

# L'alluvion du Rhône valaisan : essai de détermination de l'épaisseur par méthode électrique

Autor(en): **Lugeon, Maurice / Oulianoff, Nicolas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **60 (1937-1939)**

Heft 247

PDF erstellt am: **27.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-272760>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

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

**L'alluvion du Rhône valaisan**  
**Essai de détermination de l'épaisseur par méthode**  
**électrique**

PAR

**Maurice LUGEON et Nicolas OULIANOFF**

(*Séance du 6 juillet 1938.*)

---

*Sommaire.* — I. Introduction. II. Raison du choix du terrain d'expérience. — III. Critiques préliminaires. — IV. Base théorique de la méthode. — V. Le cas de Martigny. — VI. Résistivité spécifique des gneiss. — VII. La question de l'eau souterraine. — VIII. La surface rocheuse. — IX. Critique des courbes. — X. Calcul de la profondeur. — XI. Résultats. — XII. Vues lointaines. — XIII. Bibliographie.

**I. — Introduction.**

Le Lac Léman, dont le niveau est à la cote 375 m., présente, là où il est le plus large, un vaste plancher absolument horizontal qui est à la cote 75 m. environ. Il est certain que le sol de cette grande plaine est constitué par de l'alluvion apportée surtout par le Rhône. Le sol rocheux est plus bas encore.

Les géologues sont à peu près tous d'accord aujourd'hui pour admettre que cet ombilic est dû au surcreusement glaciaire.

A partir de la plus grande profondeur, le fond du lac s'élève peu à peu, l'alluvion émerge et constitue, jusqu'au défilé de St-Maurice, à 22 km. en amont, une plaine.

On sait que le Léman avait, à la fin de la période glaciaire, un niveau de 35 m. supérieur à l'actuel. Le défilé de St-Maurice est (niveau du Rhône) à la cote 407 environ<sup>1</sup>. Il est donc certain que cette masse de terrain d'apport occupe un territoire qui fut jadis lacustre.

<sup>1</sup> Repère ancien de la Pierre du Niton 376.86.

Mais quelle peut être la profondeur de la cuvette rocheuse? Déjà en amont du lac, non loin de ses rives, on voit émerger de la plaine d'anciennes moraines du stade de Buhl (16). Et on sait que parfois les arcs morainiques peuvent s'appuyer sur une barre rocheuse. En outre, dans la plaine d'alluvion existent des masses rocheuses isolées, comme la colline de St-Triphon, celle de Montet près de Bex. Et enfin l'un d'entre nous a montré que le défilé du Rhône à St-Maurice était épigénétique (15), que l'ancien thalweg était au large de collines rocheuses de Chiètres qui barrent la vallée du Rhône.

Comme la vallée est barrée par les collines de Chiètres et que l'ancien Rhône passait par des défilés étroits, on peut supposer que le fond rocheux pourrait se rapprocher de la surface d'alluvion, mais rien n'autorise une estimation quelconque.

En amont du défilé de St-Maurice, par le fait de l'engorgement de la vallée par l'apport de matériaux dus à des tributaires torrentiels puissants, la plaine d'alluvion se relève brusquement sur elle-même de sorte qu'au coude du Rhône, près de Martigny, aux Follaterres, le Rhône coule à la cote 459 m., soit 84 m. plus haut que le niveau du Léman.

Rien ne dit que le lac se soit étendu jusqu'à une telle distance de sa rive amont actuelle, mais la cuvette rocheuse surcreusée existe-t-elle encore si loin de la cuvette lacustre actuelle?

Bien souvent, en nous promenant dans ce beau pays, nous nous posons cette question, sans jamais espérer pouvoir y répondre un jour, même d'une manière approchée. Pas même de comparaison possible, car, à notre connaissance, aucun profond forage mécanique n'a été exécuté dans une vallée intérieure alluvionnée des Alpes.

Mais le progrès de la science n'est pas vain. Par l'effort d'hommes d'initiative, et il nous plaît de rappeler ici le nom des deux frères C. et M. Schlumberger, on possède aujourd'hui un procédé pour déterminer, avec une approximation satisfaisante, l'épaisseur de l'alluvion de n'importe quelle vallée (6).

C'est un de ces procédés de la géophysique, soit la prospection électrique, que nous pensions appliquer un jour pour contenter notre curiosité.

Mais de telles recherches nécessitent un entraînement spécial. Elles sont en outre coûteuses, autant à cause de l'instrumentation que du personnel nécessaire pour l'expérience. Le

hasard des choses est venu à notre secours. Il s'est fondé, à Zurich, en Suisse, il y a quelques années, une association constituée par un géologue, M. le Dr W. Fisch et par un ingénieur, M. O. Münger, spécialisée dans la recherche dans le sous-sol par prospection électrique.

Ces deux Messieurs nous offrirent spontanément, à titre gracieux, leur expérience, leurs instruments et leur temps. La Société vaudoise des Sciences naturelles, sollicitée, nous remit une subvention de 1000 fr. provenant des intérêts du Fonds Alexandre Agassiz. On pouvait aller de l'avant.

## II. — *Raisons du choix du terrain d'expérience.*

Fallait-il exécuter la recherche en aval du défilé de St-Maurice ou en amont? Nous avons choisi l'amont pour plusieurs raisons. En aval de St-Maurice, la vallée du Rhône est taillée dans les sédiments divers des Préalpes. Le fond rocheux est nécessairement très hétérogène, à résistivité électrique probablement fort variable. C'était peut-être des complications à éviter dans une première expérience. Puis, il se présente, en aval de St-Maurice, des collines rocheuses dans la plaine. Nous étions moins certains de trouver, relativement vite, le point le plus profond de la section transversale rocheuse. On aurait dû établir un grand nombre de stations d'observation, car la vallée est très large. Enfin, on peut supposer, avec beaucoup d'arguments, que le surcreusement glaciaire se poursuit dans la plaine préalpine et qu'en conséquence la recherche présentait moins d'intérêt.

Nous avons alors choisi la région immédiatement en aval de Martigny, entre cette ville et Vernayaz. Ici, la vallée est entièrement taillée dans le massif cristallin des Aiguilles Rouges (14). Il y avait donc probabilité d'une meilleure homogénéité des roches cristallines, seules en jeu. Il est vrai qu'il y a des gneiss, des granites, etc., mais tout cela se ressemble un peu.

Puis cette plaine de Vernayaz est étroite; les versants rocheux sont à peu près également inclinés, symétriques l'un par rapport à l'autre.

Le Rhône est chassé sur une des rives, ce qui nous a paru favorable, mais on verra en réalité que la Dranse avec son alluvion spéciale a causé quelques perturbations. Enfin, la plaine est parcourue par toute une série de routes rectilignes parallèles à la vallée et parallèles entre elles, ce qui permettait de ne pas entrer dans les cultures, ainsi que des canaux d'irrigation également longitudinaux. Il y a malheureusement

deux voies ferrées, à traction électrique, soit la voie des Chemins de fer fédéraux et le chemin de fer routier de Martigny-Châtelard (Chamonix).

Les opérations sur le terrain ont duré trois jours, du 1<sup>er</sup> au 3 mai 1935. Prirent part aux opérations:

MM. Münger et un assistant, MM. les professeurs Maurice Lugeon, Elie Gagnebin, Nicolas Oulianoff, M. le Dr E. Meyer, géologue, MM. Bersier et Rochat, préparateurs, et H. Badoux, assistant de géologie, et M. G. de Weisse, alors étudiant.

Les observations à l'appareil furent exécutées par M. Münger, assisté par MM. Lugeon et Oulianoff.

Nous ne pouvions abuser de l'amabilité de M. Münger, aussi avons-nous dû travailler très rapidement.

1 <sup>er</sup> mai, station 2		1020 m. de longueur de fil.		
» 4		1320	»	»
2 mai » 1		900	»	»
» 5		1440	»	»
» 6		1320	»	»
3 mai » 7		1060	»	»
» 3		1320	»	»

Il nous eût été agréable de placer encore une station entre 4 et 5 (fig. 1), où se trouve une bonne route, station qui, en plus, eût été très axiale par rapport à la vallée, mais l'appareil était un peu fatigué aussi bien que nous-mêmes.

