

Rôle de la microporosité dans la relation entre permittivité diélectrique HF et teneur en eau dans les sols argileux

Philippe COSENZA* et Alain TABBAGH*

*UMR 7619 Sisyphe, Université Pierre et Marie Curie & CNRS, Paris, France

Abstract

The electromagnetic determination of clay water content requires a good understanding of two main factors that affect the relationship between the clay relative permittivity ϵ and the water content θ : (a) a high content of bound water with a permittivity value lower than that of free water; (b) a geometrical effect associated with “platy” units that characterize the clay texture. Both factors are studied with two theoretical tools: the Moment Method (MoM) and the Differential Effective Medium theory. The calculations allow to identify two types of behaviour: low surface area systems, typically kaolinite geomaterials, for which the geometrical effect is predominant and high surface area systems, typically smectite clays, for which a balance between the geometrical effect and the bound water effect is expected.

Introduction

Les méthodes basées sur la mesure de la permittivité diélectriques sont aujourd’hui largement utilisées pour la détermination indirecte de la teneur en eau des sols (*e.g.* sonde TDR, radar-sol, sonde capacitive etc.). Dans l’objectif d’établir une relation quantitative entre permittivité ϵ et teneur en eau θ pour des matériaux argileux, non plus empiriquement mais sur des bases physiques claires, il s’agit (a) d’identifier les principaux phénomènes physiques opérant à l’échelle microscopique adéquate, (b) de les traduire mathématiquement et (c) d’opérer un transfert jusqu’à l’échelle macroscopique *i.e.* l’échelle pertinente pour l’utilisateur des sondes. Cette communication s’inscrit dans cette démarche.

Nous nous proposons d’étudier alternativement puis simultanément les effets de deux caractéristiques associées à la microporosité des sols argileux : (a) la présence d’une forte teneur en eau « liée », *i.e.* adsorbée sur le surface des minéraux argileux et (b) la géométrie spécifique des unités structurales existant à la petite échelle. Pour cela, nous utiliserons dans une première partie la méthodes des moments (MoM) puis dans une deuxième partie, la théorie différentielle auto-cohérente (DAC).

1. La Méthode des Moments

L’approche MoM, proposée par Harrington dès 1968 et largement utilisée pour l’inversion de données électromagnétiques en géophysique appliquée, établit l’équivalence entre d’une part la présence d’une hétérogénéité (*i.e.* une structure « anormale ») dans un espace donné et d’autre part la présence d’une source « secondaire » de courant. D’une manière générale, le travail de modélisation se divise alors en deux étapes. Dans une première étape, il s’agit de

réduire l'ensemble des équations de Maxwell à une seule équation intégrale puis dans un deuxième temps, de résoudre numériquement cette dernière (e.g. Tabbagh *et al.*, 2000).

Dans notre problème, nous n'avons pas qu'une seule hétérogénéité mais de nombreuses hétérogénéités qui correspondent à (a) des micro-volumes de solide, (b) des micro-volumes d'eau à l'intérieur d'une macroporosité et (c) des agrégats constitués de feuillets argileux et de micro-volumes d'eau situés dans la microporosité. Dans notre approche, un Volume Élémentaire Représentatif (VER) à partir duquel sera calculée une permittivité effective sera constitué de 1000 cellules élémentaires. Chaque cellule élémentaire est donc soit remplie par de l'air, soit par du solide, soit par de l'eau ou par un agrégat. Un agrégat est modélisé par un assemblage de neuf couches parallèles, trois d'entre-elles étant du solide, ~~quatre~~~~trois~~ autres de l'eau adsorbée et enfin les ~~deux~~~~trois~~ dernières de l'eau libre ou de l'air (Figure 1).

