

Relation entre résistivité et teneur en eau. Importance des caractéristiques granulométriques, minéralogiques et rhéologiques des sols

H. Robain⁽¹⁾, G. Bellier⁽¹⁾, C. Camerlynck⁽²⁾ et D. Vergnaut⁽²⁾

⁽¹⁾ IRD UR027 ; 32, avenue Henri Varagnat ; 93143 Bondy cedex.

⁽²⁾ Université Paris 6 UMR 7619 Sisyphe ; 4 place Jussieu 75252 Paris cedex 05

Abstract: Resistivity measurements are becoming widely used in environmental studies. Nevertheless, Archie's law established for sandy materials and allowing to calculate the water content from resistivity is not well suited to soil materials. A laboratory experiment taking into account soil shrinkage during desiccation shows that the distinction between water contained respectively in micro- and macro-porosity allows a relevant insight into resistivity variations for clayey materials. Macroporal water seems to be preeminently influenced by volumetric conduction of current while microporal water, by surface conduction.

Introduction

Les études environnementales s'appuient de plus en plus fréquemment sur des méthodes géophysiques qui sont non destructives et autorisent une densité d'échantillonnage très élevée. Parmi les différents "mesurables géophysiques", la résistivité est particulièrement intéressante. La résistivité présente en effet de fortes variations saisonnières qui, pour la partie non saturée des sols, dépendent principalement des variations de teneur en eau. Il n'existe cependant pas de formalisme réellement adapté aux sols qui permettent de calculer directement la teneur en eau à partir de la résistivité. En effet, les formalismes existant - établis par Archie [Parasnis, 1997] - sont valides pour les formations dites "propres" (ne contenant que peu d'argile) et rigides. Au contraire, les sols contiennent généralement beaucoup d'argile et présentent des variations notables du volume poral lorsque la teneur en eau varie. Il est donc pertinent de mener des expérimentations de laboratoire afin de mieux connaître la relation entre les variations de résistivité et la teneur en eau des sols en prenant en compte leur particularités rhéologiques, granulométrique et minéralogiques.

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental conçu permet de suivre de façon synchrone l'évolution de la teneur en eau, du volume et de la résistivité d'un échantillon de sol de forme cylindrique placé dans une étuve régulé en température (fig. 1).

Ce dispositif permet de mesurer en fonction du temps, le poids de l'échantillon : $P(t)$; la hauteur de l'échantillon : $H(t)$; la différence de potentiel entre P_1 et P_2 : $\Delta V_e(t)$. En fin d'expérience, sont aussi mesurés, la hauteur de l'échantillon : H_r ; le volume total de l'échantillon : V_r ; le poids de sol sec à 105°C : P_s ; et sur une aliquote, le volume spécifique de solide (en $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) : V_s .

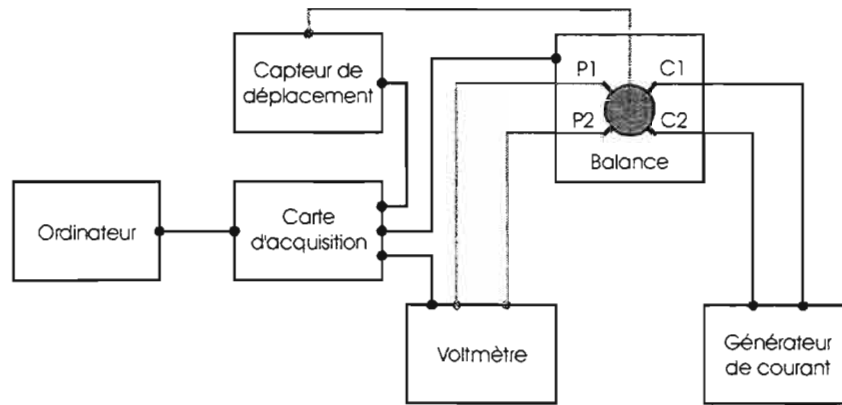


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour mesurer simultanément la teneur en eau, le volume et la résistivité d'un échantillon de sol.

