Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 93 (1967)
Heft: 18: 48e Comptoir Suisse, Lausanne, 9-24 septembre 1967

Artikel: Mesures géophysiques dans les forages et les galeries
Autor: Rham, Max de / Treyvaud, René
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-69086

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 19.07.2025

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

93e année Lausanne, 9 septembre 1967 N° 18

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL
de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE
Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgurin, arch.; J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.; M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION
de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; M. Cosandey, ing.; J. Favre, arch.; A. Rivoire, arch.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION
D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua architecte
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 40.—	Etranger	Fr. 44.—
Sociétaires	»	» 33.—		
Prix du numéro	»	» 2.—	»	» 2.50

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande » N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

ANNONCES
Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 423.—
1/2 »	» 220.—
1/4 »	» 112.—
1/8 »	» 57.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales

SOMMAIRE

Mesures géophysiques dans les forages et les galeries, par M. Max de Rham, géologue, et M. René Treyvaud, ingénieur.
Bibliographie. — Informations diverses.
Documentation du bâtiment. — Documentation générale.

MESURES GÉOPHYSIQUES DANS LES FORAGES ET LES GALERIES

par M. MAX DE RHAM, géologue, et M. RENÉ TREYVAUD, ingénieur.

I. Introduction

Nous avons vu dans les conférences précédentes comment la géophysique de surface vient en aide à la géologie pour constituer une première image du sous-sol par la mesure indirecte de paramètres physiques caractérisant les formations géologiques. Une fois cette image obtenue, il est alors possible d'entrer en contact direct avec le sous-sol aux endroits les mieux choisis.

A première vue, il semblerait que le forage mécanique devrait apporter une réponse définitive à tous les problèmes qui n'auraient pas pu être entièrement résolus depuis la surface. Or, bien souvent la recherche d'une solution exacte se révèle être beaucoup plus délicate que prévue. L'analyse des « cuttings » [1] ou des carottes présente des difficultés bien connues des géotechniciens et des géologues. Nous n'en citerons que quelques-unes à titre d'exemple :

Des échantillons de sable sont ramenés en surface, ce sable était-il compacté ? Quelle était sa perméabilité ?

Des forages de moyenne ou de grande profondeur sont exécutés, les caisses de carottes s'empilent, leur manutention devient de plus en plus fastidieuse. Comment décrire ces centaines de mètres d'échantillons et ceci d'une manière absolument exacte et répétable afin de pouvoir obtenir des corrélations stratigraphiques ?

Un forage traverse des alluvions stratifiées, argile, sable, gravier. Souvent les couches sont mélangées par l'outil. Où se trouvent ces bancs ? Quelle en est leur épaisseur exacte ? etc.

Depuis longtemps les géologues pétroliers ne se contentent plus de la simple observation des « cuttings » et des carottes, mais utilisent sous l'instigation de feu Conrad Schlumberger les techniques de mesure géophysique dans les forages. Et ceci dans une proportion telle qu'elles ont pris une extension encore beaucoup plus grande que les mesures de surface et apportent des renseignements considérés actuellement comme indispensables.

Le grand avantage des mesures en galerie ou dans les forages par rapport aux mesures de surface réside dans

[1] Résidus de forage.

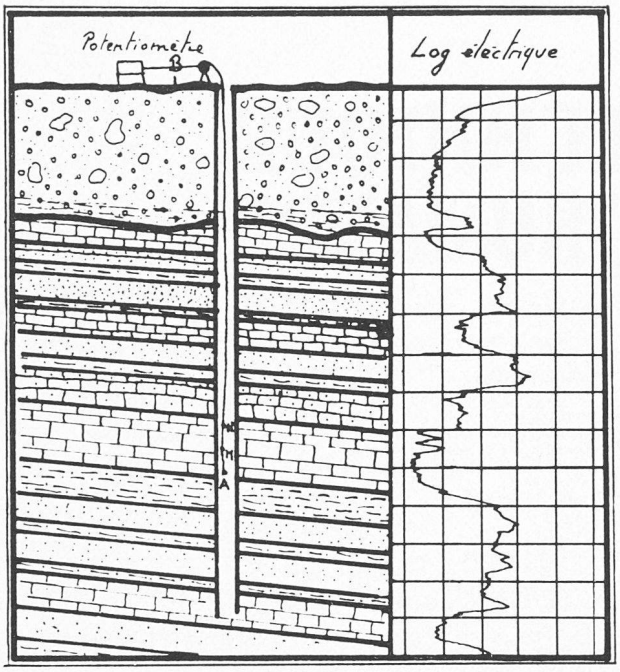

Fig. 1. — Diagraphie électrique.

le fait qu'il est possible de les effectuer directement en contact avec la matière, ce qui permet d'obtenir la valeur des paramètres physiques caractéristiques d'une couche pratiquement sans que cette dernière ne soit modifiée par la proximité de formations aux caractéristiques différentes. De telles mesures facilitent grandement les interprétations des études de surface car elles permettent d'en effectuer l'étalonnage avec précision au droit d'un forage.

