

DETERMINATION DE LA PERMEABILITE DES ALLUVIONS A PARTIR DE LA PROSPECTION ELECTRIQUE

PERMEABILITY DETERMINATION OF THE ALLUVIUM USING ELECTRICAL PROSPECTION

ALLESSANDRELLO E.*, LEMOINE Y.*

P 109

Résumé

Les nombreuses reconnaissances par sondages électriques, réalisées lors de ces vingt dernières années, en vue d'implanter des zones de captage en milieu alluvial permettent d'établir une relation entre perméabilité et résistivité. A partir de données acquises sur les vallées de la Loire, du Rhône et de la Saône, les auteurs montrent qu'il existe une relation correcte entre résistivité et perméabilité valable pour un type d'alluvionnement à condition de tenir compte d'un certain nombre de facteurs, notamment de la minéralisation de l'eau, et de l'importance de la zone dénoyée.

Summary

For the last 20 years, many resistivity surveys have been carried out for locating water wells in alluvial aquifers. Empirical relationships between resistivity and permeability have been made. From data obtained along the Saône, Rhône and Loire valleys, it is shown that there exists an accurate relationship for each type of sedimentation, if various factors, such as water resistivity and unsaturated zone are corrected.

1. Préambule

L'utilité de la prospection électrique en milieu alluvial pour la recherche des zones les plus favorables est aujourd'hui admise par tous, qu'il s'agisse de recherche d'eau ou de recherche de matériaux. Cependant, le vocable prospection électrique englobe différents types de mesures qui ne sont pas tous adaptés à la meilleure résolution du problème posé. En outre, doivent être adjointes à cette proposition, des mesures complémentaires destinées à la valoriser.

Méthode de prospection adoptée

S'agissant de recherche d'eau en plaine alluviale où le substratum argilo-marneux est conducteur, la seule méthode acceptable est celle des sondages électriques, de préférence du type Schlumberger ou Wenner.

La méthode du traîné électrique classique ou du traîné électromagnétique ne peut être utilisée que dans des cas précis, et très rares de conditions de surface homogènes (couverture, niveau statique...).

2. Observations - relation perméabilité - facteur de formation

L'établissement d'une telle relation suppose un nombre suffisant de points d'observation qui sont représentés par des forages sur lesquels ont été déterminés :

- la perméabilité K
- la résistivité de l'eau ρ_e
- la résistivité de la formation aquifère ρ_t
- le facteur de formation $F = \frac{\rho_t}{\rho_e}$

La mesure de ces paramètres suppose la réalisation d'un sondage électrique à proximité de l'ouvrage et une interprétation rigoureuse calée sur la coupe de terrains. Cette interprétation est menée à l'aide d'un programme automatique inverse (programme ELECTRA 02), cf. fig. 1).

A. Exemple de la vallée de la Saône

Cas d'une étude ponctuelle

- Rive droite entre Belleville et Villefranche (département du Rhône).

Il s'agit d'une reconnaissance portant sur 30 km ; la relation, établie sur 11 forages, s'exprime sous la forme :

$$K = 1,6 \cdot 10^{-7} F^{3,33}$$

K est compris entre $3,5 \cdot 10^{-4}$ et $3 \cdot 10^{-3}$ m/s et la résistivité de l'eau entre 1 800 et 3 000 Ω cm.

Cas d'une étude générale

L'exemple choisi se rapporte à la vallée de la Saône entre son confluent avec le Doubs à l'amont et Macon à l'aval (département de Saône-et-Loire). La relation générale correspond à la somme des relations locales. Le nombre des forages analysés est supérieur à 125.

On observe une certaine dispersion liée très vraisemblablement au type d'alluvionnement. L'exemple le plus caractéristique est celui du confluent Grosne-Saône. Il est à noter que le vocable "alluvions de la Saône" est simpliste ; il s'agit en réalité d'alluvions d'âges différents dont les conditions de mise en place ne sont pas comparables. La relation générale obtenue s'exprime sous la forme :

$$K = 9,5 \cdot 10^{-7} \cdot F^{3,42} \text{ (cf. fig. 2)}$$

* Compagnie de Prospection Géophysique Française - Rueil-Malmaison - France.

