

9 GD30



THESE
présentée à
L'UNIVERSITE D'ORLEANS
pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'ORLEANS

Discipline : Sciences de la Terre et de l'Univers

par

Anatja SAMOUËLIAN

Analyse tridimensionnelle non destructive de la fissuration
d'un sol cultivé à partir de mesures de résistivité électrique.

Soutenance publique le 26 Mars 2004, devant le jury :

- A. Bruand, (Professeur / Université Orléans)
- Y. Chen, (Professeur / Université Orléans)
- I. Cousin, (Chargée de recherche / INRA-Orléans)
- G. Richard, (Directeur de recherche / INRA-Laon)
- J.J. Schott, (Maître de Conférence / EOST-Strasbourg)
- H. Van Damme, (Professeur / ESPCI)

Directeur de Thèse
Examinateur
Examinatrice
Président
Rapporteur
Rapporteur

Avant propos

Avant d'exposer les résultats de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse financée par la région centre.

Je tiens en premier lieu, à remercier chaleureusement Isabelle Cousin, formatrice et encadrante principale de ces travaux. Durant ces trois années, j'ai pu apprécier sa grande disponibilité, ses conseils avisés, et ses encouragements. Nous avons eu de nombreuses heures de discussions toujours très constructives, dans un climat d'entente cordiale et de bonne humeur.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Jean-Jacques Schott, Maître de Conférence à l'EOST à Strasbourg, et à Monsieur Henri van Damme, Professeur à l'ESPCI à Paris, qui ont accepté le rôle de rapporteur pour juger ce travail.

Mr Yan Chen, Professeur à l'Université d'Orléans, pour sa relecture minutieuse du manuscrit et son examen critique.

Je remercie également Guy Richard, Directeur de recherche à l'INRA de Laon, qui a accepté de présider le jury de cette thèse, et avec qui, durant ces trois années, nous avons collaboré efficacement afin de relier la géophysique et la science du Sol.

J'exprime toute ma sympathie à Ary Bruand, Professeur à l'Université d'Orléans et directeur de la thèse, pour toutes les discussions enrichissantes et constructives qui ont aidé à résoudre « les embûches » de parcours.

Je voudrais remercier, Yves Guéguen, Edith Perrier, Pierre Stengel, Alain Tabbagh, Bruce Velde, pour leurs participations aux comités de pilotage, et leurs discussions et remarques pertinentes sur ce travail.

Ce travail a donné lieu à une collaboration avec l'UMR Sisyphe de Paris 6. J'adresse toute ma reconnaissance à Alain et Jeannette Tabbagh, pour leurs disponibilités et discussions enrichissantes face à mes questions de novice en géophysique. Je tiens également à remercier Roger Guérin pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour ses remarques constructives, ses conseils éclairés et sa gentillesse.

Je remercie le réseau Geofcan, pour le prêt du matériel de géophysique. Les rencontres occasionnées ont toujours été accompagnées de conseils amicaux.

Je tiens également à remercier Hubert Boizard, Bertrand Chauchard et Paul Régnier pour leur précieuse aide lors des prélèvements « si délicat » des échantillons d'études.

Ce travail a été réalisé au sein de l'unité de Science du Sol de l'INRA d'Orléans, dirigé par Monsieur Dominique King. Je le remercie pour son accueil chaleureux.

Je tiens à remercier : Pierre Courtemanche, Hervé Gaillard, Christian Le Lay et Loïc Prud'homme pour leur aide au laboratoire, leur efficacité et leur gentillesse ; Momo, Magalie et Marie-Pierre pour leur secrétariat productif et serviable ; Jocelyn Gaillard, Eric Velluet, et Gérard Yart pour leur aide informatique et toujours joviale même quand « ça imprime pas..... ». Je pense également à toute la petite vie familiale et chaleureuse du service initiée par Marcel Jamagne, et reprise par les « café'teurs », les « piscineux » mangeurs de gateaux, les « parapenteux », les sportifs en tout genre, et les adeptes du Barbecue.

Je tiens également à remercier ma famille et mes proches qui m'ont soutenue, entourée et toujours encouragée durant ces trois années.

Merci enfin à Eric, pour ton soutien et ta grande patience de tous les instants.

A Gisela

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I

**Evolution de la structure du sol liée à la fissuration lors de la dessiccation :
Analyse bibliographique des méthodes et des modèles de prévision**

CHAPITRE II

**Apports des méthodes utilisant la résistivité électrique : Théorie, mise en
œuvre et exemples d'applications en Géosciences**

CHAPITRE III

**Faisabilité de l'application de la méthode électrique à la détection de
fissures : modélisation et expérimentation**

CHAPITRE IV

Analyse tridimensionnelle de la géométrie d'un réseau de fissures

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

ANNEXE

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

L'organisation du sol influence les propriétés de stockage et de transfert telles que la rétention en eau, la conductivité hydraulique ou la diffusion gazeuse. Celles-ci modifient le comportement du sol, infiltration et ruissellement notamment, avec des conséquences majeures, à la fois au plan environnemental (transfert de produits phytosanitaires, émission de gaz à effet de serre, stockage en carbone,...) et agronomique (mise en place du système racinaire, portance du sol,...). Ainsi, la connaissance de l'organisation d'un sol est nécessaire afin d'analyser, de comprendre et de prévoir les propriétés de transfert et leurs conséquences.

Cette organisation est variable à toutes les échelles, depuis l'assemblage des particules élémentaires, jusqu'à la répartition spatiale des sols dans le paysage. Sa caractérisation n'est pas une tâche aisée puisqu'elle doit tenir compte de sa variabilité dans le temps. Il est connu que, de façon similaire à d'autres organisations naturelles (Blöschl et Sivapalan, 1995), la dynamique de variation dans le temps n'est pas indépendante de l'échelle spatiale à laquelle on caractérise cette organisation, les objets de taille moyenne (horizons de sol, par exemple) ayant une dynamique saisonnière tandis que les organisations de plus grande taille (couvertures de sol à une échelle régionale) ont une dynamique plutôt pluriséculaire¹. Nous nous focaliserons, dans notre travail, sur l'**horizon**, qui peut être caractérisé par des volumes pluricentimétriques à métriques et dont l'organisation, que l'on qualifiera ici de **structure**, présente une dynamique saisonnière.

En effet, observée à un moment donné, la structure du sol résulte d'un bilan création-disparition d'un volume de pores induit par des causes d'origines aussi bien naturelles qu'anthropiques (Boizard *et al.*, 2002). Différents agents participent à la création de ce volume de pores (Fig. 1) : (i) des agents climatiques par l'alternance de cycles humectation-dessiccation et/ou gel-dégel, (ii) des agents biologiques par l'action de la faune et des racines des plantes, (iii) des agents anthropiques par l'action de pratiques culturales, telles que le labour. Ces mêmes agents participent également à la disparition du volume de pores : (i) les agents climatiques par la prise en masse à l'humectation ou à la dessiccation, (ii) les agents biologiques par le compactage dû à la macrofaune, (iii) les agents anthropiques par le compactage dû aux passages d'engins agricoles dans des conditions humides.

Les actions strictement mécaniques (passages d'engins par exemple) ne sont elles-mêmes pas indépendantes du climat. Rappelons en effet qu'une variation de l'état d'hydrique d'un sol influence les propriétés de transferts et mécaniques des sols. Nous devons donc garder à l'esprit que cette relation est à l'origine d'interactions étroites, rétroactives et multi-échelles.

¹ On notera d'ailleurs que les sols présentent une caractéristique un peu particulière car il est probable qu'à une échelle infra-horizon, i.e. à l'échelle de l'assemblage des particules élémentaires ou même à l'échelle de la constitution des particules elles-mêmes, la dynamique temporelle de variation se produise à un pas de temps supérieur à la saison.

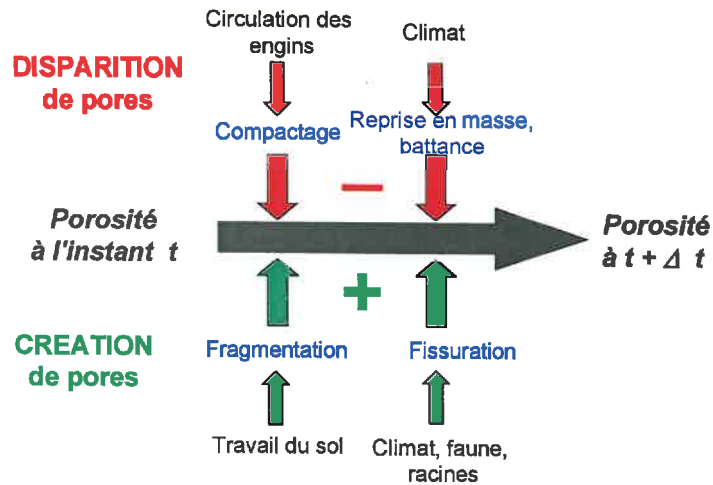


Figure 1 : Bilan de la création disparition de la porosité (d'après Richard *et al.*, 2003)

Le besoin de compréhension des relations entre la structure du sol et son fonctionnement se trouve accru avec l'émergence de techniques culturales visant à réduire, voire à supprimer le travail du sol. Ces pratiques culturales ont des conséquences environnementales (lutte contre l'érosion, stockage du carbone) et économiques (réduction des charges de mécanisation et du temps de travail). Les résultats de travaux scientifiques qui tentent de préciser l'effet de la réduction du travail du sol sur les propriétés, notamment hydrodynamiques, sont contrastés et contradictoires. Des études ont montré que l'arrêt du labour entraîne une augmentation de l'activité biologique (Trojan et Linden, 1998 ; Tebbrügge et During, 1999 ; Le Bayon *et al.*, 2002) qui augmente la connectivité des pores (Hangen *et al.*, 2002). Des études analogues (Azooz *et al.*, 1996 ; Arshad *et al.*, 1999 ; VandenBygaert *et al.*, 1999) ont également souligné que la suppression du labour permet la mise en place d'un volume de pores sans discontinuité (fissures, galeries de vers), qui, même très faible, demeure très efficace vis-à-vis des transferts et notamment des phénomènes d'infiltration et de flux préférentiels. Cet effet positif sur l'infiltration peut conduire à une augmentation de la teneur en produits phytosanitaires en profondeur (Barriuso *et al.*, 1991 ; Shipitalo *et al.*, 2000 ; During *et al.*, 2002 ; Malone *et al.*, 2003), ce qui contribue à une contamination de l'aquifère. A contrario, certaines études montrent que la réduction du travail du sol va de pair avec une diminution de l'infiltration car la compacité du milieu est plus importante (Gomez *et al.*, 1999) ; cependant la présence d'un mulch tend à limiter l'évaporation et favorise le stockage d'eau (Hangen *et al.*, 2002).

Ces quelques exemples montrent que les résultats sont à nuancer car ils résultent de travaux réalisés sur des périodes de temps variables et dans des contextes agropédoclimatiques différents. Ils traitent de situations où les influences biologiques, climatiques et anthropiques sont fortement imbriquées. Ainsi, des éléments de

réponses aux problèmes de l'effet de la réduction du travail du sol peuvent être apportés si l'on dissocie ces trois facteurs d'influence.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons choisi de nous focaliser sur l'aspect climatique et plus particulièrement sur l'évolution de la structure des sols lors de la dessiccation, qui conduit principalement au développement d'une fissuration. La littérature nous fournit des exemples de travaux qui traitent explicitement de ce sujet en contexte de travail réduit. Ainsi, les travaux de Stengel, (1986) sur l'essai longue durée de l'ITCF de Boigneville, montrent qu'en l'absence de labour, la porosité totale de l'horizon de surface, calculée à partir de mesures effectuées chaque année en fin de cycle cultural entre les mois de septembre et novembre, évolue vers un état d'équilibre. Cette porosité est cependant hétérogène : entre 7 et 15 cm de profondeur, on observe une couche homogène assez compacte, tandis qu'entre 0 et 7 cm se développe une couche superficielle plus poreuse, due en partie à l'influence climatique. En effet la fréquence et l'amplitude des cycles humectation-dessiccation sont nécessairement plus importantes en surface qu'en profondeur, et leur effet, dans ce contexte, n'est pas détruit par l'action du labour. Des observations au champ montrent qu'une partie de la porosité résulte de l'action du climat, formant des fissures dues aux variations d'humidité cycliques entre des états secs et des états d'hydratations maximums.

Sur des Vertisols cultivés en soja, Bandyopadhyay *et al.* (2003) observent depuis la surface un réseau de fissures différent suivant les techniques culturales mises en place. La suppression du labour conduit à des fissures plus larges, profondes, et dont le volume estimé est plus important par rapport à un travail traditionnel. A contrario, la longueur totale et la surface des fissures se trouvent diminuées.

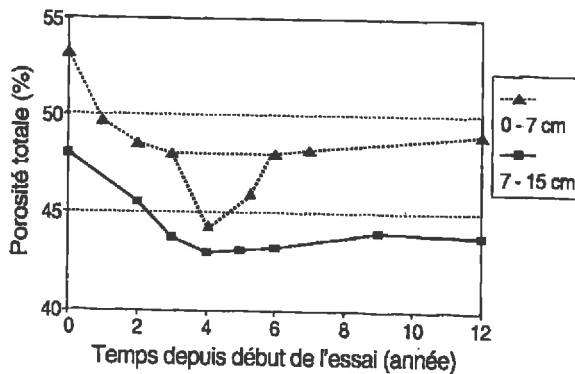


Figure 2 : Evolution de la porosité totale dans les couches non travaillées (d'après Stengel, 1986)

Bien que non contradictoires, ces deux exemples montrent que nous ne disposons pas à l'heure actuelle de travaux suffisamment généralisables pour discuter de l'effet d'une réduction du travail du sol sur l'évolution de la structure du sol sous l'action du climat. Outre le fait que les travaux sont menés dans des contextes agropédoclimatiques

donnés, deux contraintes majeures empêchent généralement l'extension des résultats obtenus à d'autres milieux :

- Les mesures sont souvent réalisées sur de nouveaux échantillons à chaque pas de temps, et non sur un échantillon identique dont on suivrait véritablement l'évolution temporelle ;
- Les études spécifiques concernant la fissuration se fondent souvent sur des observations de la surface du sol et, à partir d'hypothèses d'isotropie, généralisent les résultats aux couches inférieures non observées. Il est probable pourtant que l'organisation du réseau de fissures ne soit pas isotrope. Une connaissance tridimensionnelle est alors à rechercher surtout dans le cas où l'on souhaite ultérieurement décrire les propriétés de transfert.

Dans ce contexte, nous avons axé notre travail de thèse sur la mise au point d'une méthode permettant la description tridimensionnelle de la mise en place d'un réseau de fissures et de son évolution temporelle. Le suivi dynamique de la fissuration impose une contrainte expérimentale qui est d'être non destructive. Peu d'études expérimentales tiennent compte de cette exigence méthodologique mais l'utilisation de méthodes géophysiques répond à ce critère. Elles sont non destructives et permettent ainsi un suivi temporel du milieu. Nous proposons donc d'adapter la méthode basée sur la mesure de la résistivité électrique du sol (annotée dans le texte méthode de la résistivité électrique ou méthode électrique) à la détection de fissures. Pour cela, nous avons mené conjointement des travaux expérimentaux et numériques. Nous avons travaillé sur un sol moyennement argileux (Orthic Luvisol - FAO, 1975), représentatif des sols de grandes cultures de la moitié nord de la France, dans lesquels se développent des fissures millimétriques. Celles-ci sont à l'origine de la régénération d'une partie de la porosité par les agents climatiques, en contexte de travail du sol réduit.

Ce document s'organise en quatre parties.

Dans le premier chapitre, nous présentons les méthodes expérimentales et les essais de modélisation de description de la structure du sol. Cette analyse bibliographique nous permet de cadrer nos choix en matière de suivi de la fissuration.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la méthode de la résistivité électrique que nous avons utilisée dans notre approche expérimentale. Ce chapitre est rédigé sous la forme d'un article présentant les caractéristiques ainsi que les avantages et les inconvénients de la méthode de la résistivité électrique. Il nous permet de définir précisément notre démarche expérimentale.

Le troisième chapitre est consacré à l'utilisation de la résistivité électrique pour la détection de la fissuration dans les sols dans un cas simplifié en deux dimensions. Il présente successivement une expérience de résistivité menée en conditions contrôlées

et un modèle de calcul de la résistivité apparente. Ces travaux nous permettent de discuter de la sensibilité de la mesure électrique pour différents scénarios de fissuration.

Le quatrième chapitre aborde la caractérisation de la fissuration d'un sol en trois dimensions. Il présente successivement le protocole expérimental mis en place puis deux études, l'une sur un bloc de sol contenant un réseau de fissures artificielles, la seconde sur un bloc de sol soumis à une dessiccation réelle en conditions contrôlées. Un indice de fissuration est mis au point au moyen de la modélisation, validé ensuite à l'aide des données expérimentales de la première étude et utilisé pour caractériser le suivi de la fissuration lors de la deuxième étude.

CHAPITRE I

**Evolution de la structure du sol liée à la fissuration
lors de la dessiccation :**

Analyse bibliographique des méthodes et des modèles de prévision

Introduction

Définition de la structure

La structure d'un sol peut être décrite par la distribution spatiale de l'ensemble des éléments solides (Hillel, 1974) et par la nature et l'intensité des liaisons entre les éléments solides (Stengel, 1990). Elle peut aussi se définir comme le complémentaire de la phase solide, c'est-à-dire par ses pores et cavités entre les solides. Sa détermination est primordiale puisqu'elle quantifie l'importance du volume des pores dans lesquels s'effectuent les transferts d'eau et de gaz.

Le réseau poreux des sols se développe à plusieurs échelles. Les travaux français à partir des années 1970, ont permis d'établir une typologie de la porosité des sols (Monnier *et al.*, 1973 ; Fiès et Stengel, 1981 a et b). On considère généralement que le réseau poreux est constitué de deux compartiments (Fig.I-1) :

- la porosité texturale, reliée aux caractéristiques granulométriques des particules constitutives du sol. Elle ne dépend, en principe, que de la nature, de la quantité de ces particules élémentaires, et de la teneur en eau du matériau.
- la porosité structurale reliée à l'arrangement macroscopique des éléments structuraux (Stengel, 1979).

La porosité structurale est principalement d'origine mécanique, des mécanismes de retrait-gonflement par exemple entraînant des variations de volume important. Cette variation de volume réorganise la structure du sol et elle est à l'origine notamment de l'apparition de la porosité fissurale (Tri et Monnier, 1973). La formation de fentes de retrait isole des unités structurales par des arêtes vives créant des structures dites anguleuses (Duchaufour, 1984). Les agrégats et éléments structuraux sont ainsi délimités par un réseau plus ou moins complexe de fissures, de cavités et galeries. De façon plus générale, ces évolutions dues au climat sont également reprises par l'action de la faune et des racines (Guérif, 1994) et par le travail du sol, ce qui crée un réseau poreux à géométrie complexe. Nous nous focaliserons, dans ce travail, uniquement sur la fissuration à la dessiccation.

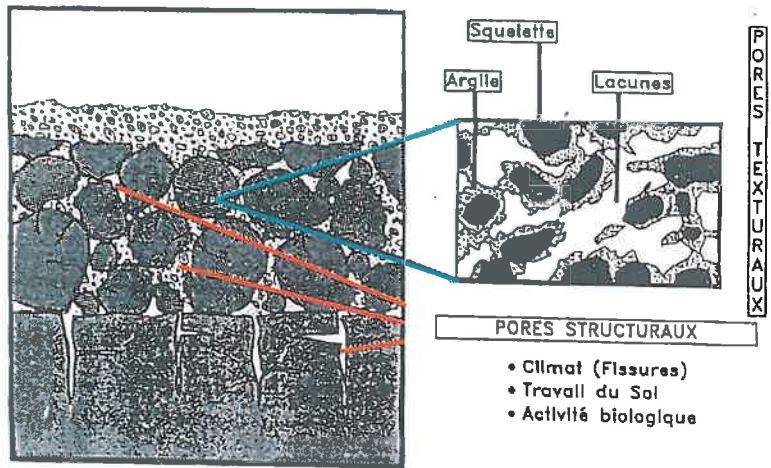


Figure I-1 : Schéma d'organisation de l'espace poral du sol (d'après Stengel, 1979).

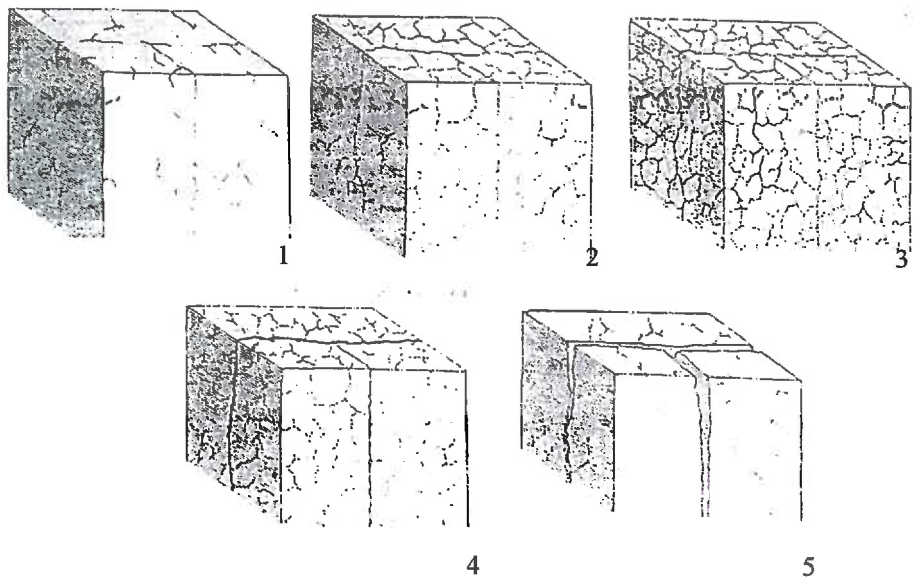


Figure I-2 : Evolution schématique de la fissuration d'un sol (d'après Hallaire, 1988b).

Cas particulier de la fissuration

Les fissures constituent des objets géométriques qui peuvent être décrits au moyen de paramètres morphométriques tels que : la largeur, la profondeur, l'orientation, la position (Fig. IV-2). Appréhender leur arrangement spatial nécessite d'en connaître également des caractéristiques topologiques telles que la connectivité ou des paramètres mixtes comme la tortuosité. Cette connaissance du réseau connecté, donc percolant, est une information nécessaire lorsque l'on s'intéresse aux phénomènes de transferts.

Cette description de la structure du sol et plus particulièrement du réseau de fissures et de son évolution peut être abordée par la voie de l'expérimentation ou par la voie de la modélisation. Nous présentons ici successivement ces deux approches. Nous décrirons les méthodes d'analyse de la structure en nous focalisant, lorsque cela est possible, sur des exemples liés à la fissuration. Nous limiterons notre étude à la présentation de méthodes permettant la description du réseau poreux à l'échelle de l'horizon, c'est-à-dire sur des volumes de quelques cm^3 à quelques dm^3 .

1. Approche expérimentale

Nous présentons ici différentes approches expérimentales de caractérisation de la structure, spécifiques ou non de la fissuration. Nous les avons classées suivant deux types d'observations : i) directes et ii) indirectes.

1.1. Observations directes

1.1.1. Sur le terrain

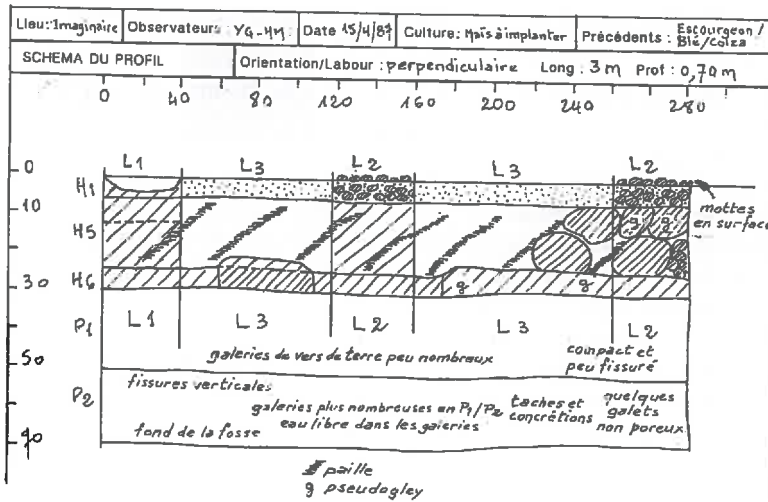
1.1.1.1. Le profil cultural

La méthode du profil cultural, mise au point par Hénin *et al.* (1969) et ensuite reprise et complétée par Manichon (1985) est une analyse au champ de l'organisation spatiale de la couche travaillée en relation avec les pratiques culturales (Fig I-3a). Cette méthode permet de quantifier l'état structural du sol dans ses variabilités verticale et latérale, à partir d'une description morphologique de l'arrangement dans un plan de mottes caractérisées par leur porosité structurale figure I-3b (on distingue schématiquement des mottes compactées Δ , des mottes non compactées Γ , et des mottes fissurées Φ). Cette méthode est très axée sur les pratiques culturales : la description des bandes de labour, l'ancien lit de semence et le passage des roues de tracteur sont recherchés et reconnus dans le profil. Soulignons que cette méthode destructive est effectuée à l'œil de l'expert et reste une description qualitative macroscopique. Elle permet une première localisation et une visualisation de fissures.

1.1.1.2. Visualisation directe du réseau de fissuration au champ

Plusieurs auteurs ont tenté de visualiser directement le réseau de fissuration au champ après l'avoir consolidé par l'infiltration d'un produit qui se solidifie dans le réseau poreux, plâtre (Fitzpatrick *et al.*, 1985). Ces méthodes d'imprégnation au champ permettent une visualisation rapide sur des volumes de plusieurs dizaines de litres mais restent lourdes à mettre en œuvre et destructives, donc peu adaptées à un suivi temporel.

De façon un peu similaire, on a également tenté de visualiser le réseau poreux après infiltration d'une solution colorée, au bleu de méthylène (Bouma *et al.*, 1977 ; Hallaire *et al.*, 1997 ; Trojan et Linden, 1998) ou au bleu brillant (Forrer *et al.*, 2000). Comme l'imprégnation au plâtre, cette technique ne permet que des études ponctuelles.



a)



motte Δ



motte Γ



motte Φ

b)

Figure I-3 : Méthode du profil cultural, a) exemple de relevé d'un profil cultural (d'après Gautronneau et Manichon, (1987), b) photographies de mottes présentant un état interne Δ, Γ et Φ (Roger-Estrade *et al.*, 2004 à paraître).

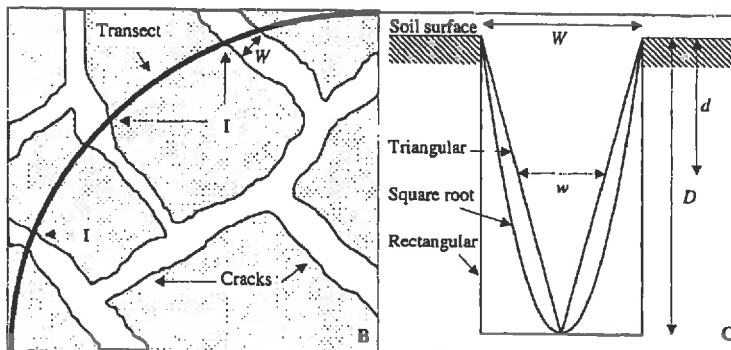


Figure I-4 : Technique de mesure des caractéristiques morphologiques des fissures au champ et estimation de la géométrie de la fissure (d'après Ringrose-Voase et Sanidad, 1996).

1.1.1.3. Détermination des paramètres de la fissuration à partir de la surface

Les fissures présentes dans un sol ont été décrites à partir d'observations de surface au champ (Ringrose-Voase et Sanidad, 1996 ; Bandyopadhyay *et al.*, 2003), et de mesures réalisées à la règle. La largeur, la longueur par cm² de surface prospectée et la profondeur de la fissure sont ainsi mesurées. A partir de ces trois paramètres, Ringrose-Voase et Sanidad (1996) caractérisent la fissuration dans le sol sur la base de trois hypothèses de formes géométriques de fissures (Fig. I-4) : i) rectangulaires, ii) triangulaires et iii) carrées. Cette méthode au champ permet de suivre la dynamique de fissuration, puisque les mesures sont non-destructives depuis la surface. Elle ne s'applique cependant qu'à des fissures sub-verticales.

Favre *et al.* (1997) à l'aide d'une jauge enfoncée de 5 cm dans le sol, suivent la fermeture des fissures à l'humectation. Cette technique, validée au champ sur des Vertisols, ne permet un suivi que depuis la surface, et uniquement en phase d'humectation.

Dans les deux cas, l'analyse est dynamique et permet une estimation temporelle réelle de l'évolution du réseau de fissures. Cependant ces techniques d'observation au champ depuis la surface ne permettent pas la reconstruction la plus complète possible d'un réseau de fissures complexe.

1.1.2. Au laboratoire

1.1.2.1. Paramètres globaux

De manière générale la structure d'un sol peut être caractérisée sur des échantillons de petite taille et non remaniés par des indicateurs globaux (Monnier *et al.*, 1973) tels que :

- la densité apparente à l'état sec (masse des solides/volume des solides et des vides),
- la porosité totale (volume des vides et de l'eau/volume total),
- la porosité structurale (volume des vides non texturaux/volume total)

Ces données sont généralement obtenues au laboratoire après des prélèvements ponctuels de sol à la tarière, ou dans des cylindres d'échantillonnage non destructif. Ces données peuvent être par la suite traitées par des outils de géostatistique si l'on souhaite une estimation spatiale de la mesure ponctuelle.

1.1.2.2. Analyse d'images 2D

1.1.2.2.1. Analyse de photos de surface

L'analyse d'images sur des échantillons de taille centimétrique à partir d'une photo de surface permet de calculer des paramètres quantitatifs de description de la structure (Stengel et Bourlet, 1985 ; Hallaire, 1984). De cette manière un suivi temporel de

l'évolution de la surface de l'échantillon peut être envisagé. Stengel et Bourlet (1987) décrivent différents états de fissuration à l'aide de variables morphologiques simples (longueur totale et surface) par une analyse d'images à partir de photographies de la surface du cylindre de prélèvement centimétrique. Ce suivi dynamique de la fissuration à l'humectation a montré une diminution de la longueur totale des fissures et une augmentation des fissures les plus fines. Cette observation est néanmoins uniquement bidimensionnelle et ne donne pas accès à la variation de la fissuration en profondeur.

1.1.2.2. Analyse de lames minces

A une échelle plus fine de résolution, l'analyse d'images 2D des lames minces obtenues en microscopie optique ou électronique permet de faire une étude morphométrique, c'est-à-dire une description de la forme et de la taille des pores au moyen d'indices. Les échantillons de sol sont imprégnés par une résine contenant des pigments fluorescents qui remplissent ainsi l'espace poral connecté. Les photographies des lames minces sous lumière ultraviolette permettent d'augmenter le contraste entre la partie poreuse et la partie solide (Scott *et al.*, 1986). Cette technique est couramment employée en Science du Sol, et notamment pour la description des phénomènes de fissuration dus à des cycles d'humectation-dessiccation et gel-dégel sur des échantillons au laboratoire à une échelle fine (Pardini *et al.*, 1996). Velde *et al.* (1996), Miller *et al.* (1998), VandenBygaart *et al.* (1999), Pagliai *et al.* (2003) étudient en particulier les effets d'une réduction du travail du sol sur l'évolution du réseau poreux. Son avantage est d'obtenir des images de haute résolution, mais le temps d'acquisition entre l'échantillonnage et l'analyse finale est relativement long. De plus la fabrication de lames minces est destructive, et ne permet donc pas de faire un suivi dynamique.

1.1.2.3. Analyse d'images 3D

L'observation 3D donne accès, en plus d'une information morphologique, à une information topologique (Scott *et al.*, 1988). Cette information concerne l'étude des connexions entre les pores et n'est donc possible qu'avec une visualisation tridimensionnelle de l'objet. Une analyse d'image menée sur une image 3D permet d'évaluer la porosité, la surface spécifique, la connectivité. Néanmoins l'acquisition d'images 3D en Science du Sol nécessite des moyens de mise en oeuvre souvent lourds à gérer. Nous présenterons deux méthodes différentes, i) les coupes sériées et ii) la tomographie à rayons X.