D'autre part, la réalisation d'appareillages de plus en plus précis et de mieux en mieux adaptés aux problèmes de génie civil rend possible des mesures du domaine de la géotechnique (mesure de la perméabilité, de la densité, du module d'élasticité, etc.) et ceci *in situ* sans avoir à travailler sur des échantillons remaniés et, par conséquent, soustraits à leurs conditions originales. La possibilité d'obtenir des résultats directement sur une courbe d'enregistrement rend leur interprétation extrêmement aisée et élimine des risques d'erreurs susceptibles de provenir du facteur humain.

Ajoutons que, combinée avec un mode de forage tel que le rotary, l'analyse géophysique souterraine procure d'excellents résultats et ceci d'une manière rapide et économique.

II. Méthodes utilisées et exemples pratiques

1. *Mesure de la résistivité électrique des formations*

a) *Log électrique* [1]

Pour mesurer la résistivité, on envoie dans le sol un courant d'intensité i connue entre deux électrodes A, B et on mesure la différence de potentiel ΔV créée par ce courant entre deux autres électrodes M, N, situées entre A et B. La résistivité du sous-sol est alors égale à :

$$\rho = \frac{K\Delta V}{i}$$

La disposition des électrodes (dont dépend le facteur K) généralement utilisées dans les puits est indiquée sur la figure 1.

b) *Inductolog* [2]

On crée un champ magnétique alternatif au moyen d'une bobine parcourue par un courant d'intensité i. Ce champ magnétique induit une force électromotrice dans les matériaux qui entourent cette bobine.

M (coefficient d'induction mutuel) $\frac{di}{dt}$ = Force électromotrice induite

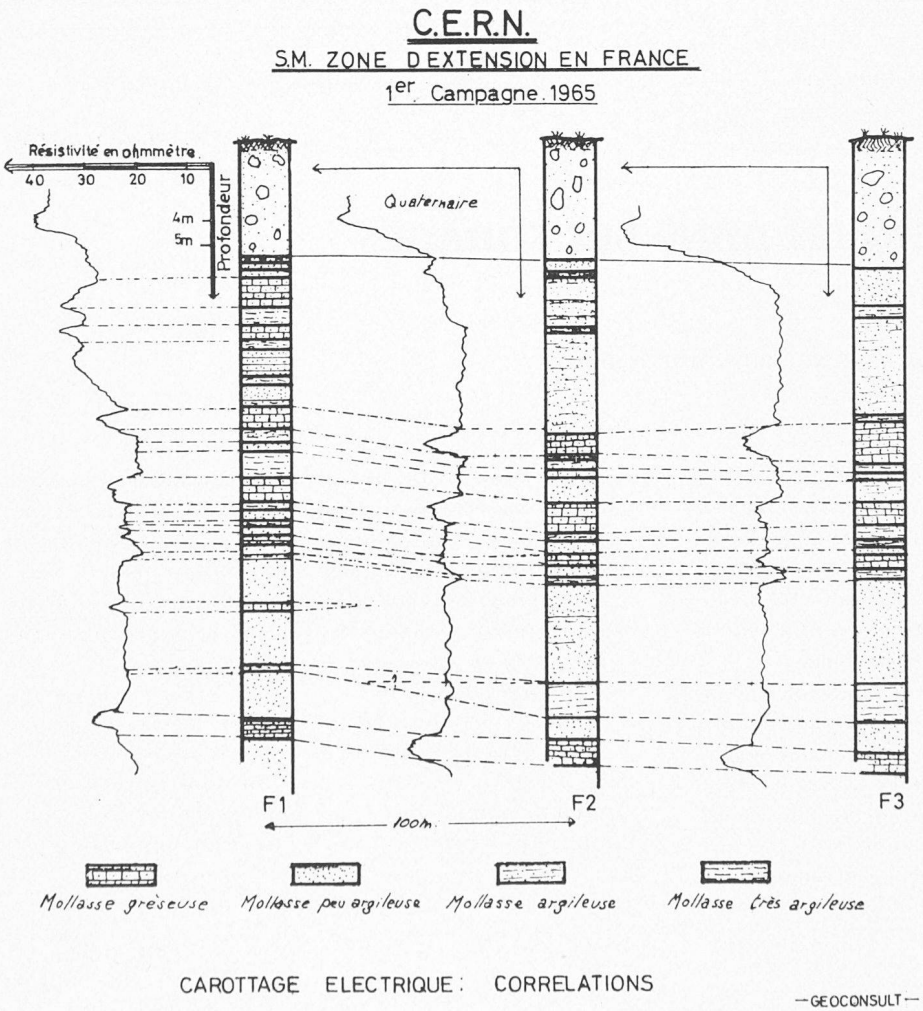

Fig. 2. — Corrélations stratigraphiques établies par comparaison des logs électriques effectués dans les forages du CERN.

[1] Diagraphie électrique.
[2] Diagraphie inductive.

