

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 75 (1980-1981)
Heft: 357

Artikel: Phénomènes d'électrofiltration liés à quelques sites de barrages
Autor: Gex, Pierre
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-277782>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 31.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN N° 248 des Laboratoires de Géologie, Minéralogie, Géophysique
et du Musée géologique de l'Université de Lausanne

Phénomènes d'électrofiltration liés à quelques sites de barrages*

PAR

PIERRE GEX**

Abstract. – Measurements of streaming potentials have been carried out on seven dam sites in Switzerland and in France. After some theoretical considerations and a brief description of the measuring technique, the results are exposed in the form of potential profiles and an equipotential map. The connection between the measured values of electric potential and hydraulic head is found to be in good agreement with theory. Finally, a simple model of the phenomena observed in the field is proposed and briefly discussed.

I. INTRODUCTION

Lorsqu'on force un liquide à s'écouler laminairement dans un milieu perméable et isolant, on provoque dans certaines conditions l'apparition d'une différence de potentiel électrique le long du corps filtrant considéré. Ce potentiel s'appelle «potentiel d'électrofiltration» ou encore «électrocinétique» (streaming potential). Ce phénomène, découvert en 1859 par le physicien allemand Quincke, s'explique par l'interaction entre la part mobile du fluide dans les pores du milieu traversé et la double couche électrique liée à la surface de ces pores (potentiel zeta). Plus intuitivement, on peut se représenter l'apparition de ce potentiel d'électrofiltration par une filtration sélective des ions du liquide: les anions, plus gros, restent adsorbés sur les parois des pores, alors que les cations sont entraînés avec le fluide. La dissymétrie dans la distribution des charges crée ainsi un potentiel négatif à l'entrée du fluide dans le corps filtrant, et positif à la sortie. Comme on le verra ci-dessous, la grandeur de la différence de potentiel qui apparaît dans ces conditions est fonction de plusieurs paramètres propres au fluide et au matériau traversé.

* Etude réalisée dans le cadre d'un projet du Fonds national suisse de la recherche scientifique, requête N° 82.647.0.78

** Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne, rue de l'Université 5, 1005 Lausanne, Suisse.

La mesure de ce phénomène est mise à profit dans l'exploration des puits de pétrole, où elle permet de distinguer les niveaux poreux et perméables des roches-magasins. Dans un autre domaine, l'électrofiltration s'observe fréquemment lors des prospections par polarisation spontanée (P.S.), où elle constitue une composante parasite parfois considérable. Cependant, depuis quelques années, la technique de mesures P.S., appliquée exclusivement au potentiel d'électrofiltration, donne des résultats intéressants lors d'études de zones à forte activité géothermale. Utilisée conjointement avec d'autres méthodes, elle permet de localiser les emplacements les plus prometteurs (ZOHDY, ANDERSON, MUFFLER, 1973; CORWIN, HOOVER, 1979).

Rappels théoriques et généralités

L'expression liant l'amplitude du potentiel d'électrofiltration E_f aux caractéristiques du fluide est la suivante :

$$E_f = \frac{\rho \varepsilon \zeta}{4 \pi \eta} \cdot \Delta P$$

ρ représente la résistivité du fluide. ε sa constante diélectrique et η sa viscosité. ζ est le potentiel électrique de la double couche et ΔP le gradient de pression entre les points de mesure de E_f .

A première vue, il est surprenant de constater que les caractéristiques du milieu filtrant (grandeur, forme et disposition des pores) n'apparaissent pas dans l'expression. Or, de nombreuses expériences de laboratoire (citées par AHMAD, 1964) ont prouvé qu'il existe une nette relation entre l'amplitude du potentiel E_f et les caractéristiques du matériau utilisé. AHMAD (*op. cit.*) a montré cependant que les expérimentateurs ne s'accordaient pas sur le sens de cette relation. Pour les uns, le potentiel est inversement proportionnel à la granulométrie; pour les autres, le contraire s'observe. Il est possible que la composition minéralogique du sable utilisé comme corps filtrant, son degré de pureté, la forme des grains influent sur le potentiel zeta et donc les valeurs de E_f . Dans son travail, AHMAD parvient aux conclusions suivantes concernant cet aspect du problème: a) la géométrie du corps filtrant importe peu; b) l'amplitude du potentiel d'électrofiltration est inversement proportionnelle à la granulométrie et, dans une moindre mesure, à la perméabilité; c) la technique de mesure est critique. Enfin, la conclusion hydrologique de son étude est qu'on ne doit s'attendre qu'à des potentiels d'électrofiltration extrêmement faibles au voisinage d'un puits en pompage. A l'opposé, BOGOSLOWSKY et OGILVY (1973) donnent un exemple d'étude d'une nappe aquifère en cours de pompage. L'anomalie maximale mesurée est de +55 mV et son allure générale reflète fidèlement la forme du cône de rabattement donnée par les piézomètres. Les auteurs suggèrent que, dans de bonnes conditions, la mesure du potentiel d'électrofiltration permet

de surveiller le comportement d'une nappe, principalement son rayon d'influence, sans recourir à des forages d'exploration.

