

Critères de fissuration des sols et résistivité électrique

Anatja SAMOUËLIAN¹, Isabelle COUSIN¹, Guy RICHARD², Alain TABBAGH³, Ary BRUAND⁴

1) INRA, Unité de Science du Sol, BP 20619, 45166 Ardon France

2) INRA Unité d'Agronomie, rue Fernand Christ, 02007 Laon France

3) UMR 7619 « Sisyphé », Case 105, 4 place Jussieu, 75005 Paris

4) Université d'Orléans UFR Science de la Terre – ISTO BP 6759 45067 Orléans

Abstract

Soil cracks, whose formation are associated with natural climate phenomena, play an important role in water and gas transfer. 3D electrical resistivity surveys are commonly gathered by a network of in-line surveys array. In heterogeneous medium, like cracking soil, measurement of apparent resistivity is sensitive to electrode configuration. The square array provides a measurement of resistivity less orientationally dependent than that given by an in-line array investigation. The aim of this study was to show the ability of the 3D electrical survey carried out by a square array quadripole for characterising the soil cracks network. Two indexes calculated from the apparent resistivity values were calculated to detect the soil heterogeneities: (i) an index of anisotropy with 2 threshold values and (ii) the α -array orientation corresponding to the preferential anisotropic orientation. The calculation of these 2 indexes provided information of the crack presence, position, orientation and extension.

Introduction

Les fissures présentes dans un sol participent aux transferts de gaz et d'eau. Leur origine est associée aux variations de contenu en eau dans le sol lors des cycles d'humectation/dessiccation ou gel/dégel. Les techniques les plus employées actuellement pour décrire en 3D les fissures dans un sol sont les coupes sériées (Cousin *et al.*, 1996), ou le scanner à rayons X (Macedo *et al.*, 1998). La première technique est destructive, la seconde contraint l'étude à une taille limitée d'échantillon.

L'observation de la mise en place d'un réseau de fissure in situ nécessite l'utilisation d'une méthode non destructive et spatialement intégrante. La résistivité électrique répond à ces deux critères. Les acquisitions 3D utilisent classiquement des dispositifs d'électrodes en ligne : Wenner, Schlumberger, ou Dipole-Dipole (Xu and Noel, 1993 ; Zhou *et al.*, 2002). Soulignons que l'importance de l'orientation du quadripole lors de prospection sur des terrains à fortes discontinuités électriques est importante (Meheni *et al.*, 1996). En effet, dans les milieux contenant des hétérogénéités (ce qui est le cas d'un sol fissuré), les mesures de résistivité apparentes dépendent de la position de la source de courant par rapport à l'objet d'étude (Bibby, 1986). Les résultats de l'inversion sont alors aussi dépendants de l'orientation du quadripole. Le dispositif carré permet une mesure 3D de résistivité, qui est moins

influencée par l'orientation que celle acquise avec un dispositif en ligne (Habberjam and Watkins, 1967).

Au vu des connaissances actuelles, nous avons choisi de conduire une expérimentation électrique 3D du suivi de la fissuration dans un sol avec une configuration d'électrodes en carré. Nous présentons ici les résultats non inversés de cette expérimentation et la mise au point de critères qualitatifs de description de la fissuration.

Matériel et Méthodes

Sol

L'expérimentation a été conduite sur un sol limoneux du nord du Bassin Parisien (70% de limon, 20% d'argile) fortement compacté par le passage d'engins agricole. Un bloc de (26 x 30 x 40 cm²) prélevé en condition humide, a été soumis à une dessiccation naturelle pendant 18 jours. Un réseau de fissures s'est alors mis en place depuis la surface.

Mesures électriques

Le dispositif électrique est constitué de 8 lignes de 8 électrodes impolarisables Cu/CuSO₄ espacées de 3 cm (Figure 1). L'espacement inter-électrode centimétrique a été choisi *a priori* afin de détecter des fissures de taille millimétrique (Samouëlian *et al.*, 2003). Une acquisition comporte 280 mesures réparties sur 7 pseudo-profondeurs. Les électrodes d'injection A et B occupent pour chaque position du quadripôle ABMN, respectivement l'orientation $\alpha=0^\circ$ et $\alpha=90^\circ$. Les mesures de résistivité apparentes sont alors notées ρ_{0° et ρ_{90° . Lorsque ρ_{0° et ρ_{90° sont équivalents le milieu est électriquement homogène.