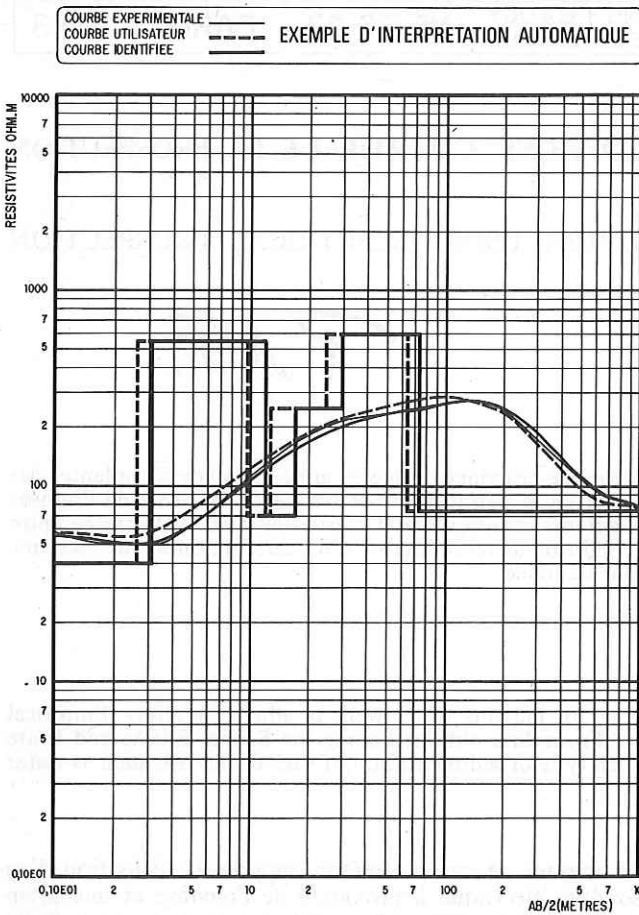


Fig. 1 : Exemple d'interprétation automatique

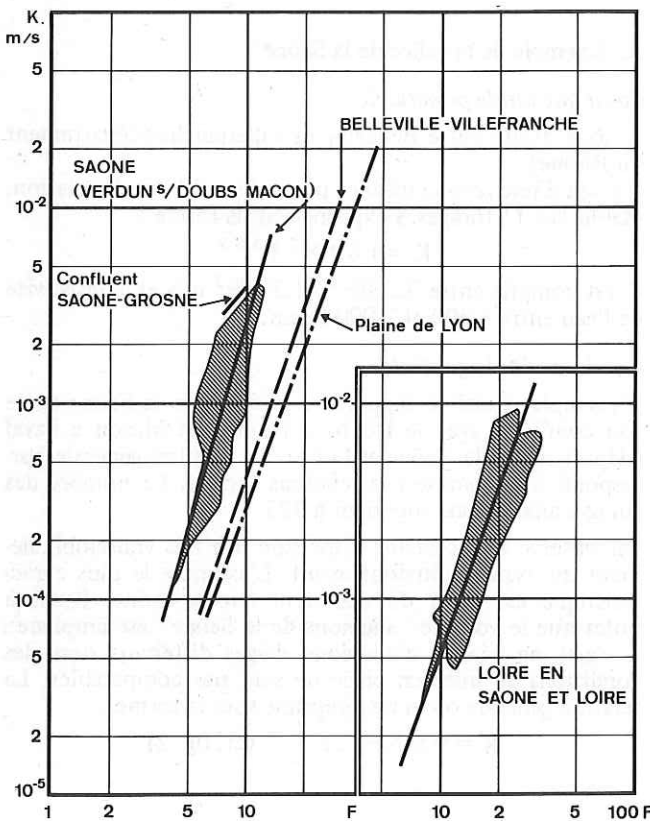


Fig. 2 : Relations expérimentales $K = f(F)$

B. Exemple de la plaine de Lyon

Le matériel aquifère correspond aux alluvions fluvioglaciers du Sud-Est lyonnais. Les 30 forages utilisés pour l'établissement de la relation sont répartis sur une surface de 180 km² environ. Les perméabilités sont comprises entre 6.10⁻⁵ et 1,5.10⁻² m/s dans un contexte de minéralisation de l'eau variant de 1 600 à 2 800 Ω cm.

La relation obtenue est relativement proche de celle de la rive droite de la Saône entre Belleville et Villefranche :

$$K = 5.10^{-7} \cdot F^{2,8} \text{ en m/s}$$

C. Exemple de la vallée de la Loire en Saône-et-Loire

Au total, 190 forages ont été analysés. La minéralisation de l'eau est très variable, de 1 700 à 8 500 Ω cm, alors que les perméabilités relativement élevées sont comprises entre 4.10⁻⁴ et 9.10⁻³ m/s. Sur la figure 2, la relation obtenue à partir des différentes études ponctuelles montre une certaine dispersion des résultats due essentiellement à l'hétérogénéité de l'alluvionnement qui, peu épais à l'amont du seuil de Gilly-Perrigny (moyenne 2,80), devient nettement plus conséquent à l'aval de Bourbon Lancy (la tranche d'alluvions sous nappe peut alors dépasser 10 m avec des intercalations argileuses).