Ces quelques citations montrent que de nombreux problèmes restent posés à l'expérimentateur et que les mesures *in situ* ne suivent pas nécessairement les prévisions théoriques ou même celles du laboratoire. Cette constatation nous a amenés à rechercher d'abord l'expérimentation directe sur le terrain. Les résultats de ces essais constituent l'essentiel du présent article.

II. BUT DE L'ÉTUDE

L'étude de l'électrofiltration liée aux lacs de barrage offre plusieurs aspects intéressants, comme la présence de hautes pressions hydrostatiques réparties sur un espace relativement restreint, la possibilité de vérifier *in situ* la dépendance entre le potentiel et la hauteur d'eau, et enfin la possibilité de mettre en évidence l'effet du voile d'étanchéité des barrages. Une synthèse de ces différentes observations, dans un stade plus avancé, pourrait servir à l'étude des fuites des ouvrages et des retenues, problèmes qui se posent parfois avec acuité. Les Soviétiques pratiquent ce genre de mesures depuis de nombreuses années sur leurs barrages en terre et obtiennent de bons résultats (BOGOSLOWSKY et OGILVY, 1970, 1971). Dans nos régions, les problèmes de fuites de barrages ne semblent pas, à notre connaissance du moins, faire l'objet d'étude par électrofiltration. Nous avons donc entrepris ce travail avec l'espoir d'apporter quelques observations originales, qui d'ailleurs ne constituent qu'un premier pas dans ce genre d'investigations.

Choix des sites étudiés

Certains sites de barrages envisagés ne se prêtaient malheureusement pas à des mesures de potentiel à l'aval de l'ouvrage. Ainsi, sur les treize sites visités (dont trois en France, sur le Drac), quatre n'ont pas convenu à cause de la pente trop forte de leur vallée: l'électrofiltration naturelle de pente aurait masqué le phénomène attendu (cas de Salanfe, Emosson, Dixence et Mattmark).

L'aval de deux autres barrages se révéla impraticable par la présence d'un plan d'eau (Rossens) ou par sa situation au fond d'une gorge inaccessible (Sautet). En France, les sites de Monteynard et de Notre-Dame de Commiers (tous deux sur le Drac) ont fourni des résultats intéressants, ainsi qu'en Suisse les barrages des Toules, de Mauvoisin, Moiry, Cleuson et Zeuzier.

L'aval de Mauvoisin a permis, exceptionnellement, le levé d'une carte de potentiel sur une surface de 600 sur 120 m environ. Le grand développement horizontal de cette zone à faible relief, lié à la présence d'un imposant barrage de 237 m de hauteur, donne lieu à des réactions très vives. On en verra plus loin les détails et une interprétation possible.

Les caractéristiques géologiques de chaque site jouent certainement un rôle dans la distribution et l'homogénéité des potentiels observés. A priori, il semble très difficile de prévoir l'incidence de la géologie locale sur les conditions hydrologiques des sites étudiés. Au stade du présent travail, nous avons été contraints de négliger les particularités géologiques et tectoniques des assises de nos barrages, même si l'on rencontre des roches aussi diverses que des schistes aaléniens écrasés (cas de la digue de Notre-Dame de Commiers), des calcaires liasiques (Monteynard), ou encore des schistes lustrés argilo-gréseux (Mauvoisin). La bonne cohérence des résultats obtenus dès nos premières expériences nous a incités à poursuivre l'étude malgré l'absence de données géologiques précises.

III. MÉTHODE DE MESURES ET MISE EN ŒUVRE

Toute valeur de potentiel électrique mesurée à la surface du sol doit se rapporter à une électrode de référence à laquelle on donne arbitrairement un potentiel nul. En pratique, cette référence se situe hors de toute perturbation électrique naturelle ou artificielle et cette condition tend naturellement à l'éloigner le plus possible de la zone à explorer. Dans les cas étudiés, l'électrode de référence, fixe, se trouve en général à environ 400 m à l'aval du barrage, et la lecture du potentiel se fait tous les 10 m, parfois tous les 5 m pour vérification. La façon de procéder est schématisée sur la figure 1.

Le matériel utilisé est celui mis au point pour la prospection par polarisation spontanée. L'électrode de référence, du type impolarisable au Cu-CuSO₄, est réalisée en PVC et bois. L'électrode mobile maniée par l'opérateur mesure 1 m de long et, grâce à son faible diamètre, s'enfonce aisément dans les terrains. Cette construction permet ainsi une économie considérable de temps et d'effort par rapport aux types habituels d'électrodes.

