de maçonnerie qu'on trouve partout sur place, soit au point de vue de la sécurité. La roche est en effet si compacte, qu'il s'en détache très rarement des blocs.

A *Crevola* on retrouve, dans l'ordre renversé, la même série de terrains qu'à *Campo* et *Casparione*, savoir 2 à 300 mètres de schistes feuilletés, suivis des bancs de marbre saccharoïde exploités au bord de la route. Toutes ces couches plongent très

fortement au S-E (60° à 70°), et forment le jambage méridional de la grande voûte, ainsi que le représente notre profil (Pl. 1).

Au-delà se retrouvent les schistes feuilletés de l'Alpe Diveglia, mais plongeant toujours au S-E. C'est eux qui constituent tout le val Bognanco, où la ligne devrait faire un grand lacet si l'on adopte le tracé à faible pente.

Sur le revers méridional de cette vallée, la ligne est suspendue à flanc de coteau à une certaine hauteur, mais la roche est suffisamment solide pour que cette situation n'ait rien de redoutable, surtout si l'on considère la forte inclinaison des couches du côté du S-E, qui augmentera encore leur résistance. Partout, d'ailleurs, se trouvent d'excellents matériaux de maçonnerie, sans parler des intéressants gisements de serpentine, qui forment de grandes lentilles au milieu des schistes amphiboliques du fond de la vallée, et qui ont donné lieu à une active industrie.

Il en sera de même tout le long de la vallée d'Ossola jusqu'à Piedimulera, si l'on construit la ligne en écharpe le long de ce coteau. Les remarquables exploitations de dalles, qu'on observe sur ce parcours, montrent quelle est la solidité de ces schistes cristallins, même sur une faible épaisseur.

En somme, nous pouvons dire que la ligne d'accès sud n'offre aucune difficulté spéciale. Son exécution sera relativement si aisée, qu'on ne peut la comparer sous ce rapport ni à la ligne d'accès du Gothard, ni à celle du projet par le Mont-Blanc.

Tels sont, Messieurs, les résultats sommaires de l'étude dont vous nous aviez chargés. Nous pouvons les présenter comme entièrement favorables à la grande entreprise dont vous poursuivez la réalisation.

(Signé) ALBERT HEIM, professeur au Polytechnicum de Zurich.

CII. LORY, professeur à la Faculté des sciences de Grenoble.

T. TARAMELLI, professeur à l'Université de Pavie.

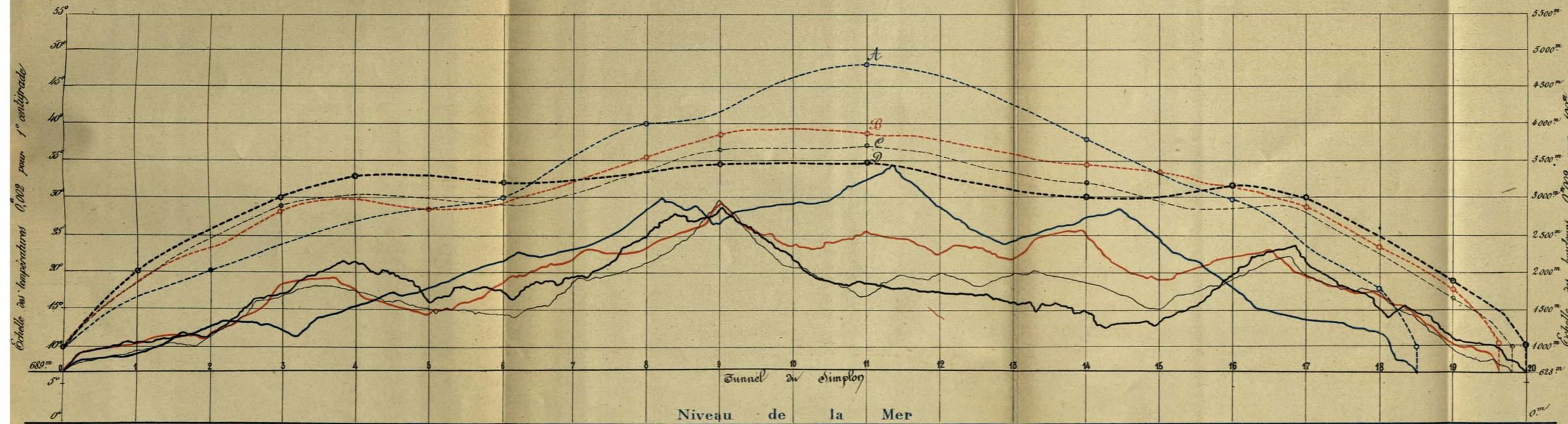
E. RENEVIER, professeur à la Faculté des sciences de Lausanne, — RAPPORTEUR.