D. Conclusions à en tirer

On retiendra des exemples précédents, qu'il existe une relation expérimentale de la forme $K = A F^b$, entre perméabilité et facteur de formation. Par ailleurs, on soulignera le rôle joué par le type d'alluvionnement, rôle démontré par les zones de confluence.

3. Essai de justification théorique

Les développements qui suivent concernent uniquement les milieux saturés.

A. Relation résistivité - porosité

Il est admis d'une manière générale qu'il existe dans le cas d'un massif à grains sphériques saturé d'eau, une relation entre :

- ρ_s : résistivité de terrain saturé
- ρ_e : résistivité de l'eau de formation
- n : porosité dépendant elle-même de l'arrangement des grains.

La plus simple est celle de G.H. Archie (1952).

$$\rho_s = \frac{1}{n^2} \rho_e$$

Théoriquement, cette relation conduit à admettre que la résistivité d'une formation sablo-graveleuse (fig. 3) décroît pour se rapprocher de celle de l'eau (de l'aquifère) quand la porosité, donc la perméabilité croît.

Cette assertion est en contradiction avec les observations faites sur les différentes plaines alluviales, sauf en ce qui concerne les poudingues.

B. Cas des argiles

Dans le cas particulier des argiles, la conductivité s'exprime sous la forme :

$$\sigma_x = \sigma_{10} (a\theta + b) + \sigma_s$$

où σ_1 = conductivité de l'électrolyte

θ = le rapport $\frac{\text{volume de l'électrolyte}}{\text{volume de sol}}$

a et b = constantes

σ_s = conductivité ionique

Dans le cas des argiles sèches, la conductivité est faible (et la résistivité élevée) dans la mesure où θ et σ_s sont petits. Par contre, en milieu saturé, σ_x augmente notablement, non seulement parce que θ croît, mais aussi et surtout parce que l'influence de σ_s est prépondérante. En effet, quand les particules d'argile sont immergées dans un liquide, les ions absorbés sont partiellement dissociés et deviennent disponibles pour la conductivité ionique. Ce phénomène est d'autant plus important que la surface d'échange cationique est grande. La montmorillonite est ainsi nettement plus conductrice que la kaolinite.

C. Mélange grave-argile

Dans le cas d'une formation sablo-graveleuse plus ou moins polluée par l'argile, l'espace libre entre les grains est entièrement occupé par l'eau de l'aquifère et l'argile. La porosité totale n_s est alors la somme de la "porosité" occupée par l'argile (n_a) et de celle occupée par l'eau (n_e). La résistivité du sol s'exprime de la façon suivante :

$$s = \frac{n_a \rho_a + n_e \rho_e}{n_s^3}$$

Le contraste de résistivité entre une formation propre et une formation complètement colmatée dépend alors du contraste entre ρ_e et ρ_a . Pour les zones étudiées et pour une résistivité de l'eau comprise entre 10 et 100 $\Omega \text{ m}$,

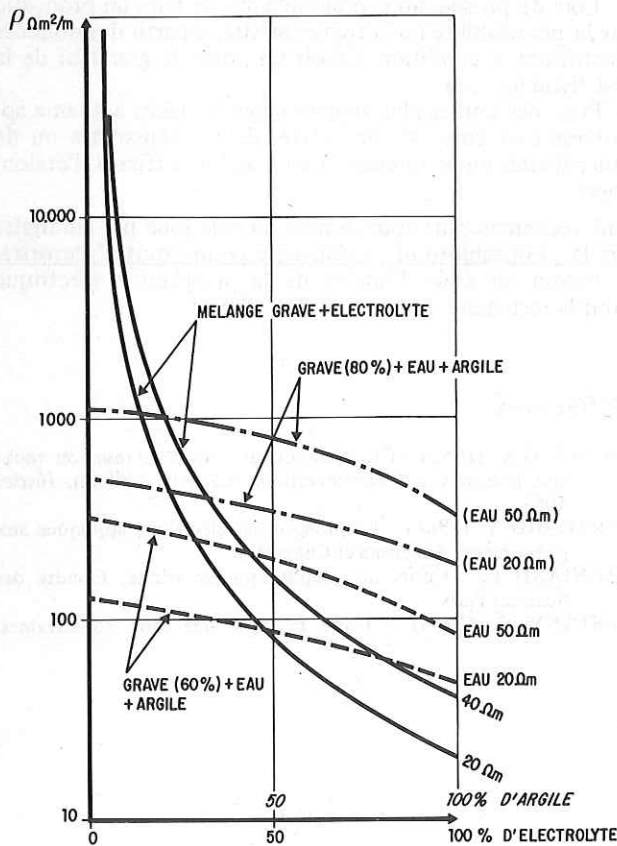


Fig. 3 : Relation perméabilité-porosité

il existe une relation empirique entre ρ_a (argile) et ρ_e (eau) de la forme $\rho_a = A \rho_e X$. On retiendra comme valeurs de A, 1,25 et de X, 0,60 en spécifiant qu'il s'agit d'une première approche.