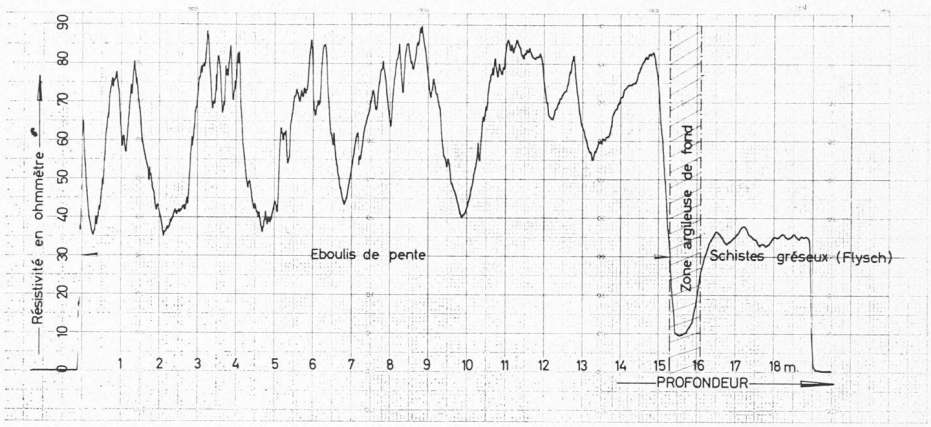

Fig. 3. — Log électrique servant à la localisation d'un massif d'ancrage.

Le courant induit (ia) dans un anneau de terrain est alors égal à :

$$ia = \frac{M\dfrac{di}{dt}}{R} \quad \text{(résistance de l'anneau du terrain)}$$

A son tour, ce courant crée un champ magnétique qui induit une force électromotrice (f.e.m. 2) dans une seconde bobine située dans l'axe de la première.

$$\text{F.e.m. } 2 = \frac{M1\ M2\dfrac{di}{dt}}{R}$$

La mesure de cette force électromotrice permettra donc de connaître la résistivité des différentes formations.

Le principal avantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle ne nécessite pas de contacts électriques directs entre la sonde et le terrain. Elle s'utilise donc pour analyser les trous tubés en plastique. Signalons qu'il est actuellement impossible de mesurer les résistivités électriques du sous-sol à travers un tubage métallique.

Exemples pratiques

Corrélation stratigraphique au CERN.

Le CERN a fait exécuter en 1965 une série de treize sondages de reconnaissance profonds de 30 m afin de déterminer l'épaisseur de la couverture morainique et les caractéristiques de la Molasse sous-jacente au futur anneau de stockage du synchro-cyclotron. Ces forages furent exécutés en carottage continu et analysés par procédé électrique.

Il s'est révélé que la Molasse présente était formée d'un très grand nombre de bancs alternés argilo-marneux et gréseux. L'étude par enregistrement électrique permit de constater d'une façon claire et indubitable que ces bancs présentaient un caractère de continuité stratigraphique remarquable. Sur la base des résultats électriques, il fut possible d'établir une coupe géologique de l'anneau et de déterminer exactement le pendage des couches, alors que l'analyse des carottes effectuées par des spécialistes laissait conclure à une discontinuité complète des formations.

Les travaux d'excavation effectués cette année ont permis de vérifier le bien-fondé des résultats électriques.

Une nouvelle campagne de forage a lieu actuellement à partir du fond même de la fouille. Cette étude très détaillée du sous-sol de l'anneau de stockage est réalisée de la manière suivante : un trou de 86 mm de diamètre est foré au carottier double tous les 60 m alternativement sur les deux bords de l'anneau. L'analyse des carottes est assurée par un spécialiste et un log électrique est enregistré.

Pour suivre les évolutions du sous-sol entre deux trous carottés, une série de trous intermédiaires est réalisée au rockbit de petit diamètre, mode de forage particulièrement rapide et économique. La comparaison des différents diagrammes électriques enregistrés dans ces trous permet de localiser la profondeur exacte de chaque couche reconnue au carottage et de suivre les évolutions qualitatives du sous-sol [1].

Localisation d'un massif d'ancrage. Aménagement régional. Section Montricher-Le Bochet, Route départementale n° 81 (Haute-Savoie).

Cette route, dont une section est actuellement instable, doit être ancrée par câbles (procédé Fressiney) dans le Flysch gréseux situé sous des éboulis de pente.

L'étude du diagramme électrique ci-joint (figure 3) effectué dans un trou d'ancrage incliné à 30° permet de préciser les points suivants :

1. La couverture est formée de blocs d'éboulis entassés (sans eau).
2. La base de cette couverture est humide et argileuse sur environ 1 m, elle présente un danger de glissement.
3. Le forage a pénétré de 4 m dans un schiste gréseux, homogène et non fissuré.

2. *Mesure de la célérité propre des formations*

Une impulsion mécanique est créée dans un forage au moyen d'un générateur magnétostrictif. L'onde produite se propage à travers les formations et l'eau qui remplit le trou pour atteindre un récepteur placé à quelques dizaines de centimètres de la source de choc. Son temps de parcours est inversement proportionnel à la célérité des formations.

A partir de cette célérité, il est possible de calculer le coefficient de Poisson et le module d'élasticité dynamique. Cette méthode apporte, donc, un résultat très précieux, mais elle ne s'applique avec succès que si les forages sont remplis d'eau ou de boue et non tubés.

Si les forages ne peuvent être remplis ou s'ils sont tubés, on procède de la manière suivante : l'émission est faite en surface alors que le géophone est descendu de plus en plus profondément dans le forage. Cette méthode donne des résultats moins détaillés que la première.