La liaison électrique nécessaire de l'électrode de mesure mobile avec la référence fixe se fait grâce à un fin fil de cuivre isolé qui se dévide d'une canette pendant la marche de l'opérateur, selon une technique déjà décrite en détail (GEX, 1977). Le dispositif a été perfectionné par l'adjonction d'un compteur métrique actionné par le dévidage du fil de cuivre

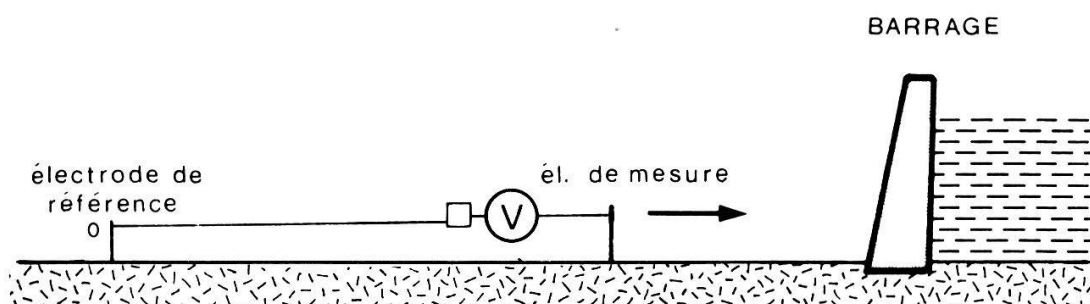


Fig. 1. — Mise en œuvre des mesures du potentiel d'électrofiltration.

lui-même, qui joue ainsi un double rôle électrique et mécanique. Ce procédé rend l'opérateur autonome et accélère la cadence du relevé. La valeur du potentiel est lue sur un millivoltmètre digital, à cristaux liquides, ne comportant qu'une gamme de mesures de 1 à 2000 mV, avec indication automatique de la polarité.

Ces caractéristiques libèrent l'opérateur en rendant les lectures faciles et sûres. Cet appareil, que nous avons réalisé à partir d'un module à circuit intégré, comprend encore un filtre commutable qui permet de stabiliser les mesures dans les zones parcourues par des courants vagabonds. Enfin, l'ensemble avec le compteur pèse environ 1 kg.

IV. RÉSULTATS

L'ensemble des résultats, sous forme de profils de potentiel, est représenté sur la figure 2. Au premier abord, l'allure générale des profils montre une décroissance générale du potentiel au fur et à mesure que l'on se rapproche du barrage. On verra plus loin, dans l'explication proposée, l'origine de ce signe négatif. On voit également que l'amplitude du minimum est fonction de la hauteur d'eau présente derrière le barrage. A Mauvoisin (et, dans une moindre mesure, aux Toules), la remontée rapide du potentiel avant le pied de l'ouvrage pose un problème qui sera traité plus loin.

A l'aval de ce même site, sur le fond de la vallée, il a été possible de dresser une carte équipotentielle grâce à plus de 250 mesures (fig. 3). Les irrégularités des courbes sont mineures et proviennent vraisemblablement des variations d'altitude dues à quelques grands remblais datant des chantiers du barrage. Les anomalies de fortes amplitudes, localisées sur le flanc gauche de la vallée, sont dues à des passées graphitiques dans les schistes lustrés.

L'allure générale de la carte reproduit bien celle du profil présenté plus haut, en particulier la forte remontée du potentiel immédiatement à l'aval du barrage.

Interprétation et discussion

Pour vérifier que l'anomalie électrique dépend de la différence de pression en présence, nous avons reporté, pour chaque barrage, la valeur du minimum de potentiel en fonction de la hauteur d'eau disponible. Les résultats sont présentés sur le graphique de la figure 4.

La corrélation est excellente, et seul le barrage des Toules s'écarte plus nettement de la droite. La pente de celle-ci conduit à un rapport $\Delta V_E/\Delta h$ de 1,1 mV/m, soit à un rapport $\Delta V_E/\Delta p$ de -11 mV/atm. Cette valeur est en accord avec l'ordre de grandeur trouvé par NOURBEHECHT (1963) (cité par CORWIN et HOOVER, 1979) pour plusieurs variétés de roche, soit de -12 à +31 mV/atm.