Il fut prélevé sur place deux échantillons de gneiss qui furent taillés en cube au laboratoire de géologie de Lausanne, puis deux échantillons du sable fin de surface.

Les résultats analytiques nous furent livrés par MM. Fisch et Münger par lettre datée du 23 mai 1935.

Nous nous plaignons à exprimer ici toute notre reconnaissance à ces Messieurs de Zurich qui ont bien voulu nous donner leur temps, alors qu'ils étaient fortement sollicités pour des travaux productifs pour eux.

Nous devons également nos remerciements à la Société vaudoise des Sciences naturelles pour son précieux appui financier.

L'un de nous (N. O.) a refait tous les calculs.

### III. — Critiques préliminaires.

Nous ne discuterons pas ici la partie technique de l'expérience, toute la responsabilité du bon fonctionnement de l'appareil étant assumée par MM. Fisch et Münger.

On a utilisé, pour les expériences, la méthode dite de

« résistivité apparente », par l'application du courant continu.

Ce qui est à craindre et ce qui est à examiner particulièrement en contrôlant les appareils, c'est la fuite possible du courant.

En général, avec la même distance des électrodes et sur les mêmes emplacements, les mesures répétées ne donnent

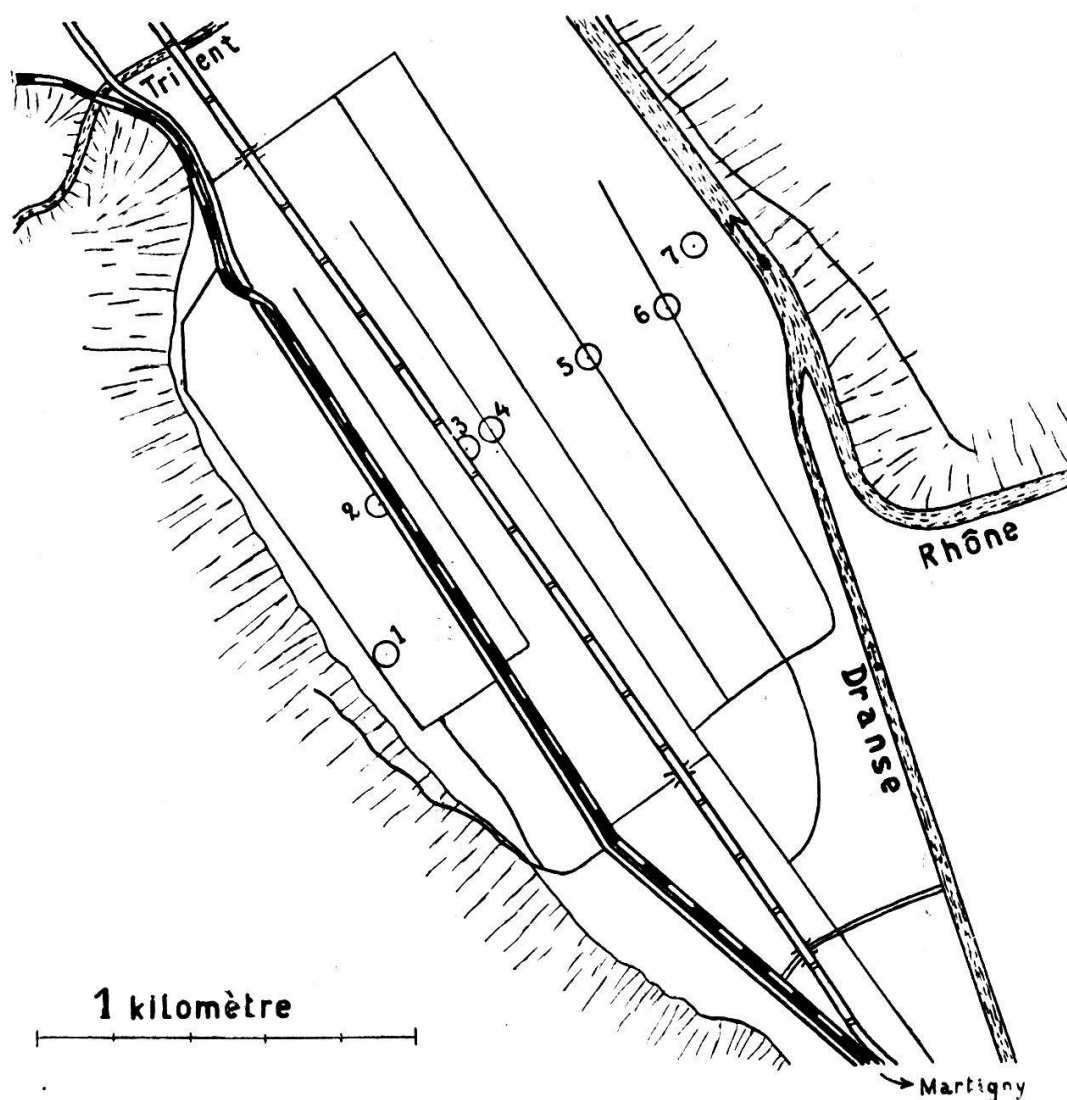


FIG. 1. — Situation des stations; plaine en aval de Martigny.

pas exactement les mêmes valeurs de résistivité apparente.

La raison de ces variations est peut-être due, par exemple, à la variation de la température, ou au changement de l'humidité des couches supérieures.

D'autre part, l'application de la méthode du courant continu a encore un inconvénient, dont on ne tient pas compte habituellement. Nous entendons les courants naturels qui existent déjà dans le corps géologique soumis à l'étude. Pour

éliminer l'influence de ces courants, il faudrait employer le courant alternatif ou bien encore il faudrait commencer par mesurer le potentiel naturel qui sera ensuite introduit dans les résultats donnant la résistivité. Nous avons dû nous contenter du courant continu.

#### IV. — Base théorique de la méthode.

La méthode de la résistivité apparente est basée sur les considérations théoriques suivantes.

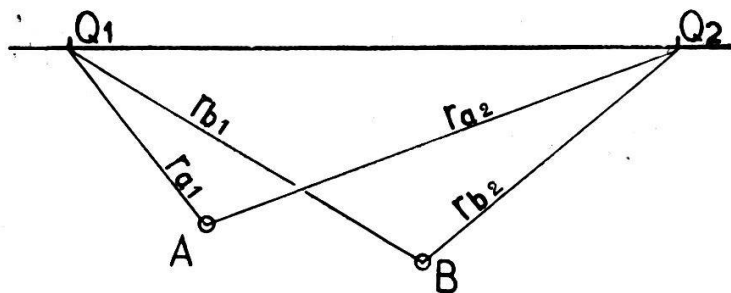


FIG. 2. — Différence de potentiel entre deux points.

Supposons que nous avons deux électrodes  $Q_1$  et  $Q_2$  dans un sol homogène, isotrope, à conductibilité  $\sigma$ . L'espace entre ces électrodes est parcouru par un courant constant d'une intensité de  $J$ . Alors, dans le point  $A$  s'établit le potentiel électrique, ayant la valeur :

$$P_A = \frac{J}{2\pi\sigma} \left( \frac{1}{r_{a_1}} - \frac{1}{r_{a_2}} \right)$$

Le potentiel correspondant à un autre point  $B$  s'exprimera ainsi :

$$P_B = \frac{J}{2\pi\sigma} \left( \frac{1}{r_{b_1}} - \frac{1}{r_{b_2}} \right)$$

D'où la différence de potentiel entre les points  $A$  et  $B$  :

$$V_{AB} = \frac{J}{2\pi\sigma} \left( \frac{1}{r_{a_1}} - \frac{1}{r_{a_2}} - \frac{1}{r_{b_1}} + \frac{1}{r_{b_2}} \right)$$

La solution par rapport à  $\frac{1}{\sigma}$  ( $\equiv \rho$ , qui est la résistivité spécifique du milieu) nous donne

$$\rho = \frac{2\pi V_{AB}}{J} \cdot \frac{1}{1/r_{a_1} - 1/r_{a_2} - 1/r_{b_1} + 1/r_{b_2}}$$

Wenner (1) a proposé de placer les électrodes A et B sur la ligne  $Q_1$  et  $Q_2$  à distances égales  $\frac{Q_1 Q_2}{3} = a$ .