Il est alors possible de calculer les paramètres suivants :

- Volume d'eau : $V_w(t) = P(t) - P_s$
- Volume de l'échantillon : $V(t) = \left(\frac{H(t)}{H_T} \right)^3 \cdot V_T$ (en supposant le retrait isotrope)
- Indice de vide : $e(t) = \frac{V(t)}{P_s \cdot V_s} - 1$
- Indice d'eau : $v(t) = \frac{V_w(t)}{P_s \cdot V_s}$
- Résistivité : $\rho(t) = K(t) \cdot \frac{\Delta V_E(t)}{I_E(t)}$

Avec : $K(t) = \frac{\pi \cdot H(t)}{\text{Ln}2}$ et I_E , l'intensité du courant délivré par le générateur

Paramétrisation de la courbe de retrait

Lorsque le sol sèche, on observe une diminution de son volume appelée retrait. Ce phénomène correspond à une modification de l'arrangement des constituants solides. Les courbes de retrait sont les courbes de variation du volume de vide du sol en fonction de sa teneur en eau. Braudeau *et al.* (1999) ont proposé un modèle qui explique la forme sigmoïde qui est souvent observée pour les sols (fig 2). Il est important de souligner que cette paramétrisation comporte 3 hypothèses : (1) la micro-porosité ne varie pas jusqu'au point E ; (2) la macro-porosité ne contient plus d'eau à partir du point C ; (3) la micro-porosité est saturée jusqu'au point B.

Paramétrisation de la courbe de résistivité

Pour prendre en compte les phénomènes liés à la présence d'argile, il est possible de considérer, d'une part, l'eau contenue dans la macro-porosité et, d'autre part, l'eau contenue dans la micro-porosité. En adaptant le formalisme d'Archie, on peut calculer la résistivité de cet électrolyte à deux phases :

$$\frac{\phi_{MA} \cdot S_{MA} + \phi_{MI} \cdot S_{MI}}{\rho_z} = \frac{\phi_{MA} \cdot S_{MA}}{\rho_{MA}} + \frac{\phi_{MI} \cdot S_{MI}}{\rho_{MI}}$$

avec ϕ_{MA} : la macro-porosité ; S_{MA} : la saturation de la macro-porosité ; ϕ_{MI} : la micro-porosité ; S_{MI} : la saturation de la micro-porosité ; ρ_z : la résistivité de l'électrolyte ; ρ_{MA} : la résistivité de l'eau contenue dans la macro-porosité ; ρ_{MI} : la résistivité de l'eau contenue dans la micro-porosité. Les termes ϕ_{MA} , S_{MA} , ϕ_{MI} et S_{MI} sont déduits de la modélisation de la courbe de retrait. On peut supposer que ρ_{MA} est constante au cours de la dessiccation car l'augmentation de la concentration de la phase liquide peut être négligée dans la gamme de variation de teneur en eau correspondant à la vidange de la macro porosité. En revanche ρ_{MI} varie au cours de la dessiccation.

Exemple d'un sol ferrallitique micro agrégé

La figure 3 présente une expérimentation conduite sur un échantillon de sol ferrallitique (75 % d'argile kaolinitique). La courbe de retrait est caractéristique d'un matériau présentant une distribution de porosité bi-modale. Sa paramétrisation permet de distinguer l'évolution du volume et du contenu en eau des macro- et des micro-vides. On note que la diminution du volume de micro-vides est en partie compensée par une augmentation du volume de macro-vides. D'un point de vue macroscopique, ceci signifie que le tassement des agrégats ne compense pas la diminution de leur taille. En d'autres termes, les agrégats deviennent de plus en plus séparés les uns des autres.