1.1.2.3.1 Coupes sériées

La méthode des coupes sériées permet, de manière destructive, une observation tridimensionnelle du milieu étudié (Fig. I-5). Cette technique consiste, après imprégnation d'un volume de sol (de manière similaire à celle décrite auparavant pour l'analyse 2D), à éroder successivement l'objet à l'aide d'une meule. Après chaque érosion, une photo de la coupe est effectuée, afin d'obtenir une information 2D qui

ensuite permet de reconstruire une représentation 3D de l'objet (Cousin *et al.*, 1996). Moreau *et al.*, (1996) utilisent la morphologie mathématique pour décrire les caractéristiques géométriques, topologiques et texturales d'un réseau de fissures 3D reconstruit par coupes sériées. La comparaison de morphologie bi et tridimensionnelle montre que les géométries sont similaires, mais que le seuil de percolation est largement sous-estimé lors de l'analyse 2D. Ainsi, le passage du 3D au 2D est à l'origine d'une perte de l'information, notamment concernant les goulots d'étranglement et élargissement des fissures. Vogel (1997) estime au moyen de cette technique la connectivité d'un réseau poreux à partir des diamètres de pores. Cousin *et al.* (1999), connaissant la géométrie 3D de la structure d'un échantillon de sol, peuvent alors correctement simuler les transferts de gaz. Néanmoins cette méthode est longue, destructive, et difficilement applicable à des échantillons de grandes tailles.

1.1.2.3.2. Tomographie aux rayons X

L'acquisition par tomographie consiste à utiliser un scanner à rayon X. En traversant l'échantillon, une partie du rayonnement est absorbée par le milieu solide tandis qu'une autre partie du rayonnement le traverse. On mesure la quantité de rayonnement qui a traversé l'échantillon et on renouvelle l'opération en faisant tourner l'échantillon. Les valeurs obtenues sous différents angles permettent de reconstruire une image 3D de l'objet et de connaître ainsi en chaque point la densité de matière (Fig.I-6). De la même manière que pour les coupes sériées, l'information obtenue renseigne sur la topologie du milieu. Vaz *et al.* (1989) ont effectué plusieurs tests de calibration sur différentes densités et teneurs en eau d'échantillons de sol ; Warner *et al.* (1989), Anderson *et al.* (1990), Heijs *et al.* (1995) ont utilisé la tomographie au rayons X pour décrire la macroporosité d'échantillon de sols ; Pierret *et al.* (2002) comparent les galeries (taille diamètre, forme, orientation) créées par deux espèces de vers de terre. Cette technique d'acquisition est très rapide et non destructive. Son volume d'application, généralement des cylindres d'une vingtaine de centimètres (Delerue, 2001) en fait un outil particulièrement adapté à la description de la structure du sol à l'échelle de l'horizon y compris à la description d'un réseau de fissures. Néanmoins son coût très élevé et son accessibilité, généralement en milieu hospitalier, sont des contraintes qui peuvent devenir importantes.

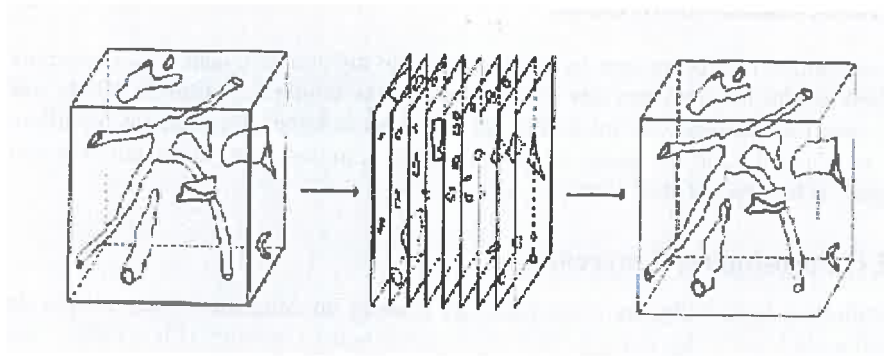


Figure I-5 : Principe des coupes s\u00e9ri\u00e9es (d'apr\u00e8s Cousin *et al.*, 1996)



Figure I-6 : Image tridimensionnelle du sol par tomographie \u00e0 rayon X. (d'apr\u00e8s Delerue, 2001)

1.2. Observations indirectes

Les observations indirectes sont faites au moyen de méthodes invasives. La structure du milieu étudié est analysée par l'intermédiaire du volume de liquide ou de gaz injecté dans l'échantillon, ce qui donne accès soit au volume global de l'échantillon, soit à une distribution de taille de pores. Deux liquides sont assez couramment employés : i) le mercure et ii) l'eau.

1.2.1. Porosimètre à mercure

La distribution de la taille des pores peut être évaluée en déterminant une courbe de distribution de la taille des pores à l'aide d'un porosimètre à mercure (Fiès, 1984 ; Fiès et Bruand, 1990). Le principe est d'injecter du mercure, liquide non mouillant, sous pression, dans les pores de l'échantillon. La distribution de la taille des pores est déduite de la quantité de mercure injectée aux différentes pressions. Cette méthode fournit une mesure ponctuelle de la distribution des diamètres de pores équivalents à la date du prélèvement de l'échantillon et se réalise sur des échantillons secs, de taille réduite (quelques cm³), au laboratoire. La caractérisation d'échantillons argileux est donc à interpréter avec prudence, et l'extrapolation à des zones de grandes surfaces est délicate.

1.2.2. Courbe de retrait

La courbe de retrait décrite par Haines (1923) permet d'étudier les modifications de volume d'un échantillon de sol, donc les variations de son réseau poreux, en fonction de l'état d'hydratation. L'expérience consiste, au laboratoire, à suivre les variations de densité apparente d'un échantillon de sol initialement saturé et qui subit une désaturation progressive. Les variations hydriques, responsables des variations de volumes des éléments structuraux sont à l'origine des contraintes mécaniques qui entraînent la formation de plan de ruptures et, le cas échéant, la création de fissures. Bruand et Prost (1987) mettent en évidence, lors de l'étude de courbe de retrait sur différentes tailles d'échantillons (micrométriques à décimétriques), l'existence d'un lien étroit entre la forme de la courbe et la taille de l'échantillon (Fig. I-7). Plus la taille de l'échantillon est importante plus le volume d'air au cours du retrait normal (phase II) est important. La création de ce volume d'air est attribuée à l'écartement des agrégats élémentaires de taille sub-centimétrique et à l'ouverture de micro-fissures. Stengel (1988) souligne cependant que les études reliant le réseau de fissures au bilan de volume de porosité sont restrictives car elles admettent : (i) la stabilité des caractéristiques morphologiques des fissures, et (ii) l'hypothèse d'isotropie lors des phénomènes de retrait gonflement.

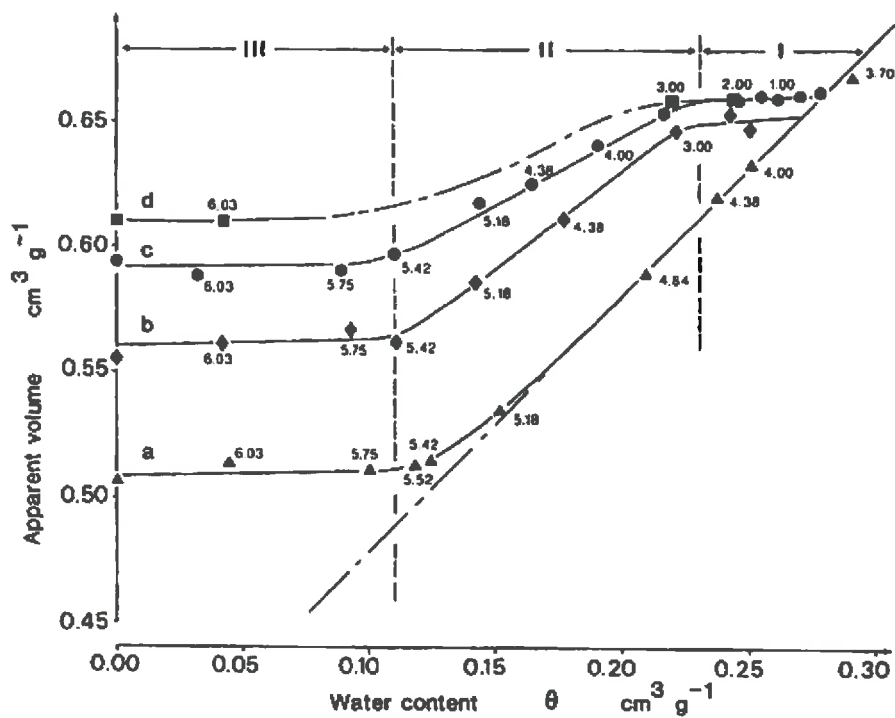


Figure I-7 : Courbe de retrait gonflement pour des échantillons de tailles différentes
 a) micrométriques, b) millimétriques, c) centimétriques, d) décimétriques.
 (d'après Bruand et Prost, 1987)

	Technique	Destructif	Dimension	Données quantitatives	
				sur la forme des pores	sur la connectivité
Directes	Mesure à la règle	non	2D	oui	non
	Profil cultural	oui	2D	non	non
	Analyse d'images	oui/non	2D/3D	oui	non/oui
Indirectes	Courbe de retrait	non	3D	oui	oui
	Porosimètre au mercure	non	3D	oui	oui

Tableau I-1 : Récapitulatif des techniques expérimentales de détermination de la structure.

Le tableau I-1 récapitule les méthodes de caractérisation expérimentales de la structure et des fissures abordées précédemment. Chaque technique présente des avantages et inconvénients, le choix de l'une d'elles pour caractériser la structure d'un sol doit se faire en fonction des objectifs de l'étude à mener. Les méthodes d'observation directes décrivent la géométrie de la structure telle qu'elle est perçue. Les méthodes d'observation indirectes sont invasives, et décrivent la structure par des grandeurs volumiques, de liquide ou de gaz, qui sont injectées et circulent dans le milieu. Dans le cas d'un réseau complexe, elles ne permettent cependant pas de distinguer explicitement les fissures parmi des pores ayant des origines variées.

2 Approche par la modélisation

Les modèles actuels concernant la dynamique d'un réseau de fissures peuvent être classés en deux familles : celle qui décrit le réseau de fissures uniquement d'un point de vue structural et celle qui le décrit par son évolution lors du fonctionnement hydrique. Dans le premier cas, le modèle peut ensuite être couplé à un modèle de transfert. Nous présentons successivement ces deux approches.

2.1. Modèle de structure

Les modèles qualifiés de modèles structuraux ont pour objectif de décrire, voire de prédire, l'évolution structurale du réseau de fissures. Ils sont basés sur différentes approches : géométrique, morphologique, mécanique.

2.1.1. Modélisation géométrique

Les modèles géométriques consistent à générer, dans un plan ou un volume, des points qui constituent des amorces de fissures puis à faire évoluer ces fissures selon des lois de propagation prédéfinies.

2.1.1.1. Géométrie aléatoire

Horgan et Young (2000) proposent un modèle de fissuration basé sur une propagation aléatoire des fissures à l'intérieur d'une enceinte bidimensionnelle (Fig. I-8). Les paramètres utilisés pour la description de la fissuration, (nombre de fissures à l'état initial, taille des agrégats à l'état final, élongation des fissures, taux d'attraction des fissures, angle maximum de changement de direction), permettent de reproduire un réseau de fissures. Cette modélisation ne tient néanmoins pas compte de certains paramètres morphologiques de fissuration tels que l'épaisseur et ne permet pas différents types de connexion. Toutes les fissures rejoignent une autre fissure ou le bord de l'enceinte orthogonalement, aucun bras mort ne peut être modélisé. Le réseau de fissures résultant présente une homogénéité qui ne correspond pas toujours à la réalité, probablement à cause de la base bidimensionnelle du modèle. En effet, la comparaison entre le réseau de fissures modélisé et un réseau naturel montre que ce type de modélisation ne tient pas compte de la présence d'hétérogénéités locales. Enfin, les propriétés des sols qui influent sur les mécanismes physiques de fissuration (typologies des sols, teneur en eau, etc...) ne sont pas explicitement prises en compte.

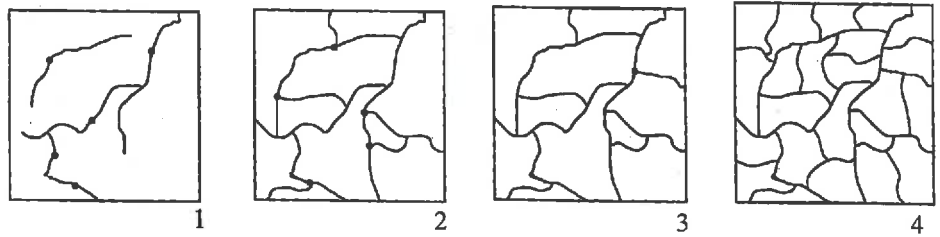


Figure I-8 : Quatre stades de formation des fissures 1) départ aléatoire des fissures, 2) propagation jusqu'aux bords de la boîte, 3) et 4) re-découpage des surfaces spécifiques (d'après Horgan et Young, 2000).

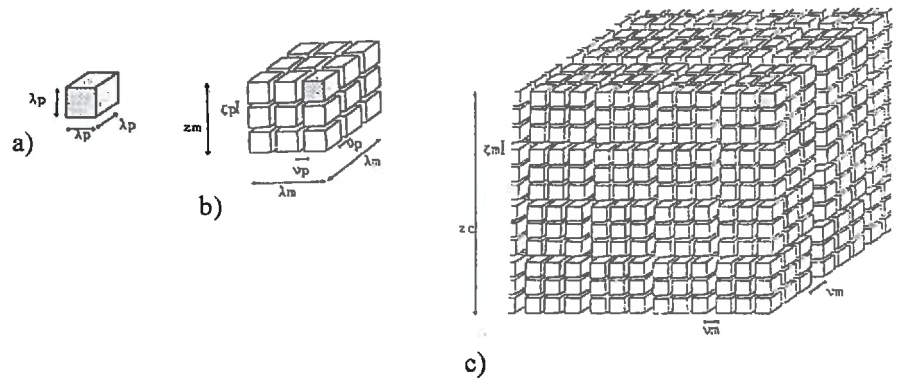


Figure I-9 : Modèle morphologique du sol et des phénomènes de fissuration : arrangement des éléments structuraux, a) peds, b) mottes, et c) couches. (d'après Hallaire, 1988b)

2.1.1.2. Géométrie fractale

La dimension fractale permet de quantifier la manière dont un objet remplit l'espace dans lequel il se trouve. La caractérisation d'un réseau de fissures en 2D est ainsi résumée par un chiffre unique. De nombreux auteurs ont relié la géométrie d'un sol fissuré à une dimension fractale au moyen d'analyse d'images en 2D (Young et Crawford, 1991 ; Moreau *et al.*, 1997 ; Preston *et al.*, 1997 ; Dathe *et al.*, 2001 ; Velde, 2001). Preston *et al.* (1997), par exemple, ont étudié la dimension fractale pour différentes textures de sols. Ils constatent qu'elle passe de 1,29 à 1,43 lorsque la teneur en argile augmente de 6,1% à 24,3%. Cette dimension fractale de la structure a ensuite été reliée à des propriétés hydrodynamiques (Rieu et Sposito, 1991 ; Van Damme, 1995 ; Gimenez *et al.*, 1997). Perrier (1994) modélise la relation pression-teneur en eau à partir d'une structure de sol construite par géométrie fractale. L'évaluation de la construction de la structure par dimension fractale, s'effectue par une validation indirecte en comparant les courbes de rétention en eau expérimentale et numérique. Il semble toutefois nécessaire de rester prudent car ces études portent sur une description 2D du milieu et induisent implicitement, à l'échelle d'observation réalisée, une homogénéisation de la structure résumée à une grandeur géométrique unique.

2.1.2. Modélisation morphologique

Hallaire (1988 a et b) propose une évolution morphologique 3D du réseau de fissures, à partir d'observations 2D de surface sur des échantillons décimétriques soumis à une expérimentation de dessiccation. Il distingue deux phases au cours du retrait. Une première phase de retrait, dite de fragmentation, qui est à l'origine de l'écartement des éléments structuraux par l'ouverture de multiples microfissures. Une seconde phase de retrait, qualifiée de prise en masse, qui est à l'origine d'un rapprochement entre les éléments structuraux élémentaires formant ainsi des éléments structuraux de tailles supérieures délimités par un réseau plus lâche de fissures (Fig.I-2). Le passage de la première phase à la seconde se fait pour un seuil de teneur en eau observé proche de 23%, dans un sol à 50 % d'argile.

Le modèle morphologique proposé repose sur ces observations. Le sol est modélisé comme un assemblage emboîté de peds, associés en mottes, regroupées en couches. Les hypothèses sont les suivantes : i) les peds (Fig.I-9a), mottes (Fig. I-9b), et couches de sol (Fig. I-9c) suivent une géométrie cubique, ii) le retrait isotropique et linéaire des éléments du sol est inversement proportionnel à l'humidité pondérale iii) les fissures intra-mottes et inter-mottes sont, soit verticales, soit horizontales, et constituent donc un réseau de fissures toujours orthogonal. Ces hypothèses simplificatrices de la géométrie induisent que la largeur des fissures est fixe, ne pouvant ainsi refléter des géométries plus complexes telles que les étranglements et les élargissements. Ces résultats de modélisation restent basés sur des observations bidimensionnelles qui sont, par la suite, généralisées à une organisation tridimensionnelle de la structure.

2.1.3. Modélisation mécanique

Hoffmann (2000) propose une modélisation 2D de la fissuration des sols qui relie les paramètres physiques des sols à des contraintes mécaniques. La fissuration est due au phénomène de dessiccation qui entraîne la contraction du sol et l'ouverture des fissures. La traduction physique en terme de modélisation passe par des expressions issues des théories mécaniques. Le sol est assimilé à un réseau de ressorts, et la modélisation des déformations est reliée à des paramètres mécaniques de contraction et relaxation. La résolution numérique utilise un maillage triangulaire, reliant ainsi chaque nœud à six voisins. Lorsque la tension entre deux nœuds est supérieure à un seuil défini par l'utilisateur, une fissure se crée et l'équilibre des forces du nouveau système se répercute sur les nœuds voisins. Un système itératif permet ainsi de reproduire la dynamique d'un réseau de fissures. Néanmoins cette modélisation a été appliquée et validée uniquement sur des échantillons remaniés de sols argileux correspondant à des couches fines, soit à une géométrie bidimensionnelle.

2.2. Modèle structure-fonctionnement

Les modèles de fissuration reliés à des caractéristiques hydrodynamiques décrivent les changements de structure par le biais des changements hydrodynamiques tels que la teneur en eau (Chertkov et Ravina, 2000), ou le potentiel (Greco, 2002). Bien que fondée sur la description de phénomènes hydrodynamiques, la fissuration est décrite au moyen des variables structurales : épaisseur moyenne de la fissure et volume moyen de fissure. Par exemple, à partir de travaux expérimentaux sur les phénomènes de retrait-gonflement dans les Vertisols de la Guadeloupe, Voltz et Cabidoche (1995) proposent un modèle permettant de relier le mouvement macroscopique vertical du sol à ses variations de teneur en eau : une couche de sol est modélisée par un assemblage de cubes homogènes de même volume. On distingue parmi eux deux types différents, ceux composés de deux phases 'solide et eau' et ceux composés d'une seule phase 'air'. Lors des processus de dessiccation (ou d'humectation) chaque cube subit un retrait (ou un gonflement). Ce modèle repose sur trois hypothèses, relatives à la géométrie du système : i) la variation des cubes est isotrope, ii) le retrait ou gonflement est normal, iii) la fissuration est uniquement verticale. L'accord entre données mesurées expérimentalement et simulées numériquement est satisfaisant. Cependant le modèle n'a été validé que dans le cas spécifique étudié sur des argiles à smectite de Guadeloupe en condition de dessèchement. De plus ce type de modélisation se base uniquement sur un bilan de volume et ne tient compte, ni de la distribution spatiale des fissures, ni de la géométrie réelle du réseau de fissures.

La modélisation de la structure d'un sol est actuellement, soit décrite par ses conséquences en termes de propriétés hydrodynamiques (courbe de rétention, de teneur en eau), soit par des modèles géométriques de structure. Ces derniers décrivent les phénomènes de fissurations et de changement de structure sous couvert d'hypothèses souvent simplificatrices (retrait isotrope, géométrie cubique). La construction d'un réseau de fissures résulte de phénomènes mécaniques et physiques complexes qui n'ont, à l'heure actuelle, pas encore abouti à une modélisation sur une base physique. Néanmoins, Hoffmann (2000) se rapproche d'une modélisation la plus réaliste : en utilisant des concepts mécaniques pour décrire la fissuration, il tient compte de l'évolution du milieu au moyen d'un calcul itératif.

3. Conclusion : Synthèse et démarche adoptée

Les travaux concernant la fissuration des sols ont été menés aussi bien par l'expérimentation que par la modélisation. Nous avons vu que les modèles décrivant le phénomène de fissuration se basent sur des hypothèses fortes quant à la géométrie du réseau de fissures. En l'absence d'une connaissance *a priori* des phénomènes à l'origine de la fissuration dans le milieu étudié, il nous semble préférable de mener **une étude expérimentale**, basée sur la description de l'évolution du réseau de fissures.

Afin de contrôler l'ensemble des paramètres expérimentaux qui pourrait influencer sur la mesure (et que nous détaillerons au chapitre suivant), nous avons choisi de mener une **étude au laboratoire**.

Nous devons donc déterminer en premier le **volume élémentaire représentatif (VER)** du système à étudier. En effet, la recherche du VER, préalable à toute étude expérimentale doit permettre de répondre aux deux questions suivantes : quelle est la taille de l'objet observé ? et par conséquent, quelle doit être la taille de l'échantillon pour qu'il soit représentatif de l'objet d'étude ? Le VER correspond à une échelle spatiale d'observation sur laquelle la propriété étudiée peut être considérée comme invariante. Bouma (1990) préconise lors d'études sur les flux préférentiels, que la taille de l'échantillon soit fonction des paramètres morphologiques de la structure des horizons de sol. Guéguen *et al.* (1996) soulignent également la dépendance entre la mesure de perméabilité d'un milieu et la taille de l'échantillon. Vogel *et al.* (2002) montrent, dans une étude conduite sur la géométrie tri-dimensionnelle de la structure de sols, que la densité de volume de pore ainsi que le coefficient de simulation gazeuse augmentent lorsque la taille de l'échantillon augmente. Ainsi aucune détermination du VER ne peut être attribuée. Ils préconisent une approche par organisation structurale allant de la porosité fine à des structures plus importantes telles que les galeries de vers de terre.

Dans le cadre de notre étude sur la fissuration des sols, il faut prendre en compte l'évolution de la taille du réseau de fissures dans le sol au cours du temps. Ainsi la détermination du VER s'avère délicate. Cette évolution du système est due aux effets de retrait-gonflement dépendant du type de sol et de la dynamique des variations de teneurs en eau, variables difficilement généralisables à d'autres contextes. Ainsi, la mise en place d'un protocole expérimental de suivi de l'évolution de la fissure doit être adaptée aux variations du volume élémentaire dans le temps et donc présenter une certaine souplesse sur le volume de sol à analyser. Néanmoins, au regard de la texture limoneuse du sol que nous étudions, nous avons fixé la taille des échantillons d'étude à l'échelle décimétrique.

Rappelons que l'hétérogénéité de la structure du sol implique **une description tridimensionnelle**, donc l'acquisition de données expérimentales dans les trois dimensions. Vogel et Kretzschmar, (1996) soulignent que la compréhension des transferts d'eau dans le sol nécessite de connaître les propriétés 3D topologiques telles que la connectivité de la structure du sol. Il semble donc inopportun de décrire la structure d'un sol uniquement au moyen de paramètres morphologiques bidimensionnels. Outre la caractérisation 3D, il faut également tenir compte de

l'évolution temporelle d'un réseau de fissures en fonction des variations de la teneur en eau du sol. L'acquisition de données expérimentales nécessite donc l'utilisation **d'une méthode non destructive**.

Nous avons choisi au cours de ce travail de thèse de nous focaliser sur la caractérisation de la fissuration par le biais d'une méthode expérimentale permettant une acquisition tridimensionnelle et non destructive. L'utilisation **d'outils géophysiques** est en accord avec ces contraintes méthodologiques. Nous nous sommes tournés vers l'adaptation de la méthode de la résistivité électrique pour mener à bien notre étude.

CHAPITRE II

**Apports des méthodes utilisant la résistivité électrique :
Théorie mise en œuvre et exemples d'applications en Géosciences.**

La démarche présentée dans le précédent chapitre a montré l'intérêt d'une méthode expérimentale 3D et non destructive permettant un suivi temporel de l'évolution d'un réseau de fissures. Ces contraintes méthodologiques nous ont conduits vers l'utilisation d'une méthode géophysique et plus spécifiquement celle basée sur la mesure de la résistivité électrique. Dans ce chapitre, nous présenterons une revue bibliographique des travaux ayant utilisé la résistivité électrique pour l'étude des sols. Ce chapitre est rédigé sous la forme d'un article de synthèse qui a été soumis à la revue Soil and Tillage Research.

Cette présentation définit l'utilisation et le domaine d'investigation de cette méthode depuis les premières études par les frères Schlumberger en 1912 jusqu'à aujourd'hui. Un résumé en français, donne les caractéristiques, les atouts et les limites de cette méthode.

Résumé en français

La mesure de la résistivité électrique ρ est une méthode non-destructive d'observation indirecte du sol. C'est la propriété physique qui détermine la capacité du milieu à laisser passer le courant électrique. Elle est exprimée en Ohm.mètre ($\Omega.m$), et correspond à l'inverse de la conductivité σ exprimée en Siemens/Mètre ($S.m^{-1}$). La mesure nécessite l'injection d'un courant électrique artificiel par le biais de deux électrodes d'injection A et B. La mesure du potentiel résultant s'effectue à l'aide de deux autres électrodes conventionnellement notées M et N. Le dispositif de mesure est placé à la surface et, selon la configuration d'électrodes, des acquisitions 1D, 2D ou 3D peuvent être réalisées. La mesure effectuée correspond à la résistivité apparente du milieu et fournit des informations dites « qualitatives ». Lorsque ce milieu est homogène, la résistivité est équivalente à la résistivité « vraie » ; dans le cas contraire une inversion des données de résistivité apparente est nécessaire. La résistivité dite « inversée » fournit une information quantitative.

Une acquisition électrique correspond à une image du sol à un instant « t » ; ainsi une succession d'acquisitions à « t+ Δt » permet d'effectuer un suivi temporel.

La résistivité est fonction des propriétés internes du milieu prospecté. Elle est sensible à plusieurs paramètres :

- la nature et l'arrangement des constituants solides,
- la teneur en eau,
- la composition et concentration en solutés,
- la température.

On retrouve dans la littérature différents ordres de grandeur en fonction du type de formation du sol : i) de 1 à quelques dizaines d'Ohm.m pour les argiles et les marnes, ii) de quelques dizaines à quelques centaines d'Ohm.m pour les sables et grès mameux, iii) d'une centaine à plusieurs milliers d'Ohm.m pour les calcaires et roches éruptives. Plusieurs études portent ainsi sur la caractérisation et cartographie des formations du sous-sol.

La teneur en eau influence également la mesure de résistivité électrique : plus le milieu est saturé plus il devient conducteur. Différents auteurs ont proposé des formalismes mathématiques, reliant la résistivité à la teneur en eau. Cependant ces relations ne sont pas toujours généralisables et applicables à tous types de sols (variations de la texture et de la structure). Il est donc recommandé de mener, en parallèle à une étude au champ, une étude en laboratoire afin d'établir cette relation pour chaque type de formation prospectée.

La qualité de l'électrolyte est un paramètre qui influence la mesure. Plus la concentration en ions présents dans la solution est importante plus la résistivité diminue. La sensibilité de la mesure à ce paramètre est à l'origine de nombreux travaux visant à délimiter et suivre dans l'espace et le temps des zones de contamination (eau salée, lixiviats de décharge, épandage chimique...).

La température joue également un rôle : plus elle augmente plus la résistivité diminue. Il est donc important de pouvoir la quantifier afin de corriger, si nécessaire, les mesures.

La caractérisation d'un milieu par la méthode de la résistivité électrique présente plusieurs avantages :

- i) elle permet d'acquérir des données tridimensionnelles,
- ii) l'échelle de prospection peut varier de quelques centimètres à plusieurs mètres,
- iii) les mesures sont adaptées à des séquences entièrement automatisées permettant des acquisitions rapides,
- iv) elle est sensible aux propriétés physiques du sol.

Les limites de la méthode sont liées à :

- i) l'instrumentation et à la technique de la mesure :
 - un bon contact sol-électrodes est nécessaire,
 - la réduction du bruit sur la mesure dû à des sources externes (électrodes impolarisables) doit être recherchée,
 - les temps d'acquisition de la série de mesures sont encore importants au regard de phénomènes physiques dynamiques qui peuvent être temporairement très rapides, tels que les transferts d'eau,
- ii) la calibration, indispensable pour estimer les propriétés in situ,
- iii) la solution non unique dans la résolution du calcul de la résistivité inversée.

Electrical resistivity survey in soil science: a review¹

Summary

Electrical resistivity exhibits a wide range of values in soils. Electrical prospecting is thus a suitable routine technique for soil surveys, permitting spatial and temporal monitoring. It is a non-destructive method and can be performed in one, two or three dimensions and at different scales. It can be used to obtain very clear information about water content and clay content variations. In more complex media or for more details about the structure, measurements should then also be performed and combined with other observation methods. Moreover, before starting a field survey, it seems necessary to get an idea of the expected values and contrasts in electrical resistivity. For that purpose, the recommendation is to perform preliminary laboratory calibration, and direct modelling of apparent resistivity. Recently it has been used in agronomical contexts for evaluating soil compaction and mapping soil thickness or bedrock depth.

1. Introduction

The changes wrought on soil by intensive agricultural production are variable in space and in time. It leads to have a continuous and precise spatially and temporal follow of the soil physical and chemical properties. Geophysical methods have been applied to soil sciences for a considerable period. The general principle of geophysical exploration is to non-intrusively collect data on the medium under investigation (Scollar *et al.*, 1990). Among such methods, those based on the electric properties seem particularly promising.

Indeed, the flux of electrical charges through materials permits conductor materials like metal or electrolytes where the conductivity is great, to be distinguished from insulating materials like air, ice and plastics, where it is small. Among the latter, soil materials exhibit intermediate electrical properties depending on their physical and chemical properties (texture, salinity, or water content). Schlumberger in 1912 cited by Meyer de Stadelhofen (1991) introduced the idea of using electrical resistivity measurements to study subsurface rock bodies. This method was first adopted in geology by oil companies searching for petroleum reservoirs and delineating geological formations. In soil science, Bevan (2000) reported that the first known equipotential map was compiled by Malamphy in 1938 for archaeological research at the site of Williamsburg in USA. Since that early study, the interest in subsurface soil prospecting by electrical prospecting has steadily increased.

In this paper, we review the literature dealing with the use of electrical resistivity when applied to soil. We first present the basic concept of the method and the different array devices. Then, we discuss the sensitivity of the electrical measurements to the soil

¹ Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G. soumis en novembre 2003, à Soil and Tillage Research.

properties. Finally, the advantages and limitations of electrical resistivity in soil survey and the application to agricultural management are discussed.

2. Theory and basic principles

The purpose of electrical resistivity surveys is to determine the subsurface resistivity distribution using measurements at the soil surface. Artificially-generated electric currents are supplied to the soil and the resulting potential differences are measured at the surface. Potential difference patterns provide information on the form and electrical properties of subsurface inhomogeneities (Kearey *et al.*, 2002). The greater the electrical contrast between the soil matrix and heterogeneity, the easier is the detection. Electrical resistivity of the soil can be considered as a proxy for the variability of soil physical properties (Banton *et al.*, 1997). The current flow line distributions depend on the medium under investigation; they are concentrated in conductive volumes.

The electrical resistivity of the medium is defined by the Ohm's law

$$\sigma = J/E \quad (\text{II-1})$$

with σ the electrical conductivity (Sm^{-1}), J being the current density (A/m^2), and E is the electrical field (V/m).

$$\sigma = (I/S) / (V/L) \quad (\text{II-2})$$

The electrical resistance of the cylindrical body R (Ω),

$$R = V/I \quad (\text{II-3})$$

with V being the potential (V) and I is the current (A).

By combining equations (II-2) and (II-3), we obtain:

$$\sigma = L/(R \times S) \quad (\text{II-4})$$

Electrical measurement is also commonly related to a conductivity value σ (Sm^{-1}), equal to the reciprocal of the soil resistivity. Thus:

$$\sigma = 1/\rho \quad (\text{II-5})$$

Then the resistivity ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) is of this cylindrical body is expressed as follows:

$$\rho = R \times (S/L) \quad (\text{II-6})$$

with R being the electrical resistance (Ω), L the length of the cylinder (m) and S its section (m^2).