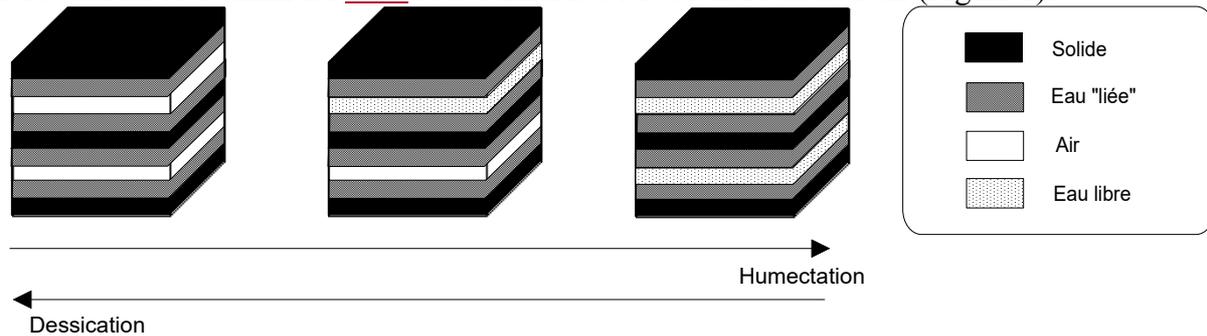


Figure 1 : Modèle d'agrégat de feuillets argileux.

Dans nos simulations, sept cas ont été considérés (Tableau 1). Pour chaque cas, le caractère aléatoire de la distribution des cellules élémentaires est obtenu en considérant 27 tirages différents de positions des cellules. Dans les calculs, la permittivité de l'eau libre, celle de l'eau et celle du solide sont fixées respectivement à 81, 10 et 5.

as	Teneur volumique en agrégats (%)	Teneur volumique en eau « liée » (%)	Porosité totale (%)	Teneur volumique en solide (%)
A	0	22	58	42
B	0	0	58	42
C	50	22	58	42
D	50	0	58	42
E	100	44	67	33
F	100	0	67	33
G	100	0	40	60

Tableau 1 : Les conditions initiales des sept cas étudiés.

Pour chacun des 7 cas, la permittivité effective du VER est calculée en fonction de la teneur en eau libre θ_{fw} . Notons que la teneur en eau « liée » n'évolue pas dans les calculs.

Les résultats des cas A, B, C et D du tableau 1 sont donnés dans la figure 2. Comme attendu, les valeurs de permittivité pour des mélanges avec eau « liée » sont plus grandes que celles sans « eau liée » (*i.e.* avec de l'air à la place). Cette figure illustre aussi l'effet géométrique associé à l'addition d'agrégats : la présence d'agrégats contribue à augmenter significativement la permittivité lorsque l'eau libre est introduite dans le matériaux. En outre, la présence initiale d'eau liée favorise d'une manière inattendue, cet effet géométrique : plus la teneur en eau « liée » initiale est grande, plus la dérivé $\partial\varepsilon/\partial\theta_{fw}$ sera élevée et par conséquent plus sera importante l'augmentation de ε avec θ_{fw} .

Si on considère les cas E, F et G avec 100 % d'agrégats (Figure 3), les résultats obtenus confirment les précédents. En premier lieu, la dérivée $\partial\varepsilon/\partial\theta_{fw}$ augmente avec la teneur initiale e

en eau « liée » (comparer le cas E et F). En second lieu, lorsque la teneur initial en eau « liée » est nulle, l'effet géométrique est faible aux faibles teneurs en eau libre, dans la gamme [0,0.1] (cas F et G). En effet, considérant ce dernier résultat, aux faibles valeurs de la teneur en eau, les courbes associées aux cas F et G sont en accord avec la loi empirique de Topp *et al.* (1980) obtenus sur des sols naturels avec une microstructure très différente de celle des matériaux ici étudiés. Toutefois, aux valeurs de teneur en eau libre plus élevées, les courbes théoriques F et G sont dessous celle de Topp *et al.*. Cette observation confirme les résultats expérimentaux de Jones et Friedman (2000).