La courbe d'évolution de la résistivité totale présente deux points d'inflexion remarquables coïncidant respectivement avec la fin de la vidange des macro vides (C) et avec l'entrée d'air dans les micro-vides (B). Le calcul de l'évolution de la résistivité de l'eau micro-porale montre une nette croissance jusqu'au point (C) puis une faible décroissance jusqu'au point (B) et enfin une forte décroissance jusqu'à la fin de l'expérience.

Interprétation

La conductivité des matériaux contenant de l'eau résulte principalement de la conduction ionique dans la phase liquide. En effet, les minéraux constituant la phase solide sont, dans leur grande majorité, isolants du point de vue électrique. On distingue toutefois deux types de conduction : (1) la conduction volumique, contrôlée par la concentration en électrolytes et par les caractéristiques géométriques du réseau poreux et en particulier par sa connectivité ; (2) La conduction surfacique, contrôlée par la double couche diffuse. Elle dépend surtout de la surface spécifique de la phase solide et des interactions à l'interface liquide-solide. Dans un système solide/liquide, la conduction surfacique est supérieure en valeur absolue à la conduction volumique car, au sein de la couche diffuse, la densité de charges est plus élevée. Cependant, la contribution de ces deux types de conduction à la résistivité globale dépend de la distribution de l'eau respectivement à l'intérieur et à l'extérieur de la couche diffuse. Ceci apparaît clairement grâce à l'expérimentation présentée.

Avant le point C, l'essentiel de la conduction est volumique. L'augmentation de résistivité de l'eau microporale correspond à la rupture des connexions électriques entre les agrégats. A partir du point C, la conduction surfacique joue un rôle de plus en plus important. D'une part, l'eau est contenue dans des vides de plus en plus fin ou forme des films à la surface des particules. La couche diffuse occupe donc une part de plus en plus importante. D'autre part, l'augmentation de la concentration de la phase liquide se traduit par une augmentation de l'épaisseur de la couche diffuse. Ainsi, la stabilisation de la valeur de résistivité microporale entre les points C et B, correspond à une compensation de l'augmentation de la conduction surfacique (en valeur relative et absolue) par la rupture des connexions inter-agrégats. Au delà du point B, la diminution de la résistivité microporale correspond à une continuation de l'augmentation de la conduction surfacique, alors que le système devenant rigide, la connectivité de la phase liquide se stabilise.

Conclusion

L'étude des relations entre la résistivité et la teneur en eau montre que pour les matériaux argileux déformables il est nécessaire d'affiner les concepts qui ont été utilisés pour les matériaux sableux rigides. De nombreuses expérimentations sont cependant encore nécessaires avant de pouvoir proposer des formalismes relativement généraux.

Références

Parasnis D.S., 1997. Principles of applied geophysics. 5th edition. Chapman & Hall, London. 429 p.

Braudeau E., Constantini JM., Bellier G. et Colleuille H., 1999. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. Soil Sci.Soc. Am. J. 63(3) : 525-535.

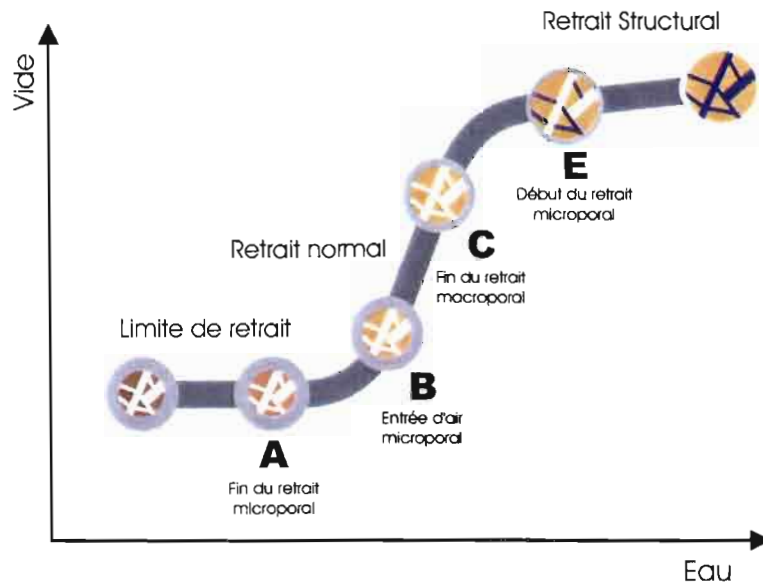


Figure 2 : Paramétrisation de la courbe de retrait (Braudeau, 1988)