Ainsi  $r_{a_1} = a$  ;  $r_{a_2} = 2a$  ;  $r_{b_1} = 2a$  ;  $r_{b_2} = a$

Donc 
$$\rho = 2\pi a \frac{V_{AB}}{J} .$$

Cette formule donne, avec toutes les variations des valeurs pour  $a$ ,  $V$ ,  $J$ , la valeur constante pour  $\rho$ , si le dispositif électrique atteint le sous-sol *homogène lithologiquement* et *isotrope* au point de vue de sa *structure*.

Mais au cas où le sous-sol n'est pas homogène, le  $\rho$  exprime la résistivité globale d'une multitude de couches dans lesquelles circule le courant électrique. Chacune de ces couches influence différemment la valeur totale de la résistivité et ceci en relation avec la distance des électrodes, avec la profondeur à laquelle se trouvent les couches respectives, enfin, avec leur épaisseur.

Dans la pratique, le problème le plus simple est celui de deux couches.

En discutant ce cas théorique d'un corps géologique composé de deux couches lithologiquement différentes, mais tout à fait homogènes, on arrive aux conclusions suivantes, quant à la résistivité que l'on peut déterminer sur le terrain.

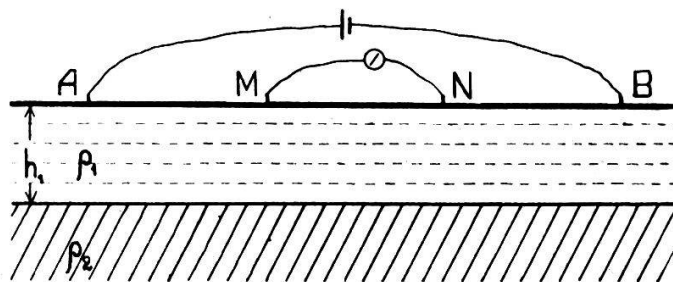


FIG. 3. — Disposition des électrodes d'après Wenner; problème de deux couches.

Le dessin (fig. 3) montre (en coupe verticale) la distribution de divers éléments du complexe qui nous intéresse. La couche supérieure a une épaisseur  $h_1$  et une résistivité spécifique  $\rho_1$ . La couche inférieure est séparée de la couche supérieure par une surface qui s'étend dans toutes les directions, tout en restant approximativement horizontale. La résistivité spécifique de cette couche inférieure est  $\rho_2$ . Quant à son



épaisseur dans ce cas, elle ne nous intéresse pas. La seule chose qui importe, c'est de la savoir suffisamment grande, afin que les résultats de nos mesures électriques ne soient pas compromis par l'influence de la couche encore plus inférieure et ayant une résistivité différente de  $\rho_2$ .

Si nous maintenons dans notre dispositif les distances entre les quatre électrodes (A et B du générateur et M et N du voltmètre) constamment égales entre elles ( $MA = MN = BN$ ), nous travaillerons par la méthode de Wenner, la plus commode de toutes celles qui ont été proposées jusqu'à présent.

En partant de la distance AB la plus petite, et en l'augmentant toujours (en même temps que la distance MN, tout en conservant le rapport  $AB : MN = 3$ ), nous déterminons la résistivité d'un volume de plus en plus considérable. Le sondage électrique pénètre ainsi progressivement dans la profondeur.

Au commencement, avec une faible distance entre les électrodes, on ne détermine que la résistivité spécifique de la couche supérieure. Si la première couche est vraiment homogène, on trouvera la même valeur de  $\rho_1$ , résultant de plusieurs positions des électrodes. A une certaine distance entre les électrodes apparaîtra l'influence de la couche inférieure, influence qui se traduira par l'augmentation ou la diminution de la résistivité. A partir de ce moment, la résistivité ne sera plus spécifique de la couche supérieure. Elle le sera d'autant moins de la couche inférieure. On l'appellera « la résistivité apparente » ( $\rho_a$ ). Avec l'augmentation de l'écartement entre les électrodes, la résistivité apparente continuera à changer en se rapprochant, asymptotiquement, de la résistivité spécifique de la couche inférieure. On voit donc une grande simplicité de la courbe qui représente les variations de la résistivité apparente dans le cas du problème de deux couches homogènes. Cependant, ce n'est qu'un cas théorique. De nombreux facteurs auxiliaires compliquent, dans la nature, cette image abstraite, ce que nous verrons dans la suite.

#### V. — *Le cas de Martigny.*

Lors de l'expérience de Martigny, on a utilisé la méthode de Lee (5), qui n'est qu'une légère modification de la méthode de Wenner. Lee a introduit une cinquième électrode, centrale, qui est aussi l'électrode de la ligne de mesure. On obtient ainsi la résistivité par les deux électrodes extrêmes et, en plus, les résistivités pour les deux moitiés de cette distance.

Cette méthode peut être utilisée, avec profit, quand on



Le plan de situation (fig. 1) montre la position du profil étudié. Les stations 2, 3, 4, 5 et 6 sont situées presque exactement suivant la ligne droite, perpendiculaire à l'axe de la vallée du Rhône. La station 1 est en décalage de 336 m. vers le Sud-Est, et la station 7 est déplacée de 88 m. vers le Nord-Ouest de cette ligne. Notre but étant de trouver la première approximation concernant la profondeur des alluvions, ces décalages n'infirmement nullement le résultat obtenu. Il peut être considéré comme appartenant à un seul et même profil rectiligne <sup>1</sup>.

Le développement de nos stations s'effectuait parallèlement aux routes.

## VI. — Résistivité spécifique des gneiss.

MM. Fisch et Münger ont prélevé sur place et examiné, dans leur laboratoire, la résistivité spécifique de deux échantillons de gneiss, caractéristiques, par leur faciès, du matériel principal qui forme le massif cristallin de la région immédiatement en aval de Martigny.

La résistivité de ces échantillons, à l'état sec, ne présente, dans notre cas, qu'un intérêt purement théorique. Presque toute l'épaisseur des alluvions est plus ou moins imbibée d'eau. Mais le lit rocheux doit être, lui aussi, abondamment pénétré d'eau, car tout ce massif cristallin est certainement diaclasé. Tout le système de ces fissures, cassures, joints, retient l'eau.

Ainsi, en discutant les valeurs de la résistivité des échantillons, nous ne prenons en considération que celles qui se rapportent aux échantillons humides.

Deux échantillons de gneiss ont été examinés :

1. gneiss nettement schisteux,
2. gneiss plus compact, granitoïde.

Le premier échantillon a été soumis à l'épreuve *a*) suivant la schistosité et *b*) perpendiculairement à la schistosité.

La résistivité spécifique, dans le premier cas, est égale à 464 000 ohm/cm<sup>3</sup>.

Dans le second cas, elle est de 488 000 ohm/cm<sup>3</sup>.

En moyenne: 476 000 ohm/cm<sup>3</sup>.

Quant au gneiss granitoïde, sa résistivité spécifique est en moyenne de 290 000 ohm/cm<sup>3</sup>. Le gneiss nettement schisteux

<sup>1</sup> Les décalages étaient obligatoires, particulièrement à cause de la visibilité, les opérateurs n'étant pas reliés par téléphone ne pouvaient être commandés que par signaux optiques.

est la roche la plus répandue dans la région. Cependant, pour simplifier, nous prendrons comme résistivité moyenne du massif cristallin, la moyenne des deux chiffres, celle de 476 000 et de 290 000.

Cette moyenne est égale à 383 000 ohm/cm<sup>3</sup>.

N'oublions pas, cependant, que la différence est grande entre l'échantillon pris pour l'examen au laboratoire et la masse formant un corps géologique: cette dernière n'étant jamais rigoureusement homogène.