Ces deux techniques s'appliquent couramment à l'étude des galeries où elles permettent une détermination rapide des modules d'élasticité dynamiques des parois et de la profondeur de la zone de décompression radiale.

[1] Nous nous proposons de publier ici les résultats de cette étude lorsqu'elle sera terminée.

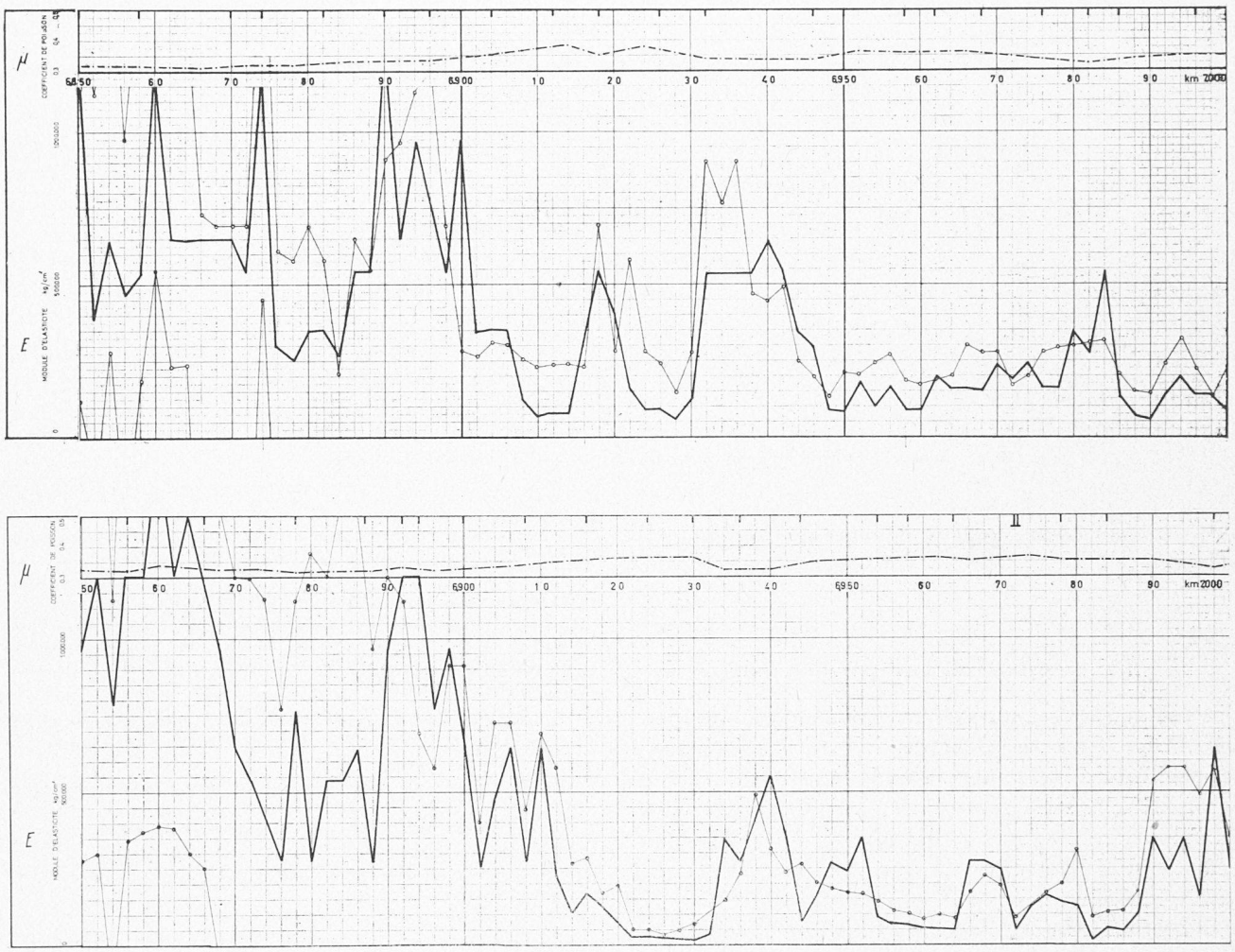

Fig. 4. — Détermination par mesures sismiques du module d'élasticité et du coefficient de Poisson sur les deux parements d'une galerie d'amenée. — Le passage Malm (calcaire très compact) - Néocomien (calcaire marneux) se produit au km 69 environ.

Exemples pratiques

Mesure du module d'élasticité dynamique dans la galerie de l'Hongrin

L'exemple de la figure 4 a été obtenu par des mesures sismiques effectuées sur les deux parements de la galerie d'amenée à la zone de contact Malm-Néocomien. La courbe épaisse correspond à une distance émetteur-récepteur de 4 m et la fine à une distance de 12 m.

Ces mesures ont permis de constater que le module d'élasticité variait dans de très fortes proportions le long de la galerie et ont mis en évidence les sections où la zone de décompression radiale était importante.

Détermination de l'épaisseur de la zone de décompression

A la suite du résultat précédent, il fut décidé d'effectuer des mesures sismiques dans des forages radiaux. Ces derniers furent placés dans des portions de la galerie représentatives des différents types de roche afin de connaître la profondeur de leur zone de décompression.