In homogeneous and isotropic half-space, electrical equipotentials are hemispherical when the current electrode is located at the soil surface (fig. II-1). So J has to be calculated for all the radial directions with:

$$J = I/(2\pi r^2) \quad (\text{II-7})$$

where $2\pi r^2$ is the surface of a hemispherical sphere of radius r. Applying equation (II-4), V can be expressed as follows:

$$V = (\rho I)/(2\pi r) \quad (\text{II-8})$$

Measurement of electrical resistivity usually requires four electrodes: two electrodes called A and B that are used in order to inject the current (“current electrodes”), and two other electrodes called M and N that are used in order to record the resulting potential difference (“potential electrodes”). The potential difference ΔV measured between the electrodes M and N is given by the equation:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (\text{II-9})$$

where AM, BM, AN, and BN represent the geometrical distance between the electrodes A and M, B and M, A and N, and B and N, respectively. The electrical resistivity is then calculated using:

$$\rho = \left[\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right] \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{II-10})$$

where K is a geometrical coefficient that depends on the arrangement of the four electrodes A, B, M and N.

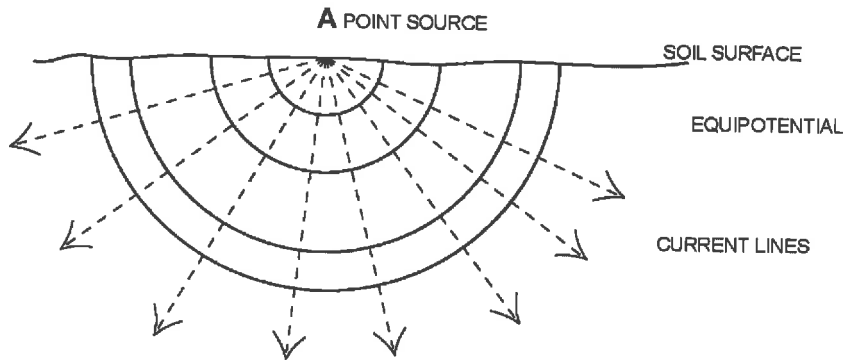


Figure II-1: Distribution of the current flow in a homogeneous soil.

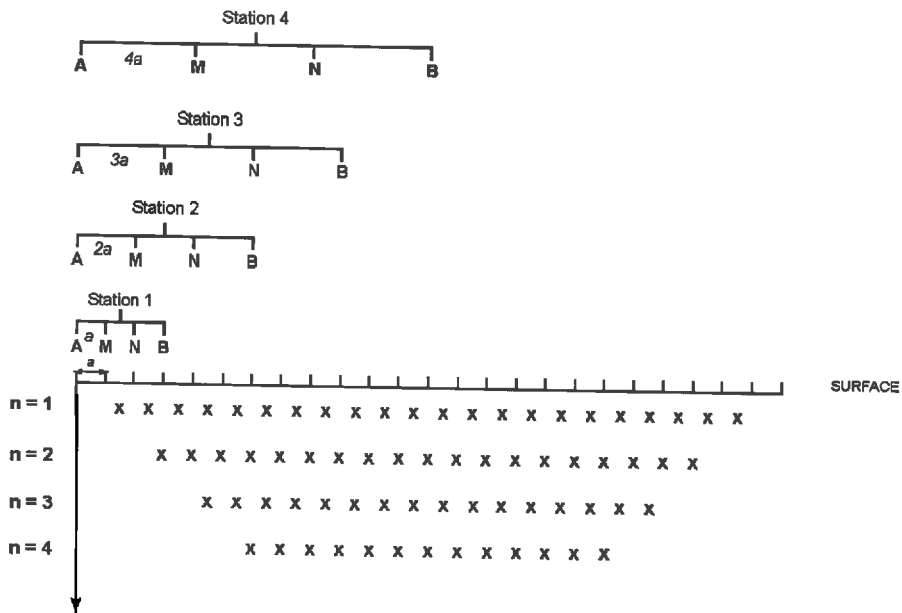


Figure II-2: Establishment of a 2D electrical resistivity pseudo-section.

3. One-, two-and three-dimensional surveys

3.1. One-Dimensional survey

One dimensional arrays using four-electrodes cells are commonly used in the laboratory for electrical resistivity calibration (Rhoades and van Schilfgaarde, 1976a), and in the field for vertical electrical sounding (VES). The latter consists of electrical measurements where distances between the electrodes are successively increased. At each step, the depth and volume of soil investigated increases and the measurement displays the variation of soil with depth. For VES data interpretation, it is usually assumed that the subsurface consists of several horizontal layers. The subsurface resistivity solely changes with depth, and thus does not change in the horizontal direction (Loke, 2001). This method gave satisfying results in geology when this assumption could be considered as a reasonable approximation of reality (Pozdnyakova *et al.*, 2001). Bottraud *et al.* (1984a) emphasised the interest in soil science to record information about the vertical discontinuity associated with different soil horizons. For more complex formations with lateral changes over short distances, 2D and 3D surveys display more realistic results.

3.2. Two-Dimensional survey

Two-dimensional multi-electrode arrays (electrical panel) provide a vertical pseudo-section. The current and potential electrodes are maintained at a regular fixed distance from each other and are progressively moved along a line at the soil surface. At each step, one measurement is recorded and all the measurements at this first inter-electrode spacing gives a profile of resistivity values. The inter-electrode spacing is increased then by a factor $n=2$, and a second measurement line is done. This process (increasing the factor n) is repeated until the maximum spacing between electrodes is reached. One can notice that the larger the n -values, the greater are the depths of investigation (fig. II-2). As the distribution of the current also depends on the resistivity contrasts of the medium, the depth of investigation deduced from the spacing is called the "pseudo-depth". The data are then arranged in a 2D "pseudo-section" plot that gives a simultaneous display of both horizontal and vertical variations in resistivity (Edwards, 1977). The conventional graphic representation, introduced by Hallof (1957), puts each measured value at the intersection of two 45-degree lines through the centres of the quadripole. Each horizontal line is then associated with a specific value of n , and gives a pseudo-depth of investigation. Depending on the respective position of the potential electrodes and on the current electrodes, several array configurations can be defined: Wenner, Wenner-Schlumberger Dipole-Dipole or Pole-Pole arrays (Table II-1). Depending on the array configuration, the geometrical factor K differs; Seaton and Burbey (2002) reported that the array configuration has a substantial influence on the resolution, sensitivity and depth of investigation. Table II-2 summarizes for different 2D array configurations: i) the sensitivity of the array to horizontal and vertical heterogeneities, ii) the depth of investigation, iii) the horizontal data coverage and iv) the signal strength (Loke, 2001;

Griffiths and Barker, 1993). The different orientations of heterogeneity can be vertical for heterogeneities such as dykes, cavities, preferential flow, or horizontal such as sedimentary layers. The depth of investigation is determined for homogeneous ground, but gives an a priori indication of the depth of investigation in heterogeneous ground. The horizontal data coverage is related to the electrode array configuration. The signal strength is related to the joint signal-response of the measurement. It is inversely proportional to the geometric factor K and is an important factor if the survey is carried out in areas with high background noise. All the different array types have specific advantages and limitations. The choice of the array configuration then depends on the type of heterogeneity to be mapped and also on the background noise level; the characteristics of an array have to be taken into account. Hesse *et al.* (1986) emphasized that in specific cases the use of multiple configurations can improve the chances of reading different features of the subsoil and leads to a better interpretation.

		Electrodes array	K
2D	Wenner		$2\pi a$
	Wenner-Schlumberger		$\pi n(n+1)a$
	Dipole-Dipole		$\pi n(n+1)(n+2)a$
	Pole-Pole		$2\pi a$
3D	Square		$\frac{2\pi a}{2 - \sqrt{2}}$

Table II-1 : Example of 2D in-line electrodes array panel, and 3D electrode device : A and B current electrodes, M and N potential electrodes, A: spacing between electrodes used in a particular measurement, n: spacing factor (integer values 1-6), x: distance to "infinite electrodes" in pole-pole array.

	Wenner	Wenner-Schlumberger	Dipole-Dipole	Pole-Pole
Sensitivity of the array Horizontal structures	++++	++	+	++
Sensitivity of the array Vertical structures	+	++	+++	++
Depth of investigation	+	++	+++	++++
Horizontal data coverage	+	++	+++	++++
Signal Strength	++++	+++	+	++

Table II-2: Characteristics of different 2D array configuration types.

3.3. Three-Dimensional survey

Two methods can be used to obtain a three-dimensional electrical resistivity acquisition.

The first method consists of building a three-dimensional electrical picture by the reconstruction of a two-dimensional network of parallel pseudo-sections (al Hagrey *et al.*, 1999; Chambers *et al.*, 1999; Oglivy *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2001; Chambers *et al.*, 2002). An accurate three-dimensional electrical picture is thus recorded if electrical anomalies are preferentially oriented and if the in-line measurement electrodes are perpendicular to the orientation of the anomalies. Chambers *et al.* (2002) underlined that electrical surveys using co-linear arrays carried out on sites with heterogeneous subsurface conditions should include measurements using electrode configurations oriented in at least two directions perpendicular to one another. Zhou *et al.* (2001) mapped 3D electrical resistivity with several 2D parallel pseudo-sections along the X, Y, XY and -XY directions, enabling the study of an anisotropic media.

The second method consists in using a square array of four electrodes (table II-1). Habberjam and Watkins (1967) showed that three-dimensional electrical resistivity survey provided a measure of resistivity less orientation-dependent than that given by an in-line array. As underlined by Senos Matias (2002), the data were orientationally stable, so there was no need for prior knowledge of the electrical heterogeneity orientation. He recommended then to use this array over anisotropic ground. Detection and characterisation of cracking in concrete with the square array quadripole was investigated by Lataste *et al.* (2002). Apparent resistivity measurement and the establishment of an anisotropic index provided a useful indication of the presence and localization of cracks. The measured apparent resistivity changed with the orientation of the square array; indeed the square device is more reliable linked to anisotropy than more commonly used devices, i.e. Schlumberger or Wenner array (Lane *et al.*, 1995). To avoid preferential directions in data recording that would be introduced by the linear electrode layout, Brunner *et al.* (1999) measured electrical resistivity by the way of a pole-pole electrode array arranged in concentric circles at the surface. Panissod *et al.* (1997) underlined the need for research into new array geometries describing better the heterogeneities in order to optimize the apparent resistivity image before data interpretation. Through the combined results of theoretical studies and of field surveys, one of their conclusions pointed out the advantage of using circular array configuration in the detection of heterogeneities in an archaeological context. Apparent anisotropy effects also provide useful information related to the direction of electrical anomalies for 3D electrical survey (Habberjam and Watkins, 1967; Senos Matias, 2002), or in-line arrays (Meheni *et al.*, 1996).

4. Recent technological improvements

Electrical resistivity prospecting has recently been improved with respect to measurement time. The improvement of computer-controlled multichannel resistivity-meters using multielectrode arrays has led to an important development of electrical imaging. Switching units allow any combination of four electrodes to be connected to the resistivity-meter at any time. The electrical data proceeding is then fully automated and acquisition is rapid (Binley *et al.*, 1996). These technological improvements in data acquisition allow efficient and complex arrays to be used, facilitating research that was inconceivable using manual methods in 2D and 3D electrical prospecting.

Besides these 1D, 2D and 3D methods that allow the characterisation of electrical resistivity at different scales but on relatively few points, some specific experiments have been developed for surveys on large areas and with continuous measurements. Hesse *et al.* (1986) introduced a new electrical device called the 'Résistivimètre Attelé à Enregistrement AUTomatique' ('RATEAU' the English equivalent terms is *harrow*), where the improvement in data capture time permits large scale soil prospecting (from 1 to 10 ha in a day). The use of this device Bourennane *et al.* (1998) allows the representation of the three-dimensional organisation of the near surface materials, after interpreting the electrical resistivity data. Christensen and Sorensen (1998) introduced a "Pulled Array Continuous Electrical Profiling" (PACEP) for spatially dense measurements over large areas. In this case, the electrode array is towed across the field behind a small vehicle. Panissod *et al.* (1997) used eight rolling electrodes corresponding to three depths of investigation. This system named Multidepth Continuous Electrical Profiling (MUCEP) is shown in figure II-3. It can be towed by a tractor or a quad, the positioning of the data points being done by a differential GPS system and with an on-board Doppler radar system. If we consider geophysical techniques in soil mapping, the application of a mobile electrical quadripole allows a considerable increase in the size of potentially surveyed areas, whilst maintaining a high spatial resolution.

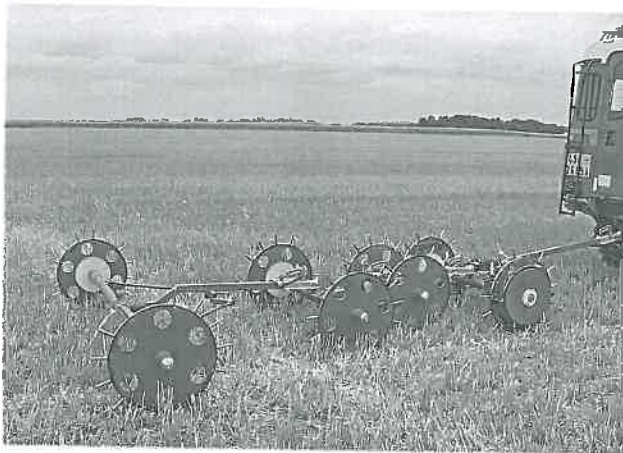


Figure II-3: MUCEP "Multi Continuous Electrical Profiling".

5. Interpretation of electrical resistivity variation

5.1. Apparent resistivity

When the soil is uniform, the resistivity calculated using equation (II-8) is constant and independent of both the electrode spacing and surface location. When heterogeneities exist in the subsurface, the resistivity varies according to the relative position of the electrodes (Bertrand, 1967). The calculated resistivity is then known as the “apparent” resistivity. The latter enables a qualitative estimation of the electrical parameters of the medium (Meheni *et al.*, 1996) but does not give the true resistivity and shapes of the anomalies. Each data acquisition corresponds to a volumetric measurement and constitutes qualitative information that is plotted against a pseudo-depth. Thus the apparent resistivity values in a pseudo-section distort the real subsurface model picture and are closely dependent on the type of electrode array configuration (Andrews *et al.*, 1995). For a given study, the resulting apparent resistivity distribution depends on the sensitivity of the electrode array. For example, a vertical resistant heterogeneity in a homogeneous medium shows a pseudo-section with a reversed V-shape of greater resistivity values enclosing lower resistivity values when recorded by a dipole-dipole array. Conversely, when the same sample is measured using a Wenner array, the pseudo-section display a reversed V-shape with smaller resistivity values enclosing higher resistivity values at the location of the resistant body (figure II-4). Thus comparisons between apparent resistivity pseudo-sections are possible only for a given electrode array configuration. In order to restrict misinterpretation due to graphic representation, Lile *et al.* (1994) proposed to move the data points according to an *a priori* knowledge of the sounding body, while Ritz *et al.* (1999) proposed using a filtering process. Nevertheless, comparisons between surveys done by different arrays are feasible if we are able to assign a “real” resistivity value to each point in the survey area. We can then calculate this “real” resistivity value by means of an inversion program.

5.2. Interpreted resistivity

To obtain quantitative information on resistivity distribution, we require a mathematical inversion of the apparent resistivity measurement into interpreted resistivity. The inversion consists of converting the volumetric apparent resistivity into inverted resistivity data that represents the resistivity at the effective depth of investigation, as opposed to the pseudo-depth. This operation requires an assessment of the effective depth of investigation corresponding to the measurement, and then the resolving of the inversion process.

5.2.1. Effective depth evaluation

The differences of depth investigation with the different array configurations is related to the a and n values (table II-1). By increasing the a and n factors, the effective

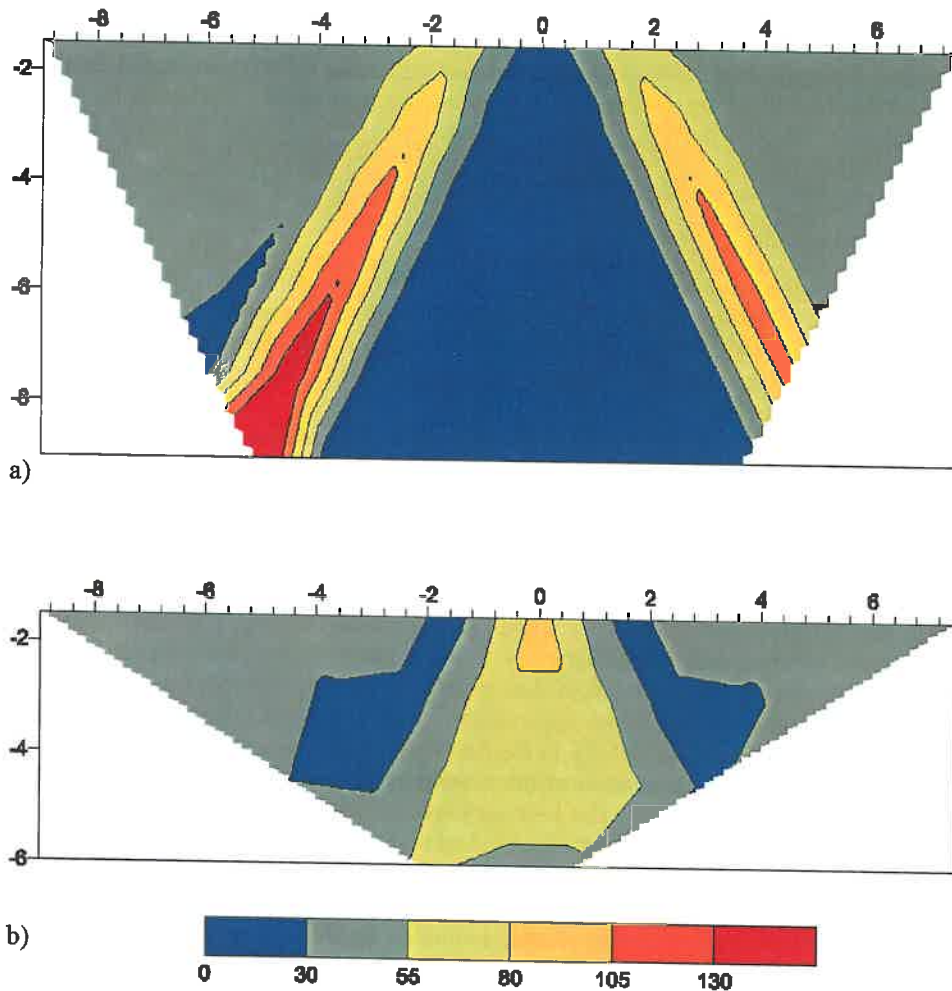


Figure II-4: Influence of the array device in electrical resistivity prospecting, simulation of a apparent resistivity pseudo-section over a vertical resistant structure of 4 mm width and 40 mm length located at $x = 0$ in an homogeneous medium of $40 \Omega.m$, a) Dipole-Dipole array, b) Wenner array.

investigation depth is increased. It is commonly assumed that the depth of investigation corresponds to the smallest distances between the A and M electrodes. So the effective depth of investigation depends on the relative positions of both current and potential electrodes. However, the effective investigation depth is also related to subsurface layering, as a conductive surface layer will reduce the investigation depth. For these reasons, there are as many investigation depths as there are possible layered structures.

5.2.2. Inversion Process

Numerous inversion modelling algorithms based on different numerical solutions have been developed, including finite-difference approximation (Dey and Morrison, 1979; Oldenburg and Li, 1994; Loke and Barker, 1996) and moment-method modelling, applied first to electromagnetic survey (Tabbagh, 1985) and then to electrical prospecting (Dabas *et al.*, 1994).

The software Res2Dinv (Loke and Barker, 1996) has been widely used to inverse data from subsurface electrical surveys investigating: heterogeneity delineation (Bateney, 2001; Seaton and Burbey, 2002), solute transfer (Acworth, 1999; Yaramanci, 2000; Depountis *et al.*, 2001), and waste contamination (Bernstone *et al.*, 1998). Res2Dinv has the advantage of being an automated inversion software. It inverts apparent resistivity measurements very quickly and without any requirement of a subsurface model. The 2D model consists of a number of rectangular blocks. These blocks are automatically generated by the program with the constraint that the number of the blocks does not exceed the number of data point. The determination of the effective depth of investigation is set to be approximately equal to the ratio $a/2$, based on experimental results (Edwards, 1977). In the first iteration, the quasi-Newton inversion is based on an analytical calculation of the sensitivity matrix (Jacobian matrix) for a homogeneous subsurface model. The homogeneous subsurface model is the simplest assumption that can be used as starting of calculation. For subsequent iterations, the sensitivity matrix is used for updating the model resistivity. This method reduces considerably the computer time needed for calculation. The iterative optimization method is performed until the differences, estimated by the root mean square error (RMSE) between the measured and calculated apparent resistivity, is the smallest. The size of the iteration cells increase by 10% per layer, which along with increasing layer thickness reduces the resolution with depth. Dahlin and Loke (1998) reported that this approach works well for small resistivity contrast but not necessarily for greater resistivity contrasts. Smooth inversion gives some good results in area with moderate resistivity contrasts and complexity, and often provide an approximate guide to the true geometry of the subsurface organisation (Olayinka and Yaramanci, 2000). Finally, one major advantage of this software is the fast processing.

6. Variation of electrical resistivity as a function of soil properties

The electrical resistivity is a function of a number of soil properties, including the nature of the solid constituents (particle size distribution, mineralogy), arrangement of voids (porosity, pore size distribution, connectivity), degree of water saturation (water content), electrical resistivity of the fluid (solute concentration) and temperature. The air medium is an insulator (i.e. infinitively resistant), the water solution resistivity is a function of the ionic concentration, and the resistivity of the solid grains is related to the electrical charges density at the surface of the constituents. All parameters affect the electrical resistivity, but in different ways and to different extents. Electrical resistivity experiments have been performed to establish relationships between the electrical resistivity and each of these soil characteristics.

6.1. Nature and arrangement of solid constituents

In the context of soil mapping, electrical resistivity exhibits a large range of values from 1 $\Omega\cdot\text{m}$ for saline soil to several $10^3 \Omega\cdot\text{m}$ for dry soil overlaying crystalline rocks. The electrical conductivity is related to the particle size distribution by the electrical charge density at the surface of the solid constituents. In clay soil, the electrical charges located at the surface of the clay particles lead to greater electrical conductivity than in coarse textured soils because of the magnitude of the specific surface (Fukue *et al.*, 1999) The electrical resistivity recorded by Giao *et al.* (2003) on 25 clay samples collected worldwide ranged from 1 to 12 $\Omega\cdot\text{m}$. Lamotte *et al.* (1994) studied two cultivated sandy soils of very similar composition but significantly different electrical resistivity. In the sandy soil showing the greatest resistivity, few clay micro-aggregates were juxtaposed to the sand grains, while in the other soil the sand grains were coated and bridged by clay leading to a great continuity of the clay phase.

The geometry of the pores (void distribution and form) determines the proportion of air and water according to the water potential. Robain *et al.* (1996) linked resistivity variations with the structure of the pedological materials, identifying that high and low resistivity values were related to macro- and meso-porosity respectively. This enabled the detection of badger burrows by Butler *et al.* (1994) and the study of their network. This also enabled the study of the crack opening at the centimetric scale by Samouëlian *et al.* (2003).

6.2. Water content

Electrical current in soils is mainly electrolytic, i.e. based on the displacement of ions in pore water, and is therefore greater with the presence of dissolved salts. Thus electrical current in soils depends on the amount of water in the pores and on its quality. In most studies concerning the water content, the electrical conductivity of the solution is assumed to remain relatively constant to be neglected against its variation related to water content variation.

Prior to field surveys, preliminary calibration of the volumetric water content related to the electrical resistivity is usually performed in the laboratory. Figure II-5 shows examples of laboratory calibration between the electrical resistivity and the volumetric water content (McCarter, 1984; Fukue *et al.*, 1999; Michot *et al.*, 2000). The electrical resistivity decreases when the water content increases. It can also be seen that for water content < 15 %, the electrical resistivity rapidly decreases with increasing water content.

An empirical linear relationship between the resistivity and the water content was proposed by (Gupta and Hanks, 1972; Goyal *et al.*, 1996) as follows:

$$\rho_{(z,t)} = a + b\theta_{(z,t)} \quad (\text{II-11})$$

where a and b are empirical constants implicitly containing the soil and water characteristics (i.e. porosity, temperature, salinity) and assumed to be invariant with time. Temporal variations in the soil moisture profile are estimated by using vertical electrical resistivity sounding data acquired at different times.

The relationship between the electrical resistivity (or its reciprocal, the conductivity, expressed in siemens/m noted mho/m) and the water content has also been studied by authors mainly in the field of petroleum research. Archie (1942) proposed an empirical relationship based on laboratory measurements of clean sandstone samples. Electrical conductivity was related to pore water conductivity and expressed as follows:

$$\rho_b = a\rho_w\phi^{-m}S^{-n} \quad (\text{II-12})$$

where ρ_b is the bulk resistivity ($\Omega.m$), ρ_w , the pore-water resistivity ($\Omega.m$), ϕ the porosity, S the saturation degree, a a lithologic factor ranging from 0.6 to 2, m a cementation factor related to the properties of the porous medium and ranging from 1.3 to 2.2, and n a parameter related to the saturation degree. The latter three parameters are empirical and determined experimentally. Equation (II-12) was established to be valid for medium to coarse-grained soils. It assumes that the characteristic of the solid phase does not influence the electrical current conduction. Frohlich and Parke (1989) reported that the great practical success of Archie's law was related to the assumed validity of the determined constants on a large range of soils except for clayey soil. Indeed, this relationship was successfully used for water content estimation in numerous studies (Zhou, *et al.*, 2001; Binley *et al.*, 2002).

For fine-textured soils, the electrical resistivity of the solid matrix cannot be neglected. As discussed above, the electrical current in clay is not only conducted by the pore water but also by the solid matrix, due to the electrical double layer at the clay particle surface. A new term describing the solid matrix resistivity was introduced by Rhoades *et al.* (1976b) with the following relationship:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_w} \times (a\theta^2 + b\theta) + \frac{1}{\rho_s} \quad (\text{II-13})$$

where ρ_s and ρ_w represent the solid matrix and the pore-water resistivity respectively, a and b are coefficients depending on the solid phase characteristics, related to the

texture and mineralogy, and θ is the volumetric water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). By using equation (II-13), Kalinski and Kelly (1993) predicted the volumetric water content with a standard error of 0.009 for water contents ranging from 0.20 to 0.50 in soil containing 20 % clay.

6.3. Pore fluid composition

As underlined above, the electrical conductivity is related to the mobility of the ions present in the fluid filling the pores. Conductivity depends on the concentration and the viscosity of the water (Scollar *et al.*, 1990). The estimation of the water content by resistivity measurements requires a knowledge of the concentration of dissolved ions. Early studies dealing with the determination of the soil water content were confronted with the problem of estimating the soil salinity variation (Rhoades *et al.*, 1977). Since salts have to be in an ionized form to conduct the current, the amount of soil water present governs the available paths of conduction. Shea and Luthin (1961) found a close linear relationship between electrical resistivity and salinity for a soil water content ranging from saturation to -3kPa water potential. Thus, estimation of the soil salinity by electrical resistivity requires measurements made at the same water content. The soil salinity is usually measured at saturation, as this is considered a standardized condition. Kalinski and Kelly (1993) estimated the volumetric water content using equation (II-13) and with pore solution conductivities (ρ_w) of 1, 2 and 3 mmho/cm. They found that at a given water content, the electrical resistivity decreases when the water conductivity increases (Figure II-6). Moreover, the different ions present in the solution (H^+ , OH^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Cl^- , ...) do not affect the conductivity in the same way because of differences in ion mobility. This explains why soil solutions at the same concentration but having different ionic composition, may have different electrical conductivity. This results in a large range of possible electrical conductivity because of concentration and ionic composition variation in different areas of the soil. The large resistivity contrast between salt water-saturated zones and fresh water-saturated zones was used by several investigators to study salt water intrusion in to coastal areas (Nowroozi *et al.*, 1999). Van Dam and Meulenkaamp, (1967) considered the soil resistivity values of 40, 12, and 3 $\Omega\cdot\text{m}$ as representative of fresh, brackish and saline water, respectively.

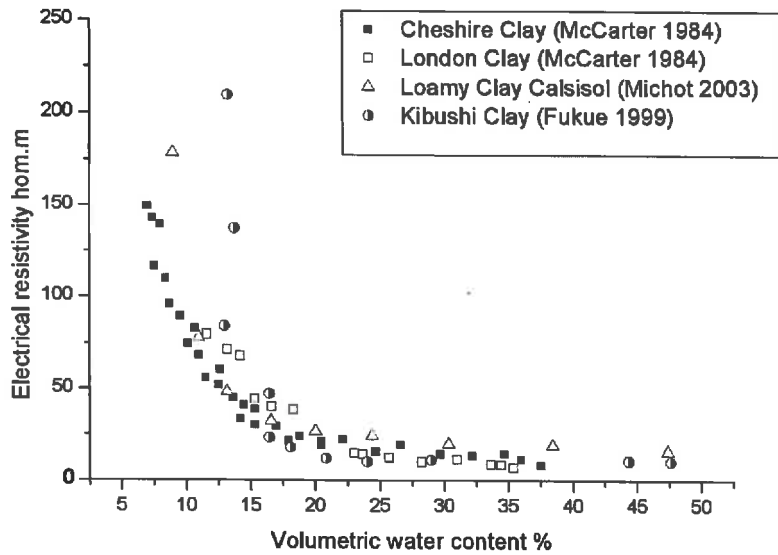


Figure II-5: Relationship between the volumetric water content and the electrical resistivity for different soil types. (Values issues from Fukue, *et al.*, 1999, McCarter, *et al.*, 1984, Michot *et al.*, 2003).

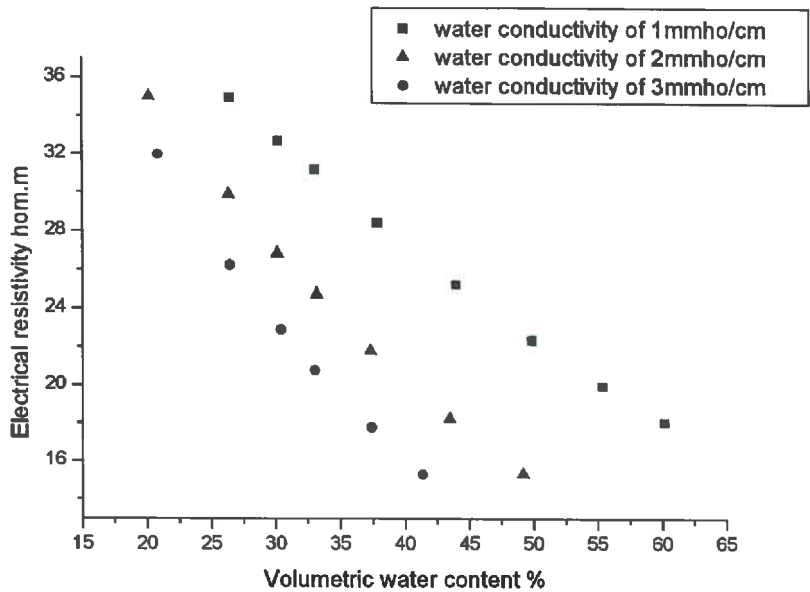


Figure II-6 : Relationship between the volumetric water content and resistivity for different values of pore water conductivity. (Values issues from Kalinski *et al.*, 1993).

6.4. Temperature

Ion agitation increases with temperature when the viscosity of a fluid decreases. Thus, the electrical resistivity decreases when the temperature increases. Simplification of resistivity interpretations and their comparison requires the expression of the electrical resistivity at a standardized temperature. By conducting laboratory experiments on 30 samples of saline and alkaline soils, Campbell *et al.* (1948) showed that conductivity was increased by 2.02% per °C between 15 and 35°C. Corrections can be then calculated to express the electrical resistivity at the standardized temperature of 25°C as follows:

$$\sigma_t = \sigma_{25^\circ\text{C}} [1 + \alpha(T - 25^\circ\text{C})] \quad (\text{II-14})$$

where σ_t is the conductivity at the experiment temperature, σ_{25° the conductivity at 25°C, and α the correction factor.

Colman and Hendrix (1949) discussed the validity of the Campbell's equation using 13 soils showing a wide range of texture. These results are in agreement with Campbell and corresponded also to the references formula used to correct the temperature effect in the log interpretation chart of Schlumberger.