## VII. — *La question de l'eau souterraine.*

En examinant les courbes de résistivité apparente obtenues pendant l'expérience de Martigny, on remarque que la conductibilité augmente de plus en plus avec la profondeur. Ceci ne peut être attribué à aucun autre facteur qu'à celui de l'imbibition des alluvions par l'eau.

Divers auteurs: Hummel (13), Reich (10), Sundberg (8) et d'autres, ont déjà montré à quel point la conductibilité du sol dépend de la quantité d'eau qui se trouve dans la roche.

Mais il faut aussi tenir compte de la nature de l'eau elle-même. Ainsi l'eau de pluie, l'eau de surface ou de profondeur, l'eau courante ou l'eau stagnante, autant de variations dans l'échelle de la conductibilité.

Quelle que soit l'épaisseur de l'alluvion qui recouvre le lit rocheux dans la vallée du Rhône, nous ne pouvons considérer cette alluvion, prise en gros, autrement que comme une masse homogène.

Certes, les coupes naturelles ou celles que l'on voit dans les carrières permettent de constater, dans les masses alluvionnaires ou fluvio-glaciaires, de nombreuses variations. On y voit l'alternance et la répétition de niveaux à gros cailloux, à petits galets, à sables ou encore lardés de couches d'argiles.

Mais pour un sondage électrique, surtout s'il s'agit de profondeurs assez importantes, toutes ces variations de composition et de structure dans la masse d'alluvions, s'effacent, en grand, avec le développement de la longueur du circuit primaire et avec la réduction des intervalles entre les mesures.

Par contre, ce qui joue un rôle capital et ce qui influence décisivement le courant électrique, c'est le degré d'imbibition, par l'eau, des alluvions, ainsi que l'état électrolytique de l'eau elle-même.

La morphologie de la vallée du Rhône entre Martigny et Bex, telle qu'elle se présente actuellement à l'observateur, per-

met de formuler certaines hypothèses au sujet du profil du fond rocheux, caché sous l'alluvion.

Un verrou gigantesque se trouve immédiatement en aval de St-Maurice (les collines de Chiètres). Mais ce seuil rocheux, n'a pas été usé jusqu'au niveau du fond de surcreusement. Nous en avons la certitude dans le fait que le Rhône coule sur les alluvions, dans la gorge de St-Maurice. Ce seuil déjà partiellement usé retient les eaux souterraines. En dessous du niveau du seuil, les eaux sont à peu près stagnantes, eaux mortes, qui saturent les alluvions. Au-dessus de ce niveau, les eaux météoriques, et celles des crues, s'écoulent à travers les alluvions. Toutefois leur mouvement se ralentit avec la profondeur.

Les eaux de ces deux régimes diffèrent sensiblement quant à leurs états électrolytiques, les eaux stagnantes étant plus chargées de sels et, par conséquent, présentant un degré plus élevé de conductibilité.

Le Rhône à St-Maurice (sous le pont) est à 407 m. Imaginons, pure hypothèse, que son fond rocheux soit à environ 400 m. L'altitude de la plaine dans la région de notre expérience est de 457 m. La différence, qui est de 50-60 m., correspond, très approximativement bien entendu, à l'épaisseur des alluvions dans laquelle les eaux circulent plus ou moins librement. Plus bas, commence le régime des eaux stagnantes.

Ce qui est remarquable, c'est que cette supposition *hypothétique* (car nous ne connaissons pas le fond rocheux sous le pont de St-Maurice) trouve une confirmation dans l'allure des courbes de résistivité obtenues en aval de Martigny; sauf pour les courbes données par les stations 3 et 7, toutes les autres stations ont enregistré le changement de la résistivité vers la profondeur de 40-60 m.<sup>1</sup>

La distance initiale des électrodes de la ligne de mesure a été de 20 m. pour toutes les sept stations. On peut regretter que les couches supérieures de l'alluvion n'aient pas été explorées électriquement avec plus de détails.

<sup>1</sup> On sait, par les recherches de l'un d'entre nous (15) que les collines de Chiètres ne forment pas un verrou absolu. Le Rhône actuel est épigénétique à St-Maurice. Nous avons reconnu dans ces collines deux anciens lits interglaciaires du fleuve. Nous les avons admis *a priori*, de par leur remplissage, comme tout à fait étanches, ce qui confirme semble-t-il les présentes recherches.

Il y a toute vraisemblance que le lit rocheux soit bien au-dessous de 400 m. d'altitude. Il serait du plus haut intérêt d'exécuter des recherches électriques le long de la gorge épigénétique « vivante » et le long des gorges « mortes ».

L'allure des courbes 1, 2, 4, 5 et 6 est presque identique. A partir de 20 m. de distance des électrodes de la ligne de mesure, la résistivité augmente. Ensuite, et d'une façon générale, entre 40 et 60 m. de distance des électrodes, se trouve le maximum de résistivité. Dès lors, la courbe baisse pour atteindre le minimum à partir duquel commence la nouvelle ascendance.

Ainsi que nous l'avons déjà vu, la résistivité des gneiss de la région de Martigny (en échantillons trempés dans l'eau) varie entre 252 000 ohm/cm<sup>3</sup> et 488 000 ohm/cm<sup>3</sup>.

Par contre, la résistivité des sables (fins et grossiers) prélevés (deux échantillons) à la surface, et saturés d'eau, s'exprime par 47 200 ohm/cm<sup>3</sup> et 11 750 ohm/cm<sup>3</sup>. Elle est donc 10 à 20 fois inférieure à celle des roches cristallines.

Mais la résistivité des sables, même saturés d'eau, déterminée au laboratoire, est de beaucoup plus élevée si on la compare à la résistivité apparente, trouvée par toutes les sept stations.

Divisons par  $200 \pi (=628)$  les chiffres 47 200 et 11 750, afin de pouvoir les comparer aux résultats des observations sur le terrain. Nous aurons ainsi pour la résistivité spécifique du sable saturé d'eau les valeurs de 65,0 et 18,7. Or, la résistivité apparente dans un cas seulement dépasse la valeur de 65,0, notamment à la station 7 (avec 20 m. de distance des électrodes de la ligne de mesure). Toutes les autres stations, de même que la station 7, mais avec les électrodes plus écartées, montrent une résistivité apparente sensiblement inférieure à  $65,0 \cdot 200 \pi$  ohm/cm<sup>3</sup>.

Ainsi que nous l'avons déjà indiqué, ce fait réside dans la nature de l'eau d'imbibition. Etant stagnante, cette eau est fortement chargée de sel en solution. Elle est donc électrolytique à un haut degré. Certaines mesures donnent une résistivité apparente sensiblement inférieure à  $18,7 \cdot 200 \pi$  ohm/cm<sup>3</sup> qui est le minimum obtenu sur un échantillon de sable au laboratoire. Il le faut attribuer au changement de l'état électrolytique de l'eau, qui sature les alluvions. A cette eau correspond une conductibilité plus élevée que celle de l'eau de saturation prise par MM. Fisch et Münger pour leur expérience du laboratoire. Ainsi, la détermination, au laboratoire, de la résistivité spécifique des sables ne nous avance pas dans nos recherches: elle ne nous renseigne pas sur la valeur de la résistivité *spécifique* de l'alluvion des niveaux inférieurs.

VIII. — *La surface rocheuse.*

Dans la partie rocheuse du lit du Rhône, les conditions naturelles sont très probablement plus compliquées qu'on ne le suppose au premier abord. Les roches cristallines dans lesquelles ce lit est taillé, n'ont plus leur fraîcheur initiale. Sur une épaisseur, peut-être assez considérable, ces roches sont altérées. On sait que l'autochtone et les masses charriées formant les Hautes Alpes calcaires subissent, à partir de la Dent du Midi, dans la direction Nord-Est, un important abaissement axial. Le soubassement cristallin (le massif hercynien) étant soumis au même régime, doit être sillonné de cassures grandes et petites. Cela est d'une importance fondamentale pour la valeur du degré de conductibilité électrique du matériel rocheux dans lequel est taillé le lit de la vallée du Rhône, près de Martigny.