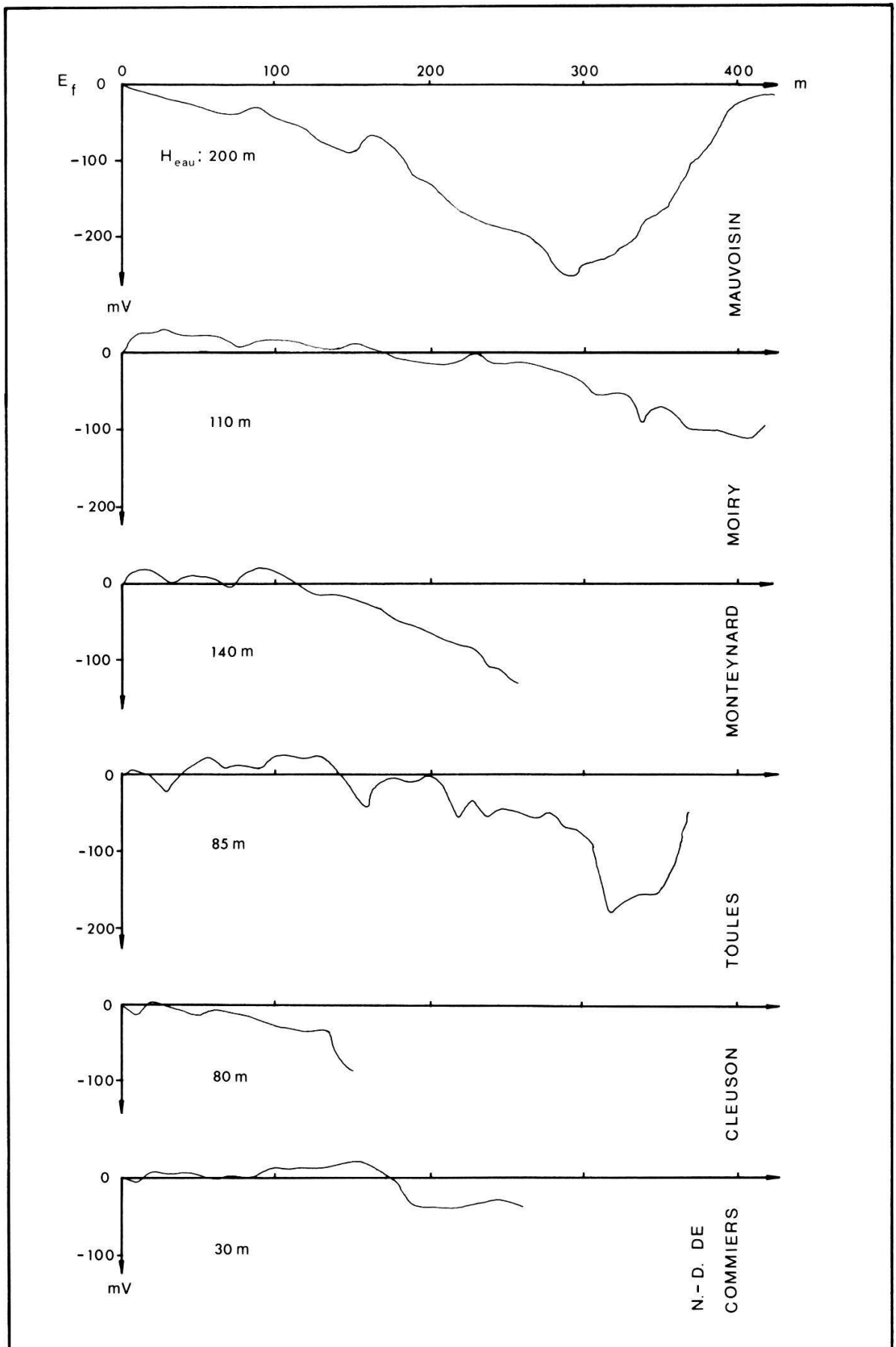


Fig. 2. - Profils de potentiels à l'aval des barrages.