In soils, temperature variation during a year is at two temporal scales, daily and annual variation. In studies where the temperature effect is not corrected, an assumption is made that temperature remains stable mostly because measurements are done every day at the same time over a short period (Bottraud *et al.*, 1984b). At the annual scale, it is not possible to avoid the effect of temperature on electrical field resistivity measurements. Usually the greatest resistivity values are recorded from September to November (in the Northern hemisphere), while the smallest resistivity values are recorded from June to July. This pattern is related to climatological variation affecting the ground water-table, precipitation, and temperature. In a two year long experiment, Binley *et al.* (2002) found a clear correlation between the net rainfall and the change of the electrical resistivity in the 0-0.82m depth. Aaltonen (2001) also reported that coarse-grained materials presented a wider range in seasonal resistivity variation than clayey soil. Thus, a knowledge of the seasonal variation of the temperature and its consequences on the electrical resistivity is essential to avoid misinterpretation of field measurements when comparing resistivity acquisition at the same place but on different dates.

7. Advantages, limitations and new prospects for soil survey

7.1. Advantages

In the context of soil science, electrical resistivity permits the delineation of the main soil types but, when performed repeatedly over time also provides information on soil

functioning. The information collected is usually very useful for agronomists, soil scientists, waste management, civil and environmental engineers.

7.1.1. Non- destructive mapping technique

The greatest advantage is that the prospecting disturbs neither the structure nor the functioning of the soil. Indeed, subsurface heterogeneities and transport properties can be determined non-invasively and in a dynamic manner. Moreover one-, two- or three-dimensional prospecting can be done. Compared to other non-destructive techniques applied in soil science, like X-ray tomography, Olsen *et al.* (1999) emphasized the possibility and advantage of monitoring resistivity variation both over long time and at decimetric scale. It can also be rapidly and easily carried out over several meters and thus applied to describe both horizontal and vertical variability of soil structure and properties at the scale of interest (Tabbagh *et al.*, 2000). Park (1998) underlined that this method may show detail of fluid migration that are unavailable with conventional hydrological monitoring technique. Preferred pathways corresponding to horizontal and vertical heterogeneities were also detected by this method and located in the unsaturated soil zone (al Hagrey *et al.*, 1999).

7.1.2. Temporal monitoring

This approach is very appealing for monitoring the temporal changes in soil water distribution. For instance, it permits the monitoring and resolving of relatively complex flow and transport mechanism (Slater *et al.*, 2002). Jackson *et al.* (2002) identified anomalies in a road side embankment following repeated measurement of resistivity over an 18 month period, incorporating several wet and dry season. Even with apparent resistivity data, temporal monitoring can be carried out. In temporal surveys, apparent resistivity anomalies ($\Delta \rho_a^t$) are computed by the equation (II-15):

$$\Delta \rho_a^t = \frac{(\rho_a^t - \rho_a^0)}{\rho_a^0} \quad (\text{II-15})$$

where ρ_a^0 , ρ_a^t are apparent resistivities at the initial stage (0) and during the temporal monitoring (t), respectively. This index is easily calculated and provides useful information on temporal variation of electrical resistivity. The differences between successive apparent resistivity measurements are more accurate than the absolute values of these measurements, because systematic errors are eliminated. Bottraud *et al.* (1984b) established a qualitative description of water transfer using the relative variation of apparent resistivity in a sandy homogeneous soil, during monitoring period of 2.5 months, they observed different patterns of water distribution related to variations in grape vine growth. Samouëlian *et al.* (2003) monitored artificial cracks as they deepened and observed an increasing apparent resistivity anomaly over time.

7.1.3. Various scale application

Electrical resistivity prospecting offers several advantages compared to other traditional soil prospecting (e.g. augering and excavation) and hydrological measurements (e.g. neutron probe, TDR, and tensiometry device). Classical techniques have restricted measurement scales that are usually incompatible with the subsurface variability. Electrical prospecting can be applied within a large range of scales by adjusting the inter-electrode spacing. Several different inter-electrode spacing could be applied at the same site. From the macroscopic to field scale, the measurements can be done without limitation and provide useful information. In this way, there is greater flexibility in the volume of soil that may be investigated. Jones (1995) selected this method for detecting the scaling properties of a fracture system at different resolutions (i.e. inter-electrode spacing), from 20 cm to 16 m. Depountis *et al.* (2001) reported a scale modelling experiment of a plume tracer by miniaturising the electrical device on a soil sample with dimension of 75 x 22 x 12 cm, at a 3 cm resolution.

7.1.4. Data acquisition facilities

Moreover, the improvement of computer controlled multi-electrodes arrays has led to an important development of electrical imaging. As a consequence of these improvements, electrical surveys can provide spatially dense and detailed measurements over large areas at low cost (Andrews *et al.*, 1995; Frohlich *et al.*, 1994). Direct modelling of the apparent resistivity over defined and synthetic subsurfaces would help in choosing the more appropriate electrical configuration in a specific context (Kampke, 1999; Mauriello *et al.*, 1998; Seaton and Burbey, 2002).

7.1.5. Large sensitivity of the measurement

As shown previously, the sensitivity of the electrical resistivity measurement is spread over a wide range depending on the soil physical properties. Choudhury *et al.* (2001) delineated the saline water contamination in soil at a district scale with electrodes 2 km apart. The small resistivity of a solution with a great salt content was also used as a tracer because it guarantees a great electrical resistivity contrast (White, 1998). Frohlich *et al.* (1994) mapped the vulnerability of an aquifer by determining the extent and flow path of pollution through distinguishing the polluted from the clean water. Groundwater contamination has also been monitored (Abdelatif and Sulaiman, 2001; Karlik and Kaya, 2001; Yoon and Park, 2001; Gu erin *et al.*, 2002) in different regions. White (1994) identified and mapped the groundwater flow direction and seepage velocity using electrical resistivity device.

7.1.6. Numerical modelling advancement

The interpreted resistivity data also provide parameters for modelling water and solute transport. Frequently, groundwater flow models are restricted in their utilization because of the insufficient characterisation of the heterogeneous aquifer (Sandberg *et al.*, 2002). Electrical resistivity measurements provide a powerful tool for detailed studies of vertical water movement in the unsaturated soil zone and therefore should

help to assess the boundary conditions for infiltration modelling (Benderitter and Schott, 1999). Recent research in monitoring solute plumes during tracer tests, and attempts to estimate a quantitative assessment of the transport characteristics (breakthrough curves), give a better understanding of advective-dispersive transport processes, and provide a promising tool to calibrate solute transport modelling (Binley *et al.*, 1996; Slater *et al.*, 2000; Kemna *et al.*, 2002; Slater *et al.*, 2002).

7.2. Limitations

7.2.1. Contact between the soil and the electrodes

From the point of view of technical aspects, systematic errors due to poor electrode contact or noise averaging can be avoided by carrying out replicated and reciprocal (i.e. reversed the positive and negative current and potential electrodes) measurements, as recommended by several authors (Xu and Noel, 1993; Binley, *et al.*, 1996; Slater *et al.*, 1997). Hesse *et al.* (1986) concluded that poor electrical contact was achieved in soil, under dry climatic conditions or on rocky ground. They proposed the use of conductive liquid injected by a high-pressure jet. Samouëlian *et al.* (2003) overcame to these difficulties by using a Cu/CuSO₄ complex linked to a saturated porous pot. These specific electrodes permitted a wet point source electrical contact at the soil surface and also avoid electrode charge-up effects i.e. polarization. This phenomenon is attributed to charge build-up at the interface between the conducting metal of the electrode and the less conductive surrounding soil. As a consequence, one should avoid making a measurement of potential (electrodes M and N) with an electrode that has just been used to inject current (electrodes A and B) (Dahlin, 2000).

7.2.2. Calibration

Field prospecting using electrical resistivity are normally associated with preliminary laboratory studies (Shaaban and Shaaban, 2001). The purpose of these preliminary studies is to calibrate the resistivity within different soil units under controlled conditions. Field electrical measurements can be then used to estimate *in situ* properties for which laboratory calibrations have been made. This calibration approach is valid for all electrical surveys, i.e. pedological prospecting, water content monitoring and identifying specific anomalies such as in archaeology. Nevertheless, the calibration cannot usually be generalised to other soil types (Gupta and Hanks, 1972).

7.2.3. Duration of the time of measurement

When soil function is studied, the technical time of electrical data acquisition (temporal resolution) with respect to the kinetics of the process studied is a crucial factor (Depountis *et al.*, 2001; Slater *et al.*, 2002). To maintain the advantages of non-destructive methods, one must choose the methods that allows a strictly reversible effect; that is the medium under study must be identical before and after the

measurement (Tabbagh *et al.*, 2000). This requirement is particularly important when monitoring transfer processes such as water or solute transport. The technical time of electrical resistivity acquisition has to be instantaneous compared to transport time. Michot *et al.* (2003) reported that deviation between the soil water content estimated by electrical resistivity and measured by a TDR probe was probably due to the technical time of electrical acquisition. Robain *et al.* (2001) proposed combining a rapid electrical sounding technique called the “three-point method” with an assumption of the subsurface into only 2 layers. This model comprised three parameters: (i) a first resistive layer ρ_1 , (ii) its thickness h corresponding to the unsaturated zone, and (iii) another second conductive layer ρ_2 corresponding to the saturated zone. Thus, the model has to resolve three equations containing three unknown quantities (ρ_1 , ρ_2 , h) corresponding to three measurements at different inter-electrode spacing. This method is applicable when the two-layers soil model can be applied and when *a priori* values of thickness and the resistivity ratio are required to define an adequate inter-electrode spacing.

7.2.4. Adequacy between heterogeneity and configuration

Using electrical resistivity, Bottraud *et al.* (1984a) attempted to map a soil with an increasing clay content with depth and a random stone distribution. They only detected a major discontinuity located between 5 and 10 m; the electrical resistivity contrast was not great enough to reveal smaller heterogeneities, and their electrical signature was very noisy. In such a case, a specific survey should consider the scale of soil heterogeneity. Because this scale may often be different down a soil profile, an adaptation of the electrode array configuration is one solution, if one keeps in mind that the sensitivity of the measurement decreases as the depth of investigation increases. Moreover, the quality of the data is strongly dependent on the contrast of the physical properties between the juxtaposed soil volumes (Demanet *et al.* 2001). High data density is of fundamental importance for the resolution and interpretation of a complicated heterogeneity (Dahlin and Loke, 1998). Too sparse data can cause important features to be overlooked, or can create false subsurface images. Xu and Noel (1993) emphasised that Wenner pseudo-section surveys cannot resolve complex heterogeneities. Thus, acquisition of extra independent data may be important for resolving complex 2D subsurface formation. In practice, the final data density should be a balance between the total electrical time acquisition and accuracy needed. The usefulness of electrical surveys is determined by the reliability of data, the density of the measurements, and the quality of the interpretation (Christensen and Sorensen, 1998).

7.2.5. Inversion process and non-uniqueness of the solution

The non-uniqueness of the solution in the inversion scheme can lead to ambiguity or misinterpretation. Thus, a basic knowledge of the medium under study is recommended before inversion. Olayinka and Yaramanci (2000) suggested that the inversion procedure cannot be very precise because: (i) the solution from the inverse

problem is often not unique, (ii) the models determine a continuous function of the space variables, whereas the amount of data is usually finite in real experiments, (iii) when the solution is unique exact inversion techniques are often unstable, and (iv) real data are often contaminated by noise. Inversion can only provide an approximate guide to the true geometry of the subsurface heterogeneities. Christensen and Sorensen (1998); Dannowski and Yaramanci (1999); Garambois *et al.* (2002) and Slater and Reeve (2002) recommend that to reduce the inversion ambiguity and so improve the quality of the interpretation, data from several different prospecting methods should be integrated.

7.3. New Prospect

As presented previously, electrical resistivity surveys can provide information about soil physical properties. Recent technological improvements in electrical devices allow rapid resolution both in space and time.

Several depths (three for example, with the “MUCEP”) can be prospected over a wide surface area to characterize the spatial variability of soils at the metric scale. Observations obtained by electrical resistivity provide a useful contribution compared to conventional soil mapping by drilling and sampling. It allows the surveyor to distinguish and delineate different soil types. Likewise Dabas *et al.* (1989) identified areas of poor crop growth in a field by precise electrical soil mapping. Electrical prospecting allowed them to distinguish the sand layer in a limestone formation and to estimate the sand layer thickness. Poor crop growth was directly linked to the shallowest sand layer 0.25 m thickness compared to 1 m thicknesses in the other parts of the field. Electrical measurements are also sensitive to water content and the ionic concentration. In this way, spatial and temporal variability of plant nutrient can also be estimated. This information can be useful in precision farming for the management of irrigated to both optimise production and to minimise nitrate leaching (Corwin and Lesch, 2003). It also provides an efficient, economical, and rapid way of i) identifying areas of excessive soil compaction due to wheel traffic, ii) identifying soil horizon thickness and bedrock depth, and iii) assessing soil hydrological properties over vast agricultural production regions (Freeland *et al.*, 1998). Electrical variability is closely linked with the crop yield at the field scale (Zanolin, 2003). Electrical resistivity devices and inversion software are currently available on the market. Nevertheless, the primary results obtained after electrical surveys give only indirect information. The method needs primary calibration at the laboratory and interpretations require a minimum knowledge of the medium under study. The use of this method as a routine operation for farmers would appear to be unlikely.

The duration of data acquisition is shortened with newly available dataloggers and multiplexers. Such equipment is necessary to perform 3D measurements with a high spatial resolution or to apply electrical resistivity measurements to transfer processes. Landscape solute transport modelling can serve as a crucial component of precision agriculture by providing feedback concerning solute loading to ground-water or to drainage tile systems (Corwin and Lesch, 2003). Christensen and Sorensen (1998) estimated the vulnerability of an aquifer to leakage of a polluting substance from the soil surface, such as infiltration of nitrates from excess fertilisers. These studies

constitute a useful step in the hydrological understanding of chemical pollutant transfers such as heavy chemical products released from agricultural and industrial practices. Indeed, salinity limits water uptake by plants by reducing the osmotic potential and thus the available water content for the plant growth. Real-time measurements obtained by electrical resistivity surveys may assist in our understanding of the transport phenomena of water solution and his spatial distribution. Model predictions may help identify management actions that will avoid the occurrence of detrimental conditions before they become manifest.

8. Conclusion

Electrical resistivity prospecting is a very attractive method for soil characterisation. Contrary to classical soil science measurements and observations which perturb the soil by random or by regular drilling and sampling, electrical resistivity is non-destructive and can provide continuous measurements over a large range of scales. In this way, temporal variables such as water and plant nutriment, depending on the internal soil structure, are monitored and quantified without altering the soil structure. The applications are numerous: i) determination of soil horization and specific heterogeneities, ii) follow-up of the transport phenomena, iii) monitoring of solute plume contamination in a saline or waste context. It enables the improvement of our understanding of the soil structure and its functioning in varying fields such as agronomy, pedology, geology, archaeology and civil engineering. Concerning agronomy, applications are present in precision farming surveys. Nevertheless, electrical measurements do not give a direct access to soil characteristics that interest the agronomist. Preliminary laboratory calibration and qualitative or quantitative data (i.e. after inversion) interpretations have to be done to link the electrical measurements with the soil characteristics and function.

Acknowledgements

The authors gratefully thank Stephen Cattle for improving our English.

9. Conclusion : Application de la méthode de la résistivité électrique à la détection de fissures

Rappelons que l'objectif de notre étude est de caractériser la fissuration des sols à la dessiccation dans le but de connaître sa géométrie 3D et son évolution de manière la plus précise possible. Appréhender l'organisation du réseau de fissures par rapport à une densité de fissures apporte des informations utiles sur le réseau fonctionnel vis-à-vis des phénomènes de transferts.

Notre choix méthodologique s'est orienté vers la méthode de la résistivité électrique afin de décrire la fissuration des sols. Cette méthode expérimentale présente une grande souplesse et convient à la détection tridimensionnelle et à l'élaboration d'un suivi temporel, ce qui répond à nos exigences déjà évoquées dans le chapitre I.

Nous avons ainsi focalisé notre attention sur l'adaptation de la méthode électrique à la détection de fissures et notre analyse bibliographique nous permet d'avancer les hypothèses suivantes :

- Les fissures à la dessiccation se remplissent d'air et leurs signatures électriques correspondent à des objets de résistance infinie. Ainsi, dans notre cas d'étude, nous rechercherons des zones avec des gradients de résistivité élevés.

- Le volume de sol prospecté lors d'un suivi par résistivité électrique est dépendant de l'espacement inter-électrodes. En ajustant cet espacement, la détection d'objets de taille millimétrique, tels que les fissures d'un sol limoneux, devrait alors être possible.

- Les données de résistivité acquises pourront être traitées à partir :

- i) des mesures acquises lors de l'expérimentation correspondant aux résistivités apparentes et organisées suivant les profondeurs supposées de l'acquisition, dites pseudo-profondeurs (PP). Celles-ci sont fonctions de l'espacement inter-électrode. En effet, plus l'écartement inter-électrode est grand, plus la mesure de résistivité apparente correspond à une intégration sur une grande profondeur. Le chemin des lignes de courant étant néanmoins fonction de la résistivité électrique du milieu, cette profondeur de prospection n'est donc pas déterminée précisément lors de l'acquisition, d'où le terme de pseudo-profondeur, très largement employé dans la communauté des géophysiciens et que nous utiliserons également dans notre document.

- ii) d'une inversion mathématique des résistivités apparentes en résistivités dites inversées et organisées, cette fois-ci, suivant la profondeur. Nous verrons que dans le cas de la détection de fissures, les modèles actuels d'inversion ne sont pas entièrement satisfaisants.

CHAPITRE III

**Faisabilité de l'application de la méthode électrique à la détection
de fissures : modélisation et expérimentation.**

Après la présentation, dans le chapitre précédent, de la méthode de la résistivité électrique, nous allons maintenant évaluer et mettre en place cette méthode dans le cadre de la détection de la fissuration sur un sol limoneux du Nord de la France. Les premiers travaux menés sont à la fois expérimentaux et numériques. Ils sont à l'origine du développement d'un logiciel de calcul de la résistivité électrique, « Fissel », spécifique à la fissuration, et à la mise au point expérimentale de l'utilisation de la méthode à une échelle d'étude centimétrique. Les données expérimentales nous fournissent ainsi une occasion de valider les résultats issus de la simulation.

Ce chapitre est composé de trois parties :

- La première partie concerne la faisabilité technique de l'expérimentation à l'échelle centimétrique sur un modèle réduit de sol. Cette partie, rédigée en anglais, fait l'objet d'un article publié dans la revue *Soil Science Society of America Journal*¹.
- La deuxième partie présente le logiciel « Fissel », élaboré par A. et J. Tabbagh (Département de Géophysique Appliquée de Paris VI), pour résoudre le calcul direct de la résistivité apparente dans les milieux fissurés. Le modèle est testé dans des conditions similaires à celles de l'expérimentation présentée précédemment. La comparaison des données issues de la simulation et de l'expérimentation nous permet ainsi de valider l'utilisation de la méthode électrique et du logiciel utilisé.
- La troisième partie nous permet d'évaluer la sensibilité de la méthode de la résistivité électrique sur différents scénarios de fissuration au moyen de simulations numériques.

¹ Samouëlian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A., Bruand, A. 2003, Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. 67 : 1319-1326.

1. Approche expérimentale : Utilisation de la résistivité électrique pour la détection de fissures à l'échelle centimétrique

Résumé en français

Nous rappelons ici les principaux résultats liés à l'expérimentation de faisabilité de la détection de fissures par la méthode électrique sur un modèle réduit de sol en laboratoire.

Cinq états ont été créés sur un échantillon de sol : un état initial A, puis quatre états B, C, D et E contenant une fissure créée artificiellement. Celle-ci est localisée entre deux électrodes (8 et 9), d'orientation verticale et de largeur constante ; seule sa profondeur varie et augmente successivement de 0,01 m entre chaque état. Un panneau 2D en configuration Wenner d'espacement inter-électrode de 0,015 m a permis de caractériser les différents états de fissuration (Fig. III-3 et III-4). La réalisation technique de la prise de la mesure a nécessité un effort particulier, afin de la rendre possible sur un sol sec et de respecter l'injection ponctuelle de courant pour des écartements inter-électrodes centimétriques. Nous avons mis au point des « micro-électrodes CuSO_4 » assurant un contact électrique humide et ponctuel en surface (Fig. III-2). Les données de résistivité apparente obtenues ont été interprétées puis inversées par le logiciel Res2Dinv (Loke et Barker 1996, Fig. III-5 et III-6) qui s'appuie, pour la résolution du problème inverse, sur la méthode des différences finies. Il applique aux gradients de résistivité des conditions de lissage favorisant la convergence du calcul numérique vers des formes molles.

Nous avons analysé à la fois les cartes de résistivité apparente et les cartes dites « d'anomalies » où l'on représente la différence entre l'état initial A et un état ultérieur. Par la suite, une inversion des données a été conduite au moyen du logiciel Res2Dinv. Les cartes d'anomalies permettent de s'affranchir de l'éventuelle hétérogénéité de l'état initial. Les cartes de résistivité apparente (Fig. III-7) et les cartes d'anomalies (Fig. III-8) présentent des variations entre les états de fissuration mais également au sein de chaque panneau. L'état initial A est homogène, sa résistivité est de 47 $\Omega\cdot\text{m}$. Les panneaux de résistivité inversée des états de fissurations B, C, D et E présentent un fort contraste de résistivité à l'emplacement de la fissure (Fig. III-9 et III-10). La fissure est détectée comme un objet résistant. Les variations sont les plus importantes à la première pseudo-profondeur. L'inversion des données par Res2Dinv permet une localisation correcte de la fissure, l'orientation verticale de la fissure est retrouvée. La résolution latérale est satisfaisante mais ne permet pas de connaître de manière précise la largeur de la fissure. De plus, son extension en profondeur, qui se caractérise par une forte augmentation de résistivité à la surface n'est pas retrouvée de manière satisfaisante par le modèle d'inversion.

Cette expérimentation de faisabilité préfigure des résultats encourageants pour la suite, à la fois sur l'utilisation technique de micro-électrodes CuSO_4 et sur l'interprétation des données de résistivité apparente. Celle-ci fournit une première idée sur

l'organisation structurale du milieu. En revanche, l'inversion des données par le logiciel Res2Dinv n'est pas complètement adaptée à la résolution de structures fines et abruptes à l'origine de forts gradients de résistivité.

Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale.²

Abstract

Electrical resistivity measurements at high resolution (1.5-cm electrode spacing) were performed in order to detect, from the soil surface, small cracks developing within the soil. We recorded a vertical electrical pseudo-section in a decimetric undisturbed homogenous soil block (silt loam) for different artificial cracking stages. Due to the unusually reduced electrode spacing associated with an air-dried soil surface, a specific Cu/CuSO₄ electrode was designed for precision wet contact at given points. The apparent resistivity measurements of the pseudo-section and the interpreted data inverted by using the Res2Dinv software are discussed. The range of interpreted electrical resistivity associated with cracking is considerable, (from 168 to 2185 Ω.m) because the cracks are filled with air that is an infinitely resistant medium. Results showed that even small structures cause perceptible changes in resistivity that can be detected by the electrical resistivity method. Results also showed that a specific software is required to predict real crack depth.

1.1. Introduction

On arable land, soil can be compacted by traffic, hardsetting and crusting processes. Soil structure can be regenerated after compaction by tillage operations, biological processes and climate processes. With new agricultural practices such as reduced tillage or no-tillage, soil structure mostly regenerates via natural processes. Thus, better understanding of climate effects is needed, especially the ability for soil to recover porosity by crack formation due to swelling and shrinking. Voorhees, (1983) pointed out the role played by natural processes such as soil freezing and thawing, wetting and drying, that decrease penetration resistance in the tilled layer of a compacted soil by about 50%, depending on soil water content. Mackie-Dawson *et al.* (1989) studied the evolution of the cracking system in the first 10-cm of soil by using vertical image analysis. They observed significant soil structural changes during an annual cycle of drying and wetting. Up to now, crack networks have been described traditionally, either by measuring manually in the field the crack geometry that forms at the soil surface (Blackwell *et al.*, 1985; Lima and Grismer, 1992; Ringrose-Voase and Sanidad, 1996; Tuong *et al.*, 1996), or automatically by using two-dimensional image analysis (Bullock and Murphy, 1980; Hallaire, 1984; Scott *et al.*, 1986; Stengel, 1988; Velde *et al.*, 1996; McGarry *et al.*, 2000; Stadler *et al.*, 2000). Image analysis

² Samouëlian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A., et Bruand, A. 2003. Soil Science Society of America Journal, 67: 1319-1326.

was widely used in order to calculate morphological parameters of cracks. VandenBygaert *et al.* (1999) performed microscopic observations and showed a development of soil structure with time in an 11-yr chronosequence of no-tillage. They noticed that the number of horizontally oriented elongated macropores in the top 5 to 15-cm increased due to the absence of tillage and to the combination of annual freeze-thaw processes. McGarry *et al.*, (2000) assessed soil structure from traditional and zero-till treatments in a Vertisol. They recorded a greater volume of large pores (1.5 to 3-mm equivalent diameter in size) after 8-yr of zero-till and a greater volume of pores of smaller size (0.74 to 1.0-mm equivalent diameter) after 8-yr of traditional tillage.

Models that are based on these experimental observations and that describe crack growth are already available. Horgan and Young (2000) developed a two-dimensional empirical model based on random processes whose parameters are not directly related to the properties of a real soil. Perrier *et al.* (1999) used fractals to describe the cracking patterns that appeared in a homogeneous soil. Chertkov and Ravina (1998) developed a physically-based probabilistic model of crack network geometry and observed a good agreement with one-dimensional experimental data. Hallaire (1988a) used image analysis to describe a three-dimensional model with cubic geometry and isotropic shrinking.

However, because the tensile and shearing stresses vary in a soil with depth, we cannot realistically deduce soil behaviour from the description of the surface alone. As a consequence, geometry of a crack network cannot be deduced from a two-dimensional description and geometrical analyses must provide three dimensional information. In addition, most studies have used two-dimensional vertical data obtained with destructive techniques, thus restricting the potential of these techniques for monitoring crack development. Therefore, the understanding of the dynamic processes of crack pattern growth requires the collection of three-dimensional data on a soil volume by using a non-destructive imaging technique. Electrical resistivity imaging is a geophysical investigation tool that has been used for many decades in hydrogeology, mining, oil and civil engineering and archaeological prospecting. The technique is particularly useful in the study of complex geology (Griffiths and Barker, 1993), and has also been used for shallow subsurface investigation and environmental works (Hesse *et al.*, 1986) as well as archaeological (Delapierre, 1998) and pedological surveys (Bourennane *et al.*, 1998; Lamotte *et al.*, 1994; Tabbagh *et al.*, 2000). Electrical resistivity varies considerably according to the electrical conductivity of materials and their proportions in a soil volume. Dannowski and Yaramanci (1999); Goyal *et al.*, (1996); al Hagrey and Michaelsen (1999); Michot *et al.*, (2000) and Zhou *et al.*, (2001) related electrical resistivity to soil water content in their experiments. Acworth (1999) used this method to identify zones of high salt content in a clay layer. In these studies the electrical anomalies corresponded to large objects (i.e. larger than a decimetric size). Our objective is to adapt this method to identify small heterogeneities (i.e. objects of millimetric size) related to soil structure and especially to cracks developing during drying and wetting cycles. Since a crack in a drying context is air-filled, this structure should be easily detectable due to the infinite electrical resistivity of air. Consequently, we examined the ability of electrical resistivity surveys to distinguish small resistivity anomalies, with specially designed

electrodes. This paper describes the first experiment to test the feasibility of electrical resistivity monitoring at this scale.

1.2. Principle of electrical measurement profile

The general principle behind geophysical exploration is to collect data external to the medium under investigation but that are functions of the internal properties of this medium (Scollar *et al.*, 1990). Andrews *et al.*, (1995) defined electrical imaging as a picture of the electrical properties of the subsurface by passing an electrical current along many different paths and measuring the associated voltage. In the resistivity method, artificially-generated electric currents are injected into the ground and the resulting differences of potential are measured at the surface. In practice, current I (A) is injected into the ground through two electrodes A and B, and an electrical potential ΔV (V) is measured across a second pair of electrodes M and N (Fig. III-1). In a homogenous terrain, the current is distributed in the ground between points A and B with a regular geometric shape. In this distribution, the lines of current linking A and B and the equipotential surfaces which are close to hemispherical shape near A and B, cross each other. Current density is not equal at all points, and the main part of intensity I emitted between A and B is concentrated in the hachured volume in the neighbourhood of the AB segment (Fig. III-1). This zone is related to the "higher sensitivity region" of the quadripole. This volume becomes larger as the distance AB increases. Soil apparent resistivity (ρ) is calculated for a quadripole electrode (Fig. III-1) as following:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \left(\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} + \frac{1}{NB} - \frac{1}{NA} \right)} \right) = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{[III-1]}$$

where ρ is in ($\Omega \cdot m$), MA , MB , NB , NA are the inter-electrode spacing (m), I the injected current and ΔV the measured electrical potential (Scollar, 1990). This equation enables the determination of soil resistivity from 4 electrodes placed randomly on the surface. Constant K is the geometric coefficient of the quadripole. In the case of the Wenner array, the electrodes are arranged in line and the current and potential electrodes are kept at an equal spacing a (m). Then, the geometric factor K becomes $K=2\pi a$. The depth of investigation is a function of the distance between the nearest potential and current electrodes. The separation between the electrodes mainly determines the volume of soil detected by the instrument. The greater is the electrode spacing, the deeper is the investigation. The resistivity value is conventionally attributed to the geometric centre point of the experimental array.

When the soil is not electrically homogeneous, the current lines and equipotential surfaces are distorted. Their patterns are no longer as described in Figure III-1. In this case, the resistivity measurement, obtained from ΔV and I , is called the apparent resistivity ρ_a . The latter is calculated with Eq. [III-1], and it provides qualitative information on the soil considered as an homogeneous equivalent medium.

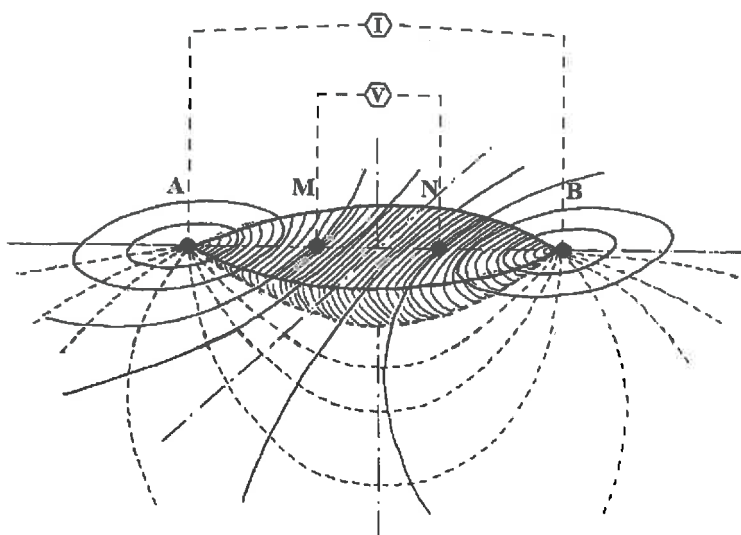


Figure III-1 : Electrical distribution of current lines (dashed) and equipotential surface between two current electrodes A and B, measure of electrical potential across the electrodes M and N in a Wenner configuration.

1.3. Material and Methods

1.3.1. The soil studied

The experiments were conducted in the laboratory on an air-dried soil sample ($2.4 \times 1.7 \times 1.6 \text{ dm}^3$) with an initial massive structure resulting from severe compaction by wheel traffic. The sample was collected in the tilled horizon of a silt loam (Typic Hapludalf) located on an experimental site in the National Institute for agronomic Research Center at Mons en Chaussée (Somme, France) (Richard *et al.*, 2001). An apparent vertical two-dimensional electrical resistivity pseudo-section was first measured along a 21-cm line from the top surface of the soil block (stage A with no crack). Then cracks were made manually. In terms of electrical prospecting, the crack is air-filled and corresponds to a resistant structure. A crack of 2-mm width and varying depths (1, 2, 3 and 4 cm deep) was created artificially with a saw in order to obtain four cracking stages (B, C, D and E) in the soil sample. The physical model used for soil fractures was intentionally simplistic because this experimentation consists in a feasibility test of electrical measurements. All the measurements were conducted on the soil sample the same day under controlled conditions (room temperature 22° Celsius). The experiment lasted 4 hours and the volumetric water content was $0.09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and remained stable throughout the experiment. The variation of resistivity was then related to the variation of the structure alone.