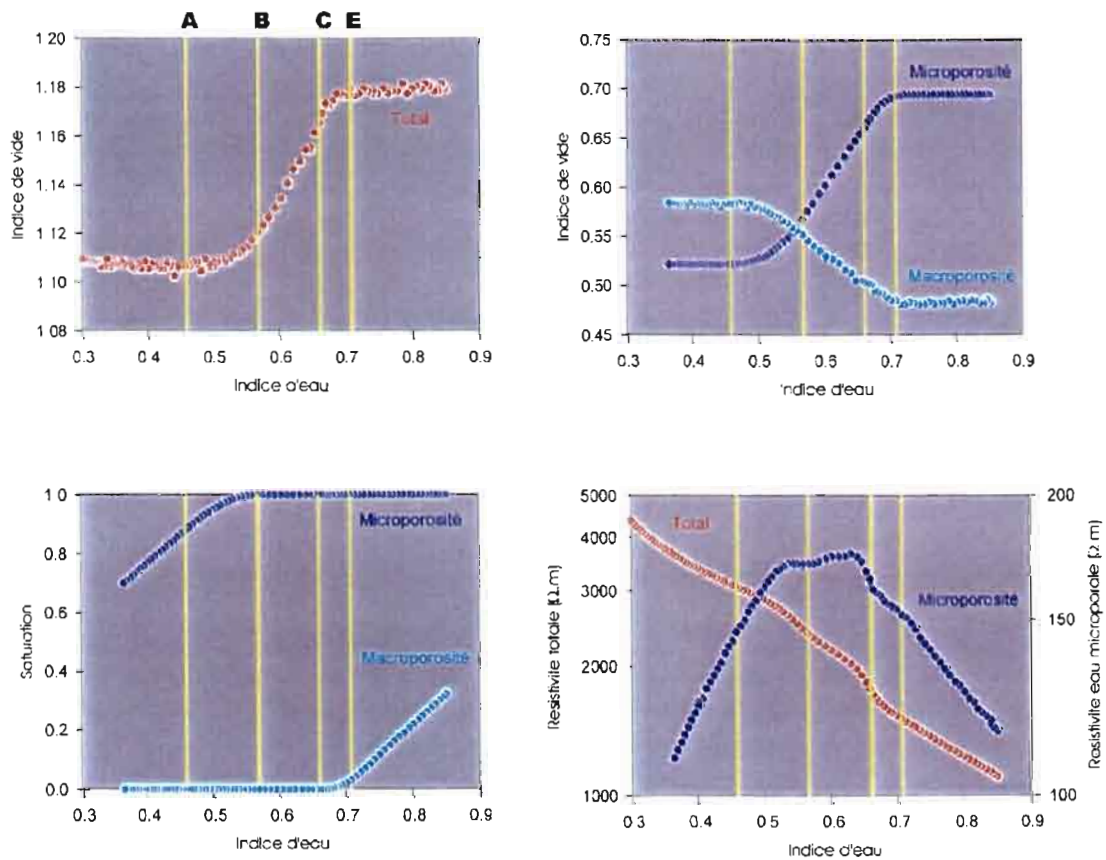


Figure 3 : HG = Courbe de retrait d'un sol ferrallitique ;
 HD = Evolution des volumes macro- et microporaux ;
 BG = Evolution de la saturation des volumes macro- et microporaux ;
 BD = Evolution de la résistivité totale et de la résistivité de l'eau microporale.