

LES EAUX SOUTERRAINES
DU
TUNNEL DU SIMPLON

PAR
H. SCHARDT
Professeur de Géologie.

(Extrait de *La Géographie* du 15 février 1905.) (1)

Le vendredi 24 février 1905, à 7 heures du matin, les deux galeries Nord et Sud du tunnel du Simplon ont été enfin rejointes. Malgré tous les déboires et toutes les surprises de l'an passé, voici enfin percé cet énorme tunnel de 19 730 mètres en ligne droite. Au moment même où s'achève ce grandiose travail, *La Géographie* a demandé l'étude qu'on va lire à M. le professeur H. Schardt, géologue officiel, délégué aux travaux du percement du Simplon, qui depuis le commencement des travaux (au mois d'août 1898) a visité régulièrement la galerie Nord une fois par quinzaine et la galerie Sud une fois par mois, et qui a consigné toutes ses observations minutieuses, faites depuis cinq années, dans des rapports spéciaux, remis tous les trimestres au Conseil fédéral suisse.

Introduction.

Le massif du Simplon est composé de trois régions nettement distinctes. Sur le versant Nord se trouve la zone des schistes lustrés, qui atteint, sur le profil du tunnel, une largeur d'environ 4 kilomètres. Les montagnes constituées par ces terrains argilo-calcaires s'élèvent à plus de 2 000 mètres d'altitude. Les schistes lustrés sont, dans leur majeure

(1) Les clichés de cet article ont été obligeamment prêtés par *La Géographie*, de Paris.

partie, certainement d'âge jurassique et forment toute une série de replis écrasés, presque verticaux, entre lesquels percent des roches triasiques (calcaire dolomitique, anhydrite, quartzites, etc.). La zone centrale, large d'une dizaine de kilomètres, contre laquelle s'appuient les schistes lustrés, est formée de schistes cristallins et de gneiss schisteux et œillés, souvent en gros bancs (gneiss du Monte Leone). Ils constituent des sommets dépassant 3 000 mètres. Des intercalations de schistes calcaires, souvent grenatifères, de marbres et de calcaires dolomitiques avec gypse et quartzites schisteux, doivent être considérées comme étant des équivalents, plus métamorphiques, des schistes lustrés jurassiques et des terrains triasiques qui les accompagnent. Les alternances, presque concordantes, du gneiss et des roches en question doivent donc être expliquées par des replis écrasés et étirés, bien que tous ces terrains paraissent dessiner une

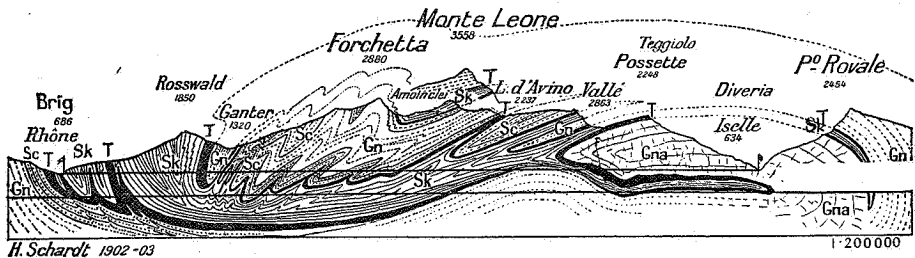


Fig. 1. — PROFIL GÉOLOGIQUE DU MASSIF DU SIMPLON, PAR H. SCHARDT (1902-1903).

Échelle : 1 200 000^e.

Sk. *Formation des schistes lustrés.* — Schistes argileux ou calcarifères. Schistes gris grenatifères, calcaires gris micacés et siliceux. *Jurassique*; — T. Calcaires dolomitiques, anhydrite, schistes chloriteux, arkose (quartzite). *Triasique*; — Sc. *Schistes cristallins.* Micaschistes souvent grenatifères, schistes amphiboliques, etc. *Paléozoïque? Trias?* — Gn. *Gneiss du Monte Leone.* Gneiss schisteux, gneiss œillé ou fibreux à deux micas en gros bancs. *Archéïque*; — Gna. *Gneiss d'Antigorio.* Gneiss massif granitoïde. *Terrain primitif.*

gigantesque voûte se moulant autour de la troisième zone, celle du gneiss d'Antigorio, qui en formerait le noyau. Cette dernière zone se développe sur tout le versant Sud du massif; la vallée de la Diveria y est entaillée très profondément, dans la région d'Iselle. On trouvera les détails tectoniques et stratigraphiques sur le Simplon dans une notice récente de l'auteur de ces lignes (1). Contrairement à l'apparence, le centre du massif du Simplon, sous le Monte Leone, n'est pas formé de gneiss. Le gneiss d'Antigorio n'est pas davantage le noyau central du Simplon, comme on

(1) *Note sur le profil géologique et la technique du massif du Simplon*, in *ELOGE GÉOLOGIQUE HELVÉTIQUE*, t. VIII, p. 173, 1904.

l'a cru pendant longtemps, mais il forme avec les grandes lames de gneiss de la partie médiane toute une série de plis culbutés, dont il n'est que l'un des plus profonds. Ces plis plongent avec leur front dans le vaste bassin des schistes lustrés. En conséquence, le tunnel, passant à l'altitude moyenne de 750 mètres, devait rencontrer dans sa partie centrale ce substratum de terrains triasiques et de schistes lustrés; ce qui se produisit, en effet, du côté de l'attaque Nord-Ouest à 9 400 mètres et, à l'attaque Sud-Est, à 6 830 mètres.