1.3.2. Micro-electrodes

Our experiment focused on the top ten centimetres of the soil, thus the electrical array required centimetric inter-electrode spacing. Because of the unusually close electrode spacing associated with an air-dried soil surface, a specific electrode device was designed in order to improve the electrical contact between the dried soil surface. Indeed, classical electrodes such as metal needles do not permit a correct electrical contact with a soil when it dries. We then designed a new electrode that enables a wet contact between the electrode and the soil surface. Figure III-2 shows this specific electrode, manufactured from a small-saturated cone-shaped ceramic cup (2-mm external diameter) linked to a Cu/CuSO₄ complex. The copper wire had a section of 0.6-mm, and the concentration of the CuSO₄ solution was 0.05 mol l⁻¹. The ceramic cup was joined to a transparent plastic rigid tube (3-mm external diameter and 2-mm internal diameter). The saturated ceramic cup placed on the soil surface permitted a wet contact. Blotting paper protected the soil surface during the installation of the device, so that all the electrodes reached the soil surface at the same time when the paper was removed. The measurements were performed as soon as the electrodes were placed in contact with the soil, in order to avoid variation of the electrical response of the soil due to infiltration of some CuSO₄ solution in the soil porosity.

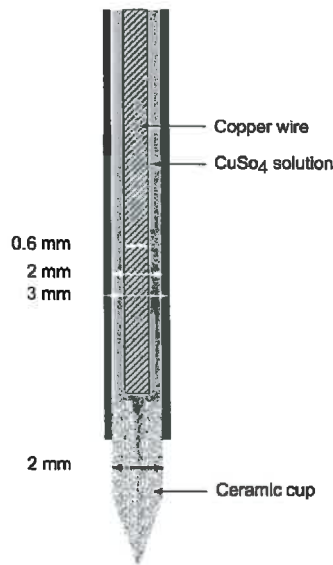


Figure III-2 : Electrode device.

1.3.3. Two-dimensional vertical pseudo-section

In order to detect the crack, its lateral position and its depth, a 21-cm line of 15 electrodes each separated by a constant distance a (1.5-cm) was installed at the soil block surface. The crack was located between electrodes 8 and 9. A Wenner array was used to monitor the electrical potential (Fig. III-3). The first four electrodes 1-2-3-4 were connected as A M N B (Station 1). A second measurement was performed by disconnecting the first four electrodes and moving the array along the 21-cm measurement line by a single electrode spacing a and connecting the array to electrodes 2-3-4-5. The process was repeated until reaching the end of the line. Then a second profile was recorded by connecting the electrodes in a way that A M N B occupied electrode positions 1-3-5-7 (Station 2). The array was then moved along the line by a $2a$ spacing. The process was repeated by increasing the electrode spacing each time by multiple N of the initial electrode spacing which resulted in four depth measurements. For each measurement, the selection of electrodes connected to the resistivity meter (Syscal-R1 Plus, Iris Instrument, Orléans, France) was controlled by an automatic computer-controlled switch array (Multinode). Intensity I injected through the A and B electrodes varied from 2 to 3.5 mA while the electrical potential varied from 251 to 3231 mV. With this configuration, 12, 9, 6, and 3 measurements were performed as the spacing multiple N increased from 1 to 4. The measured values were plotted on a measurement map at the intersections of lines sloping at 45° from the centres of the quadripole. The values were thus plotted along the depth, which reflects the increasing depth of current penetration as the inter-electrode spacing a increased. It should be noted that the units on the vertical axis of the measurement map (Fig. III-4) are multiple values of the inter-electrode spacing a , from a to $4a$. Thus, there were 30 separate apparent resistivity measurements. As the inter-electrode spacing a increased, the measurements sampled increasingly greater depths and increasingly greater volumes of soil. In other words, the total soil volume affected by the current injection rose as the inter-electrode spacing a increased. The measurement was plotted beneath the centre of the four electrodes.

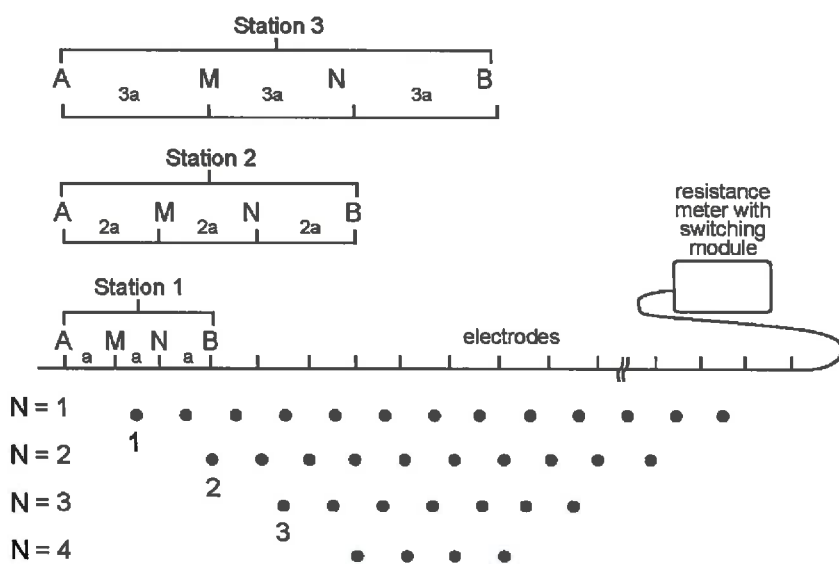


Figure III-3 : The measurement sequence for building up a pseudo-section.

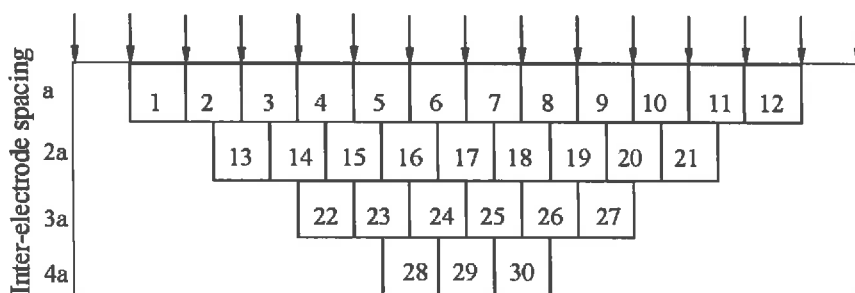


Figure III-4 : Measurement map of apparent electrical resistivity pseudo-section in a Wenner configuration for 15 electrodes. The measurement sequence for building up a pseudo-section.

1.3.4. Resistivity inversion

The heterogeneities that are present in a soil disturb the theoretical current distribution. The electrical measurement involves a given volume of soil within which the presence of heterogeneity affects the overall measured value. Thus the pseudo-section of apparent resistivity gives a qualitative spatial distribution of electrical resistivity in vertical cross-section. A quantitative approach therefore requires a mathematical inversion of the apparent electrical resistivity into interpreted resistivity. Numerical inversion of the experimental apparent resistivity was carried out using Res2Dinv software (Loke and Barker, 1996). This software is widely used in electrical surveys (Acworth, 1999; Delapierre, 1998; Michot *et al.*, 2000). This method is based on the smoothness-constrained least squares method applied to apparent electrical resistivity. The volume of influence described by the apparent resistivity is translated into the depth of investigation related to the interpreted resistivity. The two-dimensional model divides the subsurface into a number of rectangular blocks as shown in Figure III-5. Regarding the Wenner array, the thickness of the first layer of blocks is based on experimental results (Edwards, 1977). The depth corresponds to the "median depth of investigation" $a/2$. The thickness of each subsequent deeper layer is increased normally by 10%. Figure III-6 shows the successive stages of the inversion method. Initially, an interpreted resistivity pseudo-section is calculated from the measured apparent resistivity pseudo-section. The second stage then consists in resolving the direct problem (i.e. in calculating the apparent resistivity pseudo-section from the inverted resistivity pseudo-section previously obtained in the first stage). In the third stage, the algorithm calculates the difference between the measured and calculated apparent pseudo-sections. An iterative process is performed until the difference became small enough. The optimisation method reduces the differences between the calculated and measured resistivity values by adjusting the resistivity of the model blocks. The measurement of this difference is given by the root mean square error (RMSE) as following:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\rho_c - \rho_m)^2} \quad [III-2]$$

where ρ_c , ρ_m and n are respectively the apparent resistivity simulated by the Res2Dinv software, the apparent resistivity measured during the experiment and the number of data points.

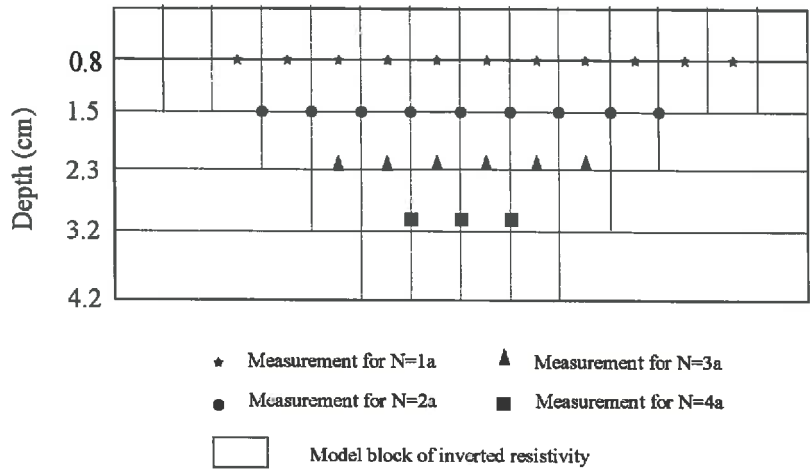


Figure III-5 : Arrangement of model blocks and resistivity datum points for a 15 electrodes in a Wenner array.

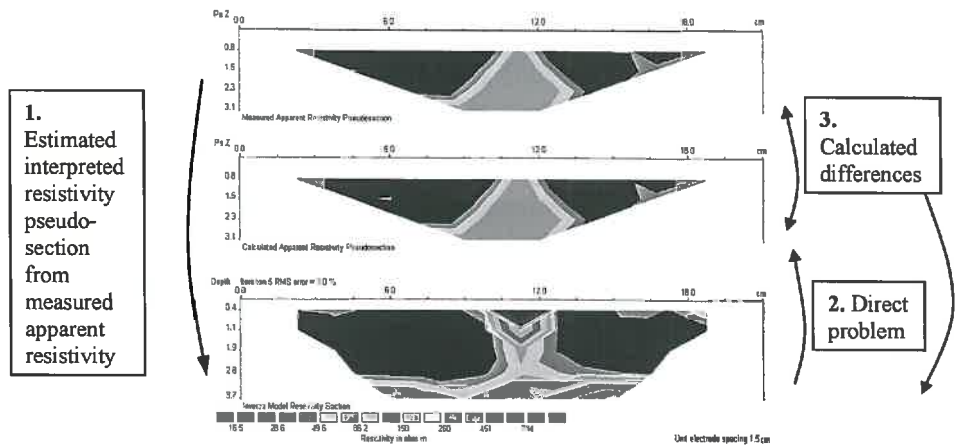


Figure III-6 : Mathematical inversion of Res2Dinv model.

1.4. Results

1.4.1. Apparent resistivity interpretation

Figure III-7 shows the apparent electrical resistivity pseudo-sections for the cracking stages A, B, C, D and E. The set of five profiles describes the artificial growth of the crack located between electrodes 8 and 9. Map representations are only based on experimental values. No interpolated values were added. Consequently, each mesh represented a data point value corresponding to a Wenner array. Stage A represented the initial soil massive structure, without any crack. The corresponding electrical pseudo-section exhibited a homogeneous apparent resistivity of 47 Ω .m. The further stages B, C, D and E, presented electrical differentiations directly above the crack between electrodes 8 and 9. The deeper was the crack in this configuration, the higher was the apparent resistivity. The resistivity range varied from 52 to 77 Ω .m. Another demonstration of the resistivity modification can be represented by positive electrical anomaly (Fig. III-8). The resistivity anomaly was calculated as following:

$$\Delta\rho_a = \frac{(\rho_{a,X} - \rho_{a,A})}{\rho_{a,A}} \quad \text{[III-3]}$$

where $\rho_{a,A}$ and $\rho_{a,X}$ were respectively the apparent resistivity of the initial stage A and the apparent resistivity of the different cracking growing stages ($X = B, C, D$ or E). All the 4 individual pseudo-sections showed a similar anomaly distribution. Directly above the crack, the positive anomaly varied from 38 to 104% respectively for stages B and E. Our results also showed that not only the amplitude of the apparent resistivity anomalies increased as the crack grew, so did also its downward extension. The classical reversed V-shape on the map corresponded to a vertical plane electrical discontinuity. Both the apparent resistivity and the anomalies (Figs. III-7 and III-8) remained constant outside the area of crack influence. This is consistent with no variation of the water content in the soil block throughout experimentation and confirms that the electrical resistivity measurement was affected by variation of the soil structure alone in our experiment. As expected, the positive anomaly corresponded to the electrical crack signature, as a resistant object that could be detected by resistivity measurement.

1.4.2. Quantitative resistivity interpretation: Resistivity inversion

The measured apparent resistivity pseudo-sections were analysed by using the Res2Dinv software in order to calculate interpreted resistivity pseudo-sections. The latter are shown in Figure III-9 for stages A, B, C, D and E. In our case, five iterations for the inversion were usually enough to derive a model distribution producing a result with an RMSE lower than 5%. Initial soil block resistivity at stage A was relatively homogenous being equal to 37 Ω .m. For stages B, C, D and E, the calculated interpreted resistivity clearly showed zones of higher electrical resistivity, from 168 to 2185 Ω .m between the electrodes 8 and 9. This high resistivity was directly correlated

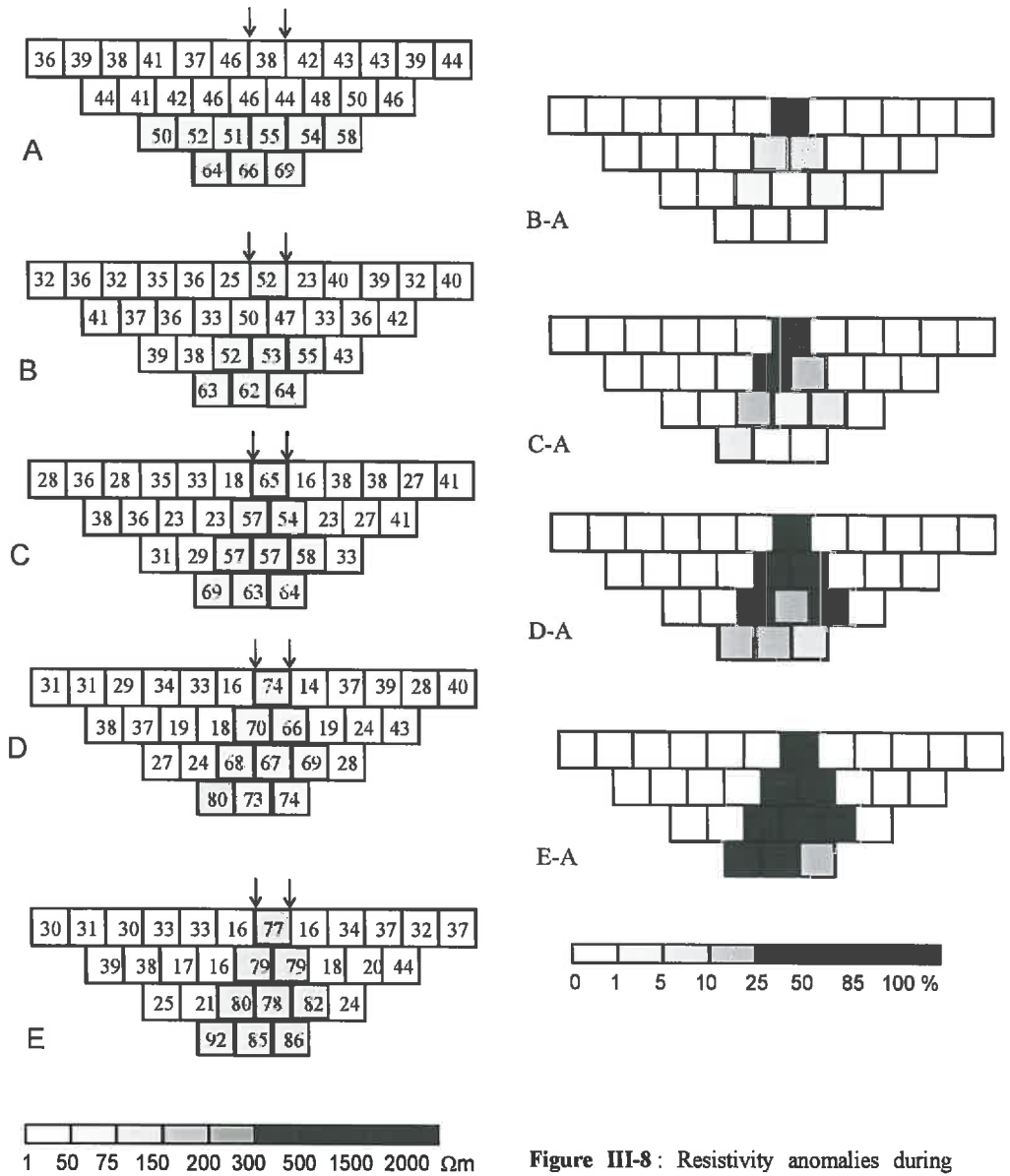


Figure III-7 : Apparent resistivity pseudo-section for the 5 stages, crack localisation between the electrodes 8 and 9.

Figure III-8 : Resistivity anomalies during the different stages along the profile.

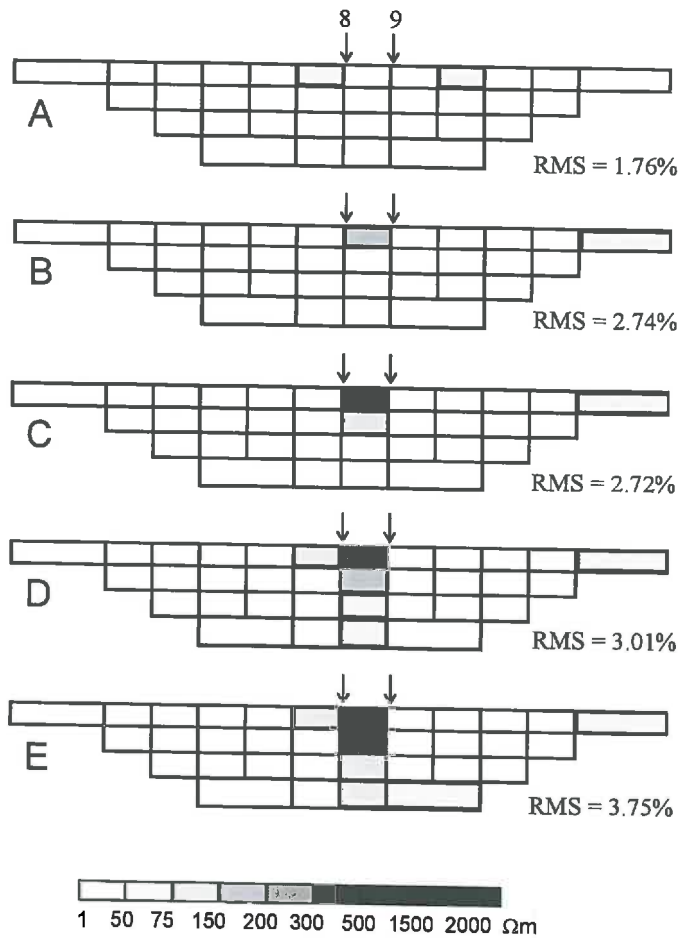


Figure III-9 : Interpreted resistivity pseudo-section for the stages A, B, C, D and E.

with the growing crack 1 to 4-cm deep. The highest heterogeneity amplitude was located at 0.8-cm depth. The magnitude of the interpreted variation decreased as the electrode spacing increased. Figure III-10 illustrates the vertical sensitivity of interpreted resistivity during cracking stages. The variation of crack depth from 1-cm to 4-cm influenced electrical resistivity distribution. The interpreted resistivity, in the first 0.8-cm depth, increased from 168 to 2185 $\Omega.m$ as the crack grew from 1 to 4 cm. The electrical resistivity in the second horizontal layer (0.8 to 1.5-cm depth) rose by 10% between stages B (32 $\Omega.m$) and E. Beyond the 1.5-cm depth layer, resistivity remained stable even for a 4-cm crack depth. The first horizontal layer was the most sensitive to structural changes.

Figure III-11 illustrates the horizontal sensitivity of interpreted resistivity during cracking stages for the first depth layer (0-0.8-cm). Stage A, represented the initial soil structure without any crack or any significant electrical variation. Directly above electrodes 8 and 9, the electrical signature of the crack increased as the crack grew, as shown in Figure III-10. The lateral sensibility is related to the following point measurement, 1.5-cm apart. Progression was the same for all cracking stages, B, C, D and E, characterised by decreased electrical resistivity in the crack site. The decrease was highest for stage E, corresponding to a fall of 98% at 1.5-cm distance. The resistivity contrast between the crack and the soil was abrupt. The lateral influence of the 2-mm width vertical crack was negligible.

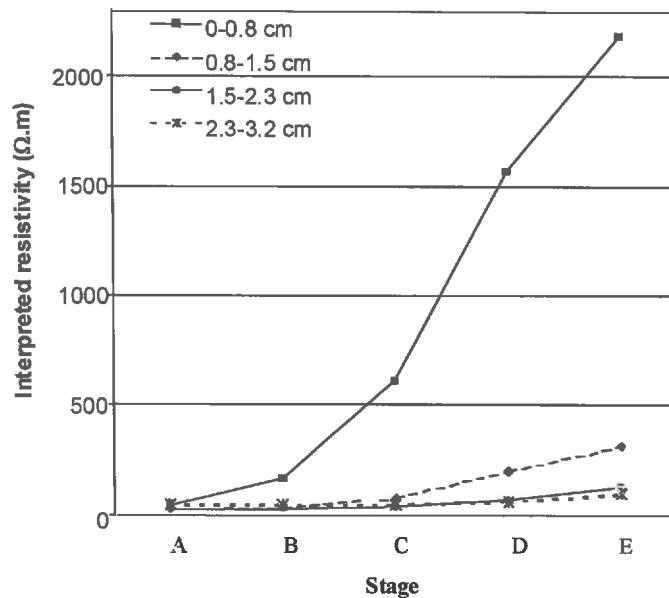


Figure III-10 : Interpreted resistivity variation between the electrodes 8 and 9 during the following cracking stages and for different depth investigation.

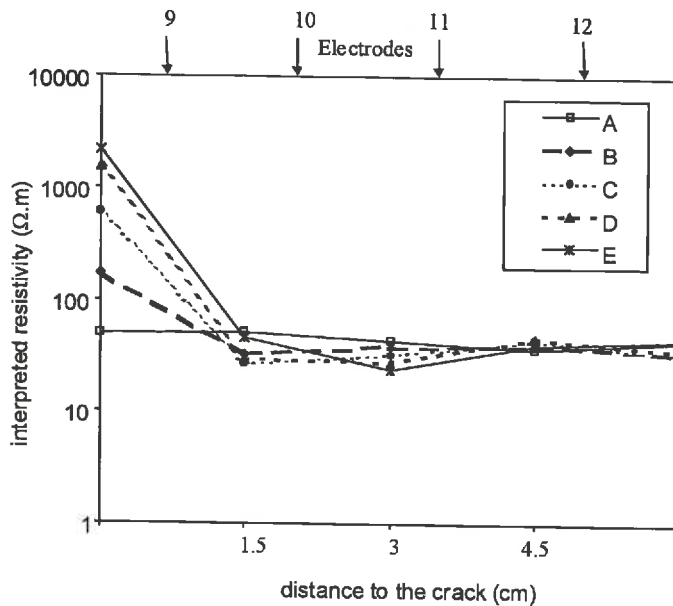


Figure III-11 : Lateral variation of interpreted resistivity as a function of crack localisation for the first depth layer 0-0.8-cm.

1.5. Discussion

This experimental survey focuses on electrical resistivity response from subsurface varying structures. Analysing the vertical interpreted pseudo-sections revealed the presence of high resistivity contrasts in a vertical zone located at the position of the crack, between electrodes 8 and 9. This demonstrated the effect of soil structure on the electrical resistivity measurement. The new ceramic cup electrodes enabled efficient electrical monitoring in dry soil. Although the shortest inter-electrode spacing was 1.5-cm the principle of point source electrical measurement was respected owing to the wet contact at the soil surface through the small (mm) electrodes.

Experiment conditions warranted stable water content during measurements. Göbel *et al.* (1993), al Hagrey and Michaelsen (1999) and Michot *et al.* (2000) studied the variation of electrical resistivity in the subsurface in water infiltration experiments. The range of interpreted resistivity measurement varied from low resistivity 10 $\Omega.m$, corresponding to wet conditions, to 200 $\Omega.m$ for dry conditions. In our experiment high and abrupt electrical resistivity measurements ranging from 48 to 2185 $\Omega.m$ were recorded and attributed to the artificial crack. The crack was filled with air and represented a resistant structure in terms of electrical prospecting. The interpreted resistivity pseudo-sections permitted detection of crack location between electrodes 8 and 9, on the one hand, and crack vertical orientation on the other hand. We did not expect variation of the top centimetres of the soil between the following cracking stages, though we did expect agreement between crack electrical signature and crack depth. The highest interpreted electrical resistivity was recorded in the top 1.5-cm

depth, whereas the crack developed down to 4-cm. Similarly, Griffiths and Barker (1993) observed that detection and resolution both decreased with depth, setting limits on the degree of geological complexity. The actual interpreted data permitted to detect the presence of the crack, but did not allow to predict its depth. Crack depth variation was represented with a significant variation of the interpreted resistivity at the subsurface. These results led us to reconsider the inversion model: the Res2Dinv software cannot totally succeed in detecting abrupt structure geometry variations and strong electrical resistivity gradients because the numerical resolution of the mathematical algorithm is based on a regular mesh and a smoothness condition. However, this study suggests that even small structures, such as millimetric cracks, cause a significant change in resistivity distribution.

1.6. Conclusion

The electrical resistivity image method is a relatively rapid method that can be used to investigate soil structure. The method produces a two-dimensional vertical section of interpreted electrical resistivity from the measurement of apparent resistivity. Our results demonstrate the effectiveness of electrical resistivity prospecting in characterising soil cracks that form during shrinking and swelling phenomena at the centimetric scale. The Cu/CuSO₄ electrodes combined with a saturated ceramic cup permitted a correct electrical contact of the electrode with the soil surface. Regarding subsurface formation, the electrical images obtained from these electrodes enable detection of structures at the millimetre scale. This experiment is a first step in crack detection by using the electrical resistivity method.

Compared to other crack determination studies, the electrical resistivity method permits non-invasive measurements. These first results based on artificial cracks with two-dimensional imaging exploration are encouraging, but they confirm the need for future work on the inversion of the apparent resistivity data. Future work will consist in adapting this electrical monitoring to a soil block under desiccation condition in order to monitor a real crack network as it grows. Nevertheless, more detailed analysis of crack network requires appreciation of the entire volume of soil and not only of a two-dimensional section. Thus we will also develop a three-dimensional electrical resistivity set-up.

Acknowledgements

The authors gratefully thank Keith Hodson for improving our English.

La méthode du panneau électrique appliquée à l'échelle centimétrique et associée à l'utilisation de microélectrodes permettant un contact électrique ponctuel, a permis de localiser précisément une fissure dans un sol. Cette étude expérimentale reste cependant semi-quantitative et incomplète dans la mesure où la profondeur de la fissure n'a pas été retrouvée précisément. Elle est à compléter par l'étude d'autres paramètres caractéristiques d'une fissure, comme sa largeur ou son pendage, qui n'a pas été analysé.

C'est pourquoi nous nous attachons maintenant à modéliser le calcul de la résistivité apparente dans le cas d'un milieu fissuré, afin d'être en mesure d'analyser ensuite plus précisément l'effet de différents paramètres géométriques de fissures sur la résistivité apparente.

2. Approche numérique : Evaluation et analyse de sensibilité d'un modèle de calcul de la résistivité électrique d'un milieu fissuré

Les modèles d'inversion du signal électrique ont longtemps été limités à l'interprétation des sondages 1D par le biais de l'utilisation d'abaques représentant un terrain tabulaire, *i.e.* une succession de N couches parallèles définies par leur épaisseur et leur résistivité. De cette manière, ce type d'inversion analytique repose sur une forte hypothèse de la géométrie du milieu prospecté. Le traitement de données de résistivité en 2D puis 3D nécessite un nombre de paramètres de plus en plus important, ce qui suppose une résolution numérique de l'inversion et une description mathématique du milieu. Jusqu'à présent, les modèles existants considèrent le milieu étudié comme continu. Ils utilisent généralement une description spatiale du milieu par le biais des différences finies ou des éléments finis. Néanmoins ces types de maillage ne fournissent pas une grande souplesse dans le cas de la détection d'objets ayant une géométrie très fine par rapport à l'encaissant. De plus, nous souhaitons pouvoir connaître précisément la localisation et la géométrie des fissures dans le milieu, et non avoir accès simplement à une densité de fissuration. Cette connaissance explicite du milieu permettrait d'envisager par la suite l'utilisation de modèles de transferts non basés sur des théories d'homogénéisation. Ce contexte nous a amenés à établir une collaboration avec des spécialistes de la géophysique, A. et J. Tabbagh de l'université Paris VI, afin d'élaborer un modèle discontinu de calcul de la distribution de la résistivité répondant spécifiquement au cas de la fissuration.

2.1. Bases du modèle

L'outil de modélisation, « Fissel », est basé sur la méthode des moments. La première étape consiste à modéliser en 3D la distribution de la résistivité apparente dans un milieu homogène, ou tabulaire à deux couches, contenant des fissures. La seconde étape est d'aboutir *in fine* au module d'inversion ; néanmoins elle ne sera pas être traitée dans ce travail de thèse.

Les fissures correspondent à des hétérogénéités électriques étendues dans deux directions, d'extension très limitée dans la troisième et présentant un fort contraste de résistivité. Comme nous l'avons énoncée précédemment, la résistivité du milieu est définie par la loi d'Ohm (équation II-2). La modélisation électrique directe³ permet le calcul en un point M du potentiel V résultant de l'injection d'un courant dans le milieu. La résolution du problème direct consiste à trouver une fonction réelle $V(x, y, z)$ solution de l'équation de Poisson avec une répartition quelconque de la résistivité $\rho(x, y, z)$ dans l'espace. La méthode des moments, développée par (Harrington, 1968), a été choisie pour la résolution du problème direct. Elle s'appuie directement sur le formalisme des équations de Maxwell et a été originellement utilisée en modélisation

³ La présentation mathématique du modèle est proposée en annexe I. Elle constitue le cœur d'un article qui sera soumis prochainement à Near Surface Geophysics.

électromagnétique 3D (Tabbagh, 1985), puis adaptée à la méthode électrique (Dabas et al., 1994). Pour des structures de type fissure, elle introduit une grande souplesse par rapport aux modèles de description du milieu qui autorisent les différences finies ou les éléments finis. En effet, la méthode des moments consiste à remplacer les corps, à l'origine de l'anomalie électrique, par une distribution équivalente de sources de courant. Elle permet de limiter le maillage à ces corps (qui peuvent avoir des formes quelconques) et, dans notre cas, de décrire facilement la géométrie des fissures.

Dans un premier temps, le calcul du champ primaire E_p est effectué, il correspond au milieu sans fissure mais prend en compte l'existence des bords de l'échantillon. Dans un second temps, on résout le calcul du champ secondaire E_s . Lorsque le milieu contient plusieurs fissures, celles-ci sont considérées comme plusieurs séries de sources secondaires.

Les données d'entrée du logiciel Fissel nécessaires aux calculs directs sont :

- les dimensions du bloc,
- la distribution des résistivités du bloc en l'absence de fissure,
- le nombre de fissures avec leurs géométrie, localisation, orientation, et pendage,
- les coordonnées successives des quadripôles ABMN.

Le bloc d'étude est de forme parallélépipédique avec des faces planes et orthogonales entre elles, ce qui facilite le calcul concernant les bords de l'échantillon. Les dimensions sont définies par les longueurs en (x,y,z) .

La géométrie des fissures est définie par huit paramètres : l'épaisseur, la longueur, la largeur, les trois coordonnées (x,y,z) du centre de la fissure, l'orientation φ dans le plan $(0,xy)$, et le pendage θ dans le plan $(0,xz)$. Seules ces fissures sont maillées.