3. *Mesure de la radioactivité naturelle et provoquée (gamma ray, gamma ray neutron, gamma gamma)*

a) *Détermination de la teneur en argile (gamma ray)*

La radioactivité naturelle des formations est due principalement à l'isotope de potassium K40 qui se trouve dans les argiles. Le diagramme de radioactivité effectué au moyen d'un détecteur Geiger-Muller donnera donc une valeur de pourcentage d'argile qui se trouve dans les formations.

Le log de radioactivité se prête particulièrement bien à la localisation de très minces couches argileuses pouvant être la cause de glissement et permet d'établir d'excellentes corrélations stratigraphiques de puits à puits. Le grand avantage de cette méthode est qu'elle s'applique dans des puits tubés en métal.

b) *Détermination de la teneur en eau (gamma ray neutron)*

On place à proximité du détecteur à rayon gamma

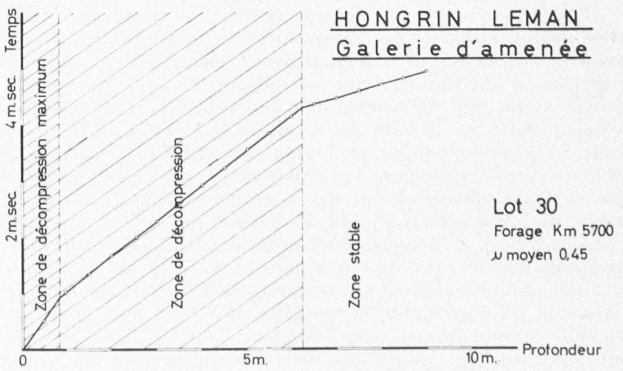

Fig. 5. — Détermination de l'épaisseur de la zone de décompression radiale d'une galerie d'amenée. La zone de décompression atteint ici 6 m.

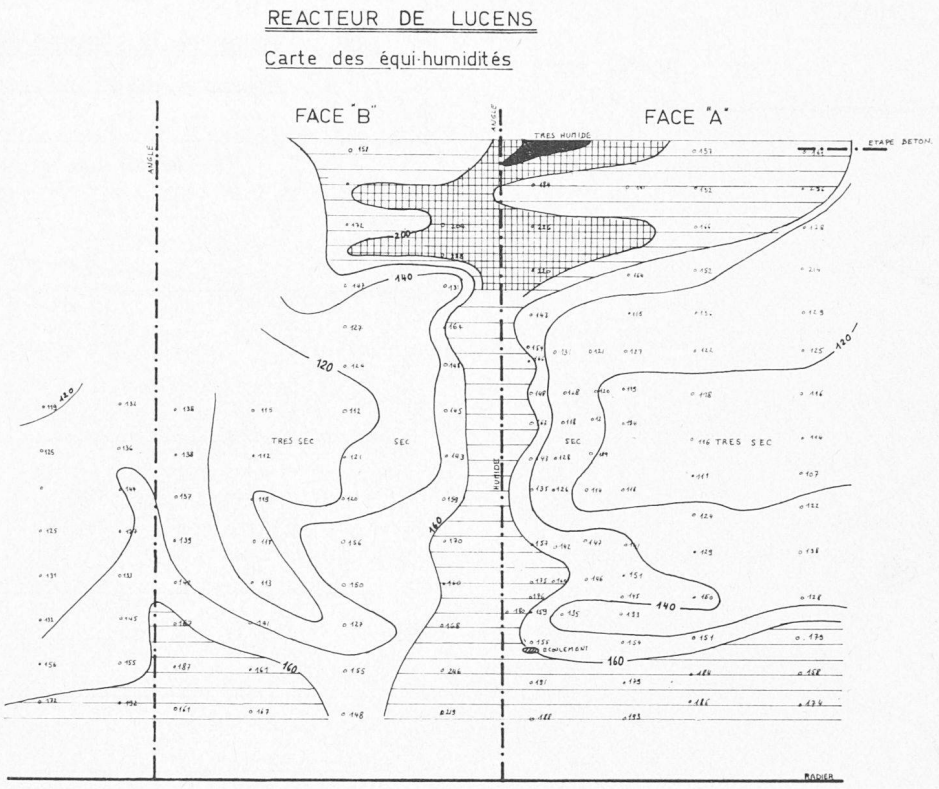

Fig. 6. — Localisation d'une zone perméable dans une paroi en béton. Etude au gamma ray neutron.

une source de neutrons rapides, les neutrons sont ralentis par leur choc avec les atomes légers (hydrogène) qui ne se trouvent pratiquement que dans l'eau ou dans les hydrocarbures. Suffisamment ralentis, les neutrons entrant en collision avec les atomes légers produisent une émission de rayons gamma détectée par le compteur. Cette radioactivité provoquée est donc proportionnelle à la teneur en eau des formations.

c) *Détermination de la densité des formations (gamma gamma)*

En employant une source de rayons gamma, on mesure l'intensité du rayonnement gamma qui est d'autant plus atténué que la densité des formations est plus élevée.

Ces mesures, bien que rendues délicates par la présence d'une source radioactive, offrent néanmoins l'avantage d'être très précises et de pouvoir être effectuées dans des trous secs et tubés.