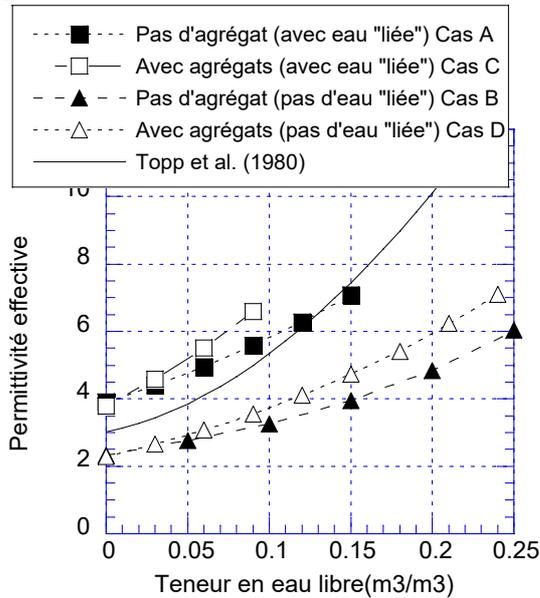


Figure 2 : Permittivité effective fonction de la teneur en eau libre (Méthode des Moments). Cas A, B, C et D.

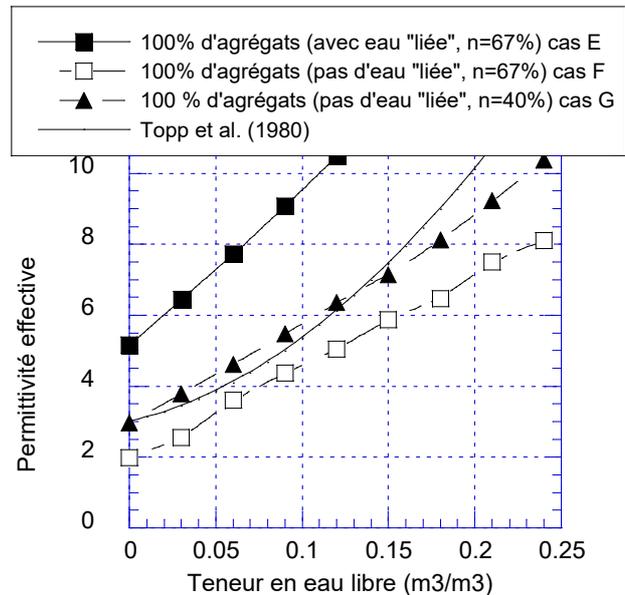


Figure 3 : Permittivité effective fonction de la teneur en eau libre (Méthode des Moments). Cas E, F et G.

2. L'Approche Différentielle auto-cohérente

L'approche MoM est un outil efficace pour l'étude de milieux hétérogènes mais peut se révéler plus difficile à mettre en œuvre lorsque la permittivité de l'eau varie d'une manière continue d'un état « liée » à un état « libre ». Or, une évolution continue de la permittivité de l'eau, donnée par exemple par l'équation de Friedman (1998) est probablement plus réaliste que le chemin d'humectation modélisé sur la figure 1. C'est pourquoi une théorie des milieux effective de type DAC a été introduite. En effet, cette approche offre au moins deux avantages (*e.g.* Cosenza *et al.*, 2003): (1) elle intègre les interactions électromagnétiques d'une manière plus réaliste que les autres approches de type milieux effectifs (*i.e.* approche milieu dilué ou auto-cohérente); (2) elle est facile à implémenter numériquement. En outre, un calcul (DAC) en choisissant la forme du disque comme unité géométrique élémentaire donne des résultats très comparables à ceux menés par une approche MoM avec 100% d'agrégats (cas G).

L'équation de Friedman qui a été ici utilisée permet de calculer la permittivité de l'eau en fonction de la teneur en eau du matériau, et ceci pour différentes valeurs de surface spécifique (Figure 4). Dans les simulations, deux surfaces spécifiques extrêmes ont été choisies : $S_{sa}=50 \text{ m}^2/\text{g}$ et $S_{sa}=800 \text{ m}^2/\text{g}$. La première valeur correspond à un système de type kaolinite ou typiquement à un sol naturel possédant une fraction argileuse inférieure à 20%. La seconde valeur est à associer à une smectite pure (*e.g.* bentonite). Pour ces deux cas, les résultats obtenus sont donnés sur la figure 6. Comme attendu, plus le milieu argileux possède une surface spécifique élevée (*i.e.* une teneur en eau « liée » élevée), plus la permittivité effective est faible. Dans le cas d'une smectite, si nous comparons ces résultats avec ceux de la figure

2, l'amplitude d'un tel effet est du même ordre de grandeur mais joue évidemment en sens inverse.