Le dispositif ABMN utilisé est spécifié dans un fichier initial indiquant pour chaque position du quadripôle les coordonnées (x,y) de chacune des électrodes. La position des électrodes ABMN est indépendante de la construction du maillage, contrairement aux méthodes des différences finies ou éléments finis.

L'utilisation du logiciel « Fissel », actuellement en fin de développement, nous a permis d'effectuer une approche numérique de simulations directes. Nous avons pu ainsi mener en parallèle une expérimentation sur un modèle réduit de sol en laboratoire (présentée dans le paragraphe précédent) et une simulation sur une reproduction de ce modèle réduit.

2.2. Evaluation du modèle de calcul

Afin de valider le modèle, nous avons simulé numériquement les différents états de fissuration de la partie expérimentale (paragraphe I-1 de ce chapitre).

Lors de l'expérimentation, une première acquisition de l'état A, sans fissure, représentait l'état initial du bloc. Comme nous avons pu le voir précédemment (Fig. III-7-A), cet état ne présentait pas d'hétérogénéité électrique majeure. Dans notre approche numérique, nous considérons donc un bloc dont la résistivité, correspondant à un état de référence ($\rho_{réf}$), est homogène et égale à 40 $\Omega.m$.

Nous simulons ensuite différents états de développement d'une fissure dans ce bloc. La fissure dans le bloc de sol homogène est détectée par un panneau électrique 2D composé de 15 électrodes séparées de 0,015 m. Elle est positionnée entre les électrodes 8 et 9, avec une orientation verticale et une profondeur qui varie suivant les états B, C, D et E respectivement de 0,01, 0,02, 0,03 et 0,04 m de profondeur.

2.2.1. Distribution de la résistivité apparente modélisée pour différentes profondeurs de fissures

La fissure est située entre les électrodes 8 et 9 du panneau électrique, avec une orientation verticale. Son épaisseur est constante de 0,004 m et sa profondeur varie suivant les 4 états B, C, D et E présentés dans la figure III-12, respectivement de 0,01, 0,02, 0,03 et 0,04 m.

La répartition des résistivités apparentes est différente pour chaque état. Les valeurs les plus importantes concernent la zone de la fissure située entre les électrodes 8 et 9. La résistivité apparente augmente à l'emplacement de la fissure. Lorsqu'on s'en éloigne elle diminue fortement. Au-delà de la zone d'influence de la fissure, soit une distance d'environ 0,03 m à PP1, la résistivité est équivalente à la résistivité initiale du modèle (40 Ω .m). La figure III-13 illustre les variations de résistivité apparente à l'aplomb de la fissure pour chaque état B, C, D et E, et pour les pseudo-profondeurs PP1 à PP4. La valeur de résistivité apparente la plus importante se situe à la pseudo-profondeur PP1, et diminue par la suite lorsque la pseudo-profondeur augmente. Ce comportement est valable pour les quatre états, mais les variations sont d'autant plus importantes que la fissure est profonde. La résistivité augmente à la pseudo-profondeur PP1, respectivement de 150 à 225 % lorsque la fissure croît de 0,01 à 0,04 m de profondeur. Plus la fissure est profonde plus les lignes de courant se propagent en profondeur, ce qui induit une forte différence de potentiel entre M et N. Ce phénomène est d'autant plus important que la fissure est profonde, et que l'on prospecte avec un écartement inter-électrode faible.

De part et d'autre de l'emplacement de la fissure, *i.e* entre les électrodes 7-8 et 9-10 pour PP1, la résistivité apparente est inférieure à la résistivité de référence du bloc (40 Ω .m). Les lignes de courant sont fortement perturbées et déviées par la présence de la fissure. Cet endroit représente une interface entre un milieu résistant, la fissure, et un milieu plus conducteur l'encaissant. Au passage d'une surface de séparation, les lignes de courant sont réfractées, elles contournent la fissure et se concentrent dans le milieu conducteur. La différence de potentiel résultante est faible, ce qui se traduit par une baisse de résistivité de part et d'autre de la fissure. Cet effet a également été souligné dans des études antérieures de simulations électriques appliquées aux milieux fissurés (Fig.III-14) (Militzer *et al.*, 1979) : de part et d'autre de la structure verticale résistante, les mesures de résistivité apparente deviennent inférieures à la résistivité de l'encaissant. Il est montré que les variations sont d'autant plus significatives que la fissure est proche de la surface.

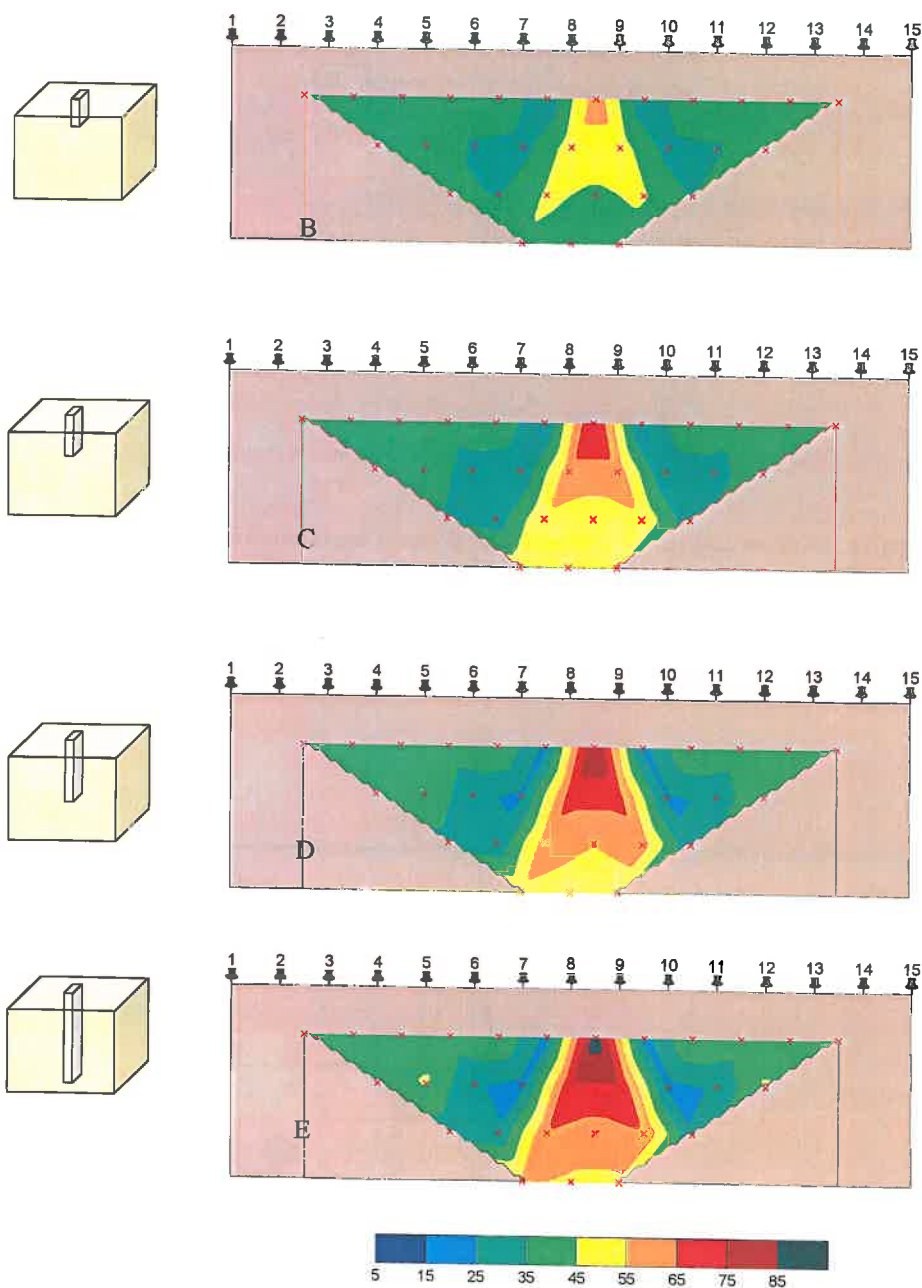


Figure III-12 : Cartes de résistivité apparente modélisées des états B, C, D et E présentant une augmentation de la fissure en profondeur de 0,01 à 0,04 m (sa largeur est fixe et égale à 0,004 m. L'échelle de couleur est donnée en ohm.m. Les croix rouges correspondent aux points de calcul aux pseudo-profondeurs successives PP1, PP2, PP3 et PP4).

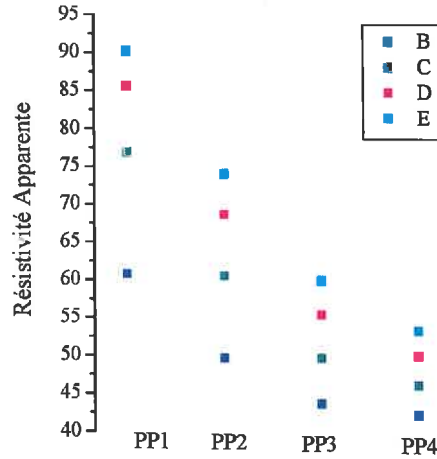


Figure III-13 : Evolution de la résistivité apparente modélisée à l'emplacement de la fissure (i.e. entre les électrodes 8 et 9) pour les 4 états B, C, D, et E à chaque pseudo-profondeur PP1 à PP4.

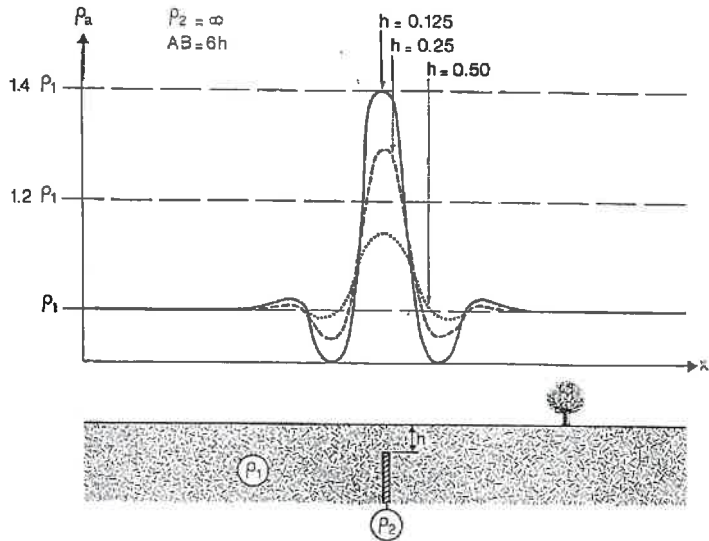


Figure III-14 : Résultats issus de simulations électriques de l'effet d'une fissure résistante (ρ₂), dans un milieu encaissant homogène de résistivité (ρ₁) à la première pseudo-profondeur et pour une acquisition de type Wenner. (d'après Militzer *et al.*, 1979).

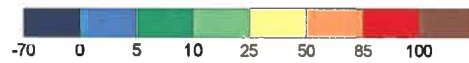
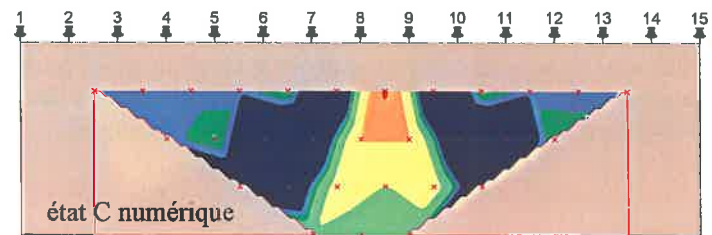
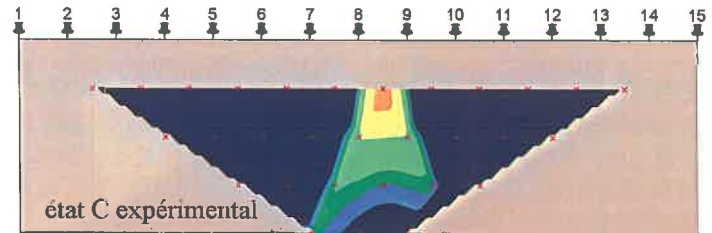
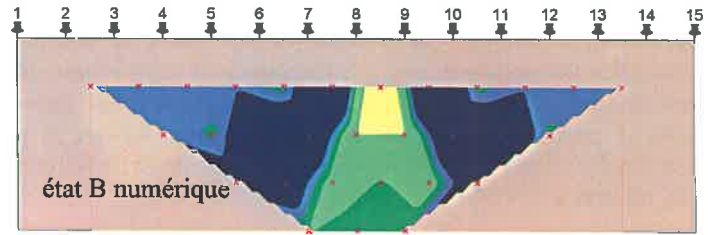
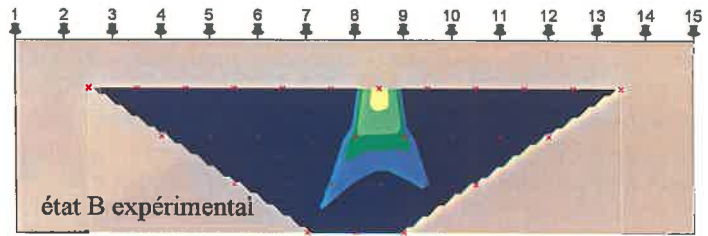
2.2.2. Comparaison des résistivités apparentes modélisées et expérimentales

Une comparaison des résultats issus de l'approche numérique et des résultats expérimentaux a été faite à partir des cartes d'anomalies de résistivité apparente (Fig. III-15). Cette démarche nous permet de valider le choix du logiciel « Fissel » pour le calcul de la distribution de la résistivité apparente en milieu fissuré. Les anomalies de résistivité électrique sont calculées à partir de l'état de référence pour les simulations numériques et de l'état initial pour les mesures expérimentales (Eq. III-3). Cette équation (III-3) permet de nettoyer les données de l'état initial, et ainsi de ne tenir compte que des variations dues à la présence de la fissure.

Comme nous l'avions déjà souligné, la présence de la fissure se traduit par une augmentation de la résistivité apparente entre les électrodes 8 et 9, et une diminution de cette résistivité de part et d'autre des électrodes. Le calcul des anomalies de résistivité apparente se traduit donc par une anomalie positive lorsque la résistivité augmente, et une anomalie négative lorsque la résistivité a diminué par rapport à l'état initial ou à l'état de référence.

2.2.2.1. Anomalies positives

La distribution des anomalies positives est liée à l'emplacement de la fissure et à sa géométrie. Elle se présente pour chaque état sous la forme d'un V-renversé centré entre les électrodes 8 et 9. Cette forme est due à l'utilisation de la configuration Wenner, elle est similaire pour les données numériques et les données expérimentales (Fig. III-15). Plus l'extension en profondeur de la fissure devient importante (états B à E) plus les valeurs des anomalies augmentent. La première pseudo-profondeur reste, dans tous les cas, la plus influencée par les variations de profondeur de la fissure. La valeur maximum, située entre les électrodes 8-9, passe respectivement entre l'état B et E de 35% à 100% pour les données expérimentales et de 50% à 120% pour les données issues de la simulation numérique à la pseudo-profondeur PP1. Les ordres de grandeur des anomalies positives entre les données expérimentales et numériques sont proches, mais néanmoins les données numériques présentent des valeurs un peu plus importantes. De plus, la zone d'influence de la fissure en profondeur est plus développée pour les simulations numériques. Nous retrouvons également de part et d'autre de l'emplacement de la fissure de petites zones reliées à un point de mesure où l'anomalie est comprise entre 5 % et 10 %. Ces valeurs sont associées à des artefacts numériques très localisés et non à la présence d'hétérogénéités électriques.



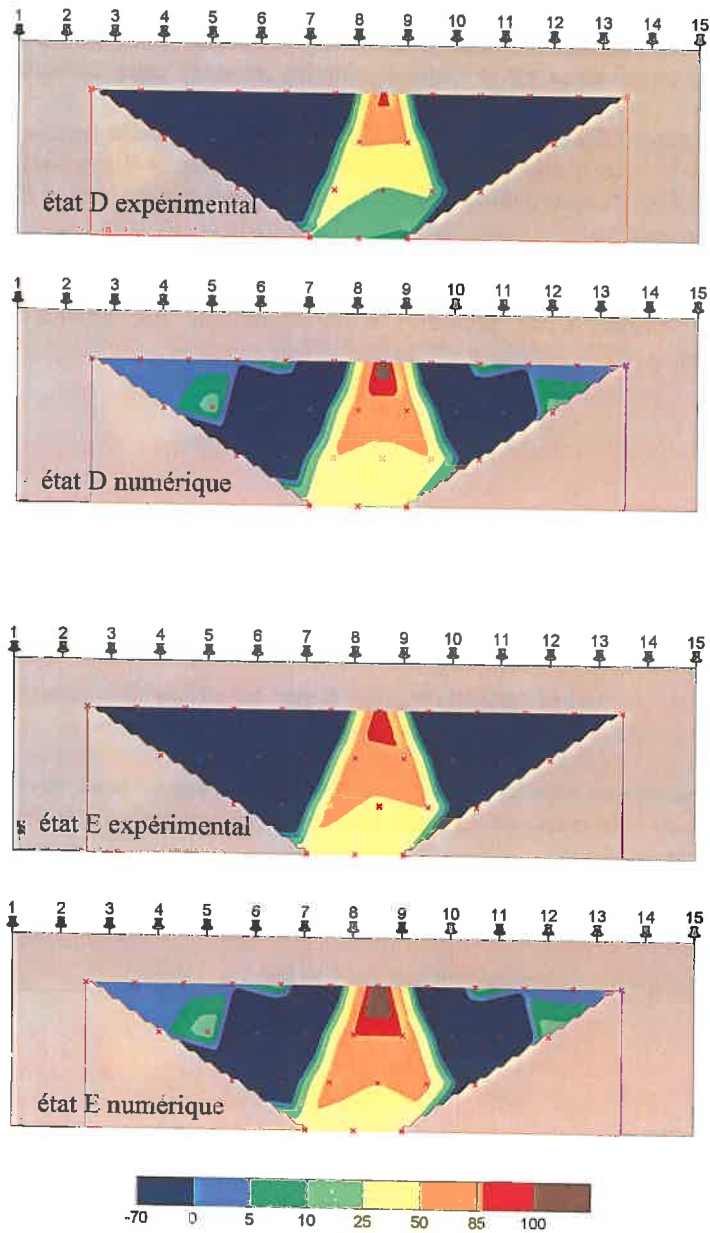


Figure III-15 : Carte de distribution des anomalies de résistivité apparente pour les états B, C, D et E des données issues de l'expérimentation et de la simulation numérique. L'échelle de couleurs est exprimée en pourcentage.

2.2.2.2. Anomalies négatives

Elles sont associées à la diminution de la résistivité apparente par rapport à l'état initial dans le cas de l'expérimentation ou par rapport à l'état de référence dans le cas de la simulation. Leur distribution est différente pour les données expérimentales et les données simulées. Dans le cas des données expérimentales, elles sont présentes sur l'ensemble du panneau 2D à l'exception de la zone d'influence de la fissure. Dans le cas des données simulées, elles se situent également de part et d'autre de la zone d'influence de la fissure, mais dans un espace plus restreint. Lorsque l'on se rapproche des extrémités du panneau électrique, une zone d'anomalie positive de faible ampleur, entre 0 et 5% est présente. La résistivité, à cet endroit du panneau, n'évolue pas au cours des différents états B, C, D et E, car cette zone n'est pas influencée par la présence de la fissure. Cette précision n'est néanmoins pas atteinte lors de l'expérimentation.

Les cartes de résistivité apparente obtenues par l'expérimentation (paragraphe 1) et par le modèle présentent de grandes similitudes. Les valeurs des anomalies positives des données numériques estimées par « Fissel » sont supérieures à celles mesurées lors de l'expérimentation. La répartition des anomalies négatives est plus étendue pour les données expérimentales. La zone d'influence de la fissure pour les données simulées est plus restreinte latéralement, laissant ainsi place à la présence de deux zones non perturbées aux extrémités du panneau électrique. Néanmoins, de manière qualitative, les anomalies observées sont en concordance entre les données numériques et les données expérimentales pour les quatre états de fissuration. La confrontation des données simulées et expérimentales nous fournit ainsi une validation qualitative de la modélisation par l'expérimentation.

2.3. Tests numériques de sensibilité de la méthode électrique appliqués à la fissuration

La comparaison des données expérimentales et numériques présentée au paragraphe précédent ayant permis une validation qualitative du modèle, celui-ci peut désormais être utilisé en simulation pour analyser l'effet de différents paramètres caractéristiques de la fissure sur la détermination de la résistivité apparente.

L'étude de sensibilité porte sur le nombre et la géométrie des fissures. Le dispositif d'électrodes utilisé est un panneau 2D en configuration Wenner de 15 électrodes espacées de 0,015 m. Le panneau électrique 2D est situé perpendiculairement à l'axe de la fissure. La résistivité du bloc est de $40 \Omega.m$, celle de la fissure est infinie. Les résultats sont présentés sous forme de cartes de résistivité apparente (Figures III-16-18)⁴ avec, en surface, la position des électrodes. L'organisation des données en profondeur s'effectue suivant l'espacement inter-électrode **a**, **2a**, **3a** et **4a** des quadripôles de mesures, ce qui correspond aux pseudo-profondeurs PP1 à PP4. Rappelons que la mesure de résistivité est volumique ; les croix rouges symbolisent la position théorique des points de mesure centrée dans la maille de mesure de chaque quadripôle ABMN. La représentation graphique utilisée ne permet pas d'interpoler dans l'ensemble de la maille théorique de prospection mais seulement à partir des points de mesure, ce qui explique le manque d'interpolation entre la surface et PP1.

Nous avons testé successivement l'effet de différents paramètres caractéristiques de la fissure sur la résistivité apparente : i) son épaisseur, ii) le nombre de fissures et iii) le pendage.

2.3.1. Influence de l'épaisseur de la fissure sur la résistivité apparente

La fissure se situe entre les électrodes 8 et 9, sa profondeur est fixe (0,03 m) et son épaisseur (e) est égale à 0,002 m ou à 0,004 m (Fig. III-16 a et b). On retrouve une distribution identique à celle décrite pour la figure III-14 : valeur élevée de résistivité à l'emplacement de la fissure, puis diminution en deçà de $40 \Omega.m$. Cette diminution de résistivité est due à une concentration des lignes de courant à l'interface entre la fissure résistante et l'ensemble du bloc. Plus la fissure est large, plus la réfraction des lignes de courant est importante, ce qui est à l'origine de la diminution de la résistivité de part et d'autre de la fissure. Lorsque l'on s'éloigne de la zone d'influence de la fissure, à partir d'une distance de 0,03 m à la pseudo-profondeur PP1, la résistivité est équivalente à la résistivité initiale. Les valeurs maximum et minimum sont respectivement de $(85 - 22 \Omega.m)$ et $(64 - 28 \Omega.m)$ pour la fissure de 0,004 m et celle de 0,002 m. Ces valeurs extrêmes se situent dans les deux cas à la première pseudo-profondeur PP1, et reflètent la présence de contrastes plus importants pour la fissure la plus large (0,004 m). Le profil des résistivités apparentes à l'aplomb de la fissure (Fig.

⁴ La représentation graphique des cartes de résistivité sera effectuée avec des échelles de codes de couleurs identiques afin de permettre au lecteur une interprétation des différentes cartes sans en fausser la lecture.

III-17) montre une évolution identique pour les deux cas étudiés. Les valeurs de résistivité sont les plus importantes à PP1, augmentant respectivement de 214 et 160 % pour la fissure de 0,004 et 0,002 m. Ensuite les valeurs diminuent, mais celles associées à la fissure de 0,004 m restent toujours supérieures à celles de 0,002 m.

2.3.2. Influence du nombre de fissures sur la résistivité apparente

Nous avons également testé l'effet de la présence de plusieurs fissures sur la distribution de la résistivité apparente du sol. Le cas étudié (figure III-16 c), correspond à deux fissures de 0,004 m d'épaisseur et de 0,03 m de profondeur chacune, positionnées entre les électrodes 7 – 8 et 9 – 10. Toutes deux ont une orientation verticale. Elles sont à l'origine de deux zones de résistivité élevées, supérieure à 85 Ω .m, localisées à proximité de la surface. De part et d'autre des deux fissures, la résistivité diminue et devient inférieure à 40 Ω .m, ce qui correspond à un comportement similaire aux observations précédentes (Fig. III-12, III-16 a et b). Le gradient de résistivité présent à la première pseudo-profondeur PP1 est le plus important sur tout le profil. Plus en profondeur, à partir de PP3, une zone résistante apparaît, avec une valeur de résistivité supérieure à celle observée dans le cas d'une fissure unique de même géométrie (Fig. III-16c, mesure annotée). Cette mesure correspond à la position du quadripôle A, B, M et N sur les électrodes 4, 7, 10, 13. Les électrodes A – B et M – N sont centrées par rapport aux deux fissures, et se situent de part et d'autre de chacune d'elles. Les deux fissures perturbent les lignes de courant augmentant localement la résistivité en profondeur. En effet lorsque la pseudo-profondeur augmente, le volume de sol prospecté devient plus important, l'effet dû à une fissure est alors moins important que celui dû à la présence de deux fissures.

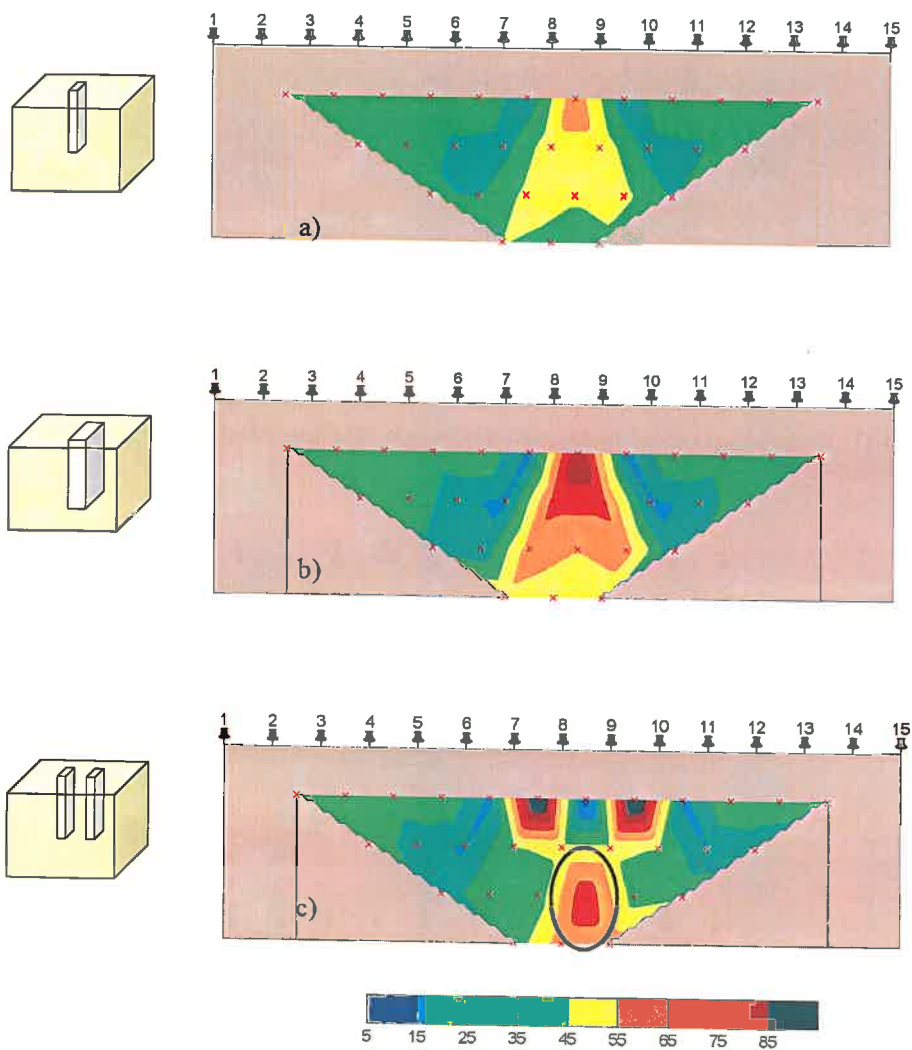


Figure III-16 : Répartition des résistivités apparentes modélisées pour différentes géométries de fissures. a) fissure de 0,002 m de large et 0,03 m de profondeur entre les électrodes 8 et 9, b) fissure de 0,004 m de large et 0,03 m de profondeur entre les électrodes 8 et 9, c) 2 fissures entre les électrodes 7 – 8 et 8 – 9 – 10 de 0,004 m de large et 0,03 m de profondeur.

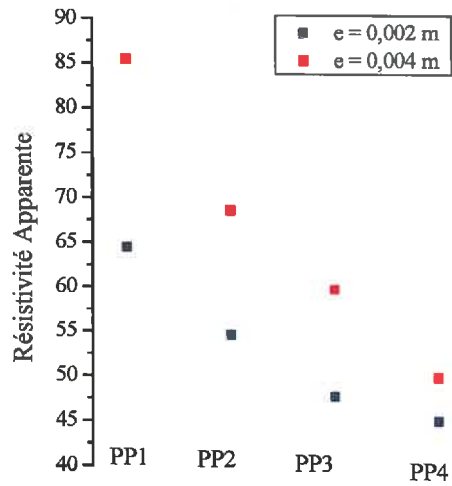


Figure III-17 : Evolution de la résistivité apparente à la position de la fissure de 0,03 m de profondeur et d'épaisseur variable 0,002 et 0,004 m.

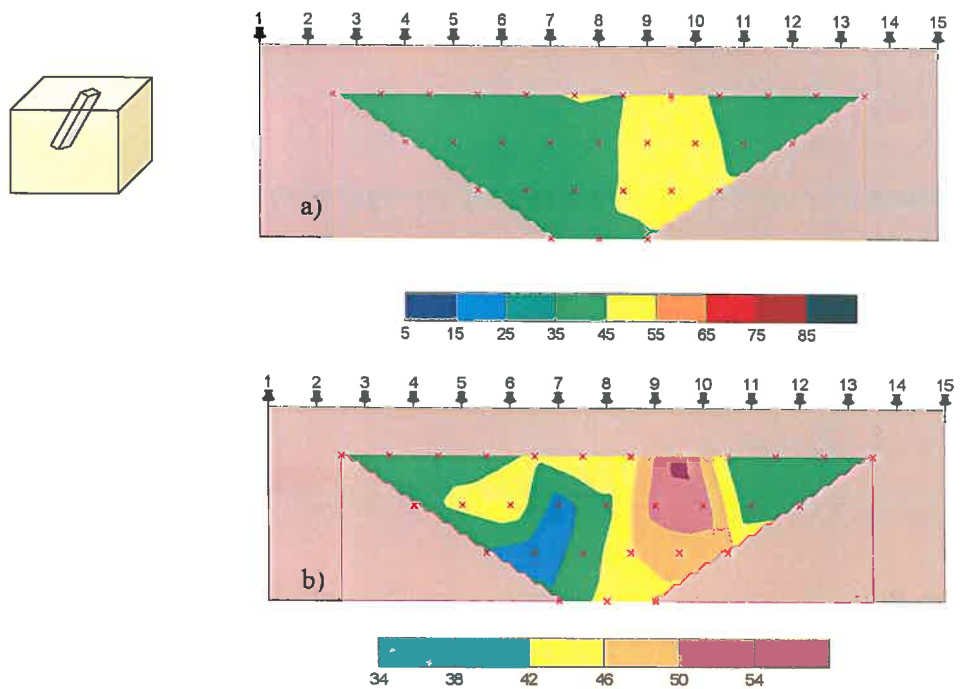


Figure III-18 : Répartition des résistivités apparentes pour une fissure de 0,004 m de large et 0,030 m de profondeur entre les électrodes 9 et 10 orientée à 45° vers la gauche, a) échelle identique aux autres cartes de résistivité, b) échelle réduite.