Exemple pratique

Recherche d'une zone perméable dans un puits bétonné au réacteur atomique de Lucens

Une fuite qui ne pouvait être tolérée s'était manifestée dans une des parois en béton du bassin. Il s'agissait de déterminer la zone perméable qui ne correspondait pas à la zone d'écoulement visible.

Une étude faite avec un humidimètre gamma neutron permit de localiser la zone responsable (voir fig. 6), qui fut démolie et rebétonnée.

4. *Localisation précise d'un forage en trois dimensions*

L'inclinométrie est utilisée depuis plusieurs années pour déterminer les variations de la pente d'un trou de forage. Cette méthode dont l'emploi s'est généralisé lors des campagnes de forages pétroliers est également utilisée en génie civil, le plus souvent lors de l'étude des glissements de terrain.

Une des méthodes les plus efficaces pour mettre en évidence un glissement de terrain consiste à forer une série de trous à travers le glissement jusqu'à la roche en place et à mesurer leur déformation en fonction du temps. Les mouvements intérieurs et le mouvement général d'un glissement sont souvent extrêmement lents ; les chercheurs se sont donc appliqués à concevoir des inclinomètres de très haute précision (de l'ordre de 0,1 mm par m) afin de pouvoir délimiter les zones en mouvement le plus rapidement possible. Il est clair qu'un mouvement uniforme qui ne pourrait être décelé qu'après une année avec un appareil de mesure dont la précision serait de 1° d'arc pourrait par contre être mis en évidence en une semaine déjà avec un appareil capable de mesurer 1″ d'arc.

Exemple pratique

L'exemple de la figure 7 présente les résultats de deux séries de mesures d'inclinométrie effectuées à trois mois d'intervalle avec un appareil Télécline spécialement développé pour des problèmes de haute précision (EDF). Le plan de glissement apparaît ici très nettement.

5. *Détermination des caractéristiques physiques du fluide contenu à l'intérieur d'un forage*

a) *Salinité*

La salinité des eaux est fonction de leur résistivité électrique et de leur température. On peut actuellement mesurer la résistivité d'un fluide avec une précision meilleure que 1/100 par un dispositif spécial d'électrodes placées dans une sonde cylindrique qui supprime complètement les influences électriques extérieures mais laisse une libre circulation au fluide.

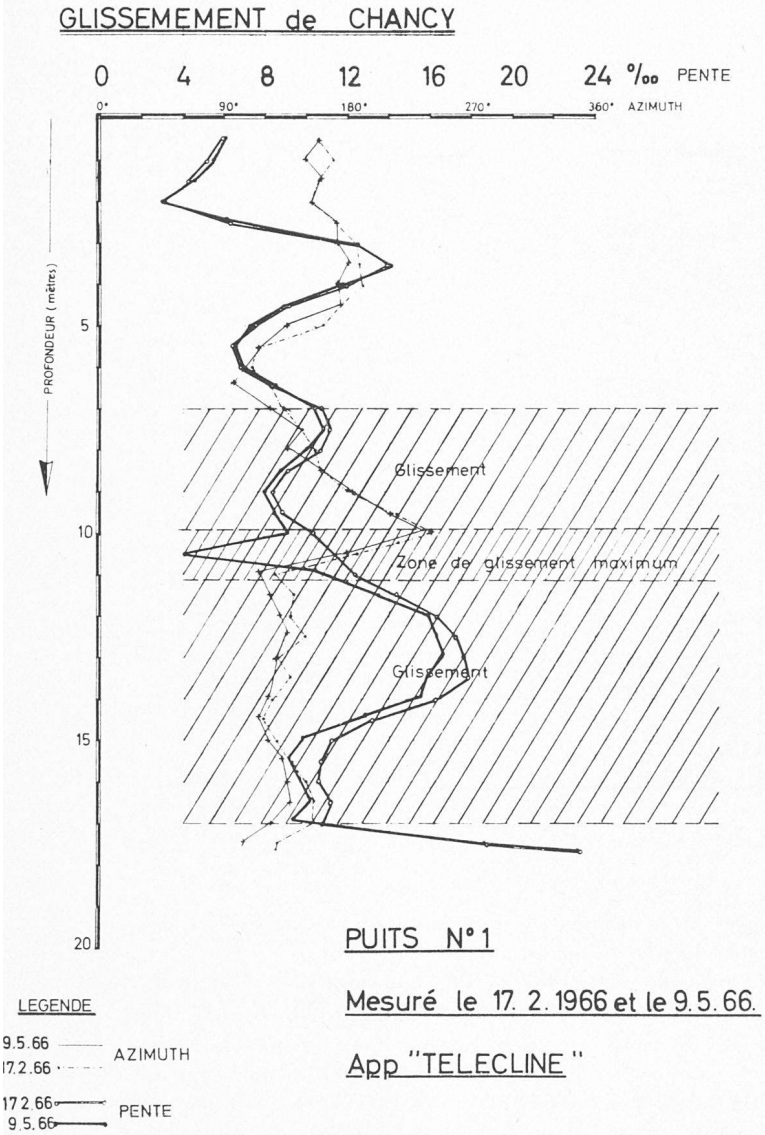

Fig. 7. — Localisation du plan de glissement principal à Chancy. Etude réalisée avec l'inclinomètre Télécline.