En partant de ces données, il est alors possible de calculer (fig. 3) la résistivité d'un mélange grave + eau + argile pour différentes porosités et différentes minéralisations de l'eau. La plupart des auteurs admettent que la perméabilité est fonction du diamètre des grains, de la surface spécifique, de la porosité et de la température ; il n'est donc pas possible, sur le plan théorique, d'aller plus loin. On se bornera à constater que pour un mélange grave-argile sous nappe, la résistivité décroît bien quand l'espace réservé à l'eau (donc la perméabilité) décroît.

4. Applications pratiques

Sur le terrain, les données qu'il est possible d'acquérir concernent l'eau et le réservoir.

— Pour l'eau, et à condition que le nombre de points d'observation soit suffisant, il est possible d'établir une carte piézométrique et une carte d'isorésistivité. Cependant dans ce cas, et sauf à disposer de forages, la valeur de la résistivité de l'eau ne sera définie qu'à l'intérieur d'une fourchette de valeurs.

— Pour le réservoir, différents cas sont à envisager, nappe libre ou captive, épaisseur relativement constante ou, au contraire, très variable. On sera alors amené à s'intéresser, soit à la résistivité, soit à la résistance transversale ($e\rho$).

A. Exemple d'estimation de la perméabilité - Plaine du Forez

L'aquifère est libre et peu épais (2,80 m en moyenne). Il a été largement possible de dresser des cartes d'isorésistivité de l'eau de la nappe.

La détermination de la résistivité des alluvions n'est possible que dans la mesure où l'on connaît la tranche dénoyée (ici de l'ordre de 2,70 m) dont l'influence est prépondérante. A partir de la relation établie plus en aval (Saône-et-Loire), on peut alors calculer la perméabilité en fonction de la résistivité du sol et ce, pour différentes minéralisations de l'eau (cf. fig. 4). On pourra donc, lors d'une prospection préliminaire, après avoir évalué ρ alluvions et ρ eau avec une certaine approximation, fournir un ordre de grandeur de la perméabilité.

L'établissement pour la plaine du Forez (fig. 4) d'une relation perméabilité-résistivité à partir des différentes données ponctuelles, conduit à des résultats cohérents. On vérifie en particulier que les faibles valeurs de perméabilité sont associées à une eau relativement minéralisée (apport de versant), alors que les valeurs les plus fortes coïncident avec une eau résistante (bordure de Loire).

La zone de confluence Loire-Bonson confirme les observations faites précédemment sur le type d'alluvionnement.

B. Estimation de la transmissivité

La relation $K = AF^n$ liant la perméabilité K au facteur de formation F implique nécessairement pour la transmissivité T, une relation du type :