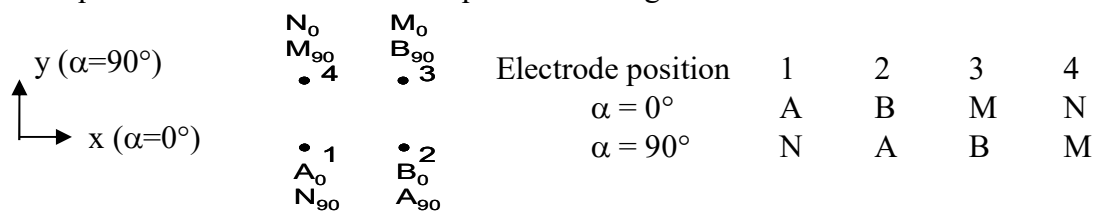


Figure 1 : Configuration d'électrodes en carré

Résultats et Discussion

Résistivité apparente à la fin de l'expérimentation

L'orientation des quadripôles $\alpha=0^\circ$ et $\alpha=90^\circ$, nous a amené à calculer un indice d'anisotropie *AI* sensible à la présence d'hétérogénéités électriques. *AI* est défini par la relation [1] :

$$AI = \rho_{0^\circ} / \rho_{90^\circ} \quad [1]$$

Les zones d'hétérogénéités électriques sont ainsi localisées spatialement à chaque pseudo-profondeur par les valeurs élevées ou faibles de *AI* (Figure 2). On observe que l'amplitude entre les valeurs minimale et maximale diminue lorsque la pseudo-profondeur augmente.

Etablissement d'un critère de fissuration à la première pseudo-profondeur

AI peut être considéré comme un critère de fissuration. Pour la première pseudo-profondeur, nous avons déterminé une relation entre la largeur moyenne de la fissure, son orientation et la valeur de *AI*. Les fissures supérieures à 1mm sont détectées pour des valeurs de *AI* inférieures à 0.42 ou supérieures à 3.14. Ces deux valeurs constituent deux seuils *Icinf* et *Icsup*. Lorsque la relation $Icinf < AI < Icsup$ est vérifiée, le quadrat de mesures correspondant est considéré comme non fissuré et inversement. Deux classes d'orientation préférentielle de fissures 0° et 90° peuvent également être distinguées à partir des valeurs de *AI*. Lorsque $AI > 1$, (resp. < 1) les fissures sont préférentiellement orientées à 0° (resp. 90°). Ces relations de détection et d'orientation préférentielle de fissures ont été appliquées à la première pseudo-profondeur (Figure3). La superposition de la photo de surface sur ces cartes permet une validation visuelle. La méthode est donc globalement satisfaisante, mais on constate que les quadrats

contenant une fissure orientée à 45° ou ne recoupant pas l'axe MN ne sont pas reconnus comme des quadrats fissurés.

Etablissement d'un critère global de fissuration

Calcul théorique du critère α_{\max}

Les seuils I_{cinf} et I_{csup} définis précédemment ne peuvent être généralisés, car ils dépendent probablement des conditions expérimentales, (type de sol, humidité, et ceci pour une configuration d'électrodes bien spécifique). Nous proposons donc d'établir un critère indépendant des contraintes expérimentales. Nous recherchons l'orientation du quadripôle ABMN, pour lequel la mesure de résistivité apparente est maximum. A partir des données expérimentales ρ_{0° et ρ_{90° , un jeu de données est recalculé pour les orientations de quadripôle variant de $\alpha=5^\circ$ entre 0° et 90° . Ce calcul s'effectue grâce à la matrice de rotation R

$$\text{(équation2) : } R = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} \rho_\alpha \\ \rho_{\alpha+90^\circ} \end{pmatrix} = |R| \begin{pmatrix} \rho_{0^\circ} \\ \rho_{90^\circ} \end{pmatrix} \quad [2]$$

Lorsque le milieu est homogène, $\rho_{0^\circ} = \rho_{90^\circ}$, α_{\max} est alors égale à 45° . Ceci correspond alors à l'un des trois cas suivant : i) fissures orientées à 45° , ii) fissures ne recoupant pas l'axe MN, ou iii) pas de fissures.

Application aux données expérimentales

Les valeurs de α_{\max} ont été calculées pour chaque pseudo-profondeur. On constate que (i) la variabilité diminue avec la profondeur et que (ii) les valeurs convergent vers 45° , soit vers une situation d'indiscernabilité (Tableau 1).