Fig. 8. — Inclinomètre Télécline sur son trépied d'étalonnage. Appareil de précision capable de percevoir des variations de pente de l'ordre de 0,1 mm par m. Une boussole à télémesure permet de contrôler son orientation.

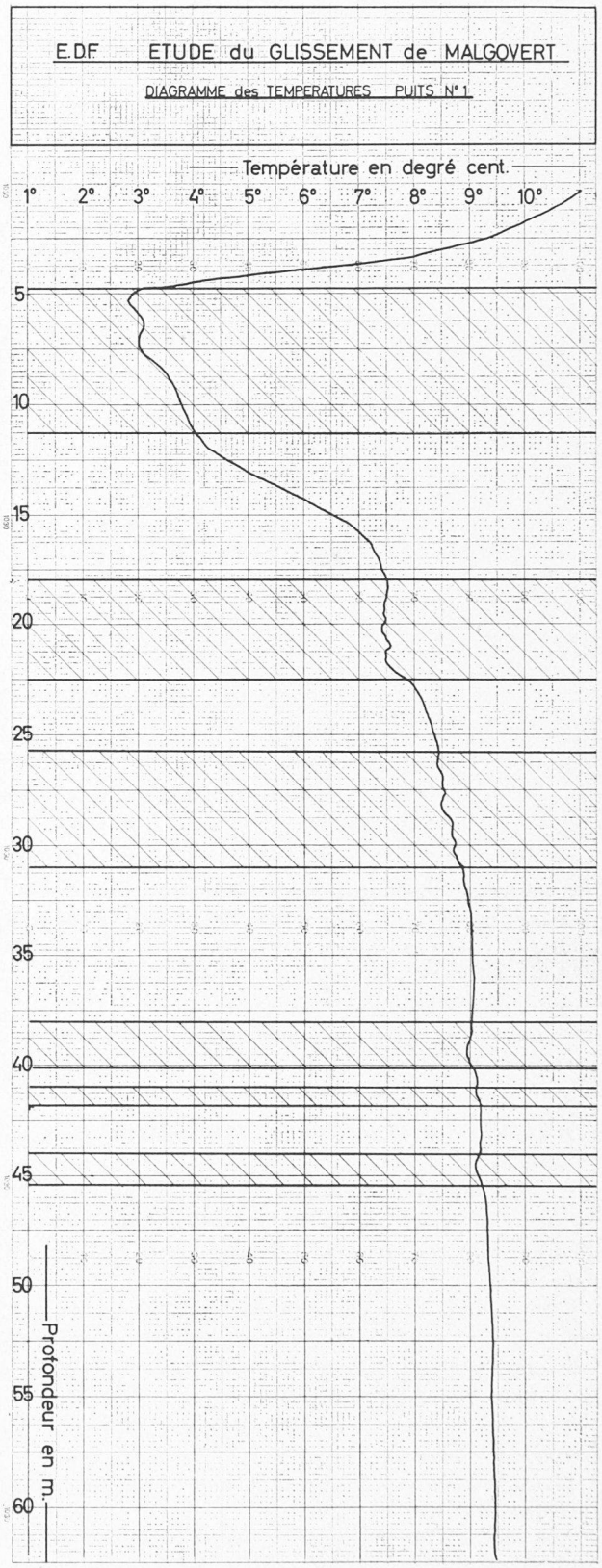

Fig. 9. — Zones d'écoulement correspondant à des zones de glissements (hachurées). Etude réalisée pour l'EDF à Malgovert.

b) *Température*

Les mesures de la température peuvent se faire au moyen de thermistances (précision meilleure que 1/20°). Dans un sondage ouvert ou crépiné elles permettent de localiser les zones de circulation d'eau et de se faire une idée de leur provenance.

c) *Onde salée*

Il est également possible d'étudier les zones de circulation souterraines entre plusieurs points en injectant de la saumure en un lieu donné et en enregistrant les variations de la salinité des eaux au cours du temps en d'autres endroits.

Ces différentes mesures qui peuvent être enregistrées constituent un excellent outil pour l'hydrogéologue et permettent de mettre en surveillance des puits et des cours d'eau pendant de longues périodes. Elles peuvent encore être combinées avec d'autres études telles que celles du pH, de la turbidité, de la teneur en oxygène dissous, etc.

Exemples pratiques

Mesures de température dans les forages de Malgovert pour l'EDF

En complément des mesures d'inclinométrie qui sont actuellement effectuées pour l'EDF, il a été enregistré des diagrammes de température apportant des résultats complémentaires sur les zones de glissement. On remarquera sur le diagramme de la figure 9 une zone d'écoulement maximum (baisse de la température) située entre 5 et 11 m et des zones d'écoulement secondaire entre 18 et 22,5 m, 26 et 31,5 m, 38 et 40 m et à 42 et 44,5 m environ.

Mesure de salinité effectuée le long du Rhône à Vouvry (Bureau du Rhône)

Les mesures de température, de vitesse de propagation d'ondes salées et de résistivité, effectuées au repos et en cours de pompage à plusieurs semaines d'intervalle, ont contribué à déterminer l'importante des échanges d'eau qui ont lieu entre le Rhône et la nappe phréatique au cours du temps.