$$T = (e\rho_t)^n \frac{A}{\rho_e \cdot e^{n-1}}$$

ρ_t = résistivité des alluvions

ρ_e = résistivité de l'eau

e = épaisseur aquifère

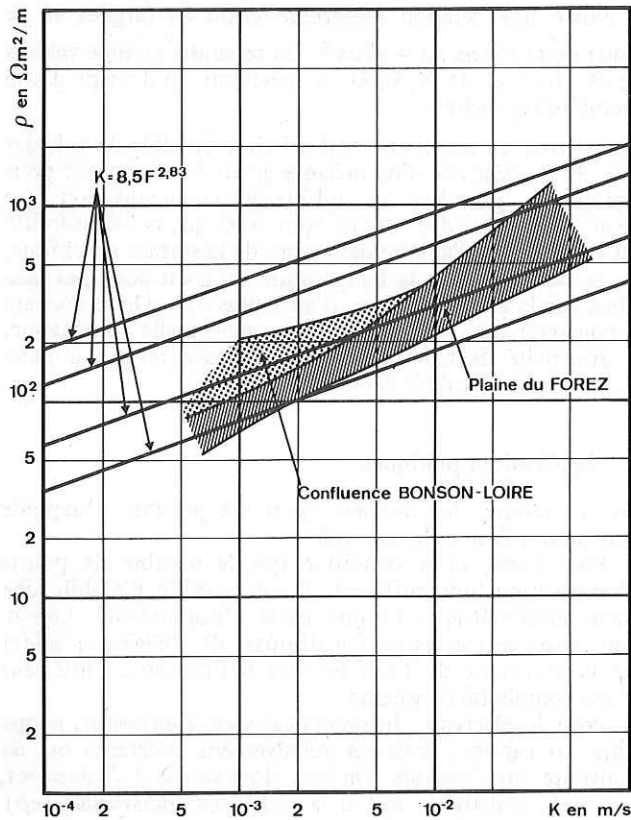


Fig. 4 : Plaine du Forez - Relation K-ρ

On voit donc que pour une résistance transversale ($e\rho t$) donnée, la transmissivité est fonction de l'épaisseur de l'aquifère et la minéralisation de celui-ci.

Confluent de la Saône et de l'Azergues

La minéralisation de l'eau est à peu près constante. Le type d'alluvionnement est légèrement différent de celui de la Saône proprement dite. La perméabilité pour des valeurs comprises entre $5 \cdot 10^{-4}$ et $1 \cdot 10^{-2}$ m/s est reliée à la résistivité par la formule suivante :

$$K = 3,86 \cdot 10^{-13} \cdot \rho^{3,96}$$

La figure 5 montre que pour une résistance transversale de $2000 \Omega m/m$, la transmissivité varie de $5 \cdot 10^{-3}$ à $4,5 \cdot 10^{-2}$ m²/s quand l'épaisseur passe de 10 à 5 m. Il nous apparaît plus judicieux de comparer la résistance transversale au produit $T \times e$ qui caractérise mieux l'exploitabilité. Si on se réfère à l'exemple précédent, la fourchette qui est de 1 à 9 passerait de 1 à 4,5.

Si dans une première phase, la résistance transversale est une représentation suffisante des potentialités aquifères, il importe après étalonnages, de reprendre l'interprétation pour passer des paramètres électriques aux paramètres hydrodynamiques, qu'il s'agisse de T ou de $T \times e$.

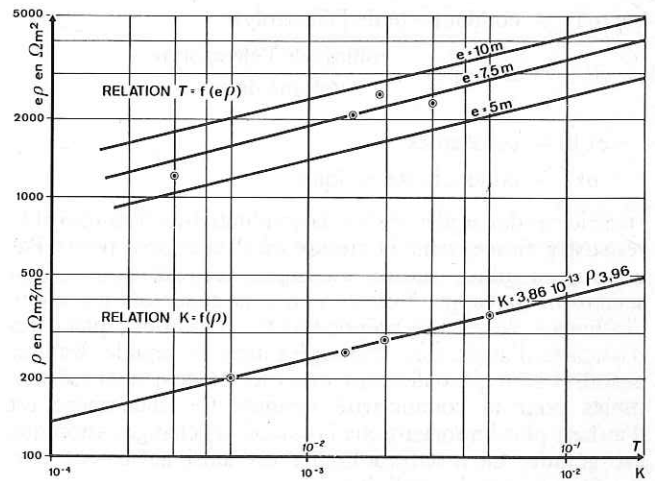


Fig. 5 : Confluent Saône-Azergues

$$\text{Relations} \begin{cases} K-\rho \\ T-e\rho \end{cases}$$

5. Conclusions

Les mesures expérimentales réalisées ces vingt dernières années sur les plaines alluviales de la Saône et de la Loire, dans les régions Bourgogne et Rhône-Alpes montrent qu'il existe bien une relation entre la résistivité des alluvions et la perméabilité, mais qu'il est absolument nécessaire de tenir compte des variations de la minéralisation de l'eau.

La mise en évidence des relations à caractère général entre la perméabilité et la résistivité permet :

- Lors de prospections préliminaires, de faire un pronostic sur la perméabilité ou la transmissivité, à partir des données électriques, à condition d'avoir un ordre de grandeur de la résistivité de l'eau.
- Pour des études plus approfondies, d'établir avec une approximation correcte, des cartes de transmissivités ou de potentialités en se référant à un nombre suffisant d'étalonnages.

Une recherche plus approfondie du rôle joué par les argiles sur la perméabilité et la résistivité permettrait d'accroître, si besoin en était, l'intérêt de la prospection électrique pour la recherche d'eau, en milieu alluvial.

Références

- ARCHIE G.A. (1952) : Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations A.A.P.G. bulletin, février 1952.
- BERTRAND Y. (1966) : La prospection électrique appliquée aux phénomènes des Ponts et Chaussées.
- CAGNIARD L. : Cours de géophysique-Electricité, Faculté des Sciences Paris.
- CASTANY G. (1963) : Traité pratique des eaux souterraines.