	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6
Mini	5	10	10	20	35	45
Max	85	70	65	65	65	50

Tableau 1 : Valeurs minimums et maximums de α_{\max} pour chaque pseudo-profondeur

La distribution spatiale des α_{\max} pour chaque pseudo-profondeur est présentée en figure 4. Pour la première pseudo-profondeur les valeurs entre 40° et 50° correspondent à des zones où la relation $I_{cinf} < AI < I_{csup}$ est vérifiée. Les valeurs comprises entre 0° - 35° et 55° - 90° sont associées à des zones d'hétérogénéités électriques correspondant au réseau de fissures. Entre la première et la seconde pseudo-profondeur les orientations des hétérogénéités électriques sont préservées ou convergent vers 45° mais ne sont jamais inversées. A la troisième pseudo-profondeur, on ne détecte plus qu'une hétérogénéité majeure orientée à 75° et présente sur 3 quadrats voisins. La comparaison avec la photo de surface montre que les quadripôles correspondant à ces 3 quadrats englobent la fissure la plus large du réseau. Les pseudo-profondeurs suivantes ne présentent plus d'anisotropie majeure, les valeurs tendent progressivement vers 45° .

La majorité des hétérogénéités électriques sont localisées en surface. Au fur et à mesure que l'espacement inter-électrode augmente, une hétérogénéité électrique initiée depuis la surface perd de son influence par rapport au volume de sol prospecté. Le signal électrique est alors de moins en moins perturbé avec la profondeur. Ceci est en accord avec les valeurs de α_{\max} convergents vers 45° , et correspondant au cas où les fissures ne sont pas présentes. Dans notre cas d'étude, la fissuration influence le signal électrique jusqu'à la troisième pseudo-profondeur.

Conclusion

Ces premiers résultats nous montrent d'une part que l'acquisition 3D par configuration carré est une méthode bien adaptée à la détection d'hétérogénéités localisées et d'autre part que la mesure est réalisable à cette échelle. Les seuils I_{cinf} et I_{csup} issus du calcul de AI et le critère α_{max} sont les deux méthodes utilisées pour détecter la présence d'hétérogénéités électriques. La première méthode est reliée à un contexte expérimental précis et validée à la première pseudo-profondeur. Les valeurs des seuils n'ont aucune portée universelle, toutefois ils peuvent être utilisés comme repère de fissuration dans le cadre du suivi temporel de la fissuration. La seconde méthode nécessite un temps de calcul plus important, mais elle est généralisable non seulement à l'ensemble du volume prospecté mais aussi à tout autre type de conditions expérimentales.

L'étude au préalable de la résistivité apparente renseigne non seulement sur la présence de fissures mais aussi de leurs orientations et de leur extension en profondeur. Néanmoins les fissures orientées à 45°, et celle ne recoupant pas l'axe MN n'ont pu être détecté. Nous proposons pour cela de mesurer également la résistivité apparente suivant les diagonales du carré. Ces résultats encourageants, permettent d'envisager une inversion 3D guidée dans le cas de milieu anisotrope, par la prise en compte des zones hétérogènes localisées au préalable.

Références

- Bibby H.M., 1986. Analysis of multiple-source bipole-quadripole resistivity surveys using the apparent resistivity tensor. *Geophysics*, 51, 972-983.
- Cousin I., Levitz P., Bruand A., 1996. Three-dimensional analysis of a loamy-clay soil using pore and chord distribution. *European Journal of Soil Science*, 47, 439-452.
- Habberjam G.M., Watkins G.E., 1967. The use of a square configuration in resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting*, 15, 445-467.
- Macedo A., Crestana S., Vaz C.M.P., 1998. X-ray microtomography to investigate thin layers of soil clod. *Soil & Tillage Research*, 49, 249-253.
- Meheni Y., Guérin R., Benderitter Y., Tabbagh A., 1996. Subsurface DC resistivity mapping : approximate 1-D interpretation. *Journal of Applied Geophysics*, 34, 255-270.
- Samouëlian A., Cousin I., Richard G., Tabbagh A., Bruand A., 2003. Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. *Soil Science Society Journal of America*, in press.
- Xu B., Noel M., 1993. On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, 41, 791-801.
- Zhou Q.Y., Shimada J., Sato A., 2002. Temporal variations of the three-dimensional rainfall infiltration process in heterogeneous soil. *Water Resources Research*, 38, 1-16.