Traversant un massif d'une structure aussi compliquée et constitué de terrains aussi variés, ce tunnel, long de près de 20 kilomètres, devait amener des faits hydrologiques aussi importants que souvent inattendus. Le but de cette notice est d'en donner un court aperçu, car une description détaillée prendrait l'extension d'un volumineux mémoire. Le percement du tunnel du Simplon se fait, pour des motifs techniques, au moyen de deux galeries d'avancement distantes de 17 mètres d'axe à axe, mais dont l'une est ordinairement de 100-150 mètres en avance sur l'autre. C'est dans celle-ci que se sont produites naturellement le plus de venues d'eau, recoupées souvent par la seconde galerie, ce qui ne constitue pas de nouvelles sources. L'attaque Nord-Ouest, partant à 2 445 mètres au Nord-Est de Brigue, dans la vallée du Rhône, a rencontré, jusqu'à 10 379 mètres, 142 sources différentes dans la galerie I et 93 dans la galerie II. Celle du Sud-Est, ouverte à 700 mètres à l'Est du hameau d'Iselle, dans la vallée de la Diveria, n'en a fait jaillir que 96 jusqu'au point de rencontre de la galerie I et 76 dans la galerie II; mais c'est de ce côté que se sont produites les plus volumineuses entrées d'eau, ayant, de plus, une relation directe avec les cours d'eau de la surface.

Toutes les sources rencontrées ont été jaugées aussi bien que possible, le plus souvent par simple estimation; leur température a été mesurée immédiatement, et pendant quelque temps encore. Leur eau a été examinée chimiquement d'une manière sommaire (par voie hydrotimétrique); quelques-unes ont été soumises à une analyse complète.

Modes de jaillissement des sources.

Le jaillissement des sources volumineuses a été presque toujours en relation avec des fissures, le plus souvent avec des failles. Les sources de délit, liées au contact de deux terrains de perméabilité différente, étaient, cependant, les plus nombreuses, quoique généralement de faible volume. Il en résulte que la circulation des eaux souterraines dans les grandes profondeurs est étroitement liée à l'état de fissuration des roches; ce fait ressort déjà à suffisance des gîtes métallifères qui sont l'œuvre des sources thermales et qui suivent presque exclusivement les lithoclasses, ou rayonnent de celles-ci dans les délits des terrains adjacents. Les sources

les plus volumineuses sont issues presque sans exception de terrains solubles, des calcaires surtout. Plusieurs, et surtout les fortes venues d'eau, ont jailli avec une violence extrême par les joints du rocher, ou par les trous de la perforation.

Températures des sources et du rocher.

En étudiant la température des sources, on constate que les sources de faible volume n'ont généralement plus leur température réelle, même au moment de leur rencontre, en raison du refroidissement rapide des parois de la galerie par la puissante ventilation et par l'eau froide servant à actionner les perforatrices; beaucoup de ces sources se sont même refroidies considérablement ensuite. Les sources d'un débit de 10 litres-minute, ou plus, obéissaient moins rapidement à cette influence, et il a été constaté que leur température est, soit égale, soit un peu plus basse que celle du rocher. Sauf un groupe à proximité de la zone aquifère de l'attaque d'Iselle, dans une région refroidie par les grandes sources froides, on n'a pas rencontré de sources thermales dans le sens propre du mot. Cela ne doit pas surprendre, puisque le souterrain du Simplon traverse, dans sa partie centrale, la région profonde de circulation des eaux, où les eaux d'infiltration se chauffent et conséquemment tendent à refroidir l'écorce terrestre. Les observations thermiques constatent et corroborent cette déduction. En effet, la plus haute température souterraine ne s'est pas présentée au-dessous du plus haut point du profil, mais plus de 1 kilomètre au Nord-Ouest, dans une région où il n'y avait que peu ou point d'infiltrations d'eau. Dans la région sous le point culminant de la montagne, les infiltrations d'eau étaient, par contre, nombreuses et la température n'a pas cessé de descendre graduellement, alors que, normalement, elle aurait dû s'élever encore. L'abondance des infiltrations d'eau a presque toujours produit un ralentissement de la hausse de la température le long de l'avancement, ou même une légère baisse. Les fortes venues d'eau rencontrées entre 3 800 et 4 400 mètres de l'attaque d'Iselle sont, sous ce rapport, absolument démonstratives, puisque, dans une région où la température souterraine aurait dû avoir 35° à 37°, on n'a trouvé que 17°2 et plus tard 15°; les sources les plus froides n'ont elles-mêmes que 10-14°. Nous donnerons plus loin quelques détails sur ce problème spécial.

Composition chimique.

La nature chimique des eaux est toujours en accord avec la composition des roches traversées et le degré de minéralisation dépend, dans une certaine mesure, de la longueur du trajet accompli dans le milieu minéralisant, tout en obéissant, avant tout, au degré de solubilité des matières

empruntées aux roches et à leur abondance dans celles-ci. Dans la zone des schistes lustrés calcaires, le degré hydrotimétrique des eaux est de 25 35°; il tombe à 4-5° dans les schistes argileux. A l'approche des roches triasiques, il augmente rapidement par l'accroissement de la quantité de sulfate de chaux, pour s'élever jusqu'à 150°, en accord avec l'augmentation du poids des matières minérales trouvées par l'évaporation. Les eaux fortement gypseuses contiennent presque toujours moins de carbonate de chaux que les eaux calcaires ordinaires; il y a en outre une certaine proportion de sulfates alcalins. Les sels de magnésie ne sont que peu représentés. La région des schistes cristallins et du gneiss du Monte Leone a été fort peu aquifère dans la première partie, d'où résulte précisément la température souterraine extrêmement haute, constatée pendant la traversée de ces terrains. Les eaux d'infiltration étaient presque privées de sels terreux (degré hydrotimétrique : 0°5); mais elles contenaient jusqu'à 0.5 gramme de carbonates et de sulfates alcalins. A l'approche des terrains triasiques et jurassiques sous-jacents au gneiss du Monte Leone, le degré hydrotimétrique des sources s'est accru subitement jusqu'à 170°, pour baisser de nouveau, aussitôt rentré dans le gneiss. Dans la zone centrale des schistes calcaires et des calcaires cristallins, où a eu lieu la rencontre des deux galeries, toutes les sources sont fortement gypseuses [140-170° de dureté (1)] et contiennent au surplus beaucoup de sulfates alcalins. Les roches traversées ne contiennent cependant pas de gisements de gypse, puisque ce sont des calcaires micacés ou des micaschistes plus ou moins calcarifères. Il faut attribuer cette forte minéralisation au long parcours souterrain, car cette région, entre le kilomètre 9 du côté Nord et le kilomètre 5 du côté Sud, soit de plus de 5 kilomètres de longueur, se trouve verticalement entre 1 500 et 2 000 mètres au-dessous de la surface; le trajet dès la surface d'affleurement des terrains aquifères est de plus de 3 kilomètres. En se concentrant dans son mouvement de descente le long des délits et des lithoclasses, et en s'échauffant en même temps, l'eau peut fort bien extraire les traces de sulfate de chaux contenues dans presque tous les calcaires et schistes calcaires. Mais il est plus probable que la décomposition de la pyrite, qui abonde dans ces roches, est la vraie cause de leur teneur en gypse. L'oxydation de la pyrite produit du sulfate ferreux, et, par double décomposition avec le bicarbonate de chaux de l'eau, il se forme du bicarbonate ferreux et du sulfate de chaux; tant que l'eau rencontre de la pyrite décomposée et du calcaire, cette réaction peut continuer indéfiniment, jusqu'à saturation de l'eau. L'origine des sulfates alcalins peut s'expliquer de la même manière par l'intervention des carbonates alcalins, résultat de la décomposition des feldspaths. La forte

(1) Dureté initiale qui a considérablement baissé depuis lors.

teneur en bicarbonate ferreux de toutes ces sources gypseuses, d'une part, et leur pauvreté en carbonate de chaux qui est bien au-dessous de la quantité normale d'une eau calcaire ordinaire, prouvent la réalité de notre hypothèse, puisque le sulfate de chaux se forme précisément au détriment du carbonate dissous.

Variations du volume.

Beaucoup de sources ont présenté au début un volume considérable et se sont réduites, plus tard, presque à l'état de simples suintements d'eau. D'autres, tout en se réduisant notablement, ont pris, au bout d'un certain temps, un débit constant. Presque toutes les sources de grand volume, au début, jaillissant avec une forte pression, se sont notablement réduites dans le cours de quelques mois; chez quelques-unes, la température a baissé, de même que la teneur en matières minérales. Ces modifications sont explicables par un seul et même phénomène. Les fissures, par lesquelles l'eau pénètre dans le tunnel, étaient, au début, pleines jusqu'à la hauteur, généralement inconnue, d'une source superficielle. L'eau était quasi stagnante dans la partie profonde, où elle se saturait en matières minérales et pouvait s'échauffer, sans que pour cela la source superficielle en relation avec ce remplissage d'eau fût pour cela ni thermale, ni minérale; en effet, l'eau la plus minéralisée, malgré sa température plus élevée, tendait à rester dans le fond des fissures. Or, en entamant celles-ci, à 1 000-1 500 mètres au-dessous de la surface, le remplissage d'eau devait se vidanger; la pression devenant de plus en plus faible, le débit, d'abord très fort, devait se réduire graduellement. L'eau qui, pendant la stagnation, pouvait se saturer de matières minérales et s'échauffer à loisir, s'écoulait dès lors très rapidement à travers les voies souterraines et devait arriver, dans le tunnel, de moins en moins minéralisée et de plus en plus froide, jusqu'au moment où un nouveau régime stable pouvait s'établir entre les affluents superficiels et l'émissaire souterrain. Sous ce rapport, les grandes venues d'eau froide du côté de l'attaque d'Iselle ont formé un vrai champ d'observations des plus féconds, si bien que nous voulons exposer ici, aussi succinctement que possible, les résultats acquis jusqu'ici sur l'origine et le régime de ces eaux souterraines d'un volume tout à fait extraordinaire.

Les grandes venues d'eau du versant Sud du tunnel du Simplon.

Si les sources chaudes, rencontrées dans le calcaire de la région centrale, ont eu un volume assez notable; c'est leur haute température, voisine de ou supérieure à 45°, qui a surtout entravé les travaux. Les grandes

venues du versant Sud entre 3 800 et 4 420 mètres ont présenté un débit si inattendu que leur étude détaillée paraissait présenter autant d'intérêt au point de vue technique que pour la science. Après avoir suivi de près le mode d'apparition de ces venues d'eau, le débit, la dureté et la température de chacune, car il y en a plus de quarante dans chaque galerie, on a examiné mensuellement l'eau de trente des plus typiques à ces mêmes points de vue. La comparaison des résultats a permis d'en faire tout d'abord une classification qui ne manque pas d'intérêt. Ce sont :

I. — *Sources chaudes* fortement gypseuses et ferrugineuses. Température plus élevée que celle du rocher. Depuis leur rencontre, la température s'est élevée, le degré hydrotimétrique de même; le volume a diminué.

II. — *Sources isothermes*, gypseuses ou non, toujours plus ou moins ferrugineuses. Température voisine de celle du rocher. Débit peu considérable, qui a beaucoup diminué depuis leur rencontre. Toutes avaient, au début, une forte teneur en gypse, qui s'est réduite pour les unes, mais pas pour d'autres.

III. — *Sources froides* gypseuses, peu ferrugineuses. Très volumineuses, débit environ quinze à vingt fois celui de toutes les sources des groupes I et II.

Il y en a deux catégories : *A*. Sources à température plus basse que celle du rocher, variant peu de température et de volume, mais bien de dureté; *B*. Sources à température initiale égale à celle du rocher, variant fortement de volume au cours de l'année, en se refroidissant au moment de la crue estivale, en diminuant de dureté.

Par leur mélange au moment de la pénétration dans le tunnel, il se forme un troisième groupe, ayant des propriétés intermédiaires entre celles des groupes *A* et *B*.

Après une traversée de 3 800 mètres à travers du gneiss dit d'Antigorio, presque privé d'infiltrations, les galeries de l'attaque d'Iselle ont rencontré les premières de ces sources (6 et 7) à 3 830 mètres, près d'une intercalation de micaschistes noirs. A 3 891 mètres s'est montrée une grande source (n° 11, temp. 28° et dureté 40°). Depuis lors, le trajet dans le gneiss massif d'Antigorio a été accompagné, dans les deux galeries, de nombreuses venues d'eau, en général de volume faible ou moyen, au maximum 10 litres par seconde, jusqu'à la rencontre du calcaire entre 4 325 et 4 330 mètres. Les distances entre 4 100 et 4 220 mètres, puis 4 250 mètres jusqu'au calcaire, étaient peu aquifères, le gneiss étant moins fissuré et plus compact. Des suintements d'eau par goutte étaient par contre continus, attestant la pression de l'eau contre le rocher. La première source rencontrée dans le calcaire venait du plafond à 4 340 mètres; elle fut de faible volume et tarit plus tard, après la rencontre d'une deuxième source jaillissant au seuil à 4 353 mètres (source n° 34), avec un débit de 10 litres-seconde. Une troisième source, venant du plafond, d'une

fissure oblique à plongement Sud-Sud-Est avec direction Nord-Nord-Ouest fut rencontrée à 4 390 mètres, avec un débit également de 10 livres-seconde. C'est à 4 400 mètres, enfin, que, le 30 septembre 1901, se produisit, par un trou de la perforation mécanique de l'avancement, le formidable jet qui arrêta les travaux de la galerie I jusqu'au milieu de novembre, soit pendant six semaines environ, moment où la galerie II arriva dans cette même région, en ouvrant successivement de nouvelles voies d'eau qui eurent pour effet de diminuer la pression et de réduire

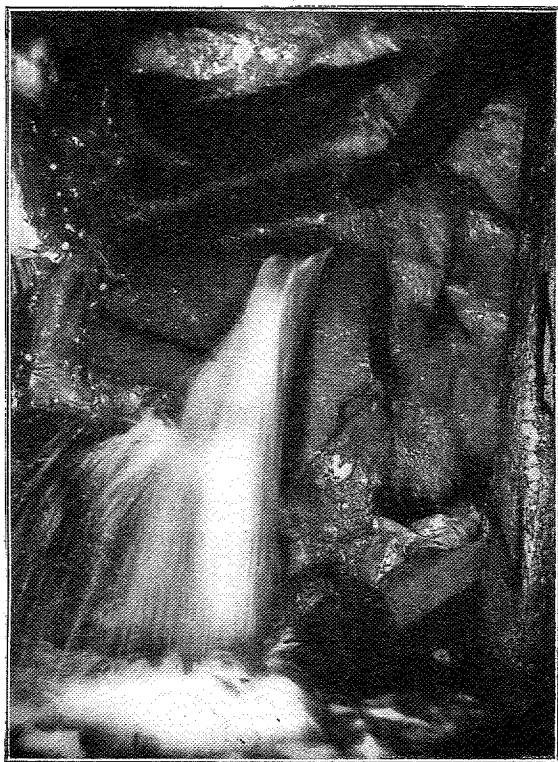


Fig. 2. — SOURCES DU TUNNEL DU SIMPLON, CÔTÉ D'ISELLE.

Galerie I. Source n° 40, le 4 mars 1903.

Reproduction d'une photographie de M. le professeur H. Schardt.

la violence du jet. On ne put cependant reprendre les travaux d'avancement dans la galerie I qu'en noyant l'orifice du jet, en élevant un barrage dans la galerie et en abattant le plafond. Au mois de décembre, enfin, on atteignit dans les deux galeries, à 4 421 mètres, une faille presque verticale à laquelle faisait suite un terrain compressible, formé

de schiste micacé broyé avec des débris de marbre. La présence de ce terrain eut pour effet une interruption générale des travaux de l'avancement pendant près de cinq mois. Le débit total de ces sources était alors d'environ 1 200 litres par seconde. Ce massif calcaire, formé de marbre blanc et gris, fortement replié par places, est ici sous-jacent au gneiss d'Antigorio, mais il entoure le pli que forme celui-ci et vient se superposer au gneiss à la surface. D'après les études préliminaires, supposant la courbure du calcaire plus au Nord et au-dessous du niveau du tunnel, on ne s'attendait à rencontrer ce terrain qu'après le sixième kilomètre. Cette rencontre prématurée, qui paraissait d'heureux augure, en raison de la grande dureté du gneiss, a eu, comme on le voit, des conséquences assez fâcheuses par les fortes venues d'eau qui en furent la conséquence, à quoi s'ajoute encore le terrain compressible succédant à la faille à 4 421 mètres.

Entretiens on avait fait plusieurs galeries transversales qui amenèrent des découvertes du plus grand intérêt. L'une, à près de 3 860 mètres (Transversale XIX), a traversé la faille de la source n° 11, au contact du schiste micacé noir. Deux sources ont jailli de cette fissure, l'une plus froide que la source 11 de 50 litres-seconde (source 8, température 25°, 7; dureté 17°) et une volumineuse source plus chaude, de 70 litres-seconde (source 9, temp. 32°; dureté 56°). En même temps, la source 11 se réduisit à vue d'œil. Ce phénomène présente un très grand intérêt hydrologique. Les trois sources jaillissent de la même fissure. La source 11, rencontrée la première, venait du plafond en cascade formidable. La source 8 tombe exclusivement du plafond, tandis que la source 9 jaillit de bas en haut entre le schiste micacé et le gneiss, au contact de la faille. Avant la percée de la galerie transversale XIX, la totalité de l'eau des deux sources 8 et 9 sortait mélangée par la source 11. La galerie transversale en a opéré la séparation, car plus tard la source 11 a presque tari, ainsi que le montrent les chiffres suivants, ne donnant que les extrêmes de la longue série d'observations :

	Température.	Débit approximatif.	Dureté.	Date.
Source 8. . . .	25°7	3 000 l. m.	17°	23 juillet 1901.
— 8. . . .	22°4	200 —	10°	10 août 1904.
— 9. . . .	30°3	4 000 —	56°	23 juillet 1901.
— 9. . . .	32°2	900 —	86°	10 août 1904.
— 11. . . .	28°	10 000 —	40°	11 juin 1901.
— 11. . . .	26°5	6 000 —	45°	30 nov. 1901.
— 11. . . .	25°	500 —	62°	3 janvier 1902.
— 11a	22°	30 —	11°	10 août 1904.
— 11b	26°6	90 —	47°	10 août 1904.

Depuis janvier 1902, l'élargissement de la galerie I a produit sur ce qui restait de la source 11 une séparation analogue à celle provoquée déjà par la transversale XIX, en créant les sources 11a et 11b.

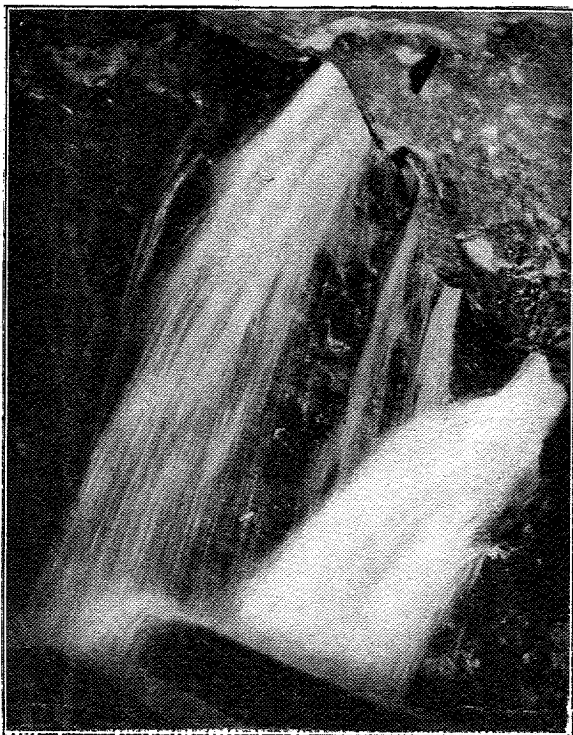


Fig. 3. — SOURCES DU TUNNEL DU SIMPLON, CÔTÉ D'ISELLE.

Galerie II. Source n° 37₁₁, le 11 mai 1903.

Reproduction d'une photographie de M. le professeur H. Schardt.

On voit que la source 11 était formée primitivement par la totalité de l'eau de tout ce groupe de sources, à la formation duquel prennent part deux sortes d'eaux très différentes. Les unes viennent d'en haut et sont plus froides et peu dures, quoique leur teneur en sels terreux soit essentiellement due au sulfate de chaux. Les autres poussent de bas en haut et sont plus chaudes; elles ont en même temps un degré de dureté très élevé. *La même faille était donc parcourue par ces deux eaux qui pouvaient librement communiquer ensemble.* Cette constatation, jointe à d'autres que nous avons eu l'occasion de faire, porte un coup décisif à cette croyance, érigée presque en dogme, que des eaux de composition et de température différentes ne peuvent être en communication et doivent avoir des parcours souterrains distincts. D'autres constatations résultant de nos

recherches au Simplon démontreront encore mieux l'absolue inanité de la prétendue indépendance des eaux de composition et de température différentes. Sur toute la longueur, dès la source 11, jusqu'aux grandes sources froides sortant du calcaire, il y a de nombreuses sources, souvent fort rapprochées, qui sont alternativement peu dures (10-12°) ou médiocrement gypseuses (30-50°). Il est certain qu'avant leur percée, alors que leur eau alimentait des sources superficielles, toutes les fissures du rocher devaient être pleines d'eau. Or on sait que les fissures ne sont pas des canaux indépendants. Elles s'entrecroisent et s'anastomosent de mille manières. Si néanmoins il peut exister dans un tel système des courants différents, cela ne doit pas étonner, bien moins que les courants montants et descendants, chauds et froids, plus ou moins salés dans un lac ou dans la mer, où le mélange de l'eau peut se faire sans entrave aucune.

Les grandes sources froides s'échappent exclusivement du calcaire par des fissures souvent béantes. Chose frappante, tandis que c'est la galerie I qui a atteint les premières et les plus violentes intrusions d'eau, c'est la galerie II qui a concentré, entre 3 350 et 4 420 mètres, donc sur 70 mètres de longueur à peine, les 90 % environ de ces grandes sources froides.

Au début, la température de celles-ci ne devait pas être loin de 18°, comme celle du rocher. Cependant la température des unes et des autres s'est abaissée rapidement dès le début. Bien que toutes ces sources soient en relation les unes avec les autres, elles suivent, sous le rapport thermique, un régime tout à fait différent. Les unes, dont la source 40 dans la galerie I est le type le plus pur, après s'être refroidies au-dessous de 14°, dès leur rencontre jusqu'au mois de juillet 1902, ont recommencé à augmenter de température pendant l'automne et l'hiver, pour dépasser même, au mois d'avril suivant (1902), la première température observée. Dès lors une nouvelle baisse s'est produite en juillet 1903, suivie d'une hausse graduelle pendant l'automne et l'hiver. Il en sera de même après la baisse de la température de juillet 1904, ainsi que le montrent les observations faites jusqu'à ce jour. (Voir le graphique, fig. 4.)

D'autres sources, dont la source 34 est le type extrême, ne sont presque absolument pas influencées par ces modifications. Après s'être refroidies de 18°4 (température initiale de la source 34) à près de 10° (11 ou 12° pour d'autres), leur température n'a presque plus varié, depuis lors, que de quelques dixièmes de degré. La composition chimique de toutes ces sources les caractérise comme des eaux gypseuses, peu ferrugineuses. Elles doivent donc puiser leur sulfate de chaux dans des gîtes de gypse ou d'anhydrite, dont la zone des marbres triasiques offre, en effet, des intercalations importantes. La richesse moyenne en gypse est de 1 gramme par litre (degré de dureté : 50-80°).

Ce degré hydrotimétrique varie avec le débit de l'eau. Au moment des

d'eau. Mais cette réduction ne s'est pas produite et il a été constaté depuis lors que la surface du champ collecteur est d'au moins 12 kilomètres carrés, pouvant assurer un débit moyen d'environ 600 litres par seconde, et il est probable que des régions adjacentes y déversent encore des sources, en sorte que le débit moyen d'environ 900 litres par seconde n'est pas loin d'être atteint.

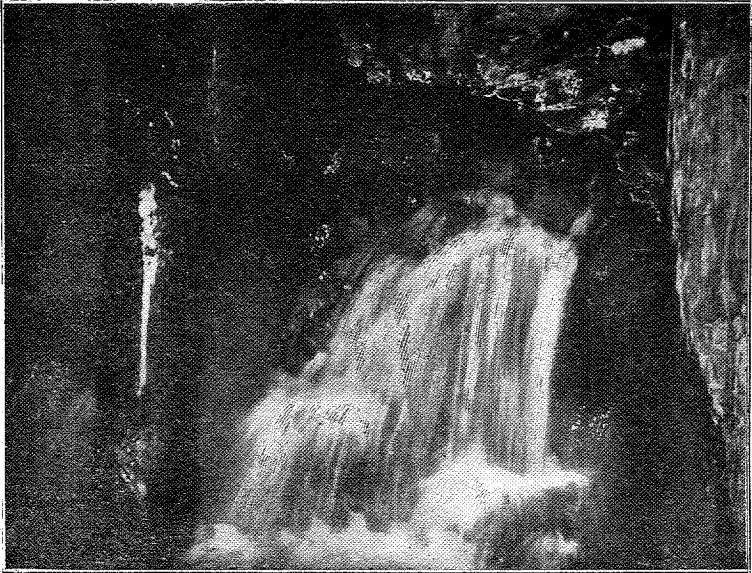


Fig. 5. — TRANSVERSALE XIX. SOURCE CHAUDE N° 9, LE 3 AVRIL 1903.

Reproduction d'une photographie de M. le professeur H. Schardt.

La position du champ collecteur est nettement indiquée par le tarissement de sources, soit dans la vallée de la Cairasca, à 2 500 mètres au Nord-Est du tunnel, soit dans la région d'Alpien, à peu près à 7 500 mètres au Sud-Ouest. C'est donc comme un immense drain que se comporte ce banc calcaire rencontré par les travaux souterrains à plus de 1 200 mètres au-dessous de la surface et à 650 mètres au-dessous de la source tarie la plus voisine. Néanmoins, le débit, bien plus élevé que celui calculé pour l'étendue du champ collecteur, devait rendre très probable l'éventualité d'une pénétration d'eau du torrent de la Cairasca qui s'écoule, à deux endroits, par-dessus le banc de calcaire triasique accompagné de gypse : à Nembro (1 300 m. d'altitude), à l'endroit où le calcaire s'enfonce sous les schistes jurassiques, en recouvrant le gneiss d'Antigorio, et une seconde fois, plus bas, à Gebbo (1 100 m.), où il émerge sous le gneiss, sur le prolongement même du banc coupé par le tunnel et plongeant vers celui-ci.

Or, à cet endroit même existent d'abondantes sources gypseuses, d'un débit voisin de 400 litres-seconde; leur tarissement paraissait presque certain; mais jusqu'à présent elles ont persisté avec leur débit normal! Néanmoins, il fallait avoir la certitude sur cette éventualité. Il résulte de trois essais de coloration avec 14 à 23 kilogrammes de fluorescéine qu'en eaux moyennes et hautes, le torrent de la Cairasca pénètre dans la région aquifère du tunnel du Simplon, dans une proportion très faible (environ 1/40 de son volume, soit 36 l.-s.), puisque la coloration n'a pu être vue qu'au fluoroscope. Mais, chose très significative, les sources de Gebbo ont toutes réagi très visiblement. Il y a donc une relation entre le torrent de la Cairasca, d'une part, et les sources froides du tunnel, de même qu'avec les sources gypseuses de Gebbo et probablement aussi entre celles-ci et les sources du tunnel, en ce sens que les deux dépendent d'un même cours souterrain qui est alimenté en partie par des infiltrations du torrent. Un troisième essai fait aux très basses eaux d'avril, avec 23 kilogrammes de fluorescéine, a donné, au contraire, un résultat absolument négatif pour les eaux du tunnel, mais très positif pour une partie des sources de Gebbo.

Donc, si les infiltrations provenaient directement de la Cairasca, il faudrait admettre qu'aux basses eaux son lit ne laisse rien échapper, ou bien si c'est par le cours souterrain des sources de Gebbo que l'infiltration se produit, que le débordement de celui-ci dans le tunnel ne peut pas avoir lieu en ce moment. Cette dernière alternative paraît fort probable, car l'étiage des sources de Gebbo coïncide naturellement avec celui du torrent de la Cairasca.

Les deux essais positifs ont fourni, en outre, des constatations fort étranges. Le premier, fait avec 16 kilogrammes de matière colorante, à l'époque des eaux moyennes, a produit une coloration faible dans les eaux du tunnel au bout de onze jours à la source 34, la plus froide, tandis qu'au mélange des sources de la galerie II la coloration n'a apparu qu'au bout de quatorze jours et a duré chez les deux pendant deux jours. L'autre essai, fait au début de l'époque des hautes eaux, avec prélèvement d'échantillons à douze sources de toute la zone aquifère, a donné un résultat des plus surprenants. La coloration a été aperçue à toutes les sources, sauf à la source 9. A la source 34, elle a apparu après un jour et demi, de même qu'aux sources du groupe opposé, comprenant la source 40 et la source 41₁ (galerie II).

Les autres sources ont été colorées quelques jours plus tard; même la source 8, peu gypseuse et la plus éloignée du groupe des sources froides, a été influencée nettement dès le troisième jour. Le fait le plus frappant, après celui de l'arrivée de la coloration en moins de quarante heures, est que, la première coloration passée, la fluorescence a réapparu chez presque toutes les sources observées, et à plusieurs reprises. Entre le douzième et

le quatorzième jour, elle était visible chez presque toutes. Ce fait ne peut s'expliquer que par la circonstance que l'eau colorée suit plusieurs voies plus ou moins directes, en traversant des canaux ou chambres assez vastes pour se mélanger aux eaux souterraines pénétrant dans le tunnel. La coloration de la source 8 ne peut s'expliquer autrement ; elle apporte une nouvelle preuve à la non-indépendance des cours d'eau souterrains, si différents et distants soient-ils. Cette expérience montre encore qu'avant leur rencontre par les galeries du Simplon, ces eaux remplissaient tout le vaste réseau de fissures de la montagne, dès le point le plus éloigné du champ collecteur du côté Ouest, jusqu'à l'extrême limite de celui-ci au delà

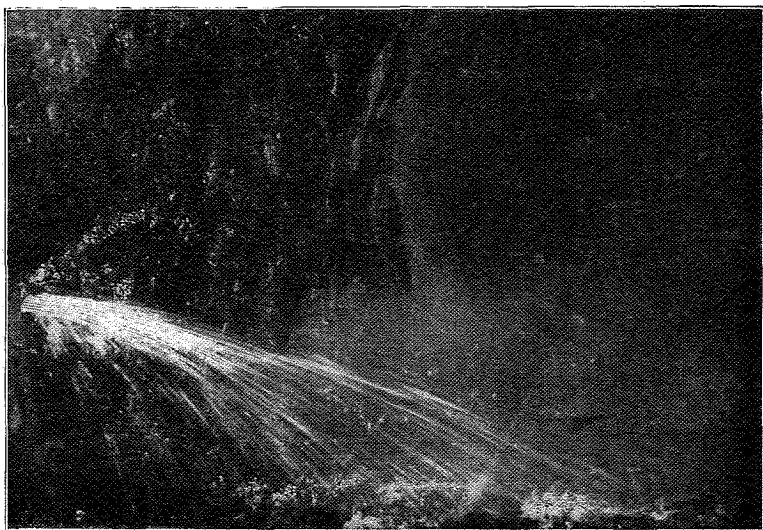


Fig. 6. — SOURCE CHAUDE N° 18_{1a}, LE 3 AVRIL 1903.

Reproduction d'une photographie de M. le professeur H. Schardt.

de la vallée de la Cairasca et sur une largeur qui dépassait certainement celle de la zone calcaire et gypsifère qui entoure le gneiss d'Antigorio, puisque les sources froides du calcaire rayonnent sur plus de 400 mètres dans ce terrain. Cette eau devait atteindre, au point le plus bas, le niveau des plus basses des sources taries, soit 1 300 mètres, ce qui explique l'énorme pression des premiers jets. Mais, de part et d'autre de la vallée de la Cairasca, son niveau devait s'élever, puisque sur l'*alp* d'Alpien une source a tari à la cote de 1 500 mètres. Cette eau n'était pas stagnante, mais s'écoulait vers des émissaires visibles ou invisibles, situés sur l'Alpe de Nembro (vallée de la Cairasca). Elle ne pouvait, en aucun cas, s'écouler vers la vallée de la Diveria, puisque les intercalations de micaschiste dans

le gneiss d'Antigorio empêchent leur évacuation dans cette direction; d'ailleurs, le tunnel aurait rencontré des venues d'eau dans ce dernier terrain beaucoup plus tôt que cela n'a été le cas. Outre les courants superficiels, dus à la gravitation, amenant les eaux souterraines à travers les canaux et fissures vers leurs émissaires superficiels, il devait y avoir dans ce remplissage d'eau une circulation dans le sens vertical, jusqu'au-dessous du niveau du tunnel. En effet, on aurait dû trouver normalement dans cette région une température de 35-37°. Elle n'a été, au moment de la rencontre, que de 17°2, tout au plus 18°. *Longtemps avant la rencontre des grandes venues d'eau, on avait constaté une baisse anormale de la chaleur souterraine, graduellement avec l'avancement.* Cette baisse ne pouvait provenir que de la circulation, dans les innombrables fissures du rocher, de l'eau souterraine qui les remplissait sur plusieurs centaines de mètres de hauteur. *L'eau froide descendait dans certains de ces canaux et montait par d'autres, après s'être réchauffée, pour se mélanger au même courant qui leur avait donné naissance.* Ce n'est pas une circulation entièrement fermée, comme celle d'un thermosiphon, puisque l'eau peut se renouveler au cours sourcier, mais c'est le même mécanisme. *La chaleur empruntée à la profondeur lui fournit la force motrice.* Mais cette circulation fait encore un autre travail, la *corrosion souterraine*, par dissolution des roches au milieu desquelles elle s'accomplit. Cette dissolution est rapide dans le gypse, l'anhydrite et le calcaire, très lente dans les roches siliceuses et cristallines. Chaque fissure, même capillaire, est une voie ouverte à cette attaque incessante. La moindre différence de température est cause d'un mouvement. L'eau enlève non seulement de la chaleur, mais elle se sature aussi de substances minérales, qui remontent vers la surface. L'eau froide, d'abord presque chimiquement pure, devient plus ou moins saturée de matières minérales enlevées dans la profondeur.

Cet enfoncement par corrosion des eaux souterraines n'a donc pas d'autres limites dans le sens vertical que celle du terrain soluble dans lequel il se produit, ou bien une température supérieure au point d'ébullition de l'eau. Nous avons là l'explication évidente du mode de formation des énormes cavités, pleines d'eau, creusées dans les terrains calcaires bien au-dessous du niveau des sources et sans qu'on puisse supposer la possibilité de l'obstruction d'orifices plus profonds. Il en ressort, nettement la différence essentielle qu'il y a entre l'érosion superficielle mécanique et l'érosion souterraine par corrosion.

Dans notre cas, il est certain que cette circulation s'étendait à 200 mètres, sinon plus, au-dessous du niveau du tunnel et à plus de 800 mètres au-dessous du niveau de l'ancien émissaire. En effet, les sources chaudes dans la galerie transversale XIX et dans la galerie II (entre les transversales XIX et XX) avaient, lors de leur rencontre déjà, une température supérieure à celle du rocher ambiant. *Elles se sont, en outre, réchauffées*

notablement depuis lors, alors que le rocher qui les entoure s'est refroidi de plusieurs degrés. Cette modification, qui en fait de véritables sources thermales, les seules que le tunnel du Simplon ait fait jaillir, ne peut s'expliquer que par le fait que ces eaux étaient jusqu'alors sous l'influence de la pression des eaux froides qui se mélangeaient à leur cours. Aujourd'hui que le niveau de l'eau souterraine froide s'est notablement abaissé, cette eau froide pénètre librement dans le tunnel par les voies que celui-ci a ouvertes. L'eau des sources chaudes, par contre, circule seule et plus lentement à travers la zone chaude sous-jacente au tunnel ; aussi, tout en diminuant de volume (source 9), elles ont toutes fortement augmenté de température et de dureté.

Le refroidissement du rocher dans toute la zone aquifère, dès la percée des sources froides, est surtout manifeste à proximité des plus grandes sources froides ; mais' on doit envisager ce phénomène *comme étant exclusivement limité au voisinage immédiat du tunnel, vers lequel les cours d'eau souterrains se précipitent rapidement sous pression*. D'autres parties de la montagne abandonnées par l'eau ont pu, depuis lors, se réchauffer, comme le prouve l'augmentation de la température des sources chaudes. *Le bilan thermique est resté le même, il n'y a eu que déplacement du capital de chaleur.*

La dérivation de tous ces cours d'eau vers le tunnel a produit, comme on l'a vu, tout un régime nouveau. D'après la rapide pénétration des eaux de la surface, on pouvait penser que les phénomènes météorologiques devraient influencer immédiatement le débit de ces sources, comme cela a lieu pour la plupart des sources superficielles, des sources vaclusiennes surtout, qui peuvent augmenter du simple au centuple à la suite d'un seul orage et pendant moins de vingt-quatre heures. Mais cela n'est pas le cas. Les variations de volume qui se produisent présentent une seule période annuelle. La seule crue qui a lieu ne parvient pas même à doubler le débit des sources. Elle se produit en juin et juillet, peu après la fonte de la neige dans le champ collecteur, situé en majeure partie entre 1 500 et 2 500 mètres d'altitude. La seule explication possible de ce régime particulier est que le réseau des canaux souterrains ne s'est jamais entièrement vidé jusqu'ici. L'eau provenant des orages et pluies tombant sur la montagne ne pénètre pas librement dans le tunnel, mais sert uniquement à remplir des vides, sans occasionner une augmentation perceptible du débit des sources ; c'est tout au plus si la courbe manifeste parfois un ralentissement du mouvement descendant pendant l'automne (voir la fig. 4). Il faut la forte affluence de l'eau de fusion de la neige, remplissant rapidement les vides souterrains, pour occasionner une augmentation du débit. La crue annuelle de ces sources est donc *une crue piézométrique, soit par augmentation de la charge*. Le refroidissement rapide, la dilution de l'eau gypseuse, suivis d'une lente augmentation de la température et de la dureté

pendant l'hiver, sont des faits suffisamment éloquents pour démontrer la réalité de cette supposition. Enfin, l'invariabilité presque complète de la température des sources les plus froides et la faible variation de leur débit ne peuvent s'expliquer que par l'arrivée de leur eau par des canaux toujours pleins, alimentés par une cavité située sur le parcours d'un affluent ininterrompu, en relation peut-être avec les sources de Gebbo, ou déversant son trop-plein dans le réseau des sources à température et à débit variables. On voit que l'étude de ces nombreuses et en partie formidables venues d'eau a fourni une vaste moisson d'observations, pouvant servir à l'élucidation d'un problème fort controversé jusqu'ici. Plus d'une lumière a jailli devant nos yeux !

D'autres faits d'une importance incontestable se rattachent à la circulation de l'eau à travers des terrains solubles, comme l'est le gypse. L'origine du sulfate de chaux des sources froides ne peut être cherchée que dans la lixiviation des gîtes de gypse ou d'anhydrite. Or, avec une teneur moyenne de 1 gramme de sulfate de chaux par litre et un débit d'environ 1 000 litres par seconde, cela représente, par année, un poids de 31 530 tonnes de sulfate de chaux, soit *un volume de plus de 10 000 mètres cubes*. On comprend dès lors avec quelle rapidité doivent s'accroître les vides souterrains sous l'influence de la circulation des eaux. Les sources de Gebbo, avec un débit d'environ 400 litres par seconde, enlèvent à la montagne annuellement plus de 12 000 tonnes de sulfate de chaux, soit *environ 4 000 mètres cubes*. Tout autour de leur ligne d'émergence et plus en aval, les deux flancs de la vallée de la Cairasca offrent des traces d'effondrements considérables, attestant que les cavités creusées au cours des siècles se sont comblées en partie par l'affaissement des massifs rocheux susjacents. Et ce phénomène de corrosion souterraine continue toujours, accentué encore aujourd'hui par la dérivation des cours d'eau souterrains d'une vaste région vers les galeries du tunnel du Simplon, à travers les gîtes gypsifères situés entre eux deux. Il ne s'arrêtera qu'après épuisement de ceux-ci.