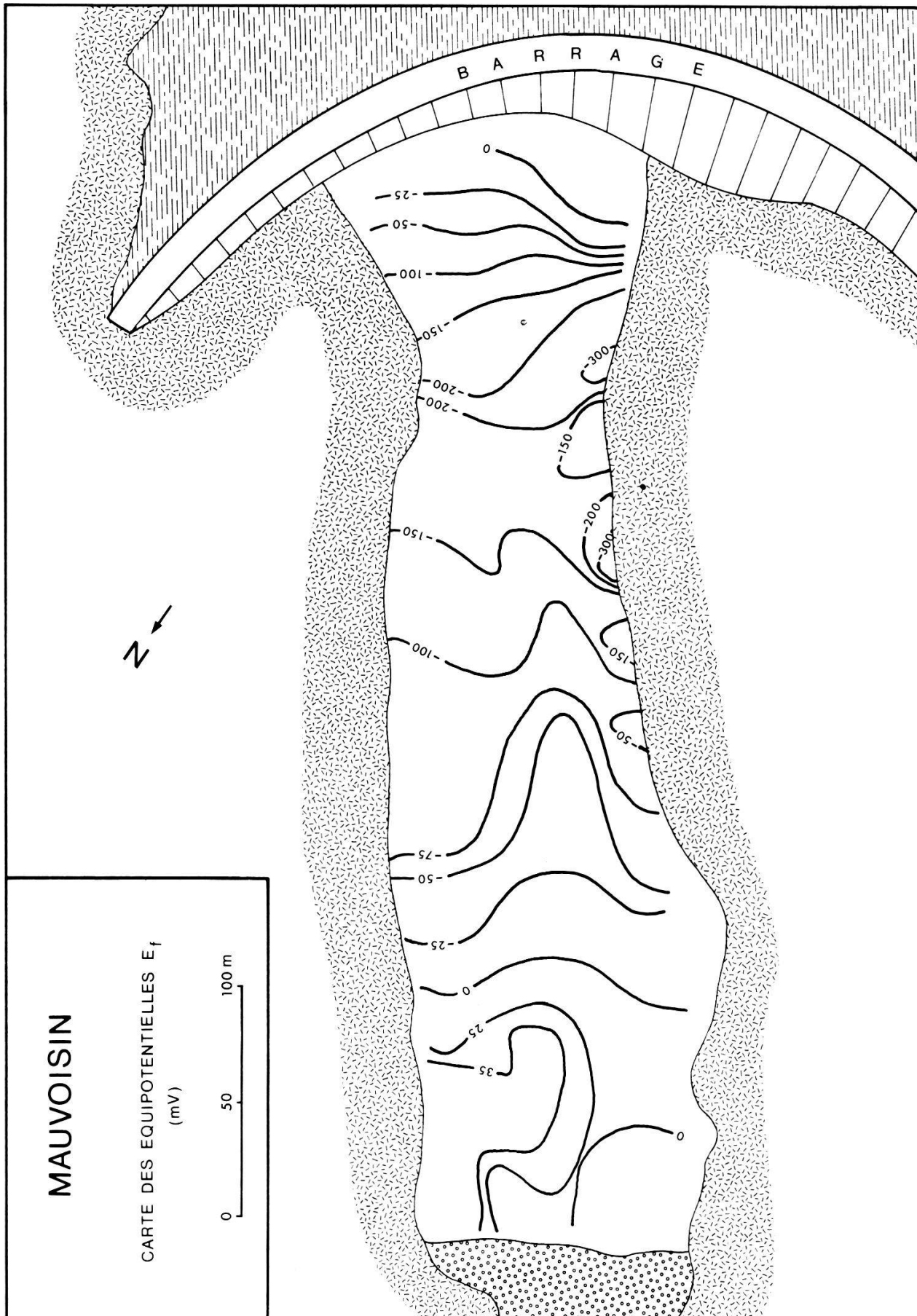


Fig. 3. - Carte des potentiels à l'aval du barrage de Mauvoisin.

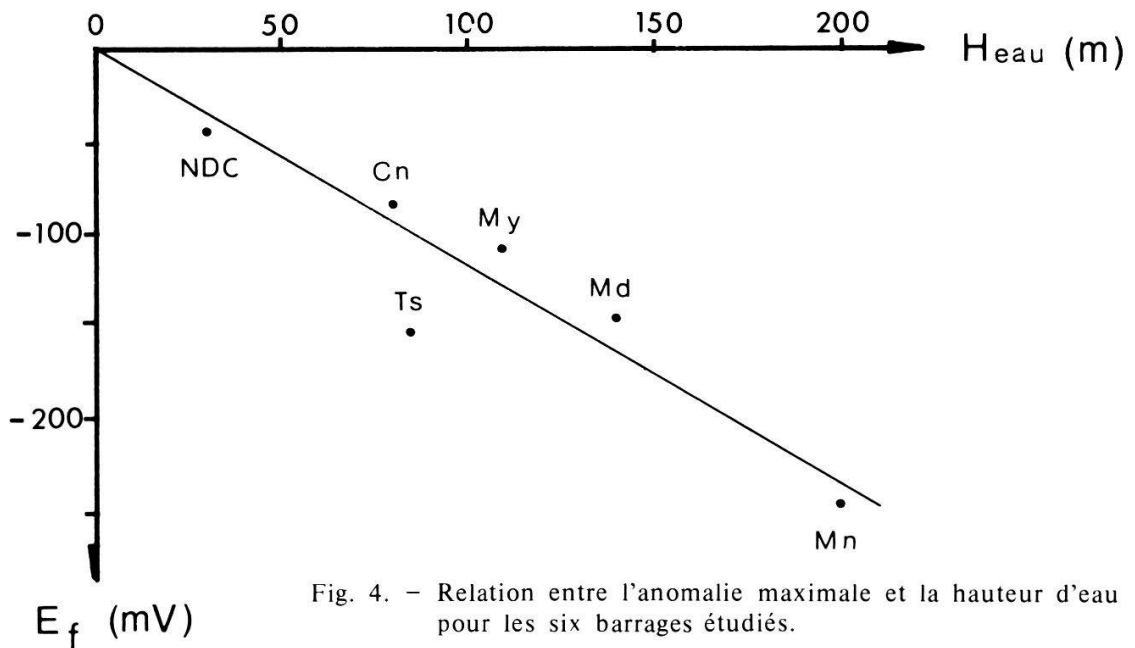


Fig. 4. - Relation entre l'anomalie maximale et la hauteur d'eau pour les six barrages étudiés.

L'interdépendance du potentiel d'électrofiltration et de la pression de l'eau s'observe ainsi d'un site à l'autre de manière très satisfaisante, du moins dans le cadre de ce travail. Cette constatation permet de penser qu'à première vue les paramètres de l'équation générale du potentiel E_f (résistivité, potentiel zeta, viscosité) restent constants ou encore compensent mutuellement leurs variations. Une analyse plus détaillée des conditions hydrologiques d'un site semblerait pouvoir apporter quelques réponses concernant la valeur de ces paramètres. Or, la mesure de la résistivité de l'eau de la retenue, par exemple, ne fournirait pas, à notre avis, une valeur utilisable dans l'équation du potentiel. En effet, même si l'eau d'imbibition des terrains sous la retenue peut provenir de l'alimentation du bassin, la lenteur de son trajet, à l'image du déplacement d'une nappe phréatique, permet probablement à l'eau de se charger plus ou moins en ions selon le chimisme des roches rencontrées, modifiant ainsi sa résistivité initiale. En définitive, seule la valeur de la viscosité de l'eau pourrait être fixée avec quelque certitude, en tenant compte de la température moyenne du lieu. Rappelons en effet que la viscosité de l'eau à 20°C passe de 1 Cp à 1,52 pour 5°C.