Des études pétrographiques ont montré que les roches cristallines de cette région sont des gneiss, des gneiss injectés et des cornéennes de diverses espèces.

Le feldspath, élément essentiel du complexe lithologique en question, subit l'altération tout particulièrement. Il en résulte une destruction progressive de la cohésion initiale entre les minéraux constitutifs, ce qui entraîne l'augmentation de la perméabilité de la roche. Les gneiss et les cornéennes atteints par la décomposition, ne sont plus comparables, au point de vue de la conductibilité électrique, aux gneiss frais, même trempés dans l'eau. Ils se rapprochent plutôt des alluvions saturées d'eaux fortement électrolytiques. Ce n'est que peu à peu et avec la profondeur, que l'altération s'atténue, là où les schistes cristallins frais remplacent les schistes altérés. La résistivité spécifique augmente alors graduellement. La limite tranchée entre les alluvions et la base rocheuse n'est que lithologique. Leurs propriétés électriques, leurs résistivités ne diffèrent que fort peu. Les courbes de la résistivité apparente le montrent d'une manière évidente. Après avoir marqué le minimum, la courbe commence à remonter fort lentement et d'une manière indéfinie.

Si nous cherchons à résumer la coupe sommaire des résistivités *spécifiques* à travers la masse d'alluvion et la partie supérieure du lit rocheux, elle se présentera comme suit :

1. Près de la surface, la résistivité est comparativement faible.

2. Puis elle augmente, pour atteindre un maximum passager.

3. Ensuite la résistivité commence à baisser avec continuité en marquant des valeurs sensiblement inférieures à celles qui caractérisent la couche de la surface.

4. Le minimum de la résistivité n'est pas décisif. Sur une épaisseur considérable, la valeur de la résistivité subit de faibles fluctuations.

5. Peu à peu, la tendance d'une augmentation définitive prend le dessus. Avec cela, la courbe de la résistivité *apparente* accuse plus de fermeté dans son allure.

#### IX. — Critique des courbes.

L'examen des résultats de l'expérience de Martigny nous oblige à éliminer complètement la station 2. Comparée aux autres stations, celle-ci montre une résistivité apparente étonnamment faible et, encore, presque constante, à partir de la distance de 60 m. entre les électrodes de la ligne de mesure et jusqu'à la distance de 260 m.

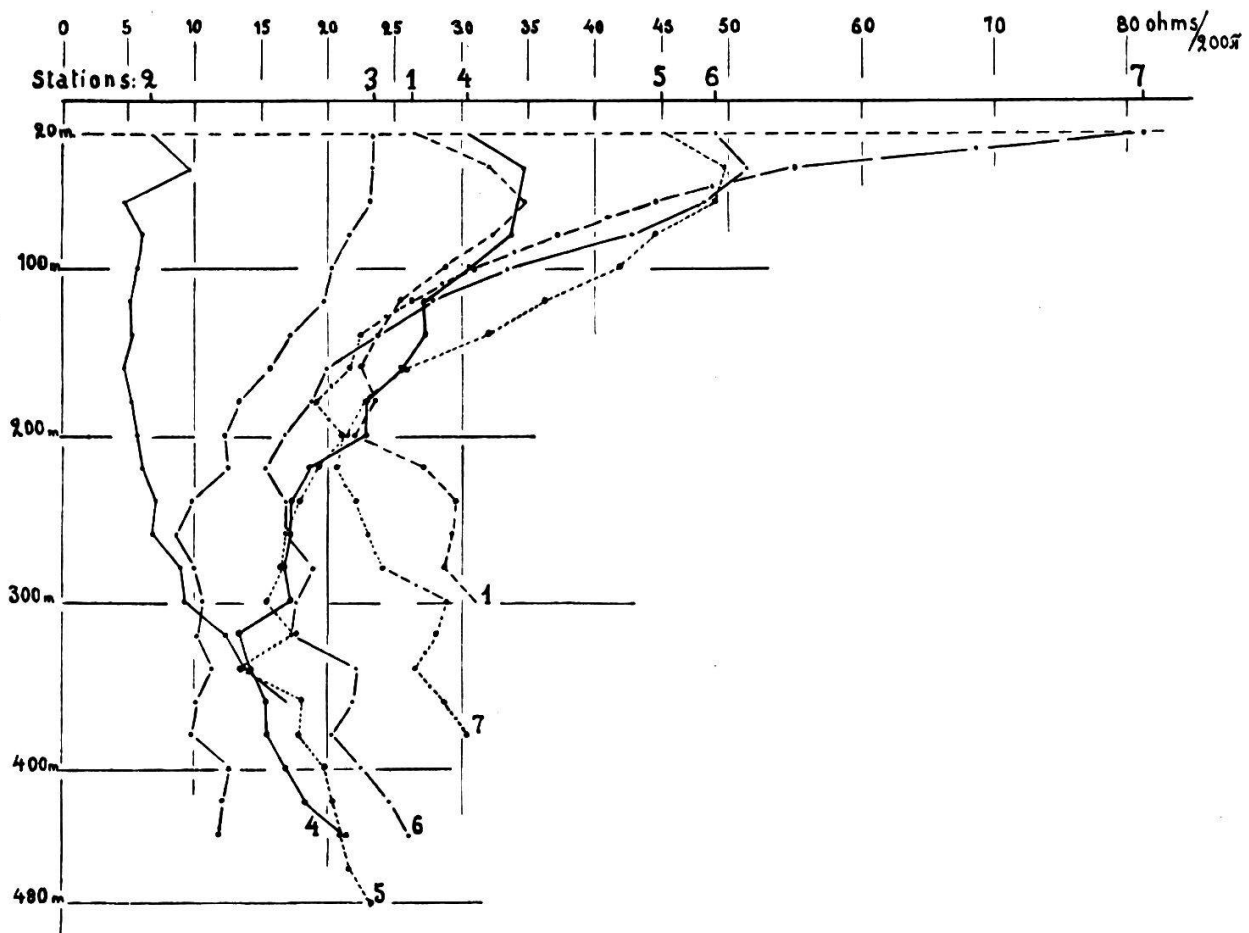


FIG. 4. — Courbes de la résistivité apparente trouvée sur les sept stations du profil en aval de Martigny.



La même remarque, mais avec moins de rigueur, se rapporte à la station 3. Nous croyons inutile d'entrer ici dans la discussion détaillée des hypothèses expliquant les raisons de cette allure curieuse des deux courbes en question. Il faut remarquer, seulement, que la station 2 longe de très près la ligne électrique du chemin de fer Martigny-Châtelard et que la station 3 est développée parallèlement, à distance de quelques mètres, de la ligne du chemin de fer du Simplon.

Nous reproduisons sur un seul diagramme (fig. 4) les courbes de toutes les sept stations. Cela permet de voir combien l'allure des courbes 2 et 3 diffère de celle des autres courbes.

Les courbes 1, 4, 5, 6 et 7 sont presque semblables. Elles ne se distinguent les unes des autres que par les amplitudes de résistivité.

Ces cinq courbes forment tout naturellement trois groupes:

1. courbes 1 et 4 (groupe 1);
2. courbes 5 et 6 (groupe 2);
3. courbe 7 (groupe 3).

Les deux premiers groupes sont en décalage réciproque de quelque  $15.200 \pi \text{ ohm/cm}^3$  à  $20.200 \pi \text{ ohm/cm}^3$  dans leurs parties supérieures. Ensuite, la différence commence à s'effacer. Les parties supérieures de ces courbes correspondent aux distances des électrodes de la ligne de mesure de 20 m. à 80 m. Il s'agit là de la résistivité des couches supérieures de l'alluvion. Or, les stations 1 et 4 sont situées dans la zone d'un régime qui diffère de celui des stations 5 et 6. Ces deux dernières stations se trouvent sur le cône de déjection de la Dranse. Cette rivière renouvelait toujours (avant sa correction) le matériel et le remuait par les déplacements de son lit. Aussi l'altération de ces dépôts ne pouvait-elle se faire tranquillement et d'une manière ininterrompue. Les stations du premier groupe: 1 et 4 étaient plus à l'abri des caprices de la Dranse. L'altération du matériel des couches supérieures de l'alluvion y est donc plus avancée et la résistivité, par conséquent, plus faible. Une analyse plus détaillée des courbes de chacun de ces groupes permet de voir que cette explication est tout à fait plausible.