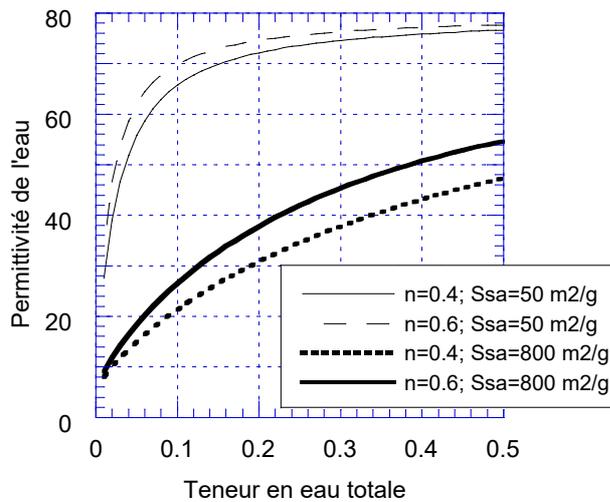


Figure 4 : La permittivité de l'eau fonction de la teneur en eau totale selon la relation de Friedman (1998) pour deux valeurs de porosité (n) et de surface spécifique (S_{sa}).

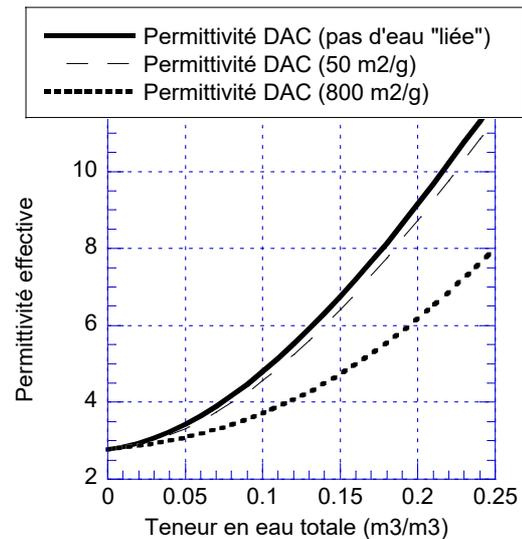


Figure 5 : Calculs DAC pour différentes valeurs de surface spécifique (*i.e.* pour différentes valeurs de teneur en eau « liée »).

3. Conclusion

Deux phénomènes attachés à la microporosité des sols argileux jouent un rôle important dans la relation $\varepsilon(\theta)$: la quantité d'eau adsorbée et l'effet géométrique associé à la forme « plate » des micro-volumes d'eau prisonniers dans les agrégats de feuillets argileux. Les calculs suggèrent que (1) ces deux effets qui agissent en sens inverse, s'équilibrent dans le cas des smectites, (2) l'effet géométrique est prédominant pour les systèmes à plus faibles surfaces spécifiques (*i.e.* kaolinite). En outre, cette étude aura permis de souligner l'intérêt de poursuivre les travaux de recherche relatifs à la caractérisation des propriétés physiques de l'eau dans l'espace poreux des matériaux argileux.

Bibliographie

- Cosenza P., Camerlynck C., Tabbagh A., 2003, Differential effective schemes for investigating the relationship between high frequency relative permittivity and water content in unsaturated soils, *Water Resour. Res.*, [sous presse/accepté pour publication](#).
- Friedman S.P., 1998. A saturation degree-dependent composite spheres model for describing the effective dielectric constant of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 34(11), 2949-2961.
- Harrington R.F., 1968. *Field computation by moment methods*. Mc Millan Co., New York.
- Jones S.B., Friedman S., 2000. Particle shape effects on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles, *Water Resour. Res.*, 36(10), 2821-2833.
- Tabbagh A., Camerlynck C., Cosenza Ph., 2000. Numerical modelling for investigating the physical meaning of the relationship between relative dielectric permittivity and water content of soils. *Water Resour. Res.*, 36(9), 2771-2776.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16(3), 574-582.