PROFILS LONGITUDINAUX

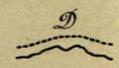
des divers tracés récents, avec les courbes thermiques probables

Echelle 1:50.000



Légende:

Les lignes continues représentent les profils du sol, les lignes interrompues donnent les courbes thermiques, suivant les 4 tracés:

-  A *Projet de la C^{ie} du Simplon 1878, (tracé haut).*
-  B *1^{re} étude nouvelle 1881, long^r 19.639^m.*
-  C *2^e étude nouvelle 1882, long^r 19.795^m.*
-  D *3^e étude nouvelle Clôit 1882, long^r 20.000^m.*

D'après le dessin original du prof. ALB. HEIM.

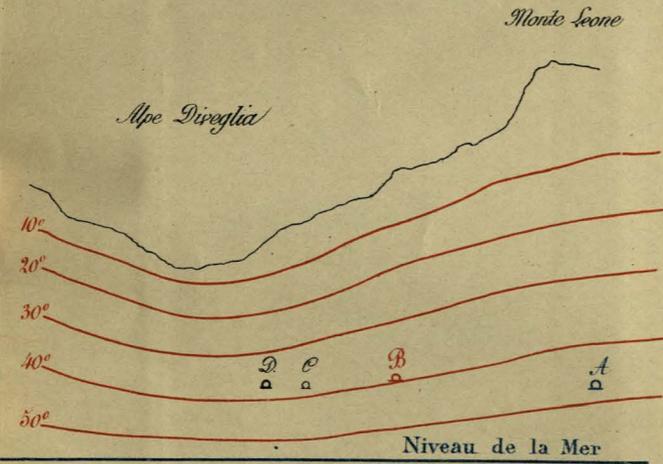
Imp. & Lith. J. Chappuis, Lausanne.

PROFILS TRANSVERSAUX

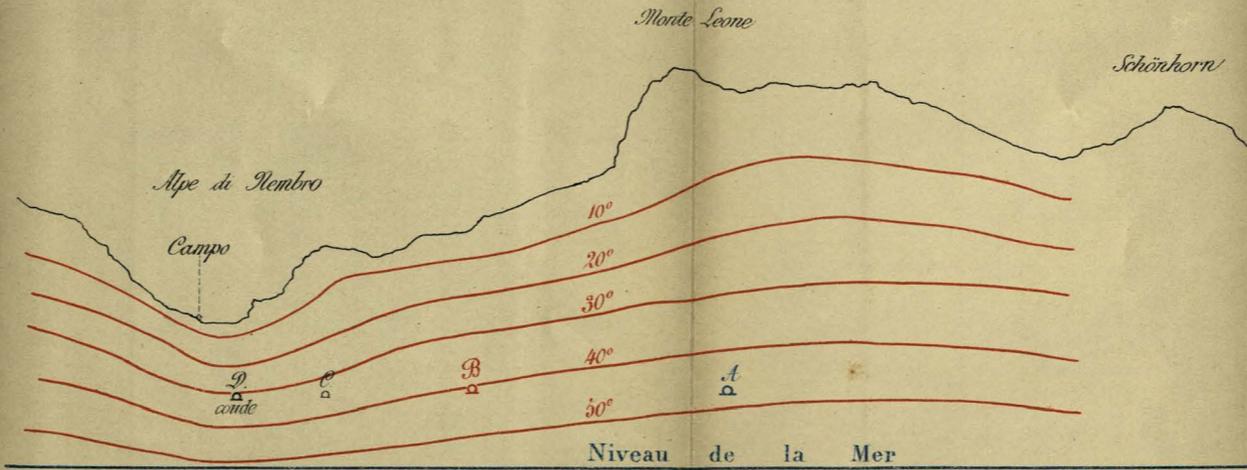
aux divers tracés, dans la direction du M^{ts} Leone, avec courbes isothermes
(températures maximales)

Echelle 1:50.000

Profil au Kilomètre 11.