Explication proposée

La bonne cohérence des résultats permet d'esquisser un modèle possible de filtration dans le sous-sol rendant compte de l'allure des anomalies observées et de leur signe négatif.

A l'amont d'un barrage, les diaclases de la roche sont remplies d'eau à la pression du lac. Immédiatement à l'aval, la pression hydrostatique est nulle et, de ce fait, règne un gradient de pression très élevé sur une faible distance. L'imperméabilité n'étant jamais parfaite, même pour un ouvrage

bien construit et ne présentant pas de fuites, des filets de courant d'eau peuvent passer sous le barrage après avoir contourné le voile d'étanchéité, et cheminer vers l'aval comme une nappe en mouvement. Les pertes de charges font baisser peu à peu la pression à mesure que l'on s'éloigne du barrage. La variation du potentiel d'électrofiltration suit probablement celle de la pression (fig. 5). Dans le cas de Mauvoisin, la remontée spectaculaire du potentiel observée dès 120 m avant le barrage s'explique peut-être par la présence ici d'un voile d'injection exceptionnellement développé (jusqu'à 200 m de profondeur). Ce rideau provoque une « zone d'ombre » pour le flux d'eau, entraînant du même coup une diminution rapide de l'électrofiltration à l'approche de l'ouvrage.

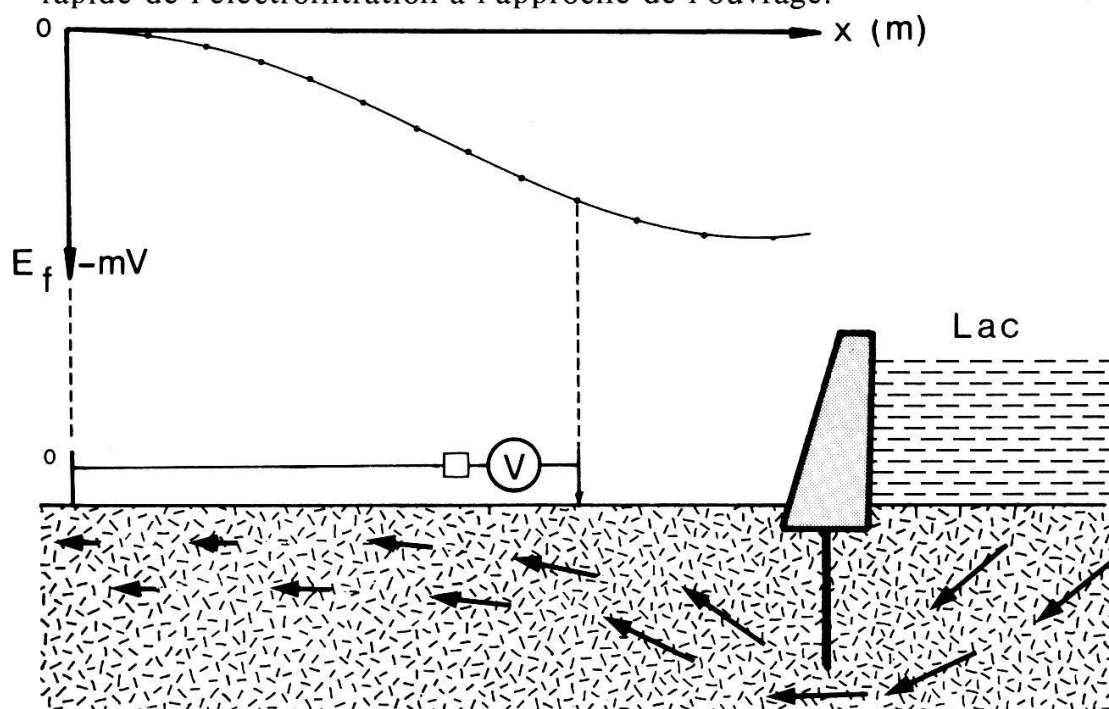


Fig. 5. — Mécanisme possible de l'électrofiltration à l'aval d'un barrage.

Le signe négatif de l'anomalie observée s'explique par le sens de filtration par rapport à l'électrode de référence. L'aval d'un barrage avec sa roche et ses alluvions peut ainsi se rapprocher d'un terrain perméable reposant sur des couches en « dip-slope ». Cette disposition se rencontre souvent en prospection par P.S. et donne lieu à l'électrofiltration naturelle de pente. L'électrode de référence étant placée au pied de cette pente, le potentiel relevé devient de plus en plus négatif avec l'accroissement de la différence d'altitude. Le profil de la figure 6 a été relevé spécialement pour illustrer qualitativement et quantitativement le phénomène. La dépendance entre le potentiel et la différence d'altitude, autrement dit la différence de pression d'eau, se marque bien linéairement dans cet exemple. Le rapport $E_f/\Delta p$ est ici plus grand (18 mV/atm) que dans le cas de nos barrages. La raison peut provenir du fait que l'eau de filtration est de l'eau de pluie, d'une résistivité probablement plus élevée que dans le cas précédent.