2.3.3. Influence du pendage de la fissure sur la résistivité apparente

Dans tous les cas précédents le pendage des fissures était de 0° , soit vertical, se distinguant de l'encaissant par une zone de résistivité élevée correspondant à la zone de fissure. Dans ces cas d'étude, la fissure recoupe le plan 2D du panneau électrique perpendiculairement. Le système présente donc une symétrie sur toute la profondeur d'acquisition. Nous avons testé un pendage de fissure différent. Elle se situe en surface entre les électrodes 9 – 10, avec un angle θ de 45° vers la gauche du panneau, son épaisseur et sa longueur sont respectivement de 0,01 m et 0,03 m. Le pendage de la fissure à 45° entraîne une répartition des résistivités apparentes ni identique, ni dans les mêmes ordres de grandeur (Fig. III-16b, III-18). Les contrastes de résistivité dus à la présence de la fissure sont très faibles comparés à ceux obtenus lorsque la fissure est verticale. Par contre la zone influencée par cette fissure est beaucoup plus importante en extension à la fois latérale et verticale. La figure III-18b est une représentation de la même carte en utilisant une échelle beaucoup plus fine, adaptée aux variations du milieu. La fissure est à l'origine de la faible augmentation de résistivité en surface, 55 $\Omega.m$, entre les électrodes 9 – 10. Lorsque la pseudo-profondeur augmente, la résistivité à l'aplomb des électrodes 9 – 10 diminue et tend vers 40 $\Omega.m$. De manière similaire aux observations faites lorsqu'une fissure est verticale, une zone de résistivité inférieure à 40 $\Omega.m$ se développe. Celle-ci se situe en profondeur au-delà de la présence de la fissure dans la partie gauche du panneau électrique. La baisse de résistivité est néanmoins très faible par rapport aux ordres de grandeurs observés lorsque la fissure est verticale.

Ces tests numériques ont permis de distinguer les zones non influencées par la fissure, où la résistivité apparente est équivalente à celle du bloc initial, des zones fissurées. La détection de fissures par la méthode électrique du panneau 2D, montre la sensibilité de la méthode à la profondeur, à la largeur, au nombre et au pendage de la fissure. Dans tous les cas testés, la sensibilité à la première pseudo-profondeur PP1 est la plus importante.

Pour une fissure de taille identique, mais de pendage variable, les résultats obtenus sont significativement différents. L'orientation verticale induit des contrastes de résistivité beaucoup plus marqués qu'une orientation oblique. Les forts contrastes de résistivité obtenus aux abords de la fissure montrent que la détection de celle-ci par la méthode de la résistivité électrique est possible.

Nous pouvons ainsi envisager un suivi expérimental de la fissuration par cette méthode.

3. Conclusion du chapitre III

L'approche expérimentale a nécessité la mise au point technique de la réalisation de la mesure à l'échelle d'investigation centimétrique sur un sol sec. Nous avons, pour cela, axé nos efforts sur l'élaboration d'électrodes permettant un contact électrique humide ponctuel. Les données expérimentales, acquises pour quatre états de fissuration, sont similaires aux résultats numériques acquis par le logiciel « Fissel », et nous permettent ainsi de valider la modélisation proposée pour la caractérisation de milieux fissurés par résistivité électrique.

La sensibilité de la méthode électrique à la géométrie de fissures dans le sol a été évaluée en 2D par des essais numériques réalisés de manière simple (variation d'un seul paramètre de description de la fissure à la fois). Les variations de géométrie de la fissure (profondeur, épaisseur, pendage) et du nombre de fissures sont à l'origine des variations de la répartition des résistivités apparentes sur les panneaux 2D.

Néanmoins, le logiciel « Fissel », ne permet pas à l'heure actuelle de fournir une inversion des données de résistivité apparente en résistivité inversée. Nous avons inversé les données expérimentales au moyen du logiciel Res2Dinv (Loke et Barker 1996). Les cartes de résistivité inversée fournissent une indication satisfaisante sur la position et l'orientation de la fissure, l'épaisseur et la profondeur de la fissure n'étant pas identifiées. La poursuite du développement du logiciel « Fissel » est nécessaire afin de pouvoir caractériser la géométrie du réseau de fissures et non pas seulement une grandeur relative à la densité de fissuration.

Les résultats numériques et expérimentaux obtenus nous encouragent à développer une expérimentation de résistivité électrique en 3D.

CHAPITRE IV

Analyse tridimensionnelle de la géométrie d'un réseau de fissures

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre précédent la réalisation technique de l'expérimentation à une échelle centimétrique est possible. L'expérimentation conduite en 2D a permis de valider qualitativement les résultats issus de la modélisation par le logiciel « Fissel ». A partir de cette étape, différents scénarios de fissuration ont été simulés. Nous avons montré que la résistivité électrique est un paramètre sensible aux caractéristiques géométriques (longueur, épaisseur, profondeur, pendage) et au nombre de fissures. Néanmoins ces résultats sont issus d'observations 2D ; nous aborderons dans ce chapitre la mise en place d'expérimentations 3D.

L'objectif de l'acquisition 3D est de compléter la connaissance de la géométrie d'un réseau de fissures par rapport aux résultats obtenus en 2D. Ainsi nous avons conduit deux expérimentations de fissuration, l'une artificielle, et l'autre naturelle. Les blocs, de taille décimétrique ($x = 0,26$ m $y = 0,36$ m $z = 0,28$ m), sont issus de la même parcelle que le bloc de l'expérimentation précédente de texture limoneuse (20 % d'argile, 75 % de limon, 5 % de sable, 1,7 % de matière organique). Avant son prélèvement, l'échantillon de sol a été soumis à une forte compaction par le passage répété d'engins agricoles. Sa densité apparente sèche est de $1,62 \text{ g cm}^{-3}$ et sa résistivité apparente proche de $23 \Omega \cdot \text{m}^1$. Un indice de fissuration, AAI, basé sur les mesures de résistivité apparente, est proposé. Parallèlement à l'expérimentation, nous avons effectué des tests de modélisation, afin d'étudier les effets de bords lors des acquisitions de résistivité électrique sur des échantillons de sol de taille finie, et la sensibilité des indices de fissuration en fonction des caractéristiques géométriques de la fissure.

Ce chapitre est composé de trois parties :

- La première partie présente une revue des différentes possibilités de quadripôles permettant une acquisition 3D. Nous détaillerons la mise en œuvre expérimentale de la configuration carré que nous avons choisie. Nous expliciterons les résultats issus de la modélisation concernant les effets de bords lors de l'acquisition par configuration carré sur un bloc décimétrique et la sensibilité des indices de fissuration.
- La deuxième partie concerne l'expérimentation dite artificielle. C'est une expérimentation 3D, réalisée sur un modèle réduit de sol, à l'aide d'un squelette artificiel de fissures. Nous avons ainsi pu appliquer l'indice de fissuration AAI à un jeu de données expérimentales. Nous avons également couplé à ce volet une modélisation 3D du réseau de fissures artificielles, au moyen du logiciel « Fissel ».
- La troisième partie concerne l'expérimentation dite naturelle. Cette expérimentation consiste en un suivi temporel d'un bloc de sol soumis à une dessiccation naturelle sous conditions contrôlées. Cette partie, rédigée en anglais, fait l'objet d'un article accepté dans la revue *European Journal of Soil Science*.

¹ Cette valeur de résistivité, différente de celle du bloc utilisé dans le chapitre précédent ($40 \Omega \cdot \text{m}$), est due à un état hydrique différent, les 2 blocs n'ayant pas été prélevés à la même saison.

1. Acquisition 3D des données de résistivité apparente

1.1. Choix d'un dispositif d'acquisition électrique

Le sol étant un milieu complexe et hétérogène, la caractérisation de son organisation spatiale requiert une observation 3D. Deux types de dispositifs d'électrodes permettent une acquisition 3D : i) les dispositifs en lignes, ii) les dispositifs « carré ».

1.1.1 Dispositif en ligne

Les électrodes ABMN sont alignées et l'acquisition des mesures de résistivité apparente s'effectue suivant des panneaux parallèles. Oglivy *et al.* (1999) utilisent une configuration pôle-dipôle avec un espacement inter-électrode et inter-ligne identique de 5 m ; les panneaux sont orientés parallèlement à l'ouverture d'une carrière, ce qui présuppose que le milieu est bidimensionnel dans la direction de l'orientation des panneaux électriques (Figure IV-1a). Chambers *et al.* (2002) utilisent des panneaux 2D de configuration Wenner et Dipôle-Dipôle orientés suivant deux directions perpendiculaires (Figure IV-1b). L'inversion des données de résistivité apparente ne fournit pas les mêmes résultats selon que i) l'inversion est conduite successivement panneau par panneau, ii) les données sont regroupées et inversées en un seul jeu de données. Dans le premier cas le système est considéré comme un regroupement de panneaux 2D indépendants fournissant ainsi une information « quasi 3D ». Dans le second cas l'ensemble des données est traité à l'aide d'un algorithme d'inversion 3D, en tenant compte de l'ensemble des mesures simultanément. Les résolutions latérale et verticale issues du traitement « quasi 3D » sont fortement dégradées par rapport au traitement 3D et la géométrie de l'objet d'étude n'est pas retrouvée (Chambers *et al.*, 2002). Zhou *et al.* (2001) utilisent également un dispositif 3D en ligne qui est orienté suivant quatre directions (Figure IV-1c). La résolution spatiale est ainsi améliorée car on ne privilégie pas une direction par rapport à une autre, ce qui permet une mesure plus fiable et représentative d'un milieu hétérogène. Bibby (1986) souligne que la mesure de la résistivité apparente dépend de la position et de l'orientation du quadripôle par rapport à l'hétérogénéité électrique. Ainsi une orientation unique de quadripôle, dans un milieu hétérogène et à fort contraste de résistivité, peut engendrer des erreurs d'interprétation du milieu prospecté. A partir de simulations numériques, Meheni *et al.* (1996) présentent des cartes de résistivité apparente pour différentes orientations du dispositif électrique. L'orientation du quadripôle électrique est soit parallèle, soit perpendiculaire à la discontinuité électrique et ne fournit pas les mêmes mesures de résistivité apparente. Panissod *et al.* (1997) recherchent des arrangements de quadripôles d'électrodes fournissant une mesure la plus isotrope possible, soit la moins influencée par la position des électrodes. Les premiers résultats (Fig. IV-2) ont été obtenus à partir d'une configuration circulaire avec différents stades de simplification allant de 17 électrodes à 3 électrodes.

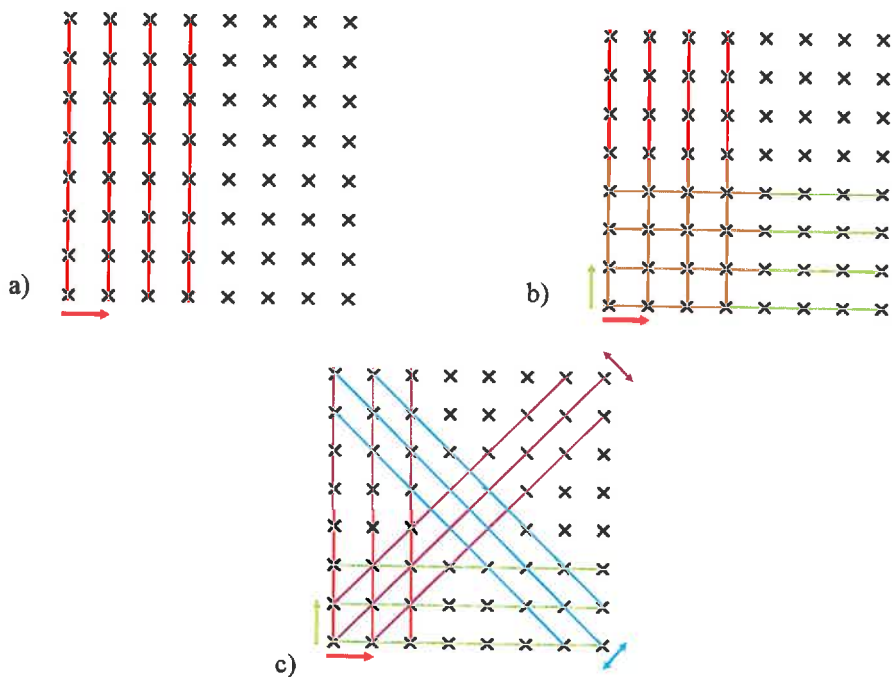


Figure IV-1 : Dispositif 3D en ligne sur une grille carrée (8 x 8) de 64 électrodes, les flèches représentent la direction des panneaux électriques : a) suivant une direction, b) suivant deux directions c) suivant quatre directions.

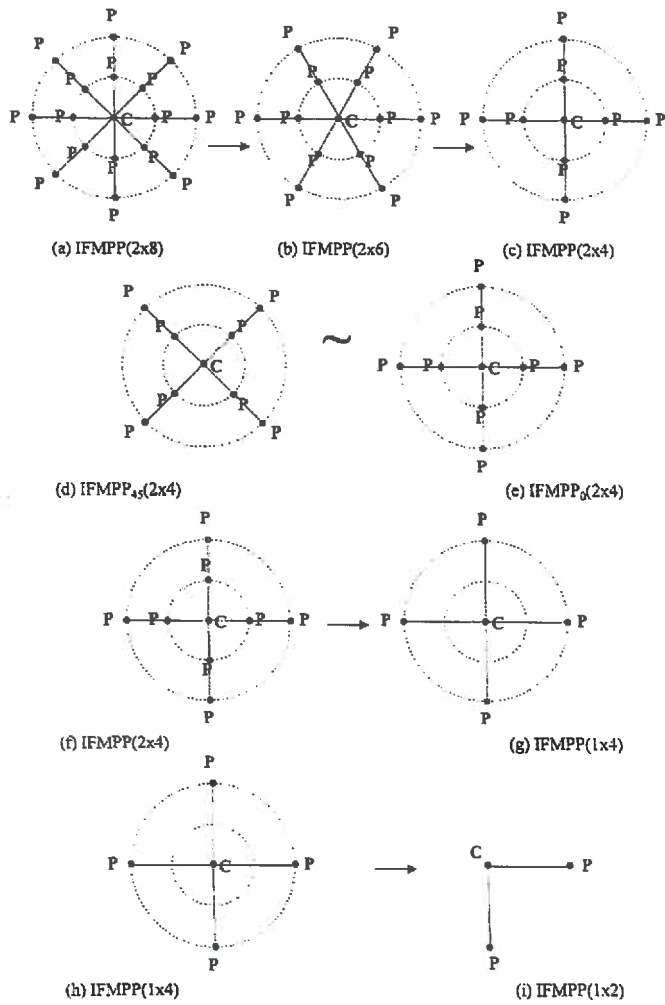


Figure IV 2 : Dispositif utilisé par Panissod *et al.* (1997), présentant l'évolution de la configuration circulaire de 16 à 2 électrodes de potentiel P, (C, étant l'électrode centrale d'injection).

1.1.2 Dispositif Carré

1.1.2.1. Description du dispositif et intérêts de son utilisation

Habberjam et Watkins (1967) introduisent la configuration carré qui permet de faire passer le courant par des électrodes, A et B, ayant des positions non colinéaires. Les électrodes ABMN ne sont donc plus alignées, leur disposition forme un carré (Figure IV-3). Cette configuration prend en compte, pour chaque mesure effectuée, un volume plus développé que lorsque les électrodes sont alignées. Ils ont montré que cette configuration est moins sensible à l'orientation des électrodes qu'un dispositif en ligne mais est plus sensible aux hétérogénéités électriques du milieu. Hesse *et al.* (1986) aboutissent aux mêmes conclusions : la configuration carré représente le quadripôle électrique le plus symétrique, elle fournit ainsi une mesure de résistivité avec un biais plus faible que celle du dispositif classique en ligne. De plus, la configuration carré est beaucoup plus sensible à l'anisotropie du terrain.

Dans une étude d'implantation de forage, Darboux-Afouda et Louis (1989) explicitent l'intérêt de cette méthode pour détecter des fissures drainantes et conductrices, par rapport à un dispositif en ligne. La configuration carré permet de détecter des anisotropies qui seraient peu visibles avec un dispositif Schlumberger classique. Ils distinguent ainsi deux types de fissures : i) des zones de fracture importante susceptibles de drainer des ressources en eaux souterraines, ii) des zones de faiblesse dans le socle moins fissuré fournissant des débits d'eaux souterraines beaucoup moins importants. Lataste *et al.* (2003) caractérisent l'endommagement des bétons, qui se manifeste notamment par l'apparition de fissures, en utilisant un coefficient d'anisotropie du matériau A_n correspondant au rapport des résistivités apparentes suivant les deux orientations de quadripôle ABMN. Senos Matias (2002) souligne que l'utilisation de cette méthode est à privilégier par rapport à un dispositif en ligne lors d'une prospection 3D dans un milieu sans connaissance *a priori* de l'organisation des hétérogénéités.

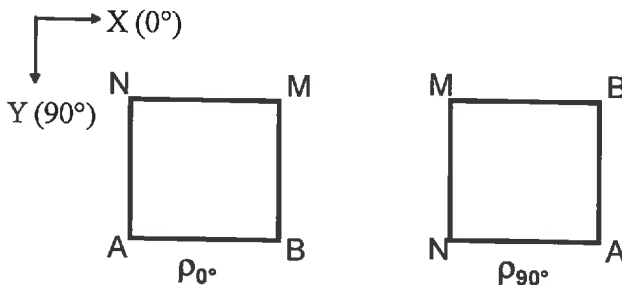


Figure IV-3 : Dispositif carré ABMN.

1.1.2.2. Influence de l'orientation d'une fissure sur la mesure de résistivité électrique

La dessiccation d'un sol entraîne la création de fissures qui sont des objets résistants d'un point de vue électrique. Cette barrière isolante perturbe la circulation du courant. La distribution des lignes de courant est différente suivant que l'orientation de la fissure est parallèle ou perpendiculaire aux électrodes d'injection A et B. En s'appuyant sur une simulation numérique à l'aide du logiciel « Fissel », dont les caractéristiques ont été explicitées dans le chapitre III, nous pouvons évaluer et quantifier l'importance de ce phénomène.

Nous avons modélisé la présence d'une fissure, orientée à 0° et centrée en (0,0) dans un milieu homogène choisi à $23 \Omega.m$ et de dimensions ($x = 0,26 \text{ m}$, $y = 0,36 \text{ m}$, $z = 0,28 \text{ m}$). La séquence de mesures simulée correspond à une acquisition faite avec un dispositif carré identique à celui décrit précédemment, et pour un espacement inter-électrode égal à $0,03 \text{ m}$. Les figures IV-4 et IV-5 présentent la répartition des résistivités pour les deux orientations de quadripôles à 90° et à 0° . Dans le premier cas (Fig. IV-4), la fissure (longueur = $0,08 \text{ m}$, largeur = $0,003 \text{ m}$, profondeur = $0,05 \text{ m}$) est orientée perpendiculairement aux électrodes A et B. Au point de mesure (0,0) centré sur la fissure, la résistivité atteint $49 \Omega.m$, ce qui correspond à une augmentation de 213 % de la résistivité par rapport à l'encaissant. Les lignes de courant vont en profondeur pour contourner l'obstacle résistant, créant ainsi une forte différence de potentiel entre les électrodes de potentiel M et N. Dans le second cas (Fig. IV-5) la fissure est orientée parallèlement aux électrodes A et B. Au point de mesure (0,0), la résistivité est de $10 \Omega.m$ ce qui correspond à une baisse de 43 % de la résistivité par rapport à l'encaissant. Les lignes de courant se concentrent entre les électrodes A et B et la fissure. La fissure empêche les lignes de courant de circuler du côté de M et N, ce qui induit une faible différence de potentiel entre les électrodes de potentiels.

Parmi les différentes configurations électriques permettant une acquisition 3D, nous avons choisi d'utiliser la configuration carré pour l'étude de la fissuration des sols. En effet, ce dispositif a une sensibilité plus importante à la présence d'hétérogénéités qu'un dispositif en ligne et il ne nécessite pas de connaissance *a priori* de l'organisation du milieu. La simulation, au moyen du logiciel « Fissel », d'une fissure par rapport aux deux orientations du quadripôle carré ABMN, a montré que la mesure de la résistivité électrique est très sensible. Lorsque la fissure a une direction parallèle aux électrodes d'injection AB la résistivité diminue, lorsqu'elle a une direction perpendiculaire, la résistivité augmente. Cette différenciation fournit un atout intéressant afin de retrouver l'orientation de la fissure au moyen de la configuration carré.

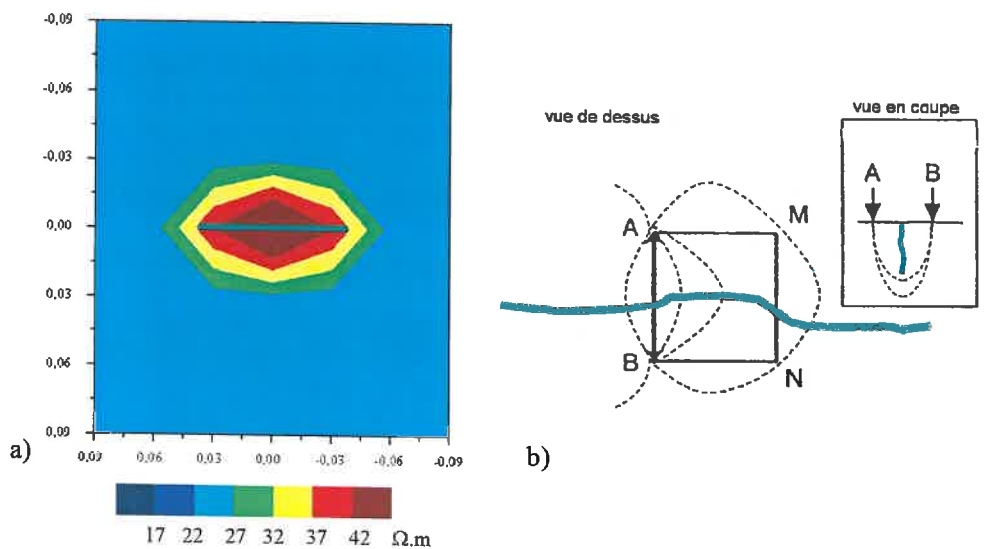


Figure IV-4 : Cas d'une fissure orientée perpendiculairement aux électrodes A et B. a) carte de résistivité apparente calculé à partir de « Fissel », b) distribution des lignes de courant.

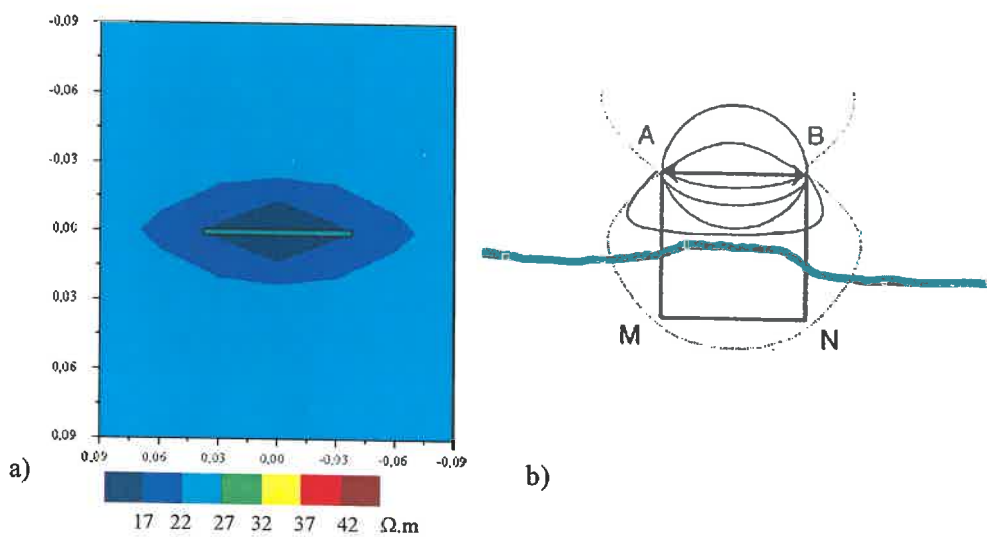


Figure IV-5 : Cas d'une fissure orientée parallèlement aux électrodes A et B. a) carte de résistivité apparente calculé à partir de « Fissel », b) distribution des lignes de courant

1.2 Mise en œuvre expérimentale

Pour chaque mesure de résistivité apparente, nous avons choisi de positionner le quadripôle suivant deux orientations correspondant aux acquisitions à 0° et 90° annotées respectivement ρ_{0° et ρ_{90° . Ces deux mesures s'effectuent par le biais d'une rotation de 90° (Fig. IV-3), soit :

- les électrodes A et B orientées à 0° , la résistivité apparente correspondante est notée ρ_{0°
- les électrodes A et B orientées à 90° , la résistivité apparente correspondante est notée ρ_{90°

Ainsi deux mesures sont réalisées pour une seule position d'électrodes. Les résistivités apparentes ρ_{0° et ρ_{90° sont calculées à partir de l'équation (II-8), rappelée ici en (IV-1) :

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{IV-1})$$

où ΔV est la différence de potentiel mesurée [V], I le courant injecté [A], k est le facteur géométrique. Dans le cas de la configuration carré, le coefficient géométrique k s'écrit suivant l'équation :

$$k = \frac{2\pi a}{2 - \sqrt{2}} \quad (\text{IV-2})$$

où a représente l'espacement inter-électrode [m].

L'acquisition 3D suppose une acquisition de données suivant les directions ($0_x, 0_y, 0_z$) et donc sur plusieurs pseudo-profondeurs. L'augmentation du volume de prospection s'effectue suivant le même principe que pour les panneaux 2D. En augmentant l'espacement inter-électrode le volume de sol prospecté devient plus important. La figure IV-6 illustre la mise en place de l'acquisition 3D, les croix représentant l'emplacement des électrodes. Pour nos expérimentations, nous avons choisi une grille composée de 8 lignes de 8 électrodes espacées de 0,03 m. A l'espacement inter-électrode le plus faible a correspond la première pseudo-profondeur. Le premier quadripole de mesure se situe en bas à gauche. Les mesures correspondantes aux deux orientations 0° et 90° sont effectuées. Ensuite le quadripole est déplacé vers la droite d'un espacement inter-électrode a , et les mesures de ρ_{0° et ρ_{90° sont à nouveau effectuées. Le quadripole ABMN est ainsi déplacé de a jusqu'au bout de la première ligne. Les deux mesures de résistivité sont faites pour chaque position du quadripole. Le processus d'acquisition se poursuit pour chaque position du quadripole, recouvrant ainsi toute la grille. A la première pseudo-profondeur, un total de 98 mesures est acquis, 49 pour l'orientation 0° et 49 pour l'orientation 90° . A la deuxième pseudo-profondeur, l'espacement inter-électrode augmente de a à $2a$ et l'acquisition s'effectue de la même manière. Le quadripole ABMN est déplacé d'une distance a , entraînant ainsi une superposition des mesures. Ce principe est appliqué jusqu'à la sixième pseudo-profondeur. Les pseudo-profondeurs 2, 3, 4, 5 et 6 contiennent ainsi

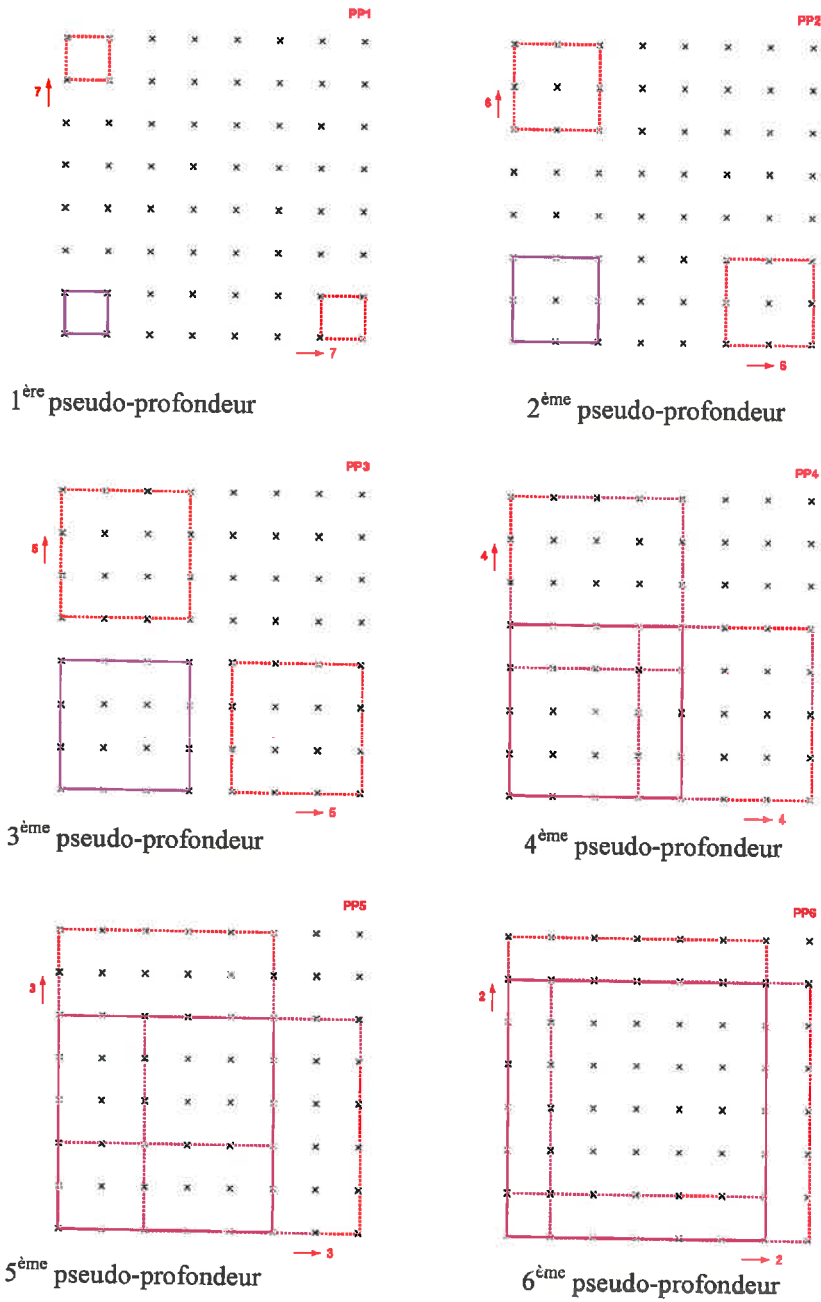


Figure IV-6 : Principe de l'acquisition 3D avec un dispositif carré, sur 6 pseudo-profondeurs.

respectivement 72, 50, 32, 18 et 8 mesures au total. Les cartes de résistivité apparente sont construites à partir de l'ensemble des mesures où chaque valeur expérimentale est affectée géographiquement au centre du carré ABMN de mesure. Ainsi, pour chaque pseudo-profondeur, nous pouvons établir deux cartes de résistivité apparente, l'une pour les acquisitions orientées à 0° et l'autre pour les acquisitions orientées à 90° . A la première pseudo-profondeur, la forme de la maille de mesure est carrée, sa dimension est équivalente à l'espacement inter-électrode a . Pour les pseudo-profondeurs 2, 3, 4, 5 et 6 les quadripôles de mesures ABMN se superposent suivant les directions (0_x) et (0_y) et il n'est pas possible de représenter sans chevauchement la taille exacte de la maille de mesure. Nous avons donc choisi de garder les dimensions de la maille carrée initiale soit a afin de pouvoir représenter toutes les mesures de chaque pseudo-profondeur sans avoir à alourdir la représentation graphique. Les cartes issues de l'acquisition 3D carré sont ainsi présentées dans ce chapitre.

La configuration carré qui a été appliquée aux expérimentations et simulations est identique. Le dispositif de mesure est composé de 8 lignes de 8 électrodes espacées de 0,03 m, il est posé à la surface de l'échantillon, et centré par rapport à cette face. Six pseudo-profondeurs sont prospectées. Rappelons que deux orientations de quadripôles (0° et 90°) sont effectuées pour chaque position d'électrodes. Ainsi à chaque pseudo-profondeur correspondent deux cartes d'acquisitions suivant les deux orientations de quadripôle 0° et 90° .

1.3. Calcul des effets de bord

L'expérimentation a été conduite au laboratoire sur un échantillon de taille finie. Ces conditions expérimentales nous ont amenés à quantifier les effets de bord obtenus lors des acquisitions des données électriques. Pour cela nous avons calculé les effets de bord par une approche numérique au moyen du logiciel « Fissel » décrit précédemment. En effet, la proximité du bord est à l'origine de gradients de résistivité apparentes non représentatifs de variations naturelles des propriétés du milieu étudié. En avoir une connaissance semble donc nécessaire afin de pouvoir décrire et quantifier ces effets. Dans ce cas précis le couplage expérimentation-modélisation fournit une connaissance *a priori* de la répartition des effets de bord. Nous présentons deux types de résultats :

- dans un premier temps, nous avons comparé la répartition des résistivités apparentes de notre bloc expérimental à celle d'un bloc de taille infinie pour quantifier directement les effets de bord de notre expérience.
- dans un second temps, nous avons déterminé la taille optimale d'un bloc expérimental sur lequel nous pourrions négliger les effets de bord.