On voit qu'à la distance des électrodes de mesure de 20 m. et de 40 m., la station 1 accuse une moindre résistivité que la station 4. De même, dans le second groupe, les résistivités à la station 5 sont inférieures aux résistivités observées à la station 6.

Mais dans le premier groupe, la première station appartient à une zone plus écartée de l'influence de la Dranse, que celle de la station 4. Et dans le second groupe, les stations 5 et 6 sont situées exactement dans le même ordre.

La coïncidence est frappante. Elle l'est d'autant plus que la station 7 formant le troisième groupe confirme encore plus cette manière de voir.

En effet, la station 7 a été développée parallèlement à la Dranse et au Rhône, tout près du confluent de ces deux rivières. Cette station montre une très grande résistivité initiale, pour la distance de 20 m. entre les électrodes de la ligne de mesure. La valeur de cette résistivité est de  $81,20.200\pi$  ohm/cm<sup>3</sup>. C'est, du reste, le maximum enregistré pendant l'expérience de Martigny. Pour la distance de 40 m. et de 60 m., entre les électrodes de mesure, la résistivité n'augmente plus, mais, au contraire, baisse rapidement. Ceci s'explique par le fait que les stations des deux premiers groupes (stations 1, 4, 5 et 6) étaient développées sur les terrains cultivés couverts de gazons, de jardins ou de forêts, tandis que la station 7 avait été située sur les sables et les graviers tout frais représentant les dépôts tout récents de la Dranse.

#### X. — *Calcul de la profondeur.*

Une courbe complexe, qui exprime les variations de la résistivité apparente dans le cas de Martigny, se prête fort mal à l'interprétation par la méthode, d'ailleurs remarquable, de J.-W. Hummel (13). Il utilise le calcul ou encore propose tout simplement l'emploi des abaques, mais, dans les deux cas, il se base sur la connaissance parfaite de la résistivité spécifique de la couche supérieure.

On détermine par l'expérience la valeur de  $\rho_1$ , de même que la résistivité apparente ( $\rho a$ ) en fonction des variations de la distance entre les électrodes ( $a$ ). On calcule la valeur de

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$
 pour les différents cas de  $\rho_2$  (=résistivité spécifique de la couche inférieure) et on arrive, par la construction de l'abaque, à déterminer l'épaisseur de la première couche ( $h_1$ ).

On voit tout de suite que la méthode de Hummel nous est interdite, parce qu'il nous manque la connaissance de plusieurs facteurs qui influencent la résistivité apparente.

Le cas indiqué plus haut est le plus simple, parmi les

solutions proposées par Hummel. C'est le problème de deux couches, dont l'une, inférieure, a une épaisseur infinie. Le problème se complique singulièrement lorsqu'on se trouve en présence de trois et surtout de quatre couches. Et c'est justement notre cas, où sont superposés les niveaux suivants:

4. couche supérieure d'alluvion imbibée d'eau faiblement électrolytique;
3. couche d'alluvion saturée d'eau fortement électrolytique;
2. zone d'altération de la base rocheuse;
1. zone saine de roches cristallines.

Tagg (12), en 1934, a mis au point une méthode qui permet, par quelques constructions, de déterminer presque automatiquement l'épaisseur de la couche supérieure. Cette méthode, appliquée avec succès dans quelques cas, mentionnés dans la littérature, n'est utilisable que pour le système à deux couches.

Nous avons essayé de simplifier le problème de Martigny, en supposant l'alluvion complètement homogène quant à la résistivité, la limite entre l'alluvion et le lit rocheux tranchée et la résistivité spécifique des roches cristallines pratiquement égale à l'infini. Le calcul et les constructions avaient été effectués, par la méthode de Tagg, pour la courbe 1, mais le résultat obtenu n'avait aucune trace de vraisemblance. L'élégante méthode de Tagg n'est applicable qu'à des épaisseurs beaucoup plus faibles (quelques dizaines de pieds) et dans des conditions plus simples de superposition des couches.

Nous espérons reprendre plus tard notre étude et refaire la détermination des résistivités suivant les divers autres profils dans le Rhône valaisan, ce qui permettra, par comparaison des conditions géologiques, d'éliminer certains facteurs qui restent inconnus jusqu'à présent et de simplifier, par conséquent, le problème.

En attendant, il serait illusoire de traiter les chiffres de cette première tentative par une analyse mathématique rigoureuse. Cela ne prêterait qu'une *apparence* d'exactitude au résultat de cette étude. Ainsi, nous avons décidé d'employer, pour le cas présent, des règles purement empiriques, établies et contrôlées dans les régions à puits et forages mécaniques multiples qui permettent, de la sorte, une comparaison immédiate.

Il convient de mettre au premier plan, parmi les travaux de ce genre, l'étude de Rooney (3) se rapportant à la région

du lac Michigan (région des célèbres gisements de cuivre).

Les mesures effectuées par Rooney sont contrôlables par les données des forages à diamant à l'ouest de Trimountain. Les roches de la série du Keweenawien (un niveau de l'Anté-Cambrien) y sont recouvertes par un dépôt glaciaire considérable.

Rooney analyse deux courbes de résistivité qui se rapportent au forage N° 24 et résultent des deux lignes de mesure perpendiculaires l'une à l'autre. On voit que la résistivité y est faible au commencement. Elle correspond à une couche du sol humide et recouverte de végétation.

En dessous, se trouve une couche plus sèche du matériel grossier — et on remarque, avec l'écartement des électrodes, une augmentation rapide de la résistivité. Le maximum correspond à la distance de 30 pieds entre les électrodes, après quoi la résistivité commence à baisser. Cette diminution est indiscutablement en relation avec la présence de l'eau.

La résistivité est à son minimum, sur les deux courbes en question, lorsque la distance entre les électrodes de mesure atteint 50-70 pieds. A partir de là, la résistivité s'élève. La distance de 50-70 pieds entre les électrodes représente, selon Rooney, l'épaisseur du glaciaire. On lit sur l'une des courbes une épaisseur égale à 50-55 pieds, sur l'autre, celle de 70 pieds. On obtient donc 60-62,5 pieds d'épaisseur moyenne. Le contrôle par le forage indique 64 pieds. Mais l'étude qui s'appuie sur le forage N° 25 n'a pas fourni une aussi belle concordance. D'après la courbe de résistivité, l'épaisseur du Quaternaire a été trouvée égale à 120 pieds. Le forage a traversé la limite inférieure du Quaternaire au 76<sup>me</sup> pied. Rooney explique cette forte différence par deux considérations:

1. Le tracé, suivant lequel on a procédé aux mesures, passe au fond d'un ravin, qui provoque une humidité exagérée du Quaternaire.

2. La surface rocheuse sous le Quaternaire est irrégulière et le forage a touché probablement une proéminence. Ainsi, les 76 pieds n'expriment pas la réelle profondeur moyenne du fond rocheux.

Nous avons rappelé, avec suffisamment de détails, le travail de Rooney pour faire voir les difficultés qui guettent l'observateur dans les recherches de ce genre.

Cependant, la conclusion la plus importante de ces expé-

rience de Rooney est la possibilité de mesurer la profondeur directement par la distance entre les électrodes.

Il ne s'agit là que d'une estimation approximative, mais elle est basée sur les expériences contrôlées. Gish et Rooney (4), deux auteurs qui, après Wenner, ont le plus travaillé pour mettre au point la méthode de résistivité, estiment que la profondeur atteinte par le dispositif électrique est égale à la distance entre les électrodes de la ligne de mesure. *Rappelons que cette distance n'est qu'un tiers de la ligne d'émission.*

Schlumberger, d'après E. Poldini (7), admet que *la profondeur d'investigation est égale au quart de la longueur de la ligne d'émission.* Autrement, le terrain sous-jacent à la couche supérieure ne se fait sentir nettement que lorsque la longueur de la ligne d'émission atteint quatre fois l'épaisseur de la couche supérieure.