Profil au Kilomètre 14. (coude)

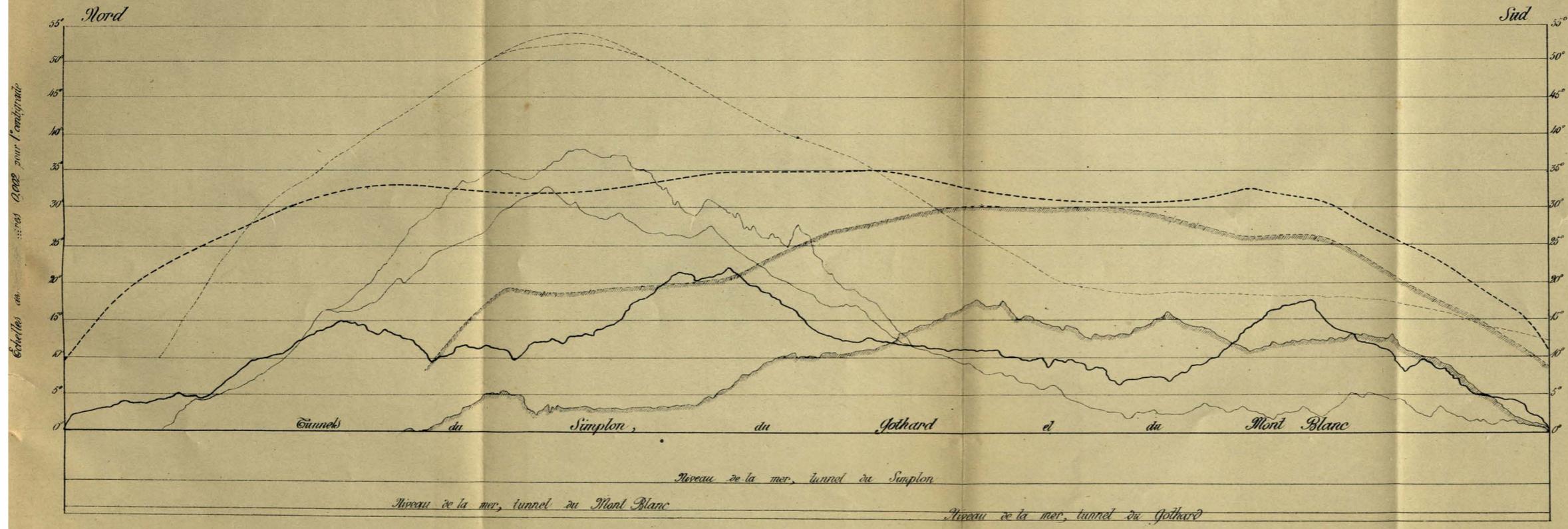


Légende.

- D* Emplacement du Tunnel suivant les 4 tracés.
- A* Projet de la C^{ie} du Simplon 1878, (tracé haut)
- B* 1^{re} étude nouvelle 1881, long^r 19.639^m
- C* 2^e étude nouvelle 1882, long^r 19.795^m
- D* 3^e étude nouvelle Août 1882, long^r 20.000^m

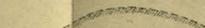
D'après le dessin original du prof. ALB. HEIM.

Echelle 1:50000



Echelle de 1:50000 pour l'altitude

Légende

-  Tunnel du Simplon, Projet d'Août 1882
long. 20.000^m
-  Tunnel du Mont-Blanc
long. 18.600^m
-  Tunnel du Gothard
long. 14.900^m

Echelle des hauteurs 0,002 pour 100^m

Le trait continu indique le profil du sol; le trait interrompu donne la température probable pour les tunnels du Simplon et du Mont-Blanc, et la température observée pour le tunnel du Gothard.

D'après le dessin original du prof. Alb. Heim.