1.3.1 Répartition des effets de bord sur le bloc expérimental

Nous avons calculé par simulation la résistivité apparente i) pour un bloc de dimensions finies identiques à celles du bloc décrit en introduction ($x = 0,26$ m, $y = 0,36$ m et $z = 0,28$ m) et ii) pour un bloc de dimensions considérées comme « infinies » par rapport au dispositif utilisé, *i.e.* en multipliant les dimensions du bloc fini par un facteur 100 ($x = 26$ m, $y = 36$ m et $z = 28$ m). Le dispositif se compose de 8 lignes de 8 électrodes espacées de 0,03 m suivant une configuration carré, centrée par rapport au plan de surface ($0_x, 0_y$). L'espacement minimal entre les côtés du dispositif est de 0,025 m avec l'axe (0_y) et de 0,075 m avec l'axe (0_x). Six pseudo-profondeurs ont été prospectées, comme décrites précédemment pour une acquisition carrée 3D. Pour chaque volume prospecté, deux orientations ont été utilisées : le couple d'électrodes A B orienté suivant 0° et suivant 90° . Les effets de bord (Efb) ont été estimés par l'équation (IV-3) :

$$Efb = \frac{\rho_{cal}}{\rho_{réf}} \quad (IV-3)$$

avec ρ_{cal} , résistivité calculée pour le bloc de dimension finie, et $\rho_{réf}$ résistivité du bloc de dimensions « infinies » considérée comme la résistivité de référence lorsque les effets de bord sont négligeables. Ainsi lorsque $Efb = 1$, les mesures ne sont pas influencées par les dimensions du bloc.

Nous avons réalisé cette étude, pour un sol homogène et pour un sol fissuré, afin d'évaluer si la répartition des effets de bord de l'échantillon étaient identiques dans les deux cas.

1.3.1.1. Cas d'un milieu homogène

La résistivité du bloc homogène, de $23 \Omega.m$, a été choisie pour être la plus proche possible de la résistivité des blocs d'étude expérimentaux non fissurés. Les figures IV-7a) et IV-7b) représentent respectivement l'effet de bord E_{fb} suivant les deux orientations de quadripôles 0° et 90° et pour les 6 pseudo-profondeurs. La répartition des E_{fb} varie selon les pseudo-profondeurs et les orientations de quadripôles. Dans les deux cas, la proximité du bord se traduit par une perturbation positive ($E_{fb} \geq 1$): pour chacune des pseudo-profondeurs, on observe une augmentation de la résistivité dans le bloc de taille finie par rapport au bloc de taille infinie. Cette augmentation de résistivité est néanmoins beaucoup moins importante pour les deux premières pseudo-profondeurs que pour les autres pseudo-profondeurs. En effet c'est la proximité relative dont il faut tenir compte, c'est-à-dire la distance au bord par rapport à l'écartement des électrodes. Lorsque l'on prospecte plus en profondeur, l'écartement entre les électrodes devient plus important, tandis que l'échantillon garde la même taille. Ainsi la limite inférieure du bloc (dimension suivant l'axe 0_z), devient non négligeable lorsque les pseudo-profondeurs augmentent. De la même manière, les mesures les moins perturbées sont celles situées au centre du dispositif de prospection électrique. Cette zone est visible pour les pseudo-profondeurs les moins importantes (PP1, PP2 et PP3). A PP1, E_{fb} est inférieure à 5 % pour les mesures situées dans l'intervalle $x = -0,06 \text{ m}$ à $0,06 \text{ m}$ et $Y = -0,09 \text{ m}$ à $0,09 \text{ m}$. Cette zone est identique pour les deux orientations de quadripôles. A PP2, la plage où E_{fb} est inférieure à 5% est réduite, centrée en $(0,0)$ et de forme ellipsoïdale allongée suivant l'axe (0_y) . Cette forme s'explique par les dimensions du bloc où la dimension en (0_y) est supérieure à celle en (0_x) . A partir de PP3, la distribution de E_{fb} est différente suivant l'orientation du quadripôle ABMN. Pour une orientation à 0° , E_{fb} varie entre 20 et 35 %, et pour une orientation à 90° E_{fb} varie entre 25% et 60%. Il apparaît que les valeurs de résistivité pour une injection du courant parallèle à (0_y) , soit à ρ_{90° , sont plus perturbées que lorsque l'injection est perpendiculaire à (0_y) soit pour des mesures à ρ_{0° . L'échantillon n'étant pas cubique ($x \neq y \neq z$), les bords ne perturbent pas les mesures de manière identique et isotrope. Ainsi, les effets de bord sont d'autant plus importants que la profondeur augmente et que les électrodes d'injection A et B sont le plus proche d'un bord.

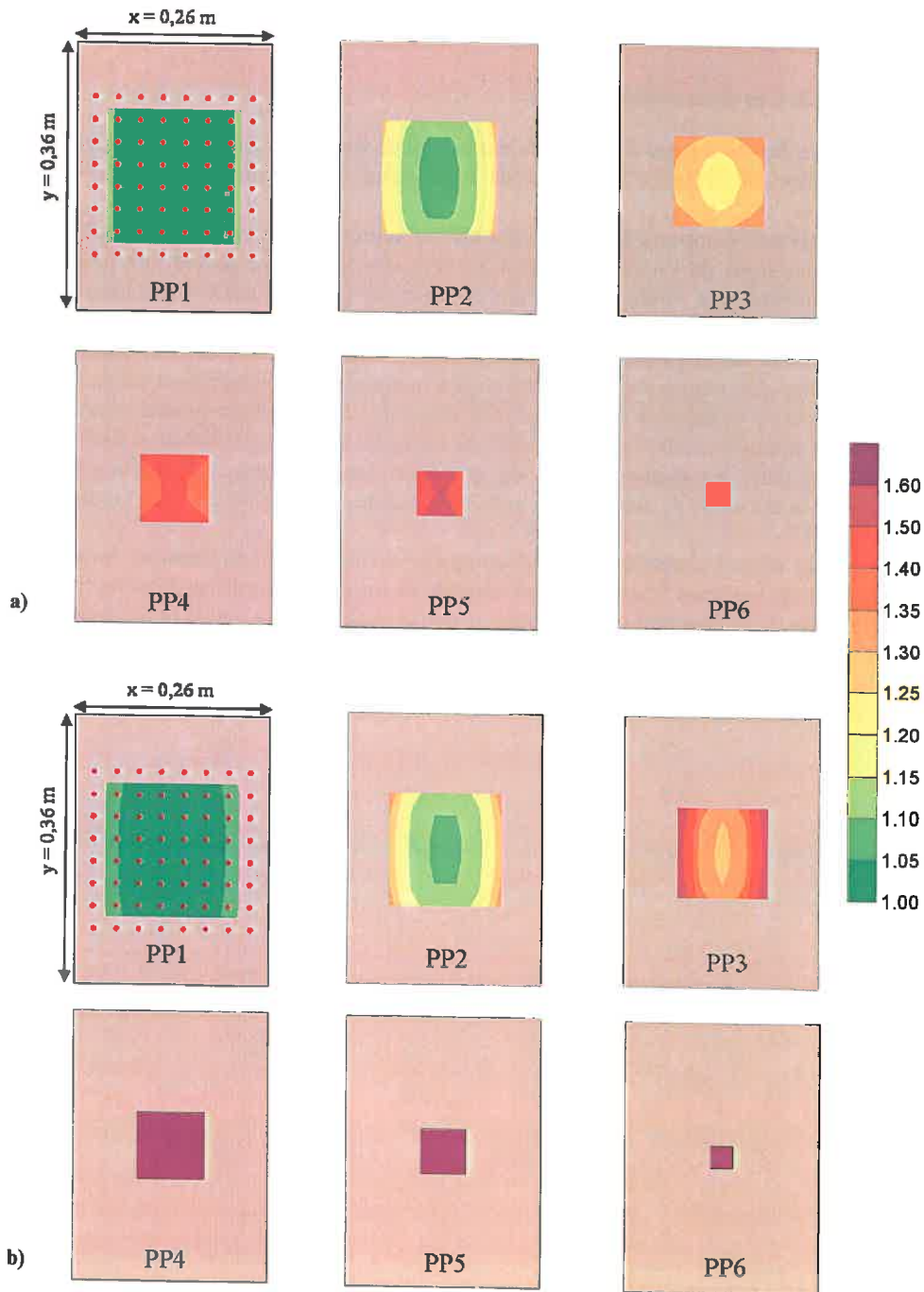


Figure IV-7 : Effets de bord calculés pour 6 pseudo-profondeurs dans un milieu homogène (taille du bloc : $x = 0,26\text{ m}$, $y = 0,36\text{ m}$, et $z = 0,28\text{ m}$) pour une configuration d'électrodes en carré orienté. a) à 0° et b) à 90° . Les points rouges représentent la position des électrodes.

1.3.1.2. Cas d'un milieu fissuré

La deuxième étape consiste à simuler le même milieu mais en y incluant des fissures, afin de mettre en évidence les effets de bord selon la répartition volumique des discontinuités.

Le milieu fissuré comporte trois fissures qui se rejoignent au centre du bloc². La résistivité électrique de l'encaissant est à 23 Ω .m. De la même manière que pour le milieu homogène, des cartes des *Efb* ont été établies pour les deux orientations de quadripôles 0° et 90°, et pour les 6 pseudo-profondeurs (Fig. IV-8 a et b).

L'influence des effets de bord augmente avec la profondeur pour les deux orientations de quadripôles. De manière similaire au milieu homogène, la perturbation est la plus importante pour l'orientation à 90°. La forme ellipsoïdale aux pseudo-profondeurs 2 et 3 est moins marquée, mais la forme reste identique (étirée dans la direction de l'axe des (0,)) et dans les mêmes ordres de grandeur. Les différences observées sont associées à la présence de fissures qui sont elles-mêmes à l'origine de forts gradients de résistivité.

Ces résultats nous permettent ainsi de comparer un milieu de dimensions finies à différents états. Les expérimentations en laboratoire sur des échantillons de taille finie, permettent un suivi temporel de l'évolution d'une propriété, par exemple la fissuration. Il faut toutefois analyser les mesures acquises en profondeur avec vigilance. Ainsi, dans le cas étudié, les mesures sont très fortement influencées par l'effet de bord à partir de la troisième pseudo-profondeur.

² Ce dispositif de fissure a été repris et décrit avec plus de détails (fig IV-19) lors de l'expérimentation artificielle, que nous aborderons dans la partie 2.

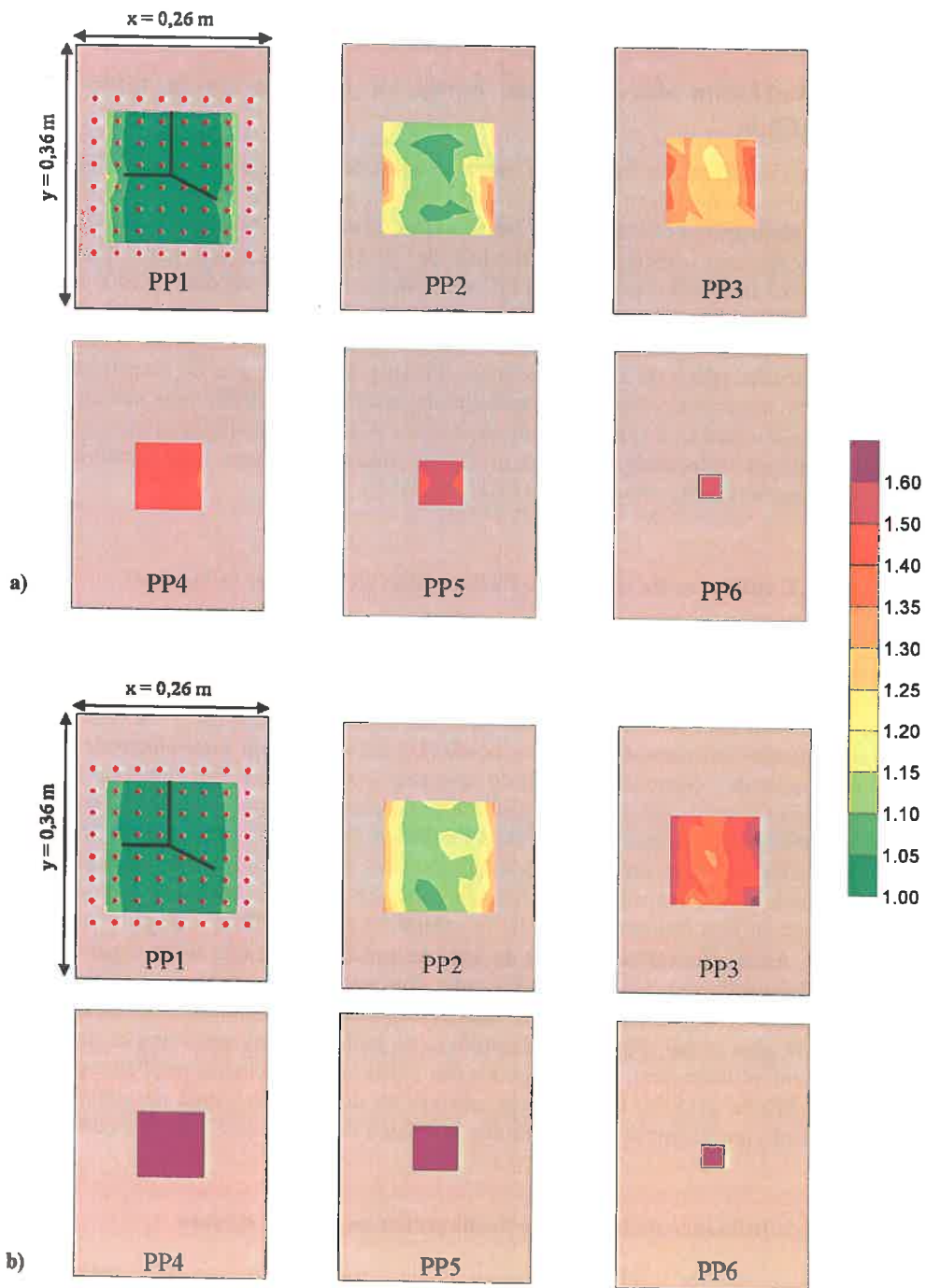


Figure IV-8 : Effets de bord calculés pour 6 pseudo-profondeurs dans un milieu fissuré (taille du bloc : $x = 0,26 \text{ m}$, $y = 0,36 \text{ m}$ et $z = 0,28 \text{ m}$) et pour une configuration d'électrodes en carré orienté. a) à 0° et b) à 90° . Les points rouges représentent la position des électrodes.

1.3.2. Variation des effets de bords en fonction de la taille de l'échantillon

Nous avons voulu estimer la relation entre la taille de l'échantillon et la taille du dispositif utilisé. L'évolution de l'indice Efb en fonction de la taille de l'échantillon permet de quantifier cette relation. Nous avons simulé un milieu de résistivité homogène avec une résistivité de référence de $20 \Omega.m$. Néanmoins des résultats similaires, avec une valeur de résistivité de référence différente, ont été obtenus. Afin de simplifier les contraintes 3D des effets de bord, nous avons d'abord fait évoluer de manière identique l'échantillon dans les directions (0_x) et (0_y) en gardant (0_z) constant. Ensuite, pour une valeur de x et y constante, influençant les mesures de résistivité de moins de 5%, nous avons évalué la sensibilité du système pour différentes valeurs de z . Le dispositif électrique utilisé est un quadripôle ABMN de configuration carré et d'espacement inter-électrode $a = 0,03$ m. Il est situé à la surface de l'échantillon, centré par rapport aux directions (0_x) et (0_y) (Fig. IV-9).

1.3.2.1. Influence de la taille de l'échantillon en x et y sur la mesure

Afin de nous affranchir de l'effet de bord en profondeur, l'échantillon a une taille fixe suivant (0_z) considérée comme infinie (soit $z = 10$ m). La sensibilité de la mesure est testée pour différentes longueurs de x et y variant de 0,04 m à 0,36 m (Fig. IV-10 a). Les résultats sont donnés en fonction du rapport de la longueur de x , (ou y car ces deux axes sont égaux dans notre simulation), notée (D) , à l'écartement inter-électrode (a) . Lorsque la taille de l'échantillon grandit la valeur de D/a augmente. La relation D/a est sans dimension et peut ainsi être généralisée à tout espacement inter-électrode. Comme précédemment nous avons calculé Efb avec l'équation (IV-3). Les variations de Efb en fonction de D/a sont présentées dans la figure IV-10 b. Nous retrouvons la logique qui associe la taille de l'échantillon aux effets de bord : ces derniers diminuent lorsque la taille de l'échantillon augmente. La relation atteint un palier à $Efb = 1$ pour la valeur de $D/a \geq 9$. Ainsi, afin qu'aucun effet de bord ne soit décelable lors de la mesure, la taille de l'échantillon en $(X Y)$ doit être neuf fois supérieure à l'espacement inter-électrode. Dans le cas d'un dispositif multi-électrodes on considérera la taille du quadripôle le plus grand. Pour des échantillons de taille compris entre une et quatre fois l'espacement inter-électrode l'influence des bords varie fortement, respectivement de plus de 300 % à 15 %. La démarche utilisée ici nous permet ainsi de quantifier l'effet de bord ; par exemple pour avoir une influence de moins de 5% il faut que $D/a \geq 6$.

1.3.2.2. Influence de la taille de l'échantillon en z sur la mesure

A partir de ce premier résultat nous avons voulu estimer l'influence de la taille de l'échantillon selon la profondeur, soit en fonction de la direction (0_z) . Les dimensions en x et en y ont été fixées à l'aide du calcul précédent à 0,18 m, soit six fois l'espacement inter-électrode ; z varie de 0,02 m à 0,30 m (Fig. IV-11 a). Les résultats

sont donnés en fonction du rapport de la longueur en z , notée (Z), à l'écartement inter-électrode (a). Les résultats obtenus sont également généralisables, puisque le rapport Z/a est sans dimension. La figure IV-11 b présente la sensibilité de la mesure en fonction de la grandeur Z/a . Les résistivités calculées sont supérieures à la résistivité de référence. Plus l'échantillon a une profondeur importante, plus le rapport Z/a est grand, plus la valeur de E_{fb} tend vers 1,5 ce qui signifie 50 % d'erreur sur la mesure. Pour des profondeurs d'échantillon très faibles, correspondant à Z/a entre 0,6 et 2, l'influence du bord est à l'origine d'une importante variation, respectivement, de plus de 95% à 13%. Lorsque Z/a est compris entre 2 et 10 E_{fb} évolue lentement et tend vers un palier correspondant à une augmentation des valeurs de résistivité de 5%. Ce palier est atteint à partir de la valeur Z/a égale à 4. Au-delà, l'augmentation de la profondeur de l'échantillon n'entraîne aucune amélioration de E_{fb} . Cette limite résulte des dimensions de x et y qui sont finies et non infinies.

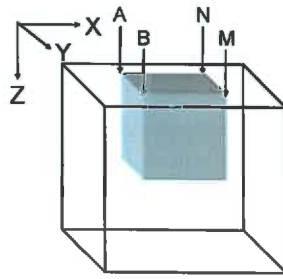


Figure IV-9 : Schéma synthétique du volume prospecté par un dispositif carré ABMN, centré par rapport à X et Y dans un milieu homogène.

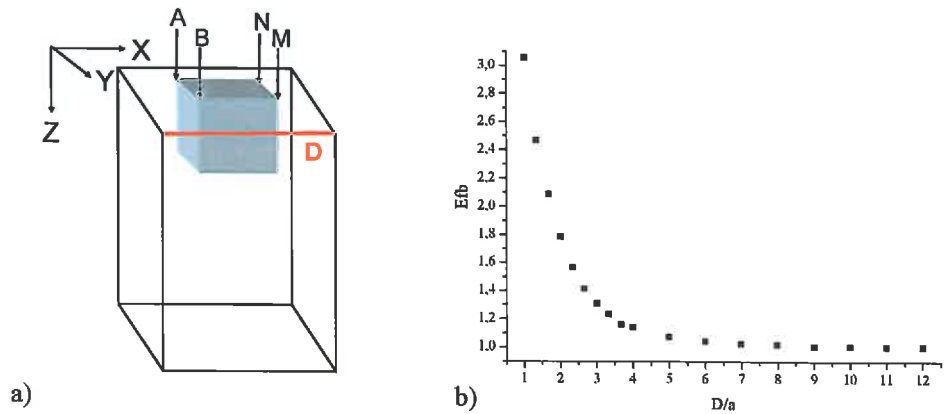


Figure IV-10 : Test de sensibilité de la taille de l'échantillon sur les effets de bord (E_{fb}). a) schéma du dispositif, x et y sont variables, z est fixe considéré comme infini. b) variation de E_{fb} en fonction de la distance D/a .

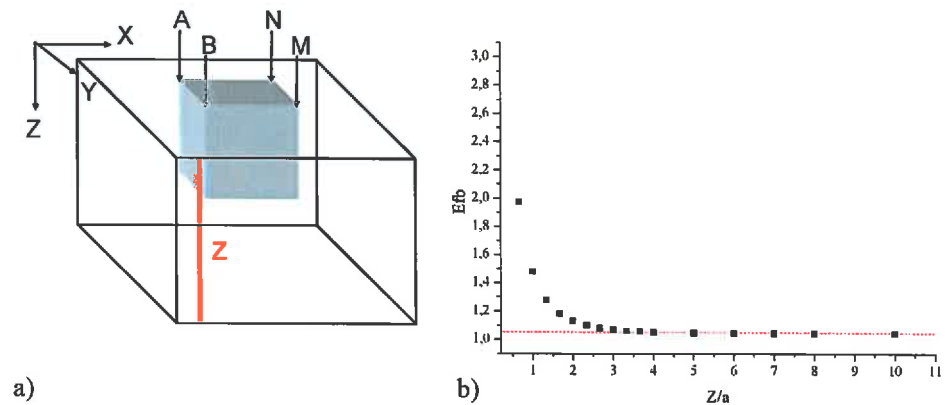


Figure IV-11 : Test de sensibilité de la taille de l'échantillon sur les effets de bord (E_{fb}). a) schéma du dispositif, x et y sont fixes et z varie. b) variation de E_{fb} en fonction de la distance Z/a .

Les simulations des effets de bord indiquent qu'une expérimentation conduite sur un bloc de dimensions finies est influencée par les bords de l'échantillon. Cette perturbation augmente lorsque la prospection électrique porte plus en profondeur. Nous attacherons une attention particulière aux mesures de résistivité des pseudo-profondeurs PP1 à PP3. Au-delà, les mesures acquises sont très fortement perturbées, à cause de la taille du dispositif par rapport à la taille de l'échantillon d'étude, que nous avons utilisé en laboratoire. Toutefois les variations de résistivité apparente dues aux effets de bord sont similaires dans le milieu homogène et le milieu fissuré. On peut supposer que ce résultat est généralisable à d'autres états de fissuration. Même si les effets de bord ne sont pas négligeables, le fait qu'ils soient identiques pour différents réseaux de fissuration nous permet de comparer des valeurs de résistivité obtenue pour différentes géométries de fissures à partir du moment où elles ont été acquises dans des conditions expérimentales similaires (en termes de taille de bloc et d'espacement inter-électrode). Le suivi temporel d'un milieu qui évolue, par exemple, peut être envisagé. La modélisation numérique nous a également permis de quantifier la relation entre la taille d'un échantillon et la taille du dispositif de mesure. La prospection électrique étant volumique, il a fallu tenir compte de l'influence des bords dans les trois dimensions. Ainsi, par exemple, pour assurer des mesures influencées à moins de 5% par les effets de bordures, les dimensions de l'échantillon doivent être au moins neuf fois supérieures à l'espacement inter-électrode, a , en O_x et en O_y , et quatre fois en O_z .

1.4 Traitement des données de résistivité apparente

1.4.1 Définition de l'indice d'anisotropie apparent : AAI

A chaque volume de sol prospecté, deux mesures de résistivité apparente, suivant les orientations 0° et 90° sont effectuées. Ces mesures acquises suivant la configuration carré sont sensibles à l'anisotropie du milieu : si les deux résistivités ρ_{0° et ρ_{90° sont différentes ceci traduit la présence d'une anisotropie électrique dans le milieu prospecté. Nous avons donc défini un indice appelé « indice d'anisotropie apparent » (AAI), calculé suivant l'équation suivante :

$$AAI = \frac{\rho_{0^\circ}}{\rho_{90^\circ}} \quad (IV-4)$$

où AAI est sans dimension et permet de distinguer les zones avec et sans anisotropie. Lorsque AAI est égal à 1, le milieu ne contient pas d'anisotropie électrique. Lorsqu'il est différent de 1, le milieu contient des anisotropies électriques. Afin de faciliter l'interprétation des données, nous avons également utilisé à plusieurs reprises le logdécimal (\log_{10}) de AAI. La valeur charnière est alors 0, et les zones d'anisotropies électriques sont représentées par des valeurs positives ou négatives.

1.4.2. Signification de l'indice AAI dans le cas d'un milieu fissuré

Afin d'évaluer la validité et la sensibilité de l'indice AAI en milieu fissuré, nous avons utilisé le logiciel « Fissel ». Nous avons ainsi testé l'influence de 4 paramètres géométriques de la fissure sur l'indice AAI : i) l'orientation, ii) la largeur, iii) le pendage et iv) la profondeur. Les résultats de résistivité apparente sont présentés dans le cas d'une configuration carré, centrée sur la fissure, avec un espacement inter-électrode de 0,03 m. La résistivité apparente est calculée pour les deux orientations de quadripôles ABMN à 0° et 90° .

1.4.2.1. Effet de l'orientation de la fissure sur l'indice AAI

Nous avons modélisé la présence d'une fissure verticale d'épaisseur 0,004 m, de longueur et de profondeur de 0,060 m (*i.e.* supérieure à l'espacement inter-électrode), dans un bloc homogène de résistivité de 20 Ω .m. Son orientation dans le plan (0, xy) varie entre 0° et 90° suivant un pas de 5° (Fig IV-12).

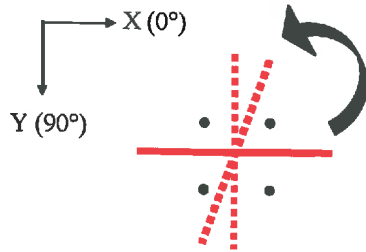


Figure IV-12 : Schéma des scénarios de modélisation de la variation de l'orientation de la fissure entre 0° et 90° dans le plan $(0,xy)$; les points noirs représentent la position des électrodes.

Les données de résistivité apparente (Fig IV-13) montrent une évolution inverse de ρ_{0° et ρ_{90° en fonction de l'orientation de la fissure. Nous retrouvons des résultats similaires à la figure IV-5, qui indiquent une valeur élevée de la résistivité apparente lorsque la fissure est orientée perpendiculairement aux électrodes A et B. Pour une orientation de fissure comprise entre 0° et 30° les valeurs de résistivité varient peu et sont stables autour d'un palier proche de $47 \Omega.m$ (respectivement $11 \Omega.m$) pour l'acquisition suivant les orientations 90° et 0° . On retrouve, comme nous l'avons observée plusieurs fois au chapitre II et au paragraphe 1.1.1. de ce chapitre, une valeur de résistivité supérieure à celle de l'encaissant lorsque la fissure est perpendiculaire à l'axe des électrodes d'injection A-B, et une valeur de résistivité inférieure à celle de l'encaissant lorsque la fissure est parallèle aux électrodes d'injection. La relation entre les résistivités s'inverse lorsque la fissure a une orientation comprise entre 60° et 90° . Lorsque l'orientation de la fissure varie de 30° à 60° , la résistivité apparente décroît pour la configuration ρ_{90° et inversement pour ρ_{0° . A l'orientation 45° , les valeurs de résistivité pour les deux orientations de quadripôle sont équivalentes. Cette première approche nous permet de distinguer trois classes d'orientation préférentielles de fissures : i) 0° - 30° , ii) 30° - 60° , iii) 60° - 90° .

De même que les courbes d'évolution de ρ_{0° et ρ_{90° avec l'orientation de la fissure (fig IV-13), l'indice AAI présente une courbe en S, où les trois classes de directions préférentielles des fissures sont retrouvées, associées respectivement à deux zones de paliers et une zone de transition (fig IV-14) :

entre 0° - 30° , les valeurs de $\log_{10}(AAI)$ sont négatives, proches de $-0,06$,

entre 60° - 90° les valeurs de $\log_{10}(AAI)$ sont positives, proches de $0,06$,

entre 30° - 60° les valeurs de $\log_{10}(AAI)$ appartiennent à la zone de transition, à

$45^\circ \log_{10}(AAI)$ est égal à 0.

Dans le cas d'une fissure d'épaisseur constante, l'indice AAI permet de retrouver l'orientation préférentielle de la fissure. Trois classes de directions préférentielles sont distinguées. Notons que l'orientation 45° est une orientation charnière qui correspond également à un milieu sans fissure ($\rho_{0^\circ} = \rho_{90^\circ}$).

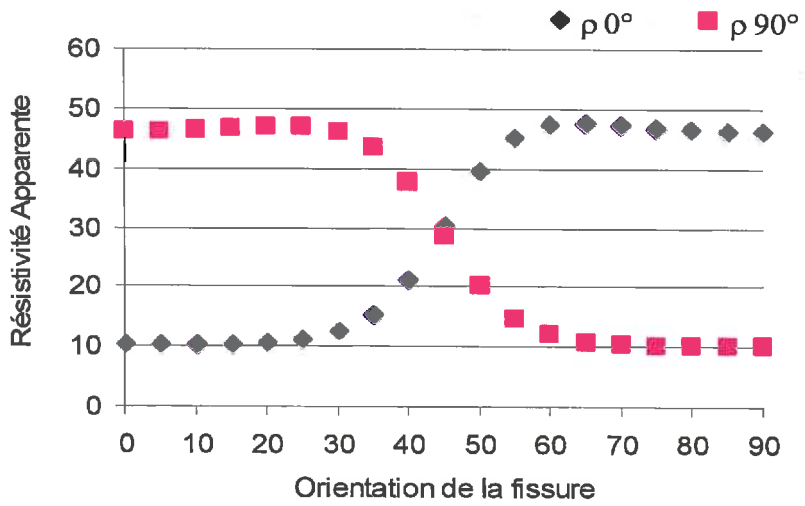


Figure IV-13 : Variation de la résistivité apparente ρ_{0° et ρ_{90° suivant l'orientation de la fissure.

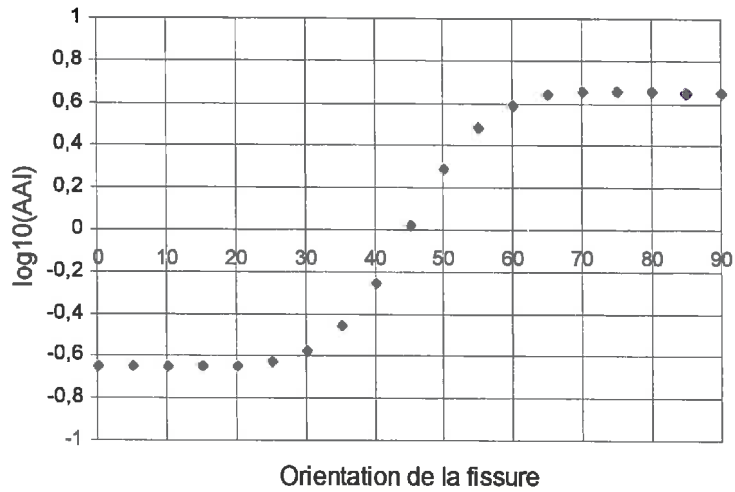


Figure IV-14 : Valeur de l'indice AAI en fonction de l'orientation de la fissure.

1.4.2.2. Effet de l'épaisseur de la fissure sur l'indice AAI

Nous avons par la suite modélisé l'influence d'une fissure verticale, de longueur et de profondeur de 0,06 m, et d'orientation 90° dans le plan $(0, xy)$ dans un bloc homogène de résistivité de $20 \Omega.m$. L'épaisseur de la fissure varie entre 0,002 m et 0,01 m (Fig IV-15).

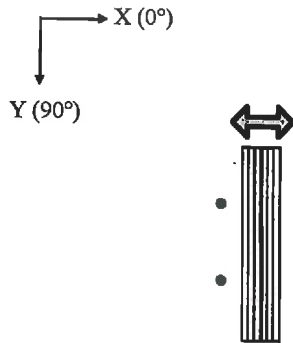


Figure IV-15 : Schéma des scénarios de modélisation dans le plan $(0,xy)$, avec une variation de l'épaisseur de la fissure entre 0,002 m et 0,01 m, les points noirs représentant la position des électrodes.

L'orientation de la fissure étant égale à 90° , nous retrouvons logiquement des valeurs de résistivité ρ_{0° plