
F LES CONDITIONS GÉOLOGIQUES DU BARRAGE DU CHAMBON-ROMANCHE

(DÉPARTEMENT DE L'ISÈRE)

par Maurice GIGNOUX et Léon MORET

INTRODUCTION

Le barrage du Chambon-Romanche est un important barrage de retenue, créant sur le cours supérieur de la Romanche (affluent du Drac, lui-même affluent de l'Isère) un réservoir de 54 millions de m³, dans lequel ont été noyés le petit hameau du Chambon, situé tout près du barrage, ainsi que les hameaux du Dauphin et du Parizet, tous dépendants de la commune du Mont-de-Lans (Isère) (fig. 1 et pl. I-A et B, pl. II-A et pl. V).

L'idée première de cet ouvrage revient à un industriel grenoblois, M. Henri FRÉDET (1918). Les études préliminaires remontent à l'année 1919; les premiers rapports géologiques ont été établis par W. KILIAN, professeur à l'Université de Grenoble (en date du 15 janvier 1919), et P. TERMIER, directeur du Service de la Carte géologique de la France (10 juin 1921).

Le barrage a été réalisé par la « Société de régularisation des Forces motrices de la vallée de la Romanche », la direction des travaux étant confiée aux Ingénieurs en Chef des

Ponts et Chaussées affectés au « Service d'Etudes des grandes Forces hydrauliques du Sud-Est » (Direction générale, M. SIMON; Direction technique, M. HAEGELEN, avec la collaboration de MM. GARNIER et BOURGIN, Ingénieurs des Ponts et Chaussées); les travaux, commencés en 1928, furent terminés en 1935, et exécutés, pour les parties essentielles, par l'Entreprise CAMPENON-BERNARD, les sondages et injections étant confiés à la Firme RODIO; MM. PACHE et CANEL, Ingénieurs T. P. E. (Ponts et Chaussées), ont successivement assuré la surveillance sur place du chantier.

Sur la demande des maîtres de l'œuvre, nous avons pu étudier les conditions géologiques des assises de fondation pendant toute la durée des travaux. Et nous ne parlerons ici que de ces conditions géologiques, renvoyant pour une description technique de l'ouvrage lui-même aux articles suivants :

A. HAEGELEN et A. BOURGIN. — *Le barrage-réservoir du Chambon, sur la Romanche (département de l'Isère)*. — « Le Génie civil », t. 108, 56^e année, n^o 2786 du 4 janvier 1936.

J. CANEL. — *Le barrage-réservoir du Chambon*. — « Les Travaux publics », 82^e année, n^o 892, mai-juin 1936.

SOCIÉTÉ DE RÉGULARISATION DES FORCES MOTRICES DE LA VALLÉE DE LA ROMANCHE. — *Le grand barrage du Chambon (Isère)*. — Travaux, juillet et août 1935, Editions « Science et Industrie ».

A HAEGELEN. — Le canyon de la Romanche à l'emplacement du barrage du Chambon (*Rev. de Géogr. alpine*, t. 20, 1932).

Rappelons seulement quelques caractéristiques de l'ouvrage qui, construit en béton cyclopéen, appartient au type dit « barrage-gravité » :

Cote du lit alluvial de la Romanche avant la construction : 953 (amont), 950 (aval).

Cote du point le plus bas de la maçonnerie dans la zone de fondations sur rocher : 915 (amont), 906 (aval).

Cote de la crête du barrage : 1043.

Hauteur du barrage au-dessus du lit alluvial primitif : 91 m.

Hauteur du barrage au-dessus du fond rocheux : 136 m. (aval), 128 m. (amont).

Longueur en crête : 293 m.

Épaisseur maximum du barrage, au contact du fond rocheux : 70 m.
 Épaisseur du barrage à la cote 1040 : 5 m.
 Cube de la maçonnerie en béton cyclopéen : 295.655 m³.
 Cotes maximum et minimum de la retenue : 1040 et 980.
 Volume de la retenue à la cote 1040 : 54 millions de m³.
 Longueur maximum de la retenue dans l'axe de la vallée : 5 km. environ.
 Surface maximum de la retenue : 126 hectares (fig. 3).
 Bassin versant : 254 km², dont 23 km² de glaciers (fig. 2).



FIG. 1. — LE VERROU DE LA ROMANCHE A L'EMPLACEMENT DU BARRAGE DU CHAMBON, AVANT LES TRAVAUX, VU DE L'AMONT, RIVE DROITE.

On voit le tronçon de la route nationale ainsi que le tunnel supprimés par le barrage

Près de la sortie du tunnel, le cône de déjections du torrent du Mont-de-Lans. Traversant la Romanche, la route de Mizoën. On a indiqué la cote maxima de la retenue (1040).

Actuellement (voir plus loin), la retenue alimente d'abord une usine de pied de barrage dont le canal de fuite est à la cote 974; il y a donc là une première chute, dont la hauteur varie de $1040 - 974 = 66$ m. à $980 - 974 = 6$ m.

De là, une dérivation longue de 5.820 m. va alimenter l'Usine de Sainte-Guillerme, à l'entrée de la plaine du Bourgd'Oisans, avec une chute de 240 m. Entre cette usine et le confluent du Drac, 9 usines antérieurement existantes bénéficient de la régularisation : ses effets se font encore sentir

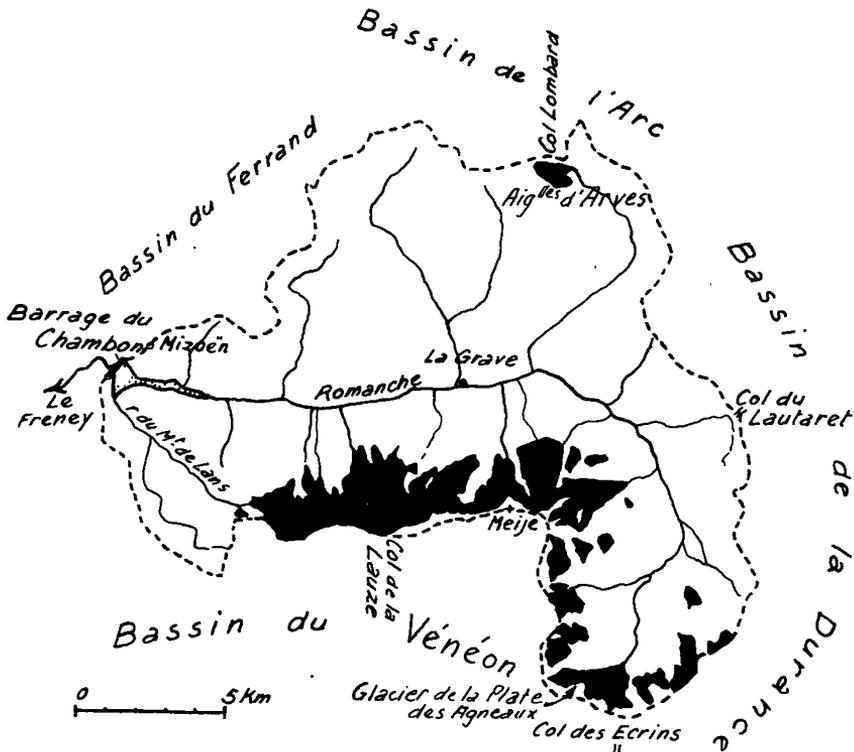


FIG. 2. — LE BASSIN VERSANT DE LA ROMANCHE AU BARRAGE DU CHAMBON.

En noir les glaciers; en traits interrompus, les limites du bassin versant; en grisé, la retenue.

sur les deux usines utilisant le Drac entre les confluent de la Romanche et de l'Isère, et même sur les usines de la basse Isère. Au total, la régularisation porte donc sur une chute brute de 664 m. avec une puissance installée de 139.000 kilowatts. C'est dire l'intérêt considérable de ce barrage.

I. — Structure géologique générale de la région ¹.

Le cours de la Romanche se déroule à travers cette partie des Alpes françaises appelée « zone des massifs cristallins hercyniens et de leur couverture sédimentaire », ou, plus brièvement, « première zone alpine » (Ch. LORY). Les roches de ces massifs hercyniens sont en général très dures, et le cours d'eau s'y encaisse dans des gorges étroites; sa vallée s'élargit au contraire entre ces massifs, dans les synclinaux de roches tendres (presque uniquement des schistes jurassiques) qui les séparent. De l'aval à l'amont, on peut donc distinguer, dans cette vallée de la Romanche, plusieurs tronçons succesifs :

Jusqu'à l'extrémité aval de la plaine du Bourg-d'Oisans, la Romanche traverse le massif cristallin de Belledonne : c'est là que se trouvent, échelonnées, les 9 usines dont il a été question plus haut.

La plaine du Bourg-d'Oisans correspond au contraire (fig. 4) au large synclinal liasique compris entre les massifs de Belledonne et des Grandes-Rousses. Au cours des temps historiques, le débouché de cette plaine a été barré à plusieurs reprises par des dépôts torrentiels venus de deux vallons latéraux; elle a été alors transformée en un lac (ancien « lac Saint-Laurent »), dont les vicissitudes ont été étudiées par M. Raoul BLANCHARD ². Dans la plaine, longue de 19 km., résultant du

¹ On consultera la feuille Briançon (2^e édition, 1933) de la Carte géologique de la France au 1/80.000; les contours géologiques sont dus ici à P. TERMIER. Voir également le Livret-guide du Congrès géol. intern. de Paris en 1900, et L. MORET, Chambon, Sautet, Bissorte, trois grands lacs de barrages alpestres. (Editions de la revue *Les Alpes*, Grenoble, 1936).

² R. BLANCHARD, Le lac de l'Oisans (*Rec. des trav. de l'Institut de géogr. alpine*, II, 1914, pp. 427-450).

comblement alluvial de cet ancien lac, la Romanche ne descend que de 2 mm. 5 par mètre. C'est à l'extrémité amont de cette plaine que se trouve l'Usine de Sainte-Guillerme.

Entre cette usine et le barrage du Chambon, la Romanche s'encaisse de nouveau en traversant le massif cristallin des Grandes-Rousses; et c'est exactement contre la bordure orientale de ce massif que s'appuie le barrage (fig. 1 et pl. I-A).

En amont, le bassin de retenue s'élargit dans les schistes jurassiques tendres qui constituent le synclinal du Chambon, entre les massifs des Grandes-Rousses et du Pelvoux (fig. 4 et pl. I-B).

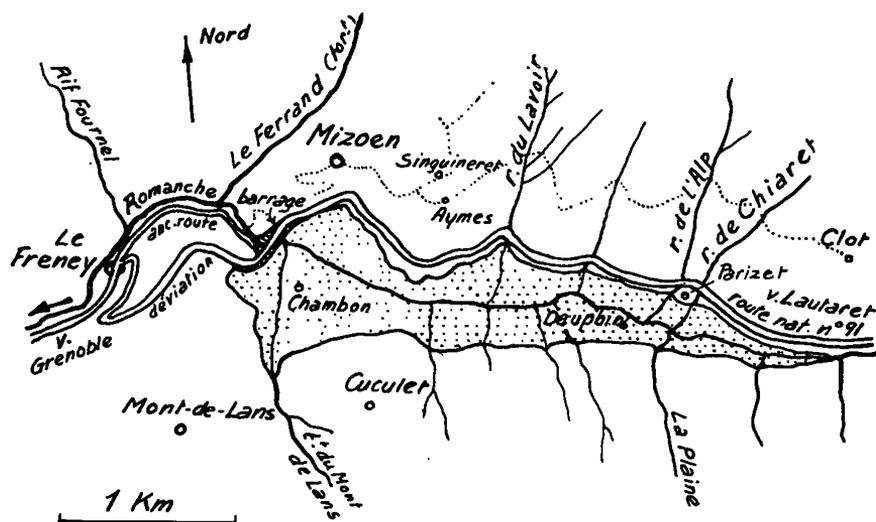


FIG. 3. — LA RETENUE DU CHAMBON (en pointillé) ET LA DÉVIATION DE LA ROUTE NATIONALE, PASSANT SUR LE BARRAGE.

A l'extrémité amont de la retenue du Chambon, la Romanche vient entailler le massif cristallin du Pelvoux (pl. I-B et pl. II-B), en restant d'ailleurs tout près de sa bordure septentrionale; elle en sort à La Grave où la vallée s'évase dans les schistes jurassiques de la couverture septentrionale du massif

ancien, que le torrent continuera à longer jusque non loin de ses sources, dans la vallée de l'Alpe du Villar-d'Arène.

Le bassin versant du Chambon est donc constitué, sur la rive gauche, presque uniquement par les roches granitiques du Pelvoux, recouvertes de grands glaciers (glaciers du Mont-de-Lans, du Rateau, de la Meije, du Tabuchet, etc.); tandis que les torrents affluents de la rive droite, dont les principaux sont le Rif Tord, le Torrent du Chazelet et le Maurian, ont leur bassin d'alimentation exposé au Sud et formé principalement de schistes tendres du Jurassique, très ravinés et donnant, en périodes de crues, de véritables laves boueuses.

La presque totalité de nos massifs hercyniens est constituée par des roches cristallines ou cristallophylliennes plus ou moins métamorphiques, dont on ignore l'âge : on sait seulement qu'elles sont antéhouillères, et que leur métamorphisme et leur granitisation sont également antéhouillers. En effet, elles sont surmontées en discordance par des sédiments houillers fossilifères (flores de la zone à *Mixoneura ovata*, Westphalien tout à fait supérieur, dit « Westphalien D », ou base du Stéphanien), non métamorphiques. Ce Houiller ne se retrouve d'ailleurs que dans d'étroits synclinaux, où les couches sont généralement presque verticales; en particulier, nous verrons que la dérivation alimentant l'Usine de Sainte-Guillerme traverse, dans le massif des Grandes-Rousses, deux de ces synclinaux. Enfin le Trias, puis le Lias, forment un manteau recouvrant indifféremment, en discordance, ces terrains antéhouillers et houillers. Les plissements de la fin du Primaire, ou « hycerniens », se sont donc produits ici en deux phases, l'une antéhouillère, ayant mis fin au métamorphisme et aux granitisations, l'autre posthouillère, mais antétriasique. Et, avec le Trias, débute une longue ère de « repos tectonique », qui, dans cette région des Alpes, a probablement duré jusque tard dans le Crétacé. Après quoi ont commencé les plissements « alpins ».

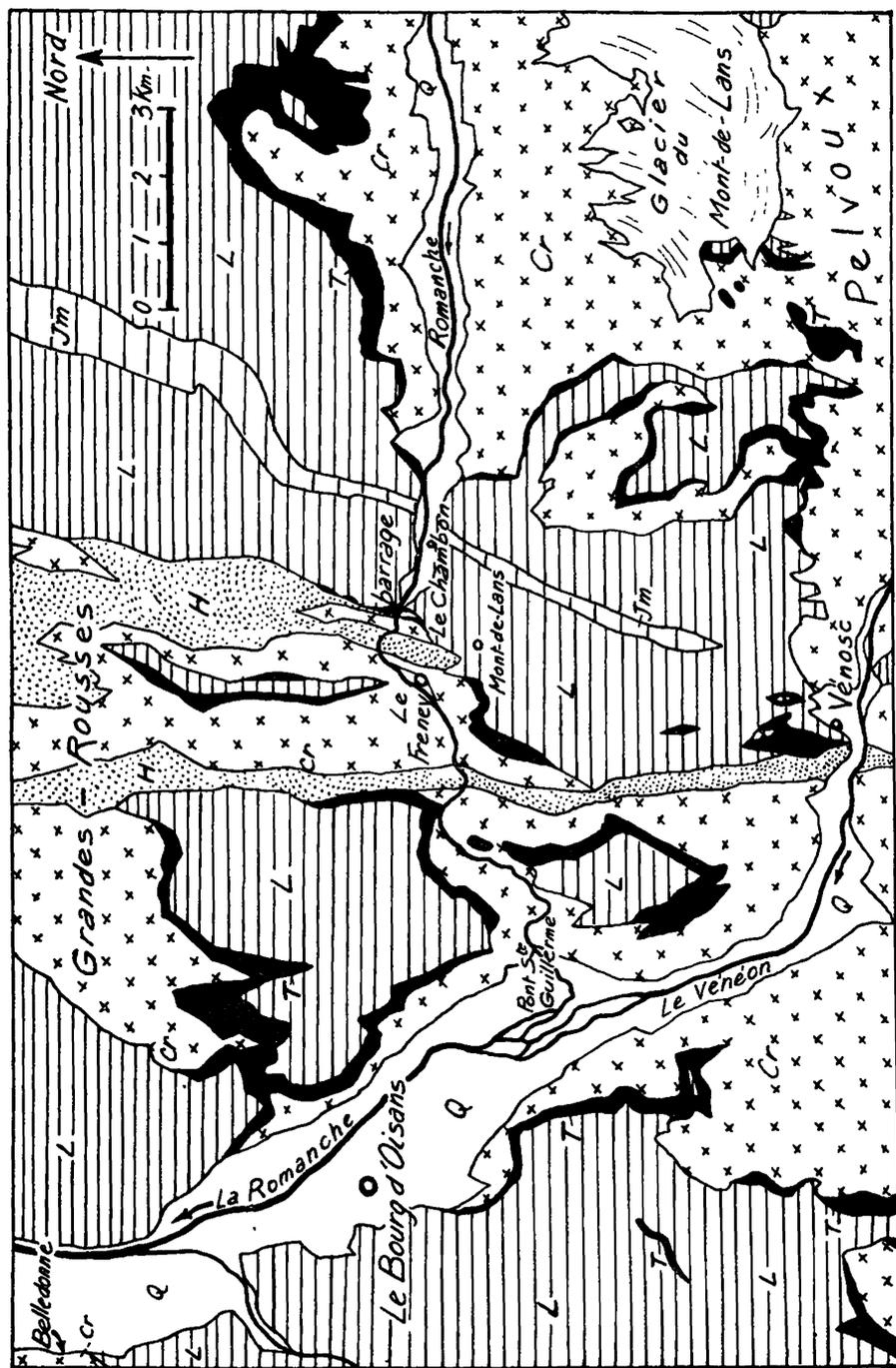


FIG. 4. — CARTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION DU CHAMBON.

serrés, Lias (*L*); traits horizontaux lâches, Jurassique moyen (*Jm*); en blanc, les terrains quaternaires et récents (*Q*). Les croix (*Cr*) représentent les terrains cristallins; en gris, le Houiller (*H*); en noir, le Trias (*T*); traits horizontaux

Nous devons souligner dès maintenant qu'entre le Houiller et le Trias, après les derniers plissements hercyniens, nos massifs anciens ont été arasés et « pénéplanés »; cette « pénéplaine antétriasique », naturellement déformée et disloquée par les plissements alpins, reste néanmoins reconnaissable sur de vastes étendues. Nous verrons ainsi que la dérivation entre le barrage du Chambon et l'Usine de Sainte-Guillerme se maintient parfois tout près de cette surface structurale, laquelle se traduit, bien entendu, avec une grande netteté dans le paysage.

Ajoutons enfin que cette même surface, qui sépare deux ensembles de roches de dureté et de plasticité très différentes, se trouvait prédisposée aux laminages : nous en verrons des exemples au barrage même du Chambon; la couverture sédimentaire, décollée, a glissé et coulé en se replissant au-dessus des vieux massifs.

II. — Description pétrographique des roches.

1° Roches cristallines et cristallophylliennes antéhouillères.

Tandis que, dans le massif du Pelvoux, les granites proprement dits jouent un très grand rôle (« protogine » du Pelvoux), le massif des Grandes-Rousses est presque totalement constitué par des roches cristallophylliennes, gneiss et schistes cristallins très variés : c'est le cas en particulier dans toute la région qui nous intéresse.

Pour une description générale de ces roches dans l'ensemble du massif, nous nous contenterons de renvoyer au Mémoire classique de P. TERMIER³. Celles qui nous intéressent le plus ici sont celles qui forment la zone de fondation du barrage.

³ P. TERMIER, Sur la tectonique du Massif du Pelvoux (*Bull. Soc. Géol. France*, 3^e série, XXIV, 1896) et légende des feuilles géologiques au 1/80.000 de Briançon et Gap. V. également du même, Le Massif des

Lors d'une visite, faite en notre compagnie aux fouilles du barrage M. Charles JACOB a récolté en divers points du chantier des échantillons de roches aussi fraîches que possible, soit dans le fond et les parois de la gorge de la Romanche, soit dans le nouveau tunnel où passait à ce moment, au fond de la vallée, la route nationale. Ces échantillons ont tous à l'œil nu un aspect identique, ce qu'a confirmé un examen pétrographique fait par M. Albert MICHEL-LÉVY, qui a bien voulu nous autoriser à reproduire ci-dessous sa diagnose :

Ces roches sont en réalité des mylonites, formées par les éléments brisés d'une roche antérieure, probablement d'un gneiss plutôt que d'un granite. Ces éléments ont été non seulement broyés, mais entraînés dans un mouvement qui les a fait glisser les uns sur les autres. Ils sont en outre intimement ressoudés par des minéraux néogènes.

Les éléments sont principalement des feldspaths, très abondants, et du quartz, moins abondant; parfois se retrouvent de fins débris de la roche initiale elle-même. Les feldspaths sont surtout des feldspaths alcalins, orthose, albite, microline, accompagnés probablement d'oligoclase. Ils sont très décomposés et remplis de séricite. Le quartz montre des extinctions roulantes; il est riche en inclusions liquides à libelle mobile; souvent les plages montrent des individus multiples différemment orientés optiquement, à la manière des quartz de gneiss.

On ne retrouve pas les micas de la roche initiale, sauf dans les rares débris de gneiss conservé; mais ils ont fourni la matière de nombreux minéraux secondaires.

A signaler en outre : quelques cristaux d'apatite, entraînés dans le broyage et quelques cristaux de tourmaline, également antérieurs au broyage.

Les minéraux secondaires, nés dans le broyage et après lui, sont principalement des séricites et des chlorites, puis en moindre abondance du quartz secondaire. Ils sont accompagnés de fer oligiste, d'hématite, de nombreux et fins granules de sphène entraînés et de calcite.

La roche originelle paraît avoir été un gneiss granulitique, comme l'indiquent l'abondance des feldspaths alcalins et la présence de la tourmaline. La mylonite actuelle est principalement séricitisée et chloritisée; elle est aussi quartzifiée.

Tous les échantillons étudiés sont analogues. Dans quelques-uns, la séricite secondaire est en lamelles particulièrement bien développées dans les plans de traînage : c'est le cas pour l'échantillon pris dans le tunnel. Les échantillons du fond de la gorge et ceux de la paroi extérieure sont assez riches en fines veinules de calcite.

Nous remarquerons que la « mylonitisation » dont témoignent les échantillons étudiés par M. A. MICHEL-LÉVY n'est point un accident local : les roches de la zone de fondation du barrage se montrent tout à fait analogues à celles qui constituent des régions très étendues du massif des Grandes-Rousses. Il ne s'agit donc point là d'une « zone mylonitisée » que l'on aurait pu éviter en déplaçant le barrage. D'ailleurs, ces gneiss mylonitisés se sont révélés, dans tous les travaux, comme d'excellente qualité, par leur compacité, leur résistance et leur imperméabilité (en dehors naturellement des zones d'altérations superficielles sur lesquelles nous reviendrons).

Mais P. TERMIER a signalé depuis longtemps, au sein même des complexes cristallophylliens des Grandes-Rousses, des zones formées de roches très peu métamorphiques, soit des conglomérats, soit même des schistes argileux noirs très peu cristallins : ces assises deviennent ainsi très difficiles à distinguer du Houiller.

P. LORY a depuis montré que de telles roches étaient aussi très développées dans certaines régions du massif de Belle-donne; frappé par leur teneur en matières charbonneuses, il les a appelées « schistes carburés », ce qui évoquerait les roches de même nom, d'âge gothlandien, bien connues dans d'autres massifs anciens (ceux des Pyrénées, en particulier).

Au Chambon, des roches de ce type ont été rencontrées d'abord dans la carrière de pierre à béton ouverte sur la rive droite, en aval du barrage; elles y forment des intercalations de quelques décimètres régulièrement interstratifiées au milieu des gneiss habituels.

On en a également traversé dans la galerie de prise, un peu avant la sortie de cette galerie sur la rive gauche du Ferrand; on se trouve là, probablement, dans le prolongement en profondeur des affleurements superficiels de la carrière.

Enfin, c'est ici le lieu de mentionner une passée de roches argileuses noires qui remplissaient un accident bien connu des Ingénieurs sous le nom de « faille des schistes houillers », et qui a été rencontré dans la partie inférieure des fouilles de fondation du barrage sur la rive droite. Nous reviendrons plus loin sur cet accident, qui a joué un certain rôle dans les travaux : des schistes noirs, devenant même plastiques quand ils étaient imprégnés d'eau, étaient ici coincés dans les gneiss sur une épaisseur de quelques décimètres. Il est probable qu'il s'agissait ici, non de « Houiller », mais d'une zone de broyage en plein Cristallophyllien, et où s'étaient accumulés des produits de laminage des gneiss. L'étude pétrographique de ces roches, faite par M. A. MICHEL-LÉVY, ne s'oppose pas à cette interprétation. Voici la diagnose que donne notre collègue :

Ce sont d'anciens sédiments schisteux et gréseux très laminés, puis séricitisés et chloritisés.

L'un des échantillons est composé de très fins éléments quartzeux et argileux au sein desquels subsistent de très petits galets de quartz et de gneiss probable.

Un autre contient des débris plus grossiers, principalement de quartz en plages à individus cristallins multiples; les feldspaths y sont assez rares.

De nombreux minéraux secondaires ont pris naissance après le laminage : fines chlorites, séricites, granules de sphène.

Ces anciens sédiments ont dû se former au détriment du gneiss, matériel originel de la mylonite qui les enserme.

2° Le Houiller.

Le massif hercynien des Grandes-Rousses comporte deux grands synclinaux houillers, étudiés et cartographiés par P. TERMIER (fig. 4) :

1° *Le synclinal occidental des Grandes-Rousses.*

Il ne nous intéresse que tout à fait accessoirement; recoupant la vallée de la Romanche bien en aval du Freney, il a

été traversé par le tunnel de la dérivation alimentant l'Usine de Sainte-Guillerme.

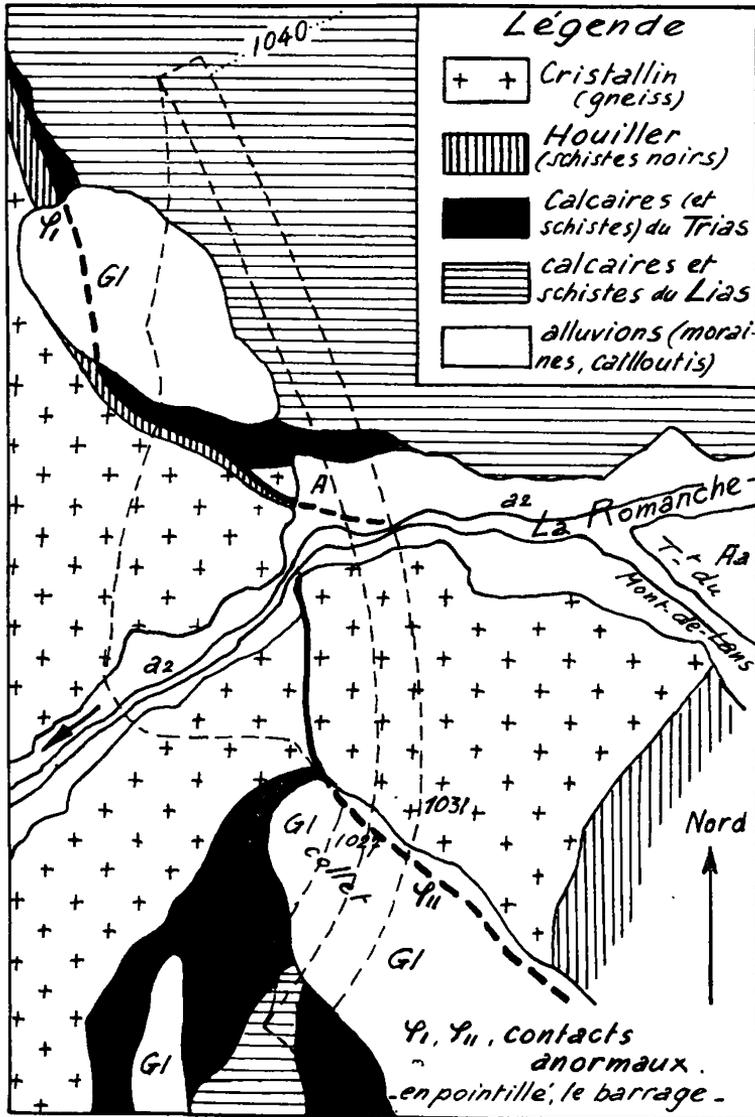


FIG. 5. — CARTE GÉOLOGIQUE DÉTAILLÉE DE L'EMPLACEMENT DU BARRAGE DU CHAMBON.

C'est dans ce synclinal que sont situées, bien plus au Nord, les mines d'antracite dites des Grandes-Rousses, sur la commune d'Huez; de là, la bande houillère, dirigée exactement Nord-Sud, vient franchir la Sarenne au Gua, puis par le Col de Cluy, passe sur le versant de la Romanche, où elle a été exploitée autrefois entre Auris et Le Freney : de la route nationale du Bourg-d'Oisans au Chambon, on aperçoit de loin ⁴ les schistes noirs et les déblais de ces anciennes mines : ils apparaissent au-dessus du ruban jaune des cargneules triasiques, lui-même dominant des ravinements d'un noir bleuâtre entaillant les schistes du Lias.

Mais, au niveau de la Romanche et de la route, les schistes houillers, verticaux, sont très laminés et dynamométamorphisés : ils deviennent très compacts, et, ne contenant que de rares bancs gréseux très minces, ils sont à première vue fort difficiles à distinguer des schistes cristallins antéhouillers; on les reconnaîtra néanmoins à distance, à leur feuilletage très régulier, ce qui les oppose aux formes plus irrégulièrement bosselées, avec gros bancs massifs, qui caractérisent les parois gneissiques.

2° *Le synclinal oriental des Grandes-Rousses.*

Dans la haute vallée de la Sarenne, ce synclinal est beaucoup plus large que le précédent et constitue le petit massif de la Croix de Cassini; car, comportant un grand développement de conglomérats durs, le Houiller peut déterminer ici des reliefs bien marqués.

⁴ Le meilleur point de vue se trouve à l'endroit où la route, avant de redescendre sur Le Freney, passe dans une petite encoche garnie de moraines : on montera sur le petit mamelon gneissique (verrou) séparant cette encoche des gorges de la Romanche; on jouit là d'un des panoramas géologiques les plus instructifs de toute la région.

Mais en descendant vers le confluent de la Romanche et du Ferrand, il se rétrécit en même temps qu'il se divise en deux branches, séparées par l'éperon de gneiss qu'entaille le bas Ferrand et sur lequel s'appuie le barrage du Chambon.

La *branche occidentale* reste assez large et bien marquée jusqu'à la Romanche et à la route : il s'y intercale une lame de porphyres (orthophyres) très laminés, difficiles à distinguer des chistes cristallins, et reconnus seulement à la suite des études micrographiques de P. TERMIER; cette branche est traversée par le tunnel de dérivation.

Dans la *branche orientale*, dès la traversée du Ferrand, le Houiller devient beaucoup plus difficile à reconnaître; il y contient bien des bancs de grès et même de conglomérats; mais, comme nous l'avons dit, de telles roches peuvent se rencontrer même dans les schistes cristallins; de plus, le Houiller forme ici la bordure externe du massif cristallin, immédiatement au contact de sa couverture triasico-liasique; on se trouve ici dans une zone de laminage, où les roches précitées pourraient, à la rigueur, représenter des sortes de mylonites dues au broyage du Cristallin.

En tout cas, si, conformément à la carte de P. TERMIER, on fait de ces roches du Houiller, on les voit arriver en placage mince au sommet de la zone de fondation du barrage rive droite : nous les y décrirons plus loin; et nous les mentionnerons aussi sur la rive gauche, à une certaine distance en amont du barrage (fig. 6 - 1, 2, 3).

3° Le Trias.

Dans la couverture des Grandes-Rousses, et même, plus généralement, des autres massifs hercyniens alpins, le Trias comprend les roches suivantes :

1° Des *grès arkosiques* de base, dont l'épaisseur varie de 0 à quelques mètres; quand ils sont laminés, ils sont parfois

difficiles à distinguer des schistes cristallins (ou des grès houillers).

2° Des *calcaires dolomitiques* et siliceux, en bancs souvent massifs de 2 ou 3 m.; leur épaisseur totale peut atteindre 10 ou 20 m.; à grain très finement cristallin, ils se montrent gris-clair sur les cassures fraîches, mais brun-jaunâtre sur les surfaces altérées, d'où le nom expressif de « dolomies-capucin » qui leur a été donné par P. TERMIER; nous y avons noté, exceptionnellement, la présence, non encore constatée, de nodules de silex (le Chambon, et Montvernier, sur la couverture du petit massif du Rocheray, entre La Chambre et Saint-Jean-de-Maurienne). Par altération et dissolution, ces calcaires peuvent passer à des cargneules jaunes, plus ou moins terreuses, qu'on trouve habituellement associées irrégulièrement aux roches suivantes.

3° Des *schistes bariolés* (noirs, rouges, verdâtres, jaunes par altération, schistes « mordorés » de P. TERMIER), des cargneules, des gypses et anhydrites, le tout à aspect très chaotique, à cause de la « tectonique salifère »; l'épaisseur est naturellement très variable (0 à plusieurs dizaines, ou même centaines de mètres).

4° Des *spilites*, roches basaltiques, de teinte foncée, noire, violacée ou verdâtre, formant, soit des coulées, soit des tufs cinéritiques; elles sont souvent fort épaisses, et toujours à la limite supérieure du Trias; mais on n'en a point rencontré dans les travaux du Chambon.

Le terme le plus constant de ces complexes triasiques est le calcaire dolomitique, qui subsiste souvent seul. Comme l'un de nous l'a déjà fait remarquer ailleurs, les cargneules et surtout les gypses manquent presque toujours dans les revêtements triasiques plaqués contre le massif cristallin des Grandes-Rousses. Au contraire, les gypses (avec cargneu-

les) apparaissent en masses énormes injectées en « anticlinaux salifères » dans la couverture liasique, à distance du massif ancien : tel est le cas pour les pointements de gypses des Cols du Couard et du Sabot, situés presque au milieu du synclinal liasique qui sépare les massifs des Grandes-Rousses et de Belledonne. Souvent ces anticlinaux salifères, réduits par étirement à de simples lames, et privés par dissolution de leurs gypses et anhydrites, ne sont plus marqués que par de véritables filons de cargneules épais de quelques mètres ou d'une dizaine de mètres et intercalés au sein de séries liasiques d'allure apparemment régulière et tranquille (ex. : sentier des Traverses entre le Lautaret et l'Alpe du Villar-d'Arène, vallée du Maurian en amont des Hières au-dessus de La Grave).

Cette indépendance entre les gypses et les massifs cristallins est si générale que pendant longtemps, voyant les gypses apparaître intercalés au sein du Lias, Ch. LORV, comme ses prédécesseurs, crut à leur âge liasique.

Les gypses et cargneules étant des roches solubles, toujours perméables, parfois meubles et ébouleuses, constituent pour les Ingénieurs de graves dangers, d'autant plus qu'aux affleurements elles sont souvent masquées et risquent ainsi de passer inaperçues. C'est à juste titre que le Trias est, dans toutes les Alpes, le seul terrain vraiment redouté des Ingénieurs.

Nous verrons plus loin que, dans les fondations du barrage, la règle générale énoncée plus haut s'est trouvée heureusement vérifiée. Le Trias, collé contre le Cristallin, n'y a montré que des calcaires et des schistes, sans trace de gypses ni de cargneules; la réussite des travaux du barrage est donc due en bonne partie à l'influence de la tectonique salifère, qui a expulsé en dehors de la zone des fondations toutes les « formations salifères » qui eussent pu contenir des roches dangereuses.

4° Le Lias.

Il a ici son « faciès dauphinois », caractérisé par de grandes épaisseurs de roches vaseuses, à grain fin, plus ou moins argileuses; tout au plus, près de la base, quelques bancs ont-ils un aspect cristallin, avec débris d'Entroques ou de Bivalves, sans qu'on puisse y individualiser la « luma-chelle rhétienne », que les laminages ont rendue presque toujours indistincte autour des massifs hercyniens de la première zone alpine.

On distingue d'ordinaire dans cette zone un Lias inférieur, ou « Lias calcaire », et un Lias supérieur ou « Lias schisteux ». Seul le Lias calcaire a été intéressé par les travaux du barrage : ce sont des alternances de bancs de calcaires schisteux noirs à grain fin, assez argileux, épais de quelques décimètres, et séparés par de très minces délits plus argileux; la schistosité est souvent différente de la stratification.

Du point de vue des travaux, ce Lias est une roche très favorable, imperméable, et d'une excellente tenue partout où elle n'a pas été altérée par les agents atmosphériques ou par des circulations d'eaux souterraines.

Enfin rappelons pour mémoire que le tracé de la nouvelle route au-dessus de la retenue a recoupé le Lias schisteux et même une bande de Dogger (calcaires marneux noirs).

5° Formations quaternaires;

Histoire de la vallée de la Romanche.

En se plaçant d'un point de vue très général et extrêmement schématique, on peut distinguer dans les vallées internes de nos Alpes trois types de structure, qui se succèdent de l'amont à l'aval de la manière suivante, sauf nombreuses et diverses exceptions ou interversions locales :

A) *Vallées purement glaciaires.* — Dans les parties supérieures, que les érosions régressives postglaciaires remontant de l'aval n'ont pu encore atteindre, les vallées ont encore conservé, presque intacte, la morphologie que leur avait léguée la dernière extension glaciaire : des « bassins » élargis et comblés d'un mélange de moraines de fond, d'alluvions torrentielles, de cônes de déjections latéraux, d'éboulis descendus des versants, y alternent avec des tronçons plus rétrécis, verrous ou gradins, où le fond rocheux du glacier a été à peine entamé par les torrents sous-glaciaires ou post-glaciaires.

Là le profil longitudinal du talweg rocheux est très irrégulier, avec des « surcreusements glaciaires » très considérables dans le tréfonds des bassins en roches tendres, suivis à l'aval par de brusques contre-pentes causées par l'apparition de roches dures.

C'est ce premier type de structure qu'a gardé la vallée de la Romanche dans la région du Chambon : le bassin de retenue y a été surcreusé dans le Lias tendre, puis rempli de moraines et d'alluvions; tandis qu'à l'aval le barrage est installé sur un verrou gneissique avec contre-pente. A l'aval ce même type de structure se prolonge dans le bassin du Freney.

B) *Vallées entaillées par l'érosion régressive postglaciaire.* — Ici l'ancien fond de vallée glaciaire a été entamé par l'érosion torrentielle postglaciaire remontant de l'aval : ce fond subsiste sous forme de replats dominant la gorge récente entaillée, soit dans la roche en place des gradins ou verrous, soit dans les dépôts de remplissage des bassins. Ici le profil longitudinal du talweg rocheux tend à se régulariser, par attaque des contre-pentes; et les moraines se retrouvent, non dans le fond de la vallée, mais éparses contre les versants.

Dans la vallée de la Romanche, ce type est réalisé entre le Freney et la plaine du Bourg-d'Oisans; dans la vallée du

Drac, il s'étend en principe entre la région de Chauffayer (amont de Corps) et le pont de Ponsonnas (au Sud de La Mure).

C) *Vallées en voie de remblaiement postglaciaire.* — Là des remblaiements postglaciaires, dus à des causes locales diverses, remontent progressivement en venant de l'aval; de sorte qu'au fond de la gorge postglaciaire, le torrent coule sur une plaine alluviale récente plus ou moins large.

C'est ainsi que, dans la vallée de la Romanche, la plaine du Bourg-d'Oisans est due, comme on l'a vu, à un remblaiement très récent et très rapide : elle joue le rôle d'un « niveau de base local » pour la Romanche supérieure. Ce remblaiement ne remonte guère au delà de l'Usine de Sainte-Guillerme, laquelle a été édifiée précisément près de l'extrémité amont de l'étroite plaine alluviale qui occupe le fond de la gorge postglaciaire.

Dans la vallée du Drac, la plaine alluviale récente remonte du confluent de l'Isère jusqu'aux abords du pont de Ponsonnas.

III. — La zone de fondation rive droite.

Comme nous l'avons dit au début, cette zone de fondation vient recouper le contact Cristallin-Lias à peu près à mi-hauteur entre la crête du barrage et le lit naturel de la Romanche; de sorte que la partie supérieure du barrage s'appuie uniquement sur le Lias et sa base (au-dessous de la Romanche) uniquement sur le Cristallin (pl. III-B et pl. IV).

1° Le soubassement cristallin.

Il était formé ici par les habituels « gneiss dynamométamorphisés », s'élevant en parois abruptes, nettoyées par

l'érosion, et où par suite les altérations superficielles étaient très peu importantes : on avait presque immédiatement la roche saine.

La seule particularité notable à signaler ici est la présence, dans le bas de la zone de fondation rive droite, au milieu des gneiss, d'une lame de schistes noirs argileux, très tendres, que les Ingénieurs avaient pris l'habitude d'appeler « la faille des schistes houillers » (*f* de la coupe 3, fig. 6 et de la fig. 7); nous y avons fait allusion plus haut. Cette lame, très fortement inclinée vers l'amont, épaisse de quelques décimètres, s'appuyait vers l'aval sur la grande masse des gneiss de l'éperon; elle était surmontée, du côté amont, par un coin de gneiss dont l'épaisseur paraissait croître vers le bas. Ainsi intercalée en plein gneiss, il est probable, comme nous l'avons dit, que cette lame n'était pas formée de schistes houillers en place; elle devait correspondre, soit à une zone de broyage remplie de matériaux argileux de toutes provenances, soit à une de ces passées de schistes très peu métamorphiques que l'on rencontre parfois en plein gneiss.

Quoi qu'il en soit, cette lame de roches très tendres, dont la présence ici, en dessous du niveau de la Romanche, était absolument imprévisible, a donné certaines difficultés. La zone de fondation, et en particulier le parafouille, la traversaient très obliquement; la roche s'enlevait facilement au pic et on avait craint un moment qu'il ne pût se produire par là des infiltrations; un programme étendu d'injections avait même été proposé pour « coudre » cette faille. Mais nous avons suggéré de faire auparavant un forage d'essai avec injection d'eau sous pression : partant de la surface décapée de l'écaille de gneiss à l'amont, ce forage a traversé en profondeur la lame de schistes, puis a été poussé jusque dans la grande masse de gneiss de l'aval; il n'a presque pas donné de pertes, de sorte qu'on put être rassuré sur l'étanchéité naturelle de la « faille ». Cela n'a rien d'étonnant, car si

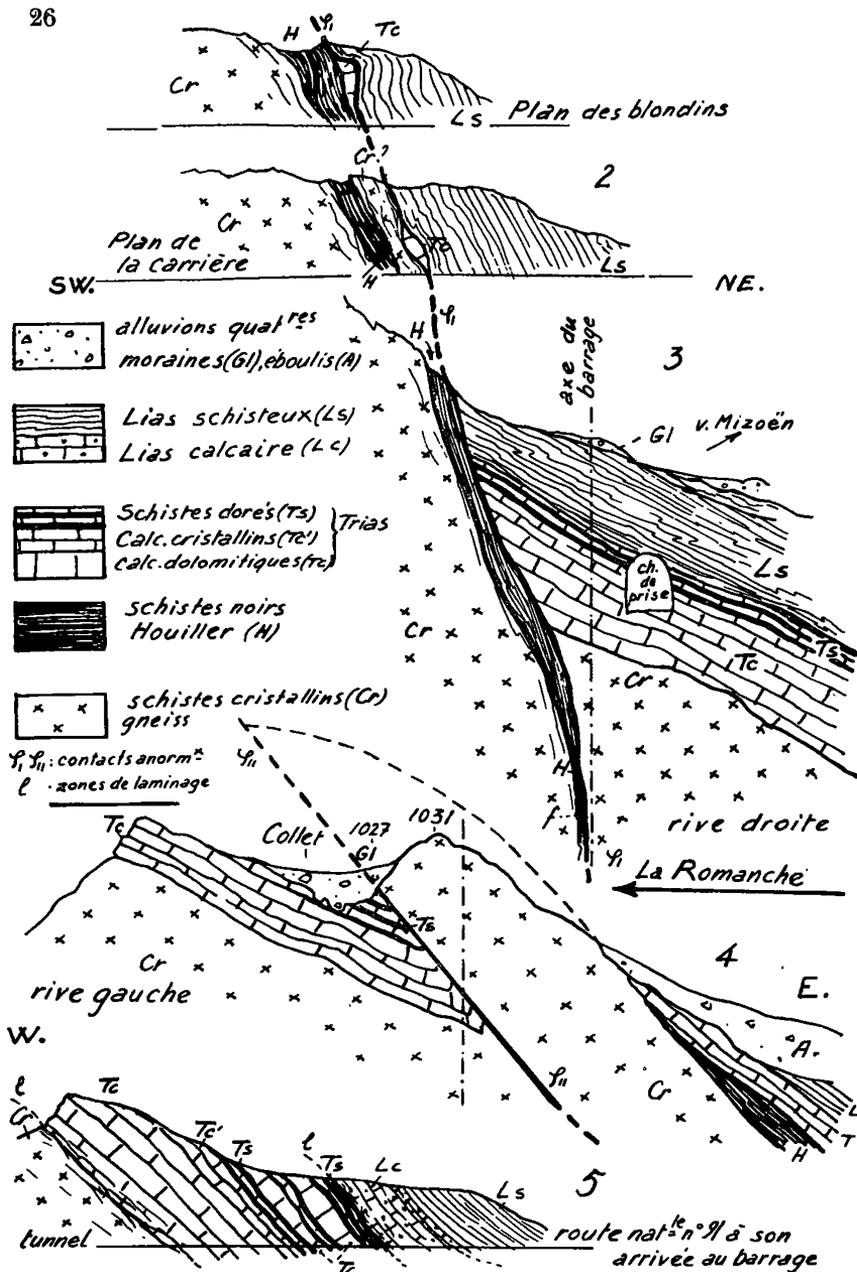


FIG. 6. — SÉRIE DE COUPES GÉOLOGIQUES DE LA ZONE DU BARRAGE.

Les coupes 3 et 4 représentent les appuis du barrage sur la rive droite et la rive gauche. (V. les pl. III-A et B, et IV).

des failles ou surfaces de laminage donnent souvent naissance à des cheminements d'eau quand elles se produisent dans des roches compactes et massives, elles se colmatent au contraire naturellement quand elles affectent des roches argileuses et plastiques.

Par contre, le prolongement de cette faille dans les parties les plus basses de la fouille donna lieu à des difficultés bien plus graves. Là, par suite du fort plongement de la faille, le parement amont venait reposer sur cette passée de schistes argileux, ce qui pouvait être dangereux, en raison de l'énorme différence de résistance à la compression entre ces schistes et les gneiss; à tel point que l'on envisagea un instant la construction d'une petite voûte en ciment armé sur laquelle le parement amont aurait reposé à la traversée de cette bande schisteuse. Une telle solution, qui eût été un peu risquée, devint d'ailleurs inutile, car, comme nous le verrons, on fut conduit par ailleurs à reculer ce parement vers l'aval : il vint alors reposer sur la grande masse des gneiss à l'aval de la faille; et cette dernière se trouva enrobée dans la zone de fondation à une cote bien supérieure, où la surface de contact béton-rocher était à peu près verticale.

2° Le Trias.

Le Trias a montré ici un développement très variable par suite des laminages : car son épaisseur, entre la base et le sommet du barrage, passe de 10 m. environ à 0.

Dans le bas, les calcaires triasiques, directement appuyés sur le Cristallin, sont très épais. Avant les travaux, on les voyait former, au-dessus du lit de la Romanche, une paroi rocheuse abrupte séparée de l'éperon cristallin par un étroit couloir presque vertical. Cette masse calcaire a été entaillée par le parafouille et par l'entrée de la galerie de prise

(fig. 6 - 3). Ces calcaires avaient été soumis à de fortes pressions orogéniques puisque, quelques mètres plus haut, ils se laminent entièrement; de fait, parcourue par un réseau de filons de calcite, la roche a l'aspect d'une véritable brèche recimentée : elle a bien été broyée et fracturée par les laminages, mais toutes les fissures ont été naturellement obturées par la recristallisation, bien plus parfaitement que n'auraient pu le faire des injections de ciment. Ainsi, contrairement à

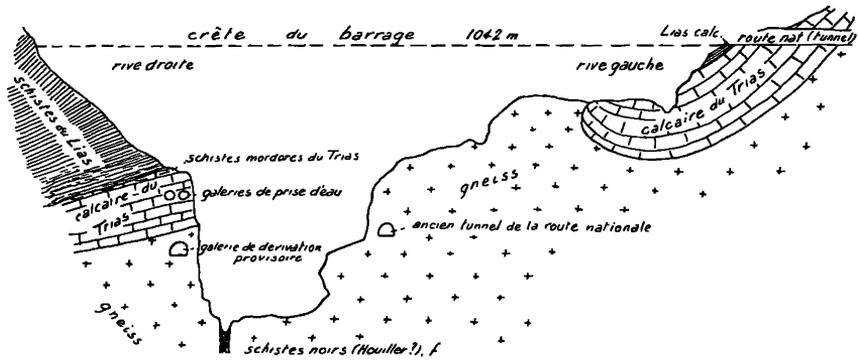


FIG. 7. — COUPE GÉOLOGIQUE TRANSVERSALE DU CANYON DE LA ROMANCHE PASSANT PAR L'AXE DU BARRAGE.

ce qu'on aurait pu craindre, le calcaire s'est montré très compact, imperméable, ne prenant presque rien aux injections.

Au-dessus de cette paroi de calcaires triasiques, on ne voyait, avant les travaux, que des pentes herbeuses très raides, d'un parcours difficile. Déjà P. TERMIER avait conseillé de faire là quelques tranchées de fouille; ces travaux de prospection montrèrent très rapidement, sous la terre végétale, une roche en place formée par des schistes très altérés, de couleur jaunâtre : c'est là l'aspect habituel des schistes bariolés du Trias quand ils sont altérés superficiellement : on les retrouve souvent ainsi dans tout le massif des Gran-

des-Rousses, où P. TERMIER les a appelés les « schistes mordorés ». Fort heureusement, ils n'étaient là pas associés à la moindre trace de gypses ni de cargneules.

L'épaisseur de ces schistes jaunes, de plusieurs mètres dans le bas, diminue rapidement vers le haut, en même temps que celle des calcaires, de sorte que là où ils sont recoupés par la zone de fondation ils sont réduits à quelques décimètres.

Quant aux calcaires, dans cette même région haute, on les voit se laminer et se morceler; finalement ils se réduisent à des lentilles de quelques décimètres, égrenées en chapelet entre les gneiss et le Lias. Cette zone de laminage très intense n'a donné lieu dans les travaux à aucune difficulté (fig. 6, coupes 1 et 2).

3° Le Lias.

Nous savons déjà que la partie supérieure du barrage s'appuie directement sur le Lias. Et cette région de la zone de fondation se présentait, après décapage, dans des conditions tellement favorables que les Ingénieurs n'ont même pas jugé nécessaire de la soumettre à un examen géologique avant bétonnage.

4° Conclusions.

Sur cette rive droite, où la pente naturelle du versant était très rapide, même souvent verticale, il n'y eut ni éboulis ni moraines à déblayer. Pour la même raison, la roche en place était déjà naturellement nettoyée et les altérations superficielles étaient presque nulles, surtout pour les gneiss. Ainsi se vérifia la règle, d'ailleurs bien naturelle, formulée par M. LUGEON : plus la pente d'un versant est forte, plus

réduits sont les déblais de terrains superficiels ou de roches altérées.

Si l'on ajoute qu'en profondeur les gneiss étaient ici très peu fissurés, et que, par conséquent, les absorptions de ciment aux injections ont été très peu considérables, on voit qu'au total, sur cette rive, les travaux de fondation ont été exceptionnellement faciles.

Rappelons que la seule difficulté, bien minime d'ailleurs, a été constituée par la rencontre de la « faille des schistes houillers », c'est-à-dire par un accident d'une importance tout à fait secondaire du point de vue géologique, et d'ailleurs impossible à prévoir. Au contraire, le laminage intense dont témoigne la surface de contact du massif cristallin et de sa couverture sédimentaire, laminage qui, pour le géologue, constitue le trait le plus saillant de la structure de cette région, n'a eu, dans les travaux de fondation, aucune conséquence fâcheuse.

IV. — La zone de fondation rive gauche.

Sa structure est bien plus compliquée que celle de la rive droite; et les travaux de fouille et les déblais y ont été bien plus importants (fig. 5, 6 et 7, et pl. III-A).

Décrivons d'abord la topographie des lieux avant tous travaux.

L'éperon cristallin venant rétrécir brusquement la vallée à l'emplacement du barrage, et que l'ancienne route franchissait en tunnel, s'élève presque verticalement jusqu'à un petit mamelon à la cote 1031, dont le sommet était encore formé par les gneiss.

Entre ce mamelon et la montagne se dessinait un petit col, à la cote 1027; cette sorte d'encoche, à sol herbeux, était garnie de dépôts morainiques. Sur le versant amont (côté

retenue) de ce col, en bordure de l'éperon gneissique, les pentes régulières et assez douces, herbeuses, ne montraient pas d'affleurements nets. Par contre son versant aval se dressait en falaises très raides, parsemées de sapins, au-dessus des gorges de la Romanche, entaillées dans les gneiss. La partie supérieure de ces falaises était à peu près inaccessible; d'autre part, le mamelon 1031 étant entièrement en gneiss, et le sommet de la falaise aval du col 1027 restant en dessous de cette cote, on pouvait être tenté de croire que toute la falaise devait être en Cristallin, et que le barrage, s'appuyant sur le col, déterminerait une retenue entièrement fermée du côté de l'aval par une masse continue de Cristallin se dressant en falaises.

Lors de nos premières explorations de ce versant aval du col, nous parcourûmes un ancien chemin, dit « romain », qui, passant en corniche dans les gorges de la Romanche (pour éviter l'éperon rocheux vertical que la route moderne franchissait en tunnel), venait aboutir au col 1027; ce chemin ne permettait de voir que la partie inférieure des falaises, où il était entaillé dans les gneiss. Mais on y reconnaissait les ruines d'un très ancien four à chaux; la situation de ce four nous fit présumer que la partie supérieure des falaises qui le dominaient devait être formée par les calcaires triasiques, ce que nous vérifiâmes ensuite au marteau. Mais il faut reconnaître que, dans la falaise, la limite du Cristallin et du Trias ne se traduisait nullement dans la topographie et était impossible à soupçonner de loin.

De là découlait une conclusion fort importante : c'est que, dans la région du col 1027, la retenue ne serait plus fermée à l'aval par la masse gneissique; le barrage reposerait là sur le Trias et des infiltrations partant de la retenue pouvaient, après avoir cheminé horizontalement dans ce Trias, venir ressortir dans les falaises à l'aval du barrage. C'est pourquoi, dès le début des travaux, nous fûmes amenés à recommander

de soigner tout spécialement les fouilles et les étanchements au voisinage de ce col.

Tectoniquement, ces conditions géologiques correspondent à un petit accident. Le massif gneissique couronné par le mamelon 1031 constitue une petite écaille, poussée sur les calcaires triasiques qui viennent s'insinuer dans le col 1027, comme le montre la coupe schématique 4 de la figure 6.

Les travaux ont présenté sur cette rive gauche les particularités suivantes :

Eperon gneissique du mamelon 1031.

On aurait pu croire à priori que les gneiss de cette rive seraient, comme sur la rive droite, peu fissurés et altérés : il n'en fut rien.

Pour juger de l'état de la roche en profondeur, on disposait ici, au niveau de la Romanche, du tunnel de l'ancienne route, et, mieux encore, du nouveau tunnel provisoire, situé encore plus profondément dans la montagne, et dans lequel on avait dévié la route pendant la durée des travaux, comme nous l'expliquerons plus loin. L'examen de ces tunnels avait un instant donné lieu à des appréciations pessimistes; la roche n'était pas jugée assez « fraîche », et il fut même question d'un décapage de grande envergure, qui aurait conduit à abattre toute la masse rocheuse comprise entre la surface et le tunnel. Nous constatâmes au contraire (en compagnie de M. Charles JACOB, appelé spécialement pour juger de cette question) que dans le tunnel on ne voyait pas trace de zones rubéfiées; quant à la roche elle-même, ce n'était point un gneiss typique, mais un gneiss « mylonitisé » (voir plus haut), contenant des minéraux de néo-formation; mais ce n'en était pas moins une roche excellente et très compacte; et surtout, on n'aurait absolument rien gagné à pousser les décapages en profondeur : la roche fût restée la même, c'est-à-dire meilleure que le béton par lequel on l'aurait remplacée.

De sorte que, dans toute la base de l'éperon, dans les falaises dominant la Romanche, les décapages purent être réduits au minimum.

Il n'en fut pas de même au voisinage du sommet du mamelon 1031; là, la pente du terrain diminuant, la zone d'altérations superficielles se montra, suivant la règle, très profonde; la roche étant très pyriteuse, elle apparaissait très pourrie et rubéfiée; il fut nécessaire de décapier la zone de fondation, et surtout le parafouille, beaucoup plus que les Ingénieurs ne l'avaient primitivement prévu dans leurs évaluations de déblais.

De plus, même en profondeur, les gneiss se montrèrent parcourus par de grandes fissures qui absorbèrent de grandes quantités de ciment aux injections; au voile d'injections normal primitivement prévu, on ajouta donc un certain nombre de grands forages profonds, soit à partir de la surface, soit à partir du tunnel. On peut penser que cette fissuration profonde tient ici à ce que, sous l'influence des mouvements orogéniques, l'éperon rocheux a travaillé plutôt à l'« éclatement » qu'à la « compression et au laminage ».

Le col 1027.

C'est là que les déblais ont été les plus importants. Des moraines à blocs souvent énormes y recouvraient le rocher sur une épaisseur moyenne de plusieurs mètres. De plus la surface du fond rocheux était extrêmement irrégulière; on y rencontra plusieurs marmites, en forme de puits verticaux, à parois régulièrement arrondies, et atteignant 5-6 m. de profondeur. Dans ce col ont donc dû passer de puissants torrents sous-glaciaires.

Comme nous l'avons vu, le fond rocheux était ici formé par les calcaires triasiques. Les altérations superficielles y

étaient faibles, comme toujours dans les calcaires; mais par contre la roche était beaucoup plus fissurée que sur la rive droite. Rappelons-nous en effet qu'ici les calcaires dessinent un synclinal assez large, en fond de bateau; et les couches horizontales du fond de ce synclinal ont été comprimées entre la grande masse des gneiss de l'aval et le coin gneissique constitué par l'éperon du mamelon 1031; sous l'influence des pressions orogéniques, les calcaires ont donc eu tendance à « éclater sur place » plutôt qu'à se laminer en s'« écoulant », comme ils l'avaient fait sur la rive droite. Beaucoup de fissures étaient ainsi restées ouvertes, non recimentées par des dépôts de calcite. Aussi les injections ont-elles donné lieu à des absorptions parfois considérables, et très irrégulièrement réparties, parfois à de grandes profondeurs.

En particulier nous avons, dès le début des travaux, attiré l'attention sur le cheminement particulièrement facile que devait constituer dans cette région la surface de contact Trias-Cristallin; car ici, les masses rocheuses ayant travaillé à la compression sans écoulement, on pouvait supposer que les joints avaient eu tendance à s'ouvrir, contrairement à ce qui s'est passé sur la rive droite. De fait, c'est dans cette surface de contact que les injections sont allées le plus loin : certaines d'entre elles, après avoir cheminé 30 m. dans le massif rocheux, sont venues ressortir dans les falaises à l'aval de la zone de fondation.

La partie supérieure.

Au delà, c'est-à-dire au-dessus, de la dépression du col 1027, les travaux de fondation n'ont donné lieu à aucune difficulté; au-dessus des calcaires triasiques, les fouilles ont traversé quelques mètres à peine de schistes bariolés (schistes mordorés), puis la base du Lias.

Nous signalons d'ailleurs aux géologues visitant le barrage qu'une très bonne coupe de cette région est donnée par le tunnel que traverse le nouveau tracé de la route nationale juste avant de déboucher sur la crête du barrage (fig. 6, coupe 5). La partie aval de ce tunnel est formée par les gneiss; puis viennent les calcaires triasiques, séparés des gneiss par un joint dont on peut suivre la trace tout autour des parois du tunnel; il n'y a pas trace de cargneules ni de gypses; et la limite des calcaires triasiques et du Lias est difficile à préciser: aux calcaires triasiques francs, dolomitiques, à grain très finement cristallin, succèdent des intercalations schisteuses, tantôt noires, tantôt brunâtres par altération superficielle (type « schistes mordorés »); puis les bancs calcaires deviennent plus cristallins, plus spathiques; des assises lumachelliques (Rhétien?) semblent exister, mais rendues indistinctes par le laminage. Enfin, après quelques mètres de ces complexes, commence la puissante et monotone série des calcschistes liasiques à faciès vaseux.

En tout cas, dans la zone de fondation du barrage, on voit que le Trias repose directement sur le Cristallin. Par contre, mentionnons pour mémoire qu'en dehors de cette zone, dans le versant qui est baigné par la retenue, au Sud-Est du barrage, on voit affleurer des grès plus ou moins grossiers qui doivent être probablement attribués au Houiller: c'est ainsi que nous les avons figurés sur la carte géologique ci-jointe.

V. — Les fouilles dans le talweg de la Romanche.

Avant les travaux, la Romanche coulait partout sur un lit d'alluvions; la largeur de cette minuscule plaine alluviale, à l'emplacement même du barrage, était évidemment très faible, et se réduisait par endroits à 3-4 m.; mais nulle part la roche en place n'était visible dans le lit même.

connaître leurs pronostics sur l'épaisseur de ces alluvions. P. TERMIER, dans son Rapport géologique, demandait que l'on fit quatre sondages tubés, dans l'axe même du lit de la rivière, en quatre points précis, tous situés dans la région que devrait couvrir le mur du barrage. Il estimait que cette épaisseur devait être de l'ordre de 20 m. environ.

Avant tous travaux, on procéda donc dès 1921 à quatre sondages dans le lit alluvial. Alignés suivant le lit du torrent, ces sondages sont numérotés de 1 à 4 de l'amont à l'aval; ils furent exécutés au trépan d'abord, dans les alluvions, puis continués à la grenaille dans les gneiss (fig. 8 et 9).

Sondage n° 1,	953,54 alluvions	926,84	gneiss	donc	25 m.	d'alluvions
— n° 2,		935,03	—	—	14-16 m.	—
— n° 3,		937,00	—	—		—
— n° 4,	950,00 alluvions	919,00	—	—	31 m.	—

Dans les plans primitifs, le parement amont devait tomber au voisinage du sondage n° 1, et le parement aval au voisinage du sondage n° 4; on verra plus loin que ces plans durent être modifiés en cours d'exécution.

Comme on le voit, ces quatre sondages étaient insuffisants pour connaître avec précision l'allure du fond rocheux: ils ne pouvaient donner que des valeurs minima pour l'épaisseur des alluvions. En effet, l'ancienne gorge sous-glaciaire devait se rétrécir progressivement vers le bas; et il était bien improbable que les quatre sondages fussent précisément tombés dans l'axe du talweg de cette gorge; il eût été nécessaire de multiplier les sondages dans un même profil transversal, en les faisant par exemple à 1 m. 50 ou 2 m. de distance dans les parties les plus profondes.

De fait, les fouilles montrèrent que les sondages n'avaient atteint que les parois latérales de la gorge, et que le talweg de cette dernière était partout plus profond qu'on ne le supposait.

Au droit du sondage n° 1, les fouilles firent voir que le talweg rocheux descendait presque verticalement vers l'amont; on s'enfonça en mettant à nu cette paroi verticale; à la cote 915, la paroi amont des fouilles n'avait pas encore rencontré le rocher; on fit alors, à 1 m. 50 environ en amont de cette paroi, un sondage (n° 5) qui n'atteignit le rocher qu'à la cote 909.

Les venues d'eau augmentaient avec la profondeur, et les boisages menaçaient de céder; on jugea impossible de prolonger les fouilles jusqu'à de telles profondeurs et on les arrêta donc à la cote 915. Or, à cette cote, le parement amont, tel qu'il avait été prévu primitivement, avec un fruit de 0,05, venait tomber dans la partie amont des fouilles, c'est-à-dire en amont du rocher mis à nu. Pour amener ce parement à reposer sur le rocher, on fut obligé de le rendre ici vertical; enfin, comme la paroi rocheuse sur laquelle il devait venir s'appuyer était elle-même presque verticale, on entailla la base de cette paroi de manière à y créer un redan, une plateforme horizontale sur laquelle vint s'appuyer la maçonnerie⁵; enfin, pour assurer encore plus parfaitement l'adhérence du béton au rocher et éviter tout danger de décollement, toute la base du parement fut ancrée dans la paroi rocheuse au moyen de fers scellés dans le gneiss.

Pendant que s'étaient poursuivies ces fouilles, les massifs de maçonnerie latéraux du barrage sur les deux versants étaient déjà édifiés, avec le fruit prévu de 0,05 pour leur parement amont. On décida alors de raccorder par des surfaces gauches ces parties latérales du parement amont avec la partie centrale, verticale; pour le visiteur non prévenu, cette petite anomalie de construction passe d'ailleurs tout à fait inaperçue (fig. 10).

⁵ M Charles JACOB, au cours de la visite dont nous avons parlé, insista beaucoup sur l'utilité de cette précaution.

Du côté du parement aval, les fouilles conduisirent à une modification analogue. Là, le sondage n° 4, trouvant le rocher à la cote 919, avait rencontré une paroi latérale de la gorge, et non son talweg. En effet, en poursuivant les fouilles vers

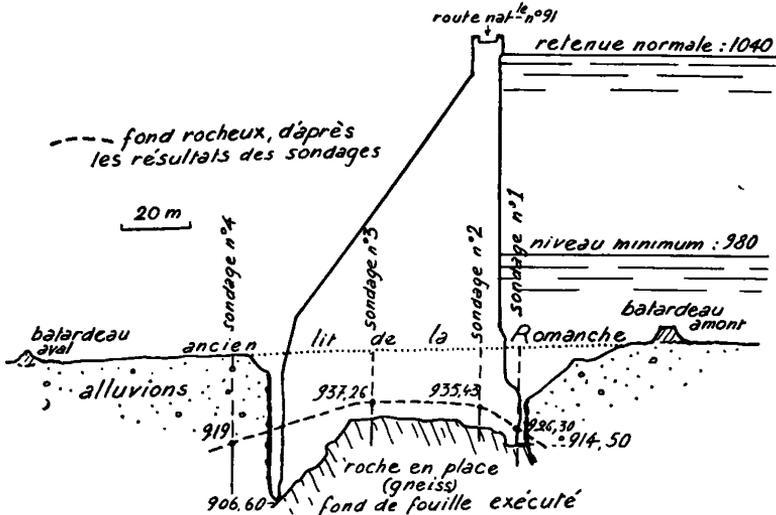


FIG. 9. — LE BARRAGE EN PLACE.

Coupe passant par l'axe du canyon de la Romanche.

l'aval, on constata qu'à 16 m. à l'amont du sondage n° 4 le fond rocheux était déjà descendu jusqu'à la cote 906; les venues d'eau là étaient peu abondantes, et il eût été possible de pousser les fouilles plus profondément vers l'aval; mais il parut plus raisonnable de les arrêter à cette cote 906; et, pour que le parement aval, primitivement prévu avec un fruit de 0,70, pût reposer ici sur le rocher à la cote 906, on décida de rendre verticale sa partie inférieure à l'aplomb de la gorge, ce qui n'avait aucun inconvénient; là le raccord avec les massifs latéraux déjà construits (avec le fruit de 0,70) fut réalisé par des décrochements à angle droit.

Au total, on voit que le profil longitudinal du talweg rocheux est, à quelques mètres à l'amont du parement amont, à la cote 909 maximum (sondage n° 5); au parement amont, il remonte à la cote 915; sous le corps du barrage il se relève

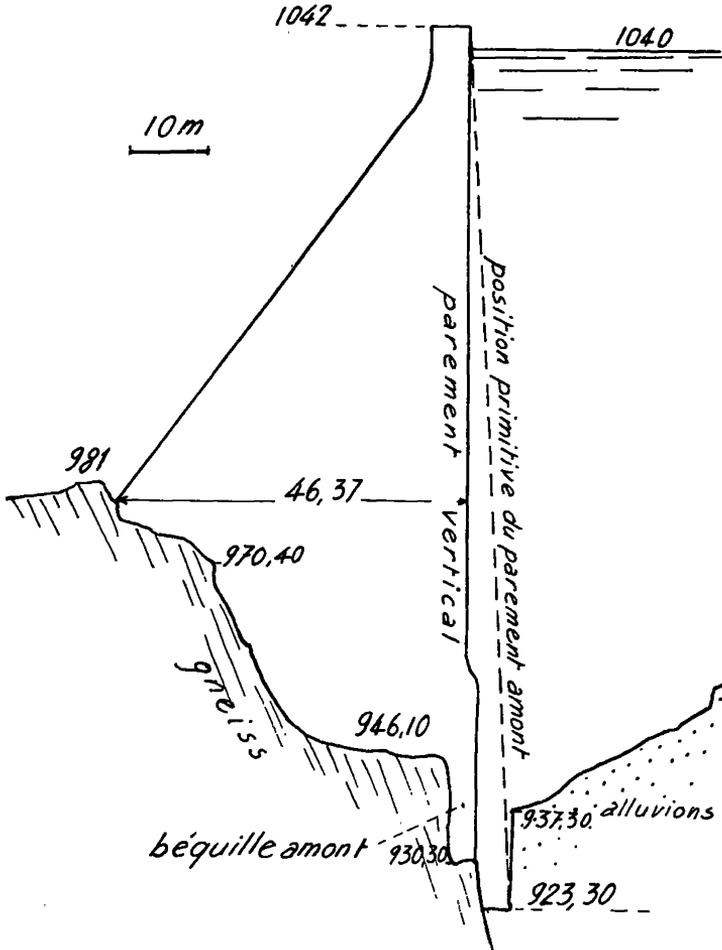


FIG. 10. - COUPE TRANSVERSALE DU BARRAGE (profil 13).

Cette coupe est destinée à montrer la profondeur atteinte par les fouilles en certains points du parement amont et les modifications de profil du barrage qui en sont résultées.

jusqu'à la cote 930 environ; il redescend ensuite, au parement aval, à la cote 906, d'où il doit continuer à descendre vers l'aval (fig. 10).

Ce talweg accuse donc, à l'emplacement même du barrage, une contre-pente de $930 - 909 = 21$ m. au minimum; mais il est infiniment probable que le « surcreusement » a dû se poursuivre encore plus profondément à l'amont, dans le Lias tendre du bassin de retenue, et que la contre-pente doit se chiffrer par plusieurs dizaines de mètres, ou même par une centaine de mètres ou plus.

Cette constatation n'a rien de très naturel : il s'agit ici en effet d'une vallée glaciaire, où l'érosion glaciaire a dû excaver profondément les schistes tendres du Lias à l'amont, dans le bassin de retenue, et s'atténuer brusquement à l'aval, à l'entrée de la vallée dans le massif gneissique; les eaux sous-glaciaires devaient être en pression dans le bassin liasique, et remonter à contre-pente pour franchir le seuil gneissique du Chambon. On sait que, dans les vallées purement torrentielles ou fluviales, les contre-pentes sont fréquentes et se chiffrent par mètres (l'un de nous, dans les fouilles du barrage des Portes du Fier, Savoie, a eu l'occasion de constater une contre-pente de 5 à 6 m.). Pour passer d'un cours d'eau à un glacier, il faut multiplier les hauteurs par 100 environ; dans les vallées glaciaires, des contre-pentes de l'ordre de la centaine de mètres n'ont donc rien de surprenant.

Néanmoins, dans les milieux non techniciens, la révélation de cette contre-pente par les fouilles au parement amont fut une surprise fort désagréable. Précisément au même moment, on venait de constater, au barrage du Sautet, l'existence de pertes de la retenue par une ancienne vallée remplie d'alluvions et située latéralement par rapport au talweg actuel et « court-circuitant » ainsi le barrage (vallée dont l'existence avait d'ailleurs été prévue par les géologues). Certains administrateurs, se refusant à croire, pour le Chambon, à la réalité

d'une contre-pente aussi considérable, émirent l'opinion qu'il y avait peut-être, là aussi, une ancienne vallée latérale; et nous dûmes fournir un Rapport spécial sur cette question pour les rassurer.

Les eaux d'infiltration dans les fouilles.

Les fouilles du parement aval, protégées contre les arrivées d'eau de l'amont par la bosse rocheuse existant sous le corps même du barrage, purent être poussées sans difficultés : les épuisements restèrent constamment faciles.

Il n'en fut pas de même dans les fouilles du parement amont.

Celles-ci furent naturellement effectuées pendant l'hiver; à ce moment, la Romanche superficielle, dérivée en tunnel, n'avait qu'un débit très faible et ne donnait, par la surface, que fort peu d'infiltrations dans les fouilles. Mais les arrivées d'eau augmentèrent rapidement à mesure que les fouilles s'approfondissaient, montrant ainsi l'arrivée de nappes profondes. En particulier, on avait l'impression qu'une notable partie de ces eaux venait du versant gauche, du bassin du torrent du Mont-de-Lans, qui se jette dans la Romanche immédiatement à l'amont du barrage; ce torrent semblait s'infiltrer partiellement en profondeur en arrivant sur son cône de déjections, de manière que ses eaux allaient alimenter, non la Romanche superficielle, mais la nappe profonde sous-alluviale de sa vallée.

C'est là un exemple d'un fait très général dans les vallées alpines, et sur lequel l'un de nous a déjà attiré l'attention ⁶.

⁶ M. GIGNOUX. Les nappes d'eau souterraines profondes dans les alluvions des vallées alpines (*C. R. du Congrès intern. des Mines de la Métallurg. et de la Géol. appliq.*, 7^e session, Paris, 1935, Sect. de géol. appliq. tome II).

Lorsqu'une vallée étroite creusée dans le rocher commence à se remblayer, et à se transformer en plaine alluviale, les premiers stades de ce remblaiement sont formés, le long des versants, par les cônes de déjection latéraux et les éboulis descendus des parois rocheuses encore en pleine jeunesse et très abruptes; ces matériaux perméables forment ainsi une bonne partie du remplissage de la vallée; et au contraire, le torrent superficiel, charriant des boues colmatantes, n'a qu'un trajet linéaire, sans largeur, au milieu de ce remplissage. Et c'est surtout dans les phases terminales du remblaiement, quand la pente du torrent principal est devenue plus faible, que ce dernier commence à divaguer et à étaler partout à la surface de sa plaine alluviale des limons peu perméables. Il s'ensuit donc que, dans l'ensemble, les parties superficielles de ce remplissage seront moins perméables, tandis que les parties profondes le seront plus. Et dans ces parties profondes circuleront des « nappes souterraines profondes », sous-alluviales (« underflow » des hydrauliciens américains), relativement indépendantes du torrent principal superficiel. Les eaux provenant des versants s'infiltreront dans les cônes de déjection et les éboulis avant d'arriver à la plaine colmatée par des limons; et ces eaux iront ainsi alimenter directement la nappe sous-alluviale⁷, souvent « captive » (parfois artésienne), sous ces limons.

Dans cette même vallée de la Romanche, en aval du barrage du Chambon, divers travaux ont mis ce phénomène en évidence.

C'est ainsi que les petits barrages de dérivation alimentant les usines situées entre le Bourg-d'Oisans et Vizille sont fondés, non sur le rocher, mais sur les alluvions. Or, au cours des travaux de fouilles de ces barrages, les entrepreneurs

⁷ Dans la vallée inférieure de la Romanche, les grosses sources du Parc du Château de Vizille, et celles de la Rive, près du Bourg-d'Oisans, sont de véritables résurgences de ces nappes profondes.

constatèrent, non sans surprise, que les creusements effectués tout près de la Romanche superficielle n'étaient point envahis par les infiltrations provenant de cette dernière, mais restaient secs; bien plus, les eaux de pluie et de ruissellement qui arrivaient dans ces fouilles étaient naturellement évacuées par leur fond; les dépenses prévues pour ces travaux furent de ce fait fort diminuées; et les entrepreneurs en bénéficièrent, au moins au début, car dans la suite, ces conditions favorables ayant été reconnues, il en fut tenu compte dans les marchés.

Cet exemple montre bien le pouvoir colmatant du torrent superficiel, opposé à la perméabilité du fond du remplissage alluvial; un fait entièrement analogue a été aussi constaté lors du creusement, par la Firme Rodio, de puits de sondage dans la plaine alluviale de l'Alpe du Villar-d'Arène, en amont de La Grave.

VI. — Les injections sous le barrage.

Les injections ont été faites ici dans trois roches très différentes : les schistes cristallins (gneiss mylonitisés), les calcaires massifs triasiques et les calcschistes liasiques. On a pu ainsi comparer leurs comportements dans ces trois roches (fig. 11) ⁸.

1° Les gneiss.

Ce sont des roches en elles-mêmes imperméables, compactes, non plastiques ni argileuses, mais schistifiées. Elles sont donc parcourues par un réseau de fissures très fines, tantôt ouvertes, tantôt virtuelles; au voisinage de la surface, sous l'action

⁸ Au total, le tonnage de ciment injecté a été de 410 tonnes; la longueur totale du forage de 2.430 mètres; l'absorption par mètre linéaire de forage de 169 kilos.

des agents atmosphériques, des joints schisteux ont tendance à s'ouvrir, livrant passage aux eaux d'infiltration, qui peuvent ainsi imprégner la masse de la roche et l'altérer en la rubéifiant. Comme nous l'avons déjà vu, cette altération superficielle a pénétré d'autant plus profondément que la pente est plus faible; ainsi elle est nulle dans les parois verticales de la gorge et sur le fond du talweg nettoyé par l'érosion du glacier et du torrent sous-glaciaire; elle est maximum, et atteignait plusieurs mètres, dans la croupe formée par le mamelon 1031 de la rive gauche.

Il en résulte, pour les injections dans les gneiss, les particularités suivantes, mises en évidence par les graphiques de ces injections:

A) Les volumes d'eau ou de ciment injectés décroissent assez régulièrement avec la profondeur.

B) Ces mêmes volumes croissent aussi assez régulièrement avec la pression, car les fissures virtuelles s'ouvrent alors progressivement. Pour assurer une bonne imperméabilisation, il y a donc lieu d'employer des pressions assez fortes: on est allé, dans ces gneiss, jusqu'à 40-50 kgs-c².

C) Les forages d'injection n'ont presque rien absorbé dans les parois verticales de roche fraîche; au contraire, le volume de ciment injecté a été considérable dans le mamelon 1031 formé de gneiss profondément altérés.

Bien entendu, de nombreuses anomalies locales peuvent venir modifier cette allure générale: ainsi, sur la rive gauche, de profondes fissures ou diaclases ont donné lieu, comme nous l'avons déjà dit, à de brusques absorptions de ciment survenant même dans des zones profondes.

Au total, 249 tonnes 160 de ciment ont été injectées dans les gneiss.

2° Les calcaires triasiques.

Ces calcaires, très compacts et massifs, ne montrent typiquement pas de réseau de fissures, mais seulement quelques grandes fentes ou cassures souvent ouvertes, et pouvant pénétrer dans la masse de la roche à des profondeurs quelconques.

Il s'ensuit que les phénomènes d'altération par les agents atmosphériques n'ont en général que peu de prise sur la roche : celle-ci reste fraîche jusqu'à quelques centimètres ou millimètres de la surface : les altérations se localisent le long des cassures, qu'elles tendent à élargir. Le plus souvent, on ne gagne donc rien à faire des décapages importants de la surface.

Les injections dans ces calcaires montrent ainsi les caractères suivants :

A) Les absorptions d'eau ou de ciment sont indépendantes de la profondeur : souvent on n'a aucune perte dans les premiers mètres d'un forage alors qu'à 10 ou 20 m. de profondeur la rencontre d'une fracture donnera brusquement des pertes importantes.

B) Les absorptions seront peu influencées par l'augmentation de la pression; en effet, les fissures des calcaires sont généralement ouvertes, et, par suite du manque d'élasticité et de schistosité de la roche, peu susceptibles de s'ouvrir davantage sous l'influence de la pression. Les graphiques montrent donc très souvent que, quand la pression varie de 10 à 40 kgs-c², les quantités d'eau ou de ciment absorbées n'augmentent que très peu. Ainsi, dans les calcaires, il est inutile d'employer de trop fortes pressions, lesquelles risqueraient au contraire de provoquer une fracturation de cette roche naturellement brisante : on n'a pas dépassé 20 à 25 kgs-c².

Enfin, nous avons déjà fait remarquer le comportement différent des calcaires sur les deux rives. Dans le massif cal-

caire du bas de la rive droite, la roche a été tectoniquement broyée, mais naturellement recimentée par des filons de calcite remplissant les moindres fissures : les injections n'ont presque rien donné (16 tonnes 440 de ciment injecté). Au contraire, dans les bancs calcaires bien réguliers, ni laminés ni broyés du sommet de la rive gauche, de grandes fissures ouvertes ont occasionné des absorptions considérables même en profondeur; et il y a eu en particulier des cheminements à grande distance dans la zone de contact des calcaires et des gneiss. Là, il a fallu injecter plus de 122 tonnes de ciment.

3° Les calschistes liasiques.

Comme il fallait s'y attendre, dans ces roches peu perméables et généralement compactes en profondeur, les injections ont été pratiquées dans d'excellentes conditions et d'une façon très régulière. La quantité de ciment injecté a à peine dépassé 22 tonnes.

VII. — Les matériaux de béton.

On aurait pu songer à utiliser, comme matériaux de béton, les alluvions extraites du lit de la Romanche; mais les blocs ou galets étaient ici noyés dans des boues argileuses, provenant du transport, par les torrents ou les glaciers, des produits de décomposition des schistes liasiques du bassin de la Romanche supérieure; de plus, on y trouve beaucoup de galets de calcaires argileux du Lias, matériau fort médiocre, qui aurait donné au concassage des éclats aplatis et beaucoup de poussière argileuse.

D'autre part, le déroquetage des parois de gneiss ou de calcaires triasiques n'a donné qu'un cube absolument insignifiant pour un ouvrage de cette importance.

On décida donc immédiatement d'ouvrir une carrière dans le massif gneissique de la rive droite, où la roche affleurerait partout à nu sans couverture de morts-terrains, à une cote supérieure à celle des bétonnières, et dans des conditions de viabilité très favorables.

A priori, les gneiss granulitisés devaient fournir un matériau excellent, et l'emplacement de la carrière put être choisi uniquement d'après des considérations d'ordre technique (facilités d'exploitation, etc.). Notons toutefois qu'à cet emplacement, quelques bancs étaient fortement rubéfiés, par oxydation superficielle de pyrites; une teneur trop grande de ce minéral dans la roche risquait de devenir un inconvénient : on sait en effet que certaines variétés de sulfures de fer naturels (pyrite blanche) peuvent se décomposer à l'air humide pour donner du sulfate de fer, lequel, en milieu calcique, se transforme en sulfate de chaux (gypse). Or, ce gypse, aisément soluble dans l'eau, est un corps dangereux pour l'avenir des bétons. Mais, après analyses, on jugea, et avec raison, qu'en moyenne la proportion de pyrite contenue dans les tout-venants était trop faible pour provoquer l'attaque du ciment.

A l'emplacement de la carrière, et avant tous travaux, la roche en place affleurerait presque partout à nu, sous forme de bosses séparées par de petites passées herbeuses de quelques centimètres ou décimètres. Au cours de l'exploitation, il fut reconnu que ces bandes herbeuses correspondaient à des bancs plus schisteux et plus tendres, formés de schistes moins métamorphiques, se comportant moins bien au concassage; de sorte qu'on fut parfois amené à rejeter aux déblais les abatages de certains de ces bancs.

Mais, au total, la carrière donna entière satisfaction.

VIII. — Ouvrages souterrains annexes.

1° Ouvrages de prise d'eau et de vidange intermédiaire.

Ces ouvrages ont été construits en souterrain sur la rive droite au voisinage de la cote 975.

Une grande chambre de prise d'eau a été creusée sans difficulté dans le massif de calcaires triasiques de cette rive, massif que nous avons déjà dit être très sain. A l'aval de cette chambre, les souterrains ont pénétré dans les gneiss.

2° Galerie de dérivation provisoire.

Creusée entièrement dans le soubassement gneissique de la rive droite, cette galerie a une section de 23 m² et une longueur de 214 m.; la roche était excellente; on n'eut à revêtir qu'une longueur de 10 m. à l'entrée amont et de 15 m. à la sortie aval.

3° Réfection de la route nationale.

Cette réfection a été effectuée en deux temps :

A) *Tracé provisoire.*

Avant les travaux, l'ancienne route nationale suivait le fond de la gorge et franchissait le verrou du Chambon par un très court tunnel. Mais à l'amont et à l'aval de ce tunnel, au bas des parois de la rive gauche, la route se trouvait dans le chantier des futures fouilles et exposée aux chutes des déblais. On remplaça donc le tunnel primitif par un tunnel à la même cote, mais plus profondément enfoncé dans la montagne et beaucoup plus long; les parties à ciel ouvert de la route se trouvèrent alors hors du chantier, ce qui permit de maintenir

la circulation pendant toute la durée des travaux sans changement du profil longitudinal de la route.

Ce nouveau tunnel a naturellement été entièrement creusé dans les gneiss; il avait une section de 31 m² et, sur une longueur totale de 115 m., seuls les 2 ou 3 m. voisins des ouvertures furent revêtus. Une fois le barrage terminé, ce tunnel fut bien entendu obturé, et la circulation fut déviée sur le tracé définitif de la route nationale.

B) *Tracé définitif.*

Actuellement, la route nationale franchit la vallée en passant sur la crête du barrage, de sorte que son tracé est entièrement nouveau entre le village du Freney et l'extrémité amont de la retenue. On a dû faire le long de ce tracé trois tunnels :

a) A l'aval du barrage, nous avons déjà dit que la route remontant du Freney venait déboucher sur la crête du barrage, rive gauche, après un court tunnel⁹, dont le percement n'a occasionné aucune difficulté. Sauf sur quelques mètres près des ouvertures, il n'a pas été revêtu; aussi le signalons-nous ici car, comme nous l'avons vu, il montre la meilleure coupe actuellement visible de la série des terrains intéressés par les travaux du barrage : gneiss, calcaires triasiques, base du Lias, coupe déjà décrite plus haut. On sera surpris de voir combien

⁹ Avant d'entrer dans ce tunnel, la route est entaillée à flanc de montagne dans un grand éboulis qui descend jusqu'à la Romanche. Or, les eaux s'écoulant par le déversoir de crues aménagé sur le côté du barrage seraient venues, si on les avait laissées s'écouler sur le terrain naturel, aboutir à la base de cet éboulis; elles auraient risqué d'y provoquer des érosions dangereuses pour la stabilité de l'éboulis et par conséquent de la route. On a donc construit, en dessous du déversoir, un chenal en béton conduisant les eaux vers la Romanche au moyen d'une bêche métallique; cet ouvrage, très curieux du point de vue hydraulique, détourne donc les eaux dans une partie du lit de la Romanche où leur action érosive est inoffensive.

est difficile, à l'œil nu, la distinction des gneiss et des calcaires triasiques; en profondeur et à l'état frais, ces deux roches arrivent à se ressembler beaucoup; de même, dans la galerie de dérivation provisoire, pour préciser le contact Cristallin-Trias, nous avons dû prélever des échantillons de mètre en mètre et les étudier au Laboratoire.

b) A l'amont du barrage, la route côtoie la rive droite du bassin de retenue. Elle est entaillée là dans les calcschistes du Lias calcaire, puis dans les schistes du Lias supérieur, enserrant une bande de calcaires marneux du Dogger. Toutes ces roches se délitent rapidement à l'air et sont souvent recouvertes de terres d'altération sujettes aux glissements¹⁰. Aussi, dans la traversée de deux éperons particulièrement abrupts, la route a dû passer en tunnels. En profondeur, la roche s'est montrée d'une excellente tenue; des revêtements n'ont été nécessaires que dans les zones où il y avait des venues d'eau. Ajoutons que, les schistes étant ici entaillés en « travers-bancs », la régularisation du profil du souterrain a été particulièrement facile.

¹⁰ Au cours de la construction du barrage, la dérivation provisoire alimentant l'Usine de Sainte-Guillerme avait été tracée à flanc de versant sur la rive droite; dans certaines régions, cette dérivation avait été sommairement réalisée au moyen de bâches en bois reposant sur des cônes d'éboulis schisteux; des glissements de ces derniers, même sur des pentes assez faibles, ont en certains points endommagé ces bâches, dans lesquelles les moindres fuites d'eau intervenaient immédiatement pour accélérer les mouvements; et cela d'autant plus que, dans la partie supérieure de certains de ces cônes, on avait imprudemment accumulé une charge supplémentaire constituée par les déblais des tunnels de la route en construction au-dessus de la dérivation.

IX. — Canal d'aménée du barrage à l'Usine de Sainte-Guillerme.

1° Diverses solutions possibles.

En aval du Chambon, la Romanche coule dans des gorges où, sur 6 km. de long, sa cote s'abaisse de 952 à 749, soit une chute de 203 m. Elle entre ensuite dans la large plaine du Bourg-d'Oisans : là, sur une longueur de 19 km. environ, elle ne descend que de 46 m. : ce tronçon est évidemment inutilisable; de sorte que l'on a été conduit dès l'abord à installer une usine à la sortie des gorges, près du pont Sainte-Guillerme, à la cote 749.

L'utilisation de la retenue étant prévue entre les cotes 1040 et 980, c'est à cette dernière cote approximative que se trouve la prise d'eau. On avait donc le choix entre trois installations possibles :

A) Etablir, entre le barrage et l'Usine de Sainte-Guillerme, une dérivation en charge, capable de résister à des pressions qui, à la tête amont, auraient atteint $1040 - 980 = 60$ m.; c'était la solution idéale au point de vue de l'exploitation, car on eût ainsi utilisé, à l'aide de la seule Usine de Sainte-Guillerme, toute l'énergie disponible à chaque instant.

B) Installer, au barrage même, une « usine de pied de barrage », avec canal de fuite à la cote 974 environ, cote suffisante pour permettre à une dérivation à écoulement libre, sans charge, d'aller alimenter l'Usine de Sainte-Guillerme; cette solution, parfaite du point de vue énergétique, a l'inconvénient de comporter deux usines successives.

C) Enfin aménager, dans le corps du barrage, à l'entrée de la dérivation précédente, un dispositif « brise-charge », dissipant en pure perte l'énergie cinétique de l'eau entre les cotes 974 et 1040 (maximum) ou 980 (minimum).

En fait, et nous verrons plus loin pourquoi, on a écarté d'emblée la solution A; l'installation C a été adoptée jusqu'en 1938; enfin, depuis cette date, l'installation B a été mise en service.

2° Conditions géologiques de la dérivation.

L'étude géologique du tracé de la dérivation, indiquée très sommairement dans le Rapport de 1919 de W. KILIAN, a fait l'objet d'un Rapport très détaillé du Professeur BUXTORF (de l'Université de Bâle) en 1926, antérieurement à l'époque où ont commencé nos propres études. Ce tracé ne pose d'ailleurs aucun problème géologique important; nous nous contenterons donc de quelques indications générales.

En principe, la dérivation se déroule dans les roches anciennes, antétriasiques, du massif hercynien des Grandes-Rousses. Mais ici, dans deux tronçons du tracé, la « surface structurale » de ce massif, ou, si l'on veut, la « pénéplaine antétriasique », s'abaisse beaucoup, ce qui se traduit dans la topographie, par des zones de replats dominant les gorges gneissiques à des cotes voisines de celle de la dérivation. Dans ces deux tronçons, on a donc été conduit à faire passer la dérivation à ciel ouvert, à la surface de ces replats d'ailleurs recouverts de moraines.

Quant aux roches du massif ancien, traversées en tunnel, disons tout de suite qu'elles ont été d'excellente qualité : ce sont en majorité des gneiss granulitisés analogues à ceux que nous avons décrits dans le soubassement du barrage. Il s'y intercale deux bandes à peu près verticales de terrains houillers; schistes plus ou moins gréseux, avec quelques passées de porphyres très schistifiés (orthophyres), mais heureusement sans aucune veine d'anthracite, ni même de schistes argileux ou charbonneux. Ajoutons que la schistosité a en général une direction Nord-Sud, avec fort pendage Est,

comme au Chambon; le souterrain a donc été tracé en « travers-bancs » ou presque, ce qui constitue la disposition la plus favorable à l'abatage et à la régularisation du profil.

Nous distinguerons, de l'amont à l'aval, les secteurs suivants :

1° *Tunnel amont.* — Le souterrain traverse d'abord le massif gneissique formant, sur la rive gauche du Ferrand, l'éperon auquel s'appuie le barrage; on a rencontré là, dans ces gneiss, quelques minces passées schisteuses plus tendres; elles représentent sans doute le prolongement direct en profondeur des couches analogues que nous avons signalées aux affleurements dans la carrière.

Le Ferrand, traversé en pont très court dans une gorge étroite, a été capté au passage. Le manque de place n'a malheureusement pas permis l'établissement d'un dessableur. Or, le Ferrand est un torrent à régime très irrégulier, dont le bassin versant, entièrement exposé au Sud, est constitué par d'immenses étendue très ravinées de schistes liasiques noirs très argileux, ou de moraines elles-mêmes très argileuses. Il s'ensuit que les moments où il convient d'économiser l'eau de la retenue du Chambon, et par conséquent d'utiliser le Ferrand, coïncident avec les débuts des fontes de neige du printemps, alors que le bassin versant de la Romanche, exposé en grande partie au Nord, débite encore très peu, tandis que celui du Ferrand, plus bas et exposé au Sud, donne déjà de gros débits. Pendant ces crues de fonte (ou les crues d'orages occasionnels), les eaux du Ferrand ressemblent à de véritables laves boueuses, transportant des débris végétaux (feuilles) et parfois des galets de schistes; les grilles de prise d'eau s'obturent alors facilement, et, si on les lève, on risque de voir pénétrer dans le souterrain des blocs de schistes; un tel accident est survenu au début de l'exploitation, et un bloc de plusieurs décimètres de diamètre a parcouru

les 6 km. de la dérivation, puis les conduites forcées, pour venir finalement se coincer à l'entrée d'une des turbines de l'Usine de Sainte-Guillerme.

Sur la rive droite du Ferrand, le tunnel traverse une bande de Houiller, d'où il débouche sur le plateau du Freney.

2° *Ciel ouvert amont.* — Il correspond à la traversée du plateau du Freney; ce plateau étant recouvert par une épaisse couche de moraines, qui masquent tous les affleurement rocheux, il n'a pas été possible de le traverser en souterrain; pour rester dans le rocher, il eût fallu dévier fortement le tracé de la dérivation, en s'éloignant de la Romanche, suivant une courbe convexe vers le Nord. On a donc jugé avec raison préférable de passer en surface, suivant une courbe de niveau, interrompue seulement par un court siphon à la traversée d'un vallon (combe Fournel); comme l'avait prévu M. BUXTORF, les moraines se sont révélées très stables et l'installation des conduites en ciment armé s'est faite en toute sécurité.

3° *Tunnel intermédiaire.* — Ce tunnel a dû d'abord traverser les moraines revêtant le flanc Ouest du plateau du Freney, sous les maisons des Granges (en dessous de l'église du Freney); mais ces moraines, plaquées contre un versant et non remplissant un talweg, se sont montrées assez peu aquifères et n'ont pas donné de difficultés.

Le souterrain a pénétré ensuite dans les gneiss des gorges de l'Infernet, à la sortie desquels il a recoupé une bande de schistes houillers très siliceux et très compacts, dépendant du « synclinal houiller occidental des Grandes-Rousses » (voir plus haut); puis il est rentré dans les gneiss.

Mais, dans cette région, s'est présentée la seule difficulté réelle rencontrée au cours du creusement : ce fut la traversée de la Combe Maillot. On appelle ainsi un petit vallon

affluent de la Romanche ¹¹, dont le tracé coïncide avec le passage d'un étroit synclinal triasique Nord-Sud; le Trias est d'ailleurs à peine visible sur les deux versants, car le vallon est entièrement rempli de moraines. Il s'agissait donc ici de traverser, à 30-40 m. sous le talweg, cette combe morainique; on devait s'attendre à ce que ces moraines fussent particulièrement aquifères, puisqu'on les traversait dans un fond de vallon; de plus le revêtement de calcaires triasiques, perméables, devait encore contribuer à y amener des eaux souterraines ¹². M. BUXTORF avait fort justement attiré l'attention sur les difficultés de cette traversée. Mais pour rester dans le rocher, il eût fallu sans doute dévier fortement le tracé vers le Nord, ce qui eût beaucoup allongé le souterrain. Ajoutons d'ailleurs que, dans cette traversée morainique en profondeur, l'ouvrage, une fois réalisé, n'avait pas à craindre de glissements d'ensemble de la masse morainique, bien coincée dans le fond du vallon. On se décida donc à aborder franchement l'obstacle; la traversée du talweg morainique, longue de 30 m. environ, fut extrêmement difficile, dans des terrains très argileux et aquifères, menaçant les boisages. Et ces 30 m. ont laissé aux Ingénieurs plus de mauvais souvenirs que les 4.000 m. du reste du tunnel. Enfin, au sortir de ces moraines, et après une courte traversée de gneiss, le souterrain débouche en surface.

4° *Ciel ouvert aval.* — Il se trouve sur les replats des hameaux inférieurs d'Auris; les conditions topographiques et géologiques sont ici analogues à celles que nous avons décrites pour le plateau du Freney; là encore, on passa en surface ou en tranchée, dans des moraines stables.

¹¹ Très bien visible du « point de vue » signalé plus haut, p. 14, note 4.

¹² D'épais dépôts de tufs existent sur les berges du vallon: ils sont indiqués sur la « feuille Briançon ».

5° *Tunnel aval*. — Il est situé entièrement dans des gneiss granulitisés, affleurant en parois abruptes; et il ne donna naturellement lieu à aucune difficulté.

3° Conclusions.

Au total, la dérivation, longue de 5.820 m., comporte 1.075 m. à ciel ouvert et 4.745 m. de souterrain; sauf quelques dizaines de mètres dans des moraines, ce souterrain est resté constamment dans des roches excellentes, imperméables, très compactes, très résistantes à l'écrasement, présentant ainsi des conditions de solidité et de sécurité telles qu'on pourrait difficilement en concevoir de meilleures. Ajoutons qu'à l'extrémité aval du souterrain, la topographie se prêtait particulièrement bien à la construction d'un ouvrage d'équilibre dans les gneiss.

Aussi, dans les projets primitivement établis par les techniciens de la Société Chambon-Romanche, avait-on cru pouvoir réaliser une dérivation en charge : c'était le cas de la solution A décrite plus haut, et qui eût été la plus rationnelle. Mais, pour plus de prudence la solution C fut adoptée.

X. — Conduites forcées et Usine de Sainte-Guillerme.

Les conduites forcées descendent le long d'une paroi très abrupte de gneiss granulitisés où la roche, très solide, affleure partout. Les fondations des massifs d'ancrage de ces conduites, de même que le tracé d'un déversoir de trop-plein, ont donc pu être réalisés sans difficultés. Nous noterons seulement que les falaises presque verticales dominant directement l'usine ont été l'objet de travaux de consolidation soignés à l'extrême : on a soutenu par des contre-

forts toutes les dalles rocheuses qui auraient menacé de se détacher, et fait des revêtements de béton dans toutes les parois où la roche ne paraissait pas absolument saine.

L'usine a été fondée sur la petite plaine d'alluvions de la Romanche. Son alimentation en eau potable a donné lieu à une constatation intéressante; elle a été en effet réalisée au moyen d'un puits de pompage foré dans la plaine d'alluvions; on s'attendait à y rencontrer la « nappe phréatique » en arrivant à peu près au niveau de la Romanche; mais, à la grande surprise des Ingénieurs, le puits est resté sec jusqu'à 7-8 m. au-dessous de la cote de la Romanche superficielle au droit du puits. On a eu ainsi un exemple de plus des anomalies qui deviennent presque la règle dans nos vallées alpines : comme nous l'avons déjà dit, il y a très souvent indépendance complète entre les eaux superficielles et les nappes souterraines profondes qui circulent dans les parties inférieures des remblaiements alluviaux.

XI. — Conclusions générales.

Comme notre lecteur a pu le voir, le présent travail a été rédigé sous un point de vue assez différent de celui adopté généralement dans les monographies de ce genre. Nous avons voulu en faire, non une simple description d'ouvrages et de travaux, mais une leçon et un enseignement pour des travaux analogues. Aussi avons-nous insisté, à dessein et peut-être plus que de raison, sur les quelques menues difficultés qui se sont présentées au cours des travaux, et sur les hésitations et les tâtonnements auxquels elles ont donné lieu.

Ce faisant, il faut bien avouer que nous avons dû, suivant des expressions familières, « chercher la petite bête » et « monter en épingle » beaucoup de petits incidents sans importance réelle.

Car, fort heureusement, le barrage du Chambon n'a posé aux géologues aucun problème véritablement délicat. Et, au total, les ouvrages prévus ont été réalisés par les Ingénieurs avec une sécurité, une perfection technique, et en particulier une économie qui font le plus grand honneur à tous les dirigeants de la Société Chambon-Romanche et à leurs entrepreneurs.