La figure 10 représente un enregistrement de la résistivité et l'effet que produit l'arrivée d'une onde salée.

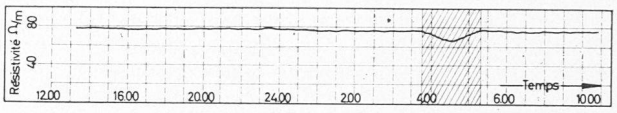

Fig. 10. — Arrivée d'une onde salée à 04 : 00 (baisse de la résistivité). L'injection de saumure avait eu lieu à 12 : 00 dans un puits distant de 40 m environ.

Conclusions

La possibilité d'effectuer rapidement des mesures de qualité sur le terrain même, leur caractère de « répétabilité », leur présentation sous forme de courbes enregistrées d'une interprétation presque immédiate ; tels sont les principaux avantages qui apportent une contribution efficace à la résolution des problèmes posés par le génie civil, la géologie et l'hydrologie.

BIBLIOGRAPHIE

Cours de mécanique des milieux continus (2 volumes), par *J. Mandel*, professeur à l'Ecole polytechnique et à l'Ecole des Mines de Paris. Paris, Gauthier-Villars, 1966.
— *Tome I :* Généralités, mécanique des fluides. — Un volume 16×25 cm, VIII + 456 pages, 150 figures. Prix : relié, 96 F.
— *Tome II :* Mécanique des solides. — Un volume 16×25 cm, 392 pages, 123 figures. Prix : 84 F.

L'ouvrage traite de l'équilibre et du mouvement (au sens thermodynamique) des milieux continus déformables sous l'effet des forces et des différences de température. Les principes généraux sont exposés dans la première partie du livre ; leur application aux fluides puis aux solides est l'objet des deux autres parties. L'ensemble constitue le cours enseigné en seconde année à l'Ecole polytechnique.

L'auteur a conservé la division, en usage à l'Ecole polytechnique, entre le cours proprement dit et les annexes du cours. Cette division réduit l'effort nécessaire pour acquérir une vue d'ensemble de la matière. En annexes se trouvent rejetées diverses questions particulières, certains développements généraux mais d'un niveau élevé (élasticité des déformations finies, vibrations des corps élastiques) qu'il n'a pas paru indispensable d'inclure dans le cours, enfin des théories récentes (magnétodynamique des fluides, thermoélasticité, plasticité, viscoélasticité). De nombreux exemples illustrent le texte. L'ouvrage contient en outre une importante collection d'exercices avec leurs solutions.

Le niveau mathématique est celui de la propédeutique, sauf dans certaines annexes où des connaissances plus avancées sont nécessaires.

Offrant un vaste aperçu sur une discipline vivante, riche en applications et en développements théoriques, ce livre s'adresse aux élèves des grandes écoles, aux étudiants de deuxième et troisième cycles des facultés, aux chercheurs et aux ingénieurs désireux de compléter ou de moderniser leur formation.

Table des matières du tome I :

PREMIÈRE PARTIE : *Généralités sur les milieux continus déformables :* I. L'hypothèse de continuité. Rappel de notions sur les tenseurs. — II. Géométrie des milieux continus déformables. — III. Cinématique d'un milieu déformable. — IV. Dynamique des milieux déformables. Contraintes. Théorème d'Euler. — V. Travail de déformation. Théorème des travaux virtuels. — VI. Thermodynamique des milieux déformables. Equations de comportement. — VII. Surfaces de discontinuité.

DEUXIÈME PARTIE : *Mécanique des fluides :* I. Equilibre des fluides. — II. Mouvement des fluides parfaits. Propriétés générales. — III. Mouvements irrotationnels (fluide incompressible parfait). — IV. Mouvements tourbillonnaires (fluide incompressible). — V. Petits mouvements des fluides. Ondes. — VI. Dynamique des gaz. Ondes de discontinuité dans le cas des perturbations finies. — VII. Mouvements permanents d'un fluide compressible. — VIII. Fluides visqueux. Turbulence. Hydraulique. — IX. Similitude mécanique.

ANNEXES : Compléments sur les déformations d'un milieu continu. Complément à l'étude des contraintes. Coordonnées curvilignes orthogonales. Conditions imposées aux lois de comportement. Compléments d'hydrostatique. Compléments sur les mouvements irrotationnels à trois dimensions. Représentation conforme en hydrodynamique. Compléments sur les mouvements tourbillonnaires. Compléments sur les ondes dans les fluides. Compléments sur les mouvements permanents d'un fluide compressible. Mouvement des liquides visqueux. Compléments d'hydraulique. Magnétodynamique des fluides.

Table des matières du tome II :

PREMIÈRE PARTIE : *Mécanique des solides, théorie de l'élasticité :* I. Généralités sur les déformations des solides. — II. Equilibre élastique lorsque l'état initial est naturel. — III. Solide élastique homogène isotrope. — IV. Solutions particulières. — V. Elasticité plane. — VI. Notions de résistance des matériaux. — VII. Théorie du travail virtuel en