Tagg (12) est également d'avis que la profondeur atteinte par le courant est inférieure à un tiers de la distance entre les électrodes primaires.

W. Stern (11), dans un travail récemment paru, étudie cette question très attentivement. Il a choisi une région d'exploitation de lignite à Ville, près du Rhin, où de nombreux puits permettent un contrôle rigoureux.

Voici ses conclusions. Le diagramme des résistivités apparentes est une fonction de la distance entre les électrodes. En comparant les diagrammes et les profils fournis par les forages mécaniques, on peut établir à quel point les variations de la résistivité correspondent aux changements de la composition et de la structure lithologique. Les nombreuses expériences, plusieurs fois répétées, ont montré que la concordance des résultats est tout à fait remarquable, si l'on prend pour profondeur atteinte par le sondage électrique la distance entre les électrodes secondaires, c'est-à-dire celles du voltmètre. Ainsi, d'après Stern, la profondeur que le sondage électrique ausculte, est donnée, approximativement, par le tiers de la distance entre les électrodes d'émission. On porte, habituellement, sur l'axe des ordonnées, les distances entre les électrodes de la ligne de mesure. Ces valeurs sont en même temps (d'après Rooney et plusieurs autres auteurs) les profondeurs atteintes par le sondage électrique.

Si nous appliquons cette règle dans le cas de Martigny, l'épaisseur de l'alluvion sera donc donnée par la distance entre

les électrodes de la ligne de mesure au moment où la résistivité apparente est à son minimum.

Il s'agit là du minimum de la courbe approchée. Celui-ci ne correspond pas nécessairement au minimum enregistré.

En voici les raisons :

La série de chiffres qui expriment la résistivité apparente comprend nécessairement quelques-uns qui reflètent les conditions particulières d'un niveau exceptionnel ou d'une anomalie locale. La masse de l'alluvion n'est pas homogène dans ses détails. C'est précisément les changements de détails qui ne permettent pas de relier, par une courbe régulière, tous les points du diagramme. Ils déforment, par des écarts brusques, l'allure tranquille de la courbe. Les raisons de ces écarts résident dans la rencontre, par les lignes de force, de lentilles considérables de sédiments sélectionnés (sable, gravier, argile, imbibés à divers degrés par l'eau). La courbe approchée que l'on construit en se basant sur la ligne brisée des observations directes fait mieux ressortir la position la plus probable et la valeur du minimum des résistivités.

#### XI. — Résultats.

Voici à quelles distances entre les électrodes de la ligne de mesure  $\left(= \frac{AB}{3}\right)$  correspondent les résistivités apparentes les plus faibles (pour toutes les courbes sauf les Nos 2 et 3):

	Minima donnés par la courbe brute	Minima déduits de l'allure de la courbe approchée
Courbe 1	200 mètres	170 mètres
» 4	340 »	320 »
» 5	340 »	300 »
» 6	260 »	220 »
» 7	180 »	190 »

La figure 5 sert à expliquer le dessin de la courbe approchée correspondant à la station 1.

La concordance des chiffres est presque parfaite pour les courbes 4 et 7. Au autres, l'écart est plus considérable. La précision de la courbe approchée dépend bien entendu de la longueur des intervalles des mesures.

Comme nous l'avons dit plus haut, nous sommes obligés de nous abstenir d'utiliser les formules mathématiques pour déterminer l'épaisseur de l'alluvion. Nous l'estimerons par la

distance entre les électrodes de la ligne d'émission. On reçoit la profondeur atteinte par le dispositif électrique en multipliant cette distance par  $\frac{1}{3}$  (Rooney) ou par  $\frac{1}{4}$  (Schlumberger).

Voici les profondeurs respectives pour toutes les cinq stations :

	PROFONDEURS DE L'ALLUVION	
	en employant le coefficient $\frac{1}{3}$	en employant le coefficient $\frac{1}{4}$
1	170 m.	128 m.
4	320	240
5	300	225
6	220	165
7	190	143

Nous croyons que de ces deux colonnes de chiffres est à préférer celle où les profondeurs sont obtenues par l'emploi du coefficient  $\frac{1}{4}$ .

Ce n'est pas uniquement par prudence ou par crainte de surestimer les profondeurs du surcreusement glaciaires, que

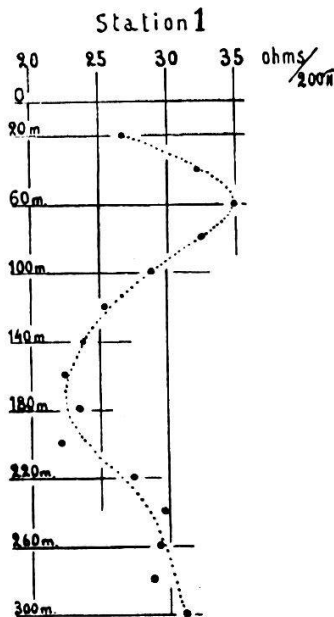


FIG. 5. — Les résistivités apparentes trouvées (station 1) et la construction de la courbe approchée des résistivités.

nous choisissons le coefficient  $\frac{1}{4}$  et non pas  $\frac{1}{3}$  de la distance entre les électrodes primaires pour calculer l'épaisseur de l'alluvion. Il y a encore un argument important qui nous oblige à fixer ainsi notre choix. C'est que la base de l'alluvion et, probablement, aussi le sommet du substratum cristallin (altération) sont caractérisés par une résistivité particulièrement

faible. Par contre, le cristallin frais oppose au courant électrique une résistance considérable. Il en résulte nécessairement un retardement de la réaction du substratum sur la ligne de mesure. Quand le dispositif électrique embrasse déjà, théoriquement, le sommet du cristallin altéré, les lignes de force en réalité continuent à passer toujours par le niveau de faible résistivité. Il faut encore écarter, et sensiblement, les électrodes

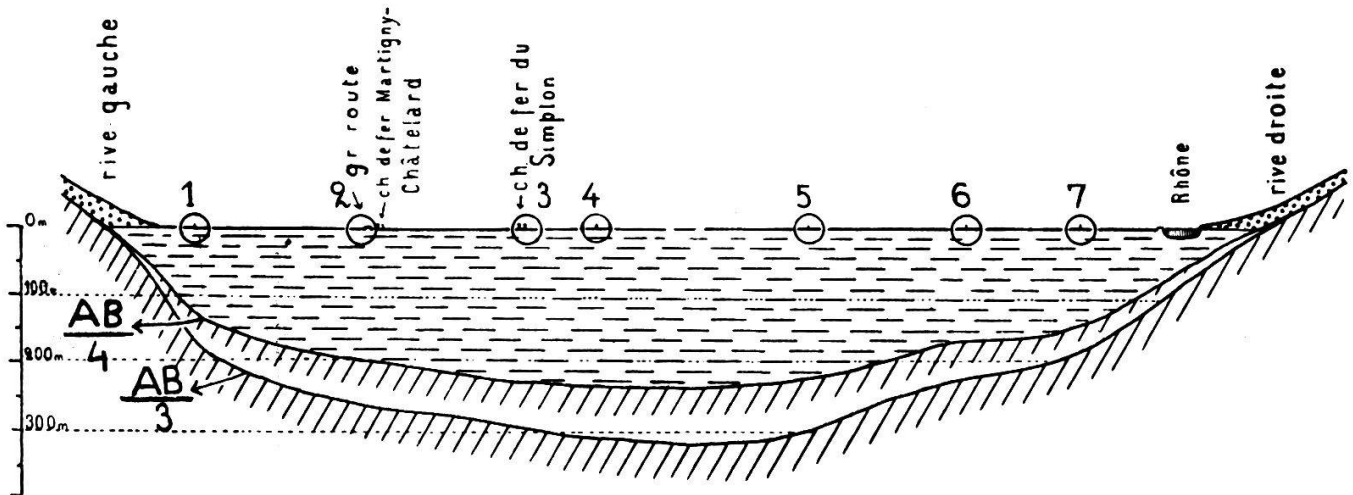


FIG. 6. — Profil de la vallée rocheuse du Rhône en aval de Martigny résultant des mesures électriques.

du circuit d'émission pour voir sur celui de mesure l'augmentation de la résistivité apparente. Dans ces conditions, l'emploi du coefficient  $\frac{1}{3}$  ne convient plus. Il est trop élevé, et nous croyons être plus près de la vérité en prenant  $\frac{1}{4}$  de la distance entre les électrodes primaires pour mesurer l'épaisseur de l'alluvion.