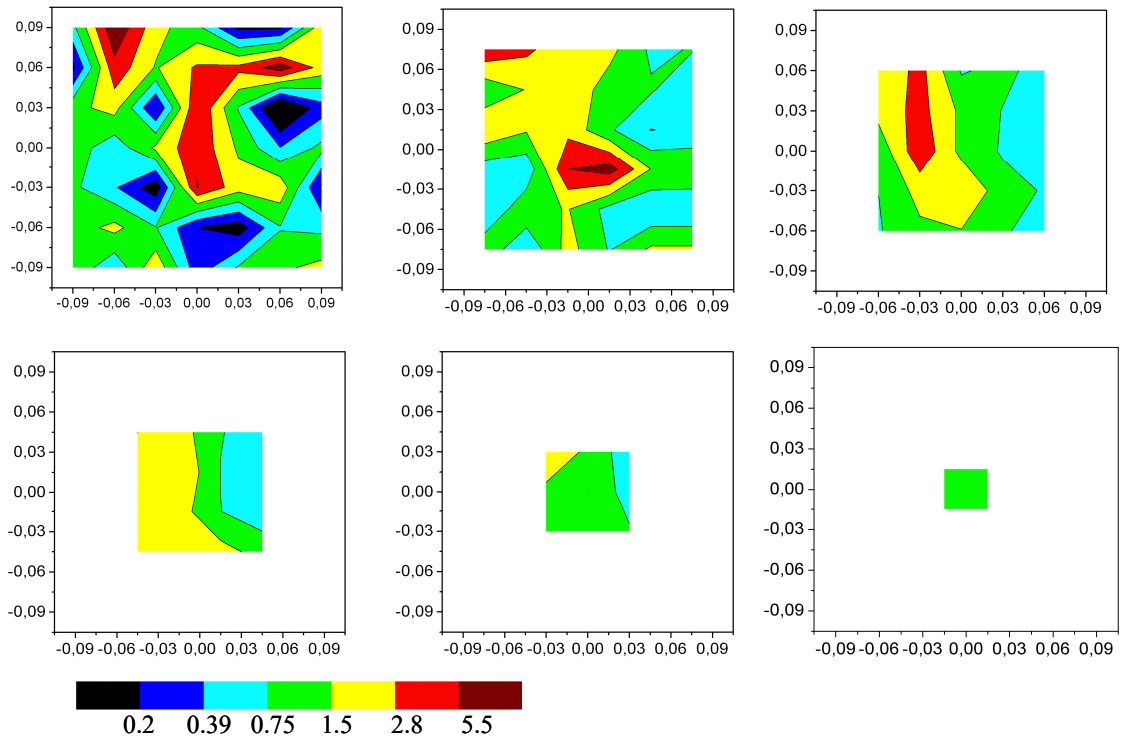


Figure 2 : Distribution spatiale de l'indice d'anisotropie AI

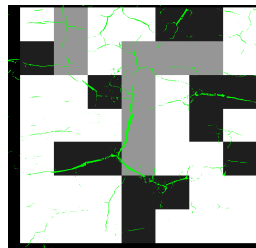


Figure 3 : Détection et orientation des fissures, en noire zone de fissures orientées préférentiellement à 0° , en gris zone de fissures orientées préférentiellement à 90° , en blanc zone non détectée comme fissurées

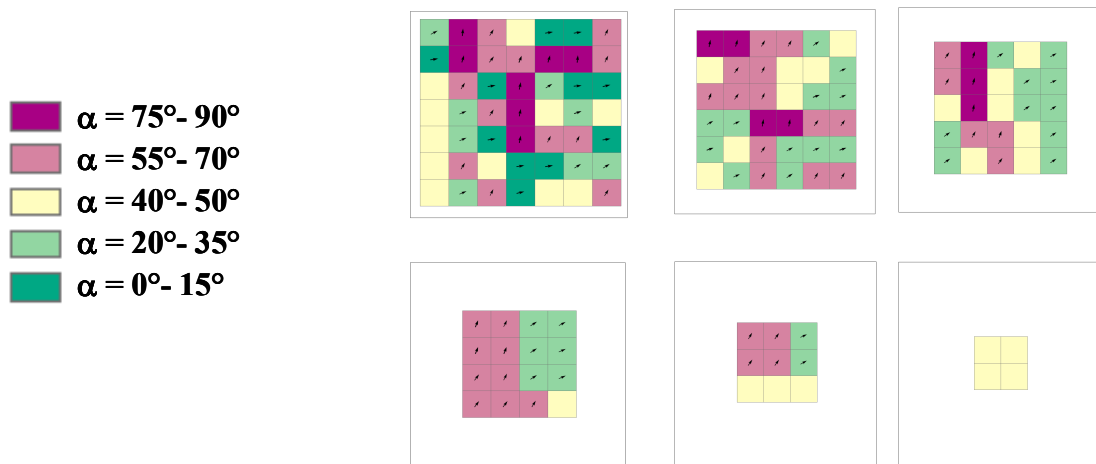


Figure 4 : Répartition des orientations préférentielles des anisotropies, à partir du calcul du critère α_{\max}