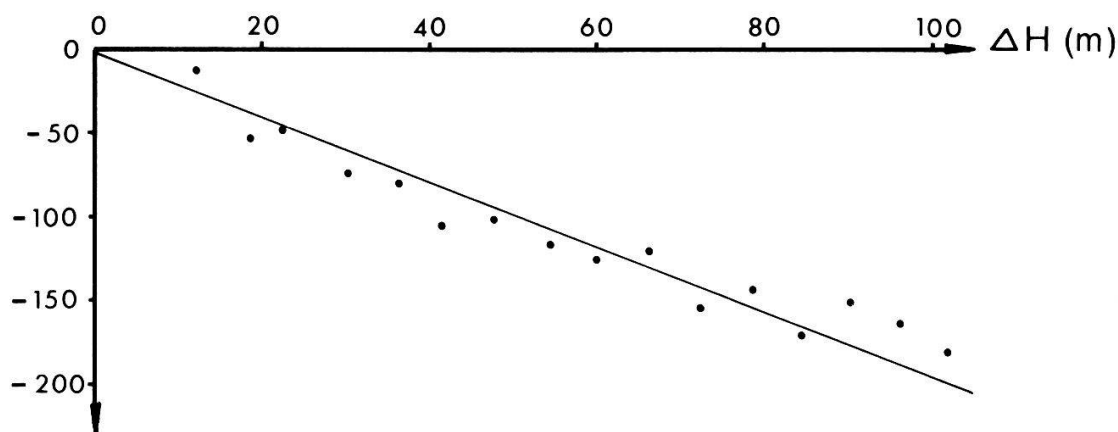


Fig. 6. – Croissance du potentiel négatif en fonction de l'élévation d'une pente.

Pour confirmer la dépendance du potentiel E_f et de la pression d'eau, et du même coup la constance du facteur contenant les paramètres résistivité, viscosité et potentiel zeta, il serait intéressant de procéder à des mesures semblables à l'aval des barrages vides ou en cours de remplissage. Malheureusement, leurs situations, comprises entre 1700 et 2100 m d'altitude empêche généralement toute mesure à la fin de l'hiver, lorsque les retenues sont à leur niveau minimal. Pour les barrages de Monteynard et Notre-Dame de Commiers, leur position au fil de l'eau exclut en principe leur vidange.

Lors de notre campagne de mesures, nous avons pu cependant exécuter un profil à l'aval du barrage de Zeuzier (Rawyl), alors entièrement vidé pour des raisons techniques. Il ne s'agit évidemment pas d'une réelle contre-épreuve, en l'absence des valeurs de potentiel pour le barrage plein, mais l'anomalie obtenue présente des particularités intéressantes, sinon aisément explicables. L'aval de l'ouvrage, formé d'une gorge étroite taillée dans les calcaires du Malm, n'offre pas une disposition favorable à nos mesures. Le profil a dû être mené hors de l'axe de la vallée, en suivant une horizontale pour éviter l'effet de l'électrofiltration naturelle de pente. Ces conditions jouent peut-être un rôle dans l'allure inhabituelle de cette anomalie (fig. 7). Celle-ci est peu régulière, modulée en dents de scie. Il est possible d'ailleurs que la chute brutale du potentiel 100 m avant l'ouvrage soit due à l'influence parasite d'un petit local de béton construit à cet endroit. Enfin, contrairement aux cas précédents, le profil se caractérise par des valeurs positives.

D'après la théorie et nos observations schématisées précédemment sur la figure 4, on devrait observer un ensemble de valeurs oscillant autour de 0 mV. La raison de cette «anomalie» n'est pas évidente et, d'ailleurs, une tentative d'explication fondée sur ce seul profil ne doit être considérée qu'avec prudence.

Si le phénomène apparaît ici comme l'image renversée des précédents, on peut penser que son mécanisme joue en sens opposé. Ainsi, par exemple, à un flux souterrain amont-aval devrait correspondre un mouve-

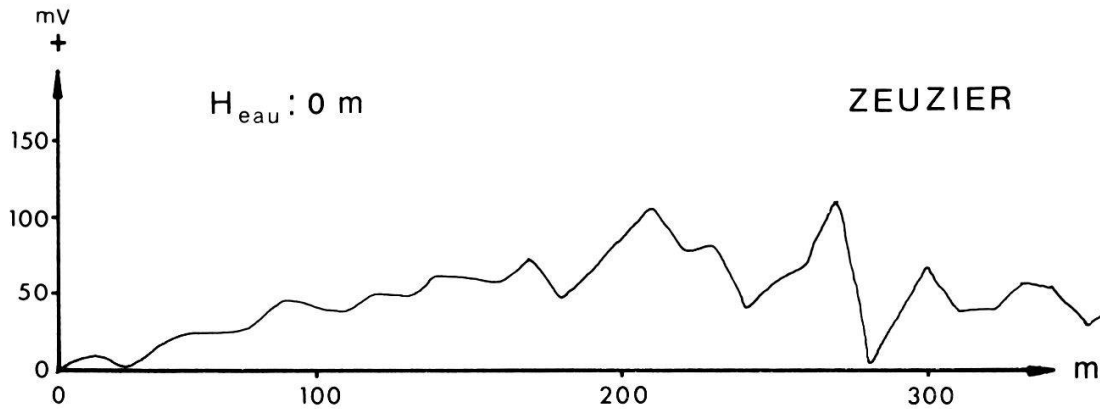


Fig. 7. — Anomalie positive à l'aval du barrage de Zeuzier vide.