On pourrait se demander: mais pourquoi ne pas choisir un coefficient, intermédiaire entre  $\frac{1}{3}$  et  $\frac{1}{4}$  ?

La pratique de l'application de la méthode des résistivités se charge de donner la réponse. Königsberger (9), en résumant les nombreuses expériences, dans ce domaine, estime que les erreurs allant jusqu'à 10%, quant à la profondeur, sont tout à fait admissibles.

Mais cette limite des erreurs admissibles se rapporte aux déterminations basées elles-mêmes sur la connaissance directe (par forages mécaniques) de certains facteurs qui modifient la résistivité. Dans le cas de Martigny, les conditions de l'application de la méthode électrique ne sont pas aussi favorables, et, par conséquent, les erreurs admissibles peuvent dépasser



les 10%. Or, la moitié de la différence ( $\frac{1}{3} - \frac{1}{4}$ ) représente déjà 12,5% de  $\frac{1}{3}$ .

En nous basant sur toutes ces considérations, nous estimons qu'un quart de la distance entre les électrodes d'émission exprime l'épaisseur de l'alluvion plus exactement qu'un tiers de cette distance. Sur le profil de la vallée du Rhône, nous reproduisons, à titre de comparaison, les deux solutions (avec  $\frac{1}{3}$  et avec  $\frac{1}{4}$  comme coefficients).

La surface du profil, que l'on obtient par l'application du coefficient  $\frac{1}{4}$ , est égale à 287 000 m<sup>2</sup>. En prenant 2,5 pour la valeur moyenne du poids spécifique de l'alluvion, une tranche épaisse d'un mètre découpée dans ce profil, pèse 717 500 tonnes.

Dans le cas du profil calculé à la base du coefficient  $\frac{1}{3}$ , les chiffres correspondants seront: 389 000 m<sup>2</sup> pour la surface du profil et 972 500 tonnes pour le poids d'une tranche d'un mètre d'épaisseur.

Les marges de tolérance de tous ces calculs peuvent paraître assez larges. Mais notre but est atteint, car nous n'avons cherché qu'à établir, par cette première étude, l'ordre des grandeurs.

## XII. — Vues lointaines.

De Martigny, au moins (car le surcreusement doit certainement se prolonger en amont), le lit rocheux du Rhône est très loin, en aval, partout inconnu. Il est inconnu à travers le canton de Genève. A la traversée du chaînon du Vuache, au Fort de l'Ecluse, le fleuve s'écoule dans une gorge étroite dont le fond doit être alluvionné puisque, dès l'aval de cette gorge, le Rhône est, par Bellegarde-Génissiat (Canyon du Rhône), de nouveau épigénétique. Son lit préwurmien s'écoulait jadis vers la vallée des Usses par ce que l'un de nous a appelé « tronçon de Clarafond » (2). Ce n'est que vers l'embouchure de la rivière les Usses, dans le Rhône, au Pont de Bassy, à plus de 30 km. à vol d'oiseau en aval de Genève, que des sondages ont rencontré le seuil rocheux antique. Ces sondages, examinés par le regretté W. Kilian, ont montré la molasse à 16,5 m. sous le lit des Usses, soit à la cote  $258 - 16.50 = 241.50$ . C'est donc à cette cote 241.50 m. que devrait se raccorder le lit rocheux du Rhône dès le Valais. Tout ce qui serait plus bas, du Valais aux Usses, serait dû au surcreusement glaciaire ou éventuellement à des affaissements. Une multitude de pro-

blèmes se posent. C'est pourquoi une vaste enquête par les méthodes de la géophysique s'impose non seulement pour le Rhône, mais encore pour les anciennes vallées comblées qui, par la Venoge, s'en vont en Suisse allemande. Il semble que nulle part, dans toute la Suisse molassique, l'ancien fond rocheux n'est connu. Nous aurons, par cette présente étude, apporté une première lumière, encore bien vacillante, dans ce milieu à jamais obscur aux yeux des hommes, mais que la Science pourrait rendre lumineux.

*Lausanne, Laboratoire de géologie de l'Université.*

25 septembre 1938.

---

### BIBLIOGRAPHIE

1. — 1916. — F. WENNER: A method of measuring earth-resistivity. *Bull. U. S. Bur. Stand.* vol. 12, pp. 469-478.
2. — 1921. — MAURICE LUGEON et J. VILLEMAGNE. — Sur un ancien lit glaciaire du Rhône entre Léaz et le Pont-Rouge des Usses (Haute-Savoie) (*C. R. Ac. des Sciences*, t. 127, p. 109).
3. — 1927. — W. J. ROONEY: Earth-Resistivity Measurements in the Copper Country, Michigan. *Terr. Magn.* 32, N°N° 3-4, pp. 97-126.
4. — 1928. — O. H. GISH and W. J. ROONEY: On Earth-current Observations at Watheroo Magnetic Observatory, 1924-1927, *Terr. Magn.* 33, pp. 79-90.
5. — 1928. — F. W. LEE: Measuring of the Variation of Ground Resistivity with a megger. U. S. Bureau of Mines. *Techn. Papers* 440. Wash.
6. — 1932. — M. LUGEON et C. SCHLUMBERGER: Application des méthodes de prospection électrique à l'étude des fondations de hauts barrages et des ouvrages annexes. *Génie civil*, 6. VIII. 1932, 12 p. 6 fig.
7. — 1932. — E.-M. POLDINI: Les sondages électriques. *Bull. techn. de la Suisse romande*.
8. — 1932. — K. SUNDBERG: Electrical conductivity of soils and rocks. *Transactions of the American Institute of Min. and Metallurg. Engineers*, pp. 367-392.
9. — 1935. — J. KOENIGSBERGER. — Aufsuchung von Wasser mit geophysikalischen Methoden. *Beiträge zur angewandten Geophysik*, Bd. III.

10. — 1933. — M. REICH: Die geophysikalischen Unterlagen der elektrischen Wassersuche. *Ztsch. d. D. Geol. Ges.* Bd. 85.
  11. — 1933. — W. STERN: Das Widerstandsverfahren zur Untersuchung von Tektonik und Hydrologie des Untergrundes. (Theorie und Beiträge zur Anwendung und Auswertung). *Beiträge zur angewandten Geophysik*, Bd. III, s. 408-462.
  12. — 1934. — G. F. TAGG: Interpretation of Resistivity Measurements. *Transactions of the Am. Inst. Min. and Met. Engineers*. Vol. 110, pp. 135-147.
  13. — 1935. — J. HUMMEL: Die elektrische Leitfähigkeit von Aggregaten in Bezug auf die Leitfähigkeit ihrer Bestandteilen. *Zeitschr. für Geoph.*
  14. — 1937. — Atlas géologique de la Suisse: Feuille 485, Saxon-Morcles, au 1: 25 000, avec texte explicatif.
  15. — 1937. — M. LUGEON et ELIE GAGNEBIN: La géologie des collines de Chiètres (*Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, vol. 59, et *Bulletin Lab. de géol. de l'Université de Lausanne*, N° 57.)
  16. — 1937. — ELIE GAGNEBIN: Trois notes sur le Quaternaire de la région du Léman. 3. Les collines de Noville-Chessel, près de Villeneuve, sur la plaine vaudoise du Rhône (*Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, vol. 60, et *Bull. Lab. de géol. de l'Université de Lausanne*, N° 60).
-