ment de fluide vers l'amont. Cette filtration horizontale inverse paraît exclue. Le signe positif de cette anomalie pourrait être dû plus vraisemblablement à une électrofiltration «per ascensum». Cette hypothèse s'appuyerait sur le fait que lorsqu'un lac de barrage se remplit, la pression hydrostatique tend à écarter élastiquement les flancs de la vallée. Ce déplacement a pu être calculé et étudié sur modèle réduit, et son amplitude est d'environ 2 cm (STUCKY, 1954). Par ailleurs, la masse d'eau de la retenue fait naître une pression interstitielle considérable dans les pores et les microfissures de la roche. La charge éliminée par vidange, il est peu probable que l'équilibrage des déplacements et des pressions ait lieu instantanément. L'élasticité des roches liée à une faible perméabilité (cas souhaitable pour une retenue) pourrait donner naissance à une filtration vers le haut, responsable de l'anomalie positive observée. Répétons encore qu'il ne s'agit là que d'une hypothèse qui demanderait des vérifications par l'étude d'autres lacs de barrages vides.

V. CONCLUSIONS

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude préliminaire montrent une constance inattendue du rapport $\Delta E_f / \Delta p$ malgré la diversité des sites étudiés. Cette cohérence permet d'envisager avec une certaine confiance l'étude d'autres barrages, afin de compléter nos connaissances dans les phénomènes d'électrofiltration «artificielle» créés au voisinage des lacs de retenue. Certains essais particuliers mériteraient d'être entrepris. Par exemple, des profils de potentiel parallèles à l'axe des vallées et menés horizontalement à diverses altitudes au-dessus du fond permettraient peut-être d'obtenir, dans des conditions différentes, d'autres vérifications de la dépendance entre le potentiel et la pression. Ce genre d'essais ne serait évidemment possible que si les flancs de la vallée étaient praticables à différents niveaux. Or, beaucoup de vallées des Alpes fermées par un barrage comportent des flancs escarpés et irréguliers, rendant les mesures souvent problématiques. Des profils perpendiculaires à la

vallée montreraient également des résultats intéressants. Il faudrait compter dans ce cas avec une forte électrofiltration naturelle de pente. Sa tendance générale pourrait peut-être se dégager grâce à d'autres mesures exécutées loin à l'aval, où l'anomalie due au barrage doit s'annuler.

Ces considérations théoriques et leurs vérifications sur le terrain devraient déboucher sur l'application pratique des phénomènes d'électrofiltration à l'étude des fuites des barrages et des retenues. Comme nous l'avons dit précédemment, ce problème des fuites ne semble pas avoir fait l'objet d'études spécifiques par cette méthode, alors que d'autres techniques comme les essais de coloration, les traçages radioactifs ou les mesures thermiques ont été souvent employées. Celles-ci présentent des difficultés d'application inhérentes au problème lui-même. En effet, les fuites les plus graves et les moins visibles présentent un caractère lent et diffus, embrassant de grands volumes de terrains. Cet effet de diffusion à grande échelle entraîne une dilution considérable des marquages ou des traçages, rendant finalement difficile ou douteuse la détection des anomalies.

La perméabilité en petit est une condition essentielle à la création d'un potentiel d'électrofiltration; une prospection par cette méthode semble ainsi bien adaptée au problème des fuites diffuses, et enfin, par sa facilité de mise en œuvre, pourrait apporter rapidement des informations utiles. Les quelques essais d'application que nous avons entrepris récemment montrent des résultats prometteurs, qui feront ultérieurement l'objet d'une autre étude.

Ajoutons enfin que la mesure des potentiels d'électrofiltration ne constitue qu'une technique (et cela seulement) et que l'étude d'un problème de fuites, par exemple, nécessite absolument la synthèse d'un maximum d'informations pluridisciplinaires, fournies par les méthodes de la géologie, de l'hydrologie et de la géotechnique.

RÉFÉRENCES

- AHMAD, M. U., 1964. – A laboratory study of streaming potentials. *Geophys. Prospect.*, 12, 49-64.
- BOGOSLOWSKY, V. V., OGILVY, A. A., 1970. – Natural potential anomalies as a quantitative index of the rate of seepage from water reservoirs. *Geophys. Prospect.*, 18, 261-268.
- 1970. – Application of geophysical methods for studying the technical status of earth dams. *Geophys. Prospect.*, 18, 758-773.
- 1973. – Deformation of natural electric fields near drainage structures. *Geophys. Prospect.*, 21, 716-723.
- CORWIN, R. F., HOOVER, D. B., 1979. – The self-potential method in geothermal exploration. *Geophysics*, 44, 226-245.
- GEX, P., 1977. – La méthode de polarisation spontanée. Thèse. Juris Druck + Verlag, Zürich.
- STUCKY, A., 1954. – Quelques problèmes relatifs aux fondations des grands barrages-réservoirs. Tiré à part du *Bull. techn. de la Suisse romande*, N^{os} 21 et 22.

Manuscrit reçu le 18 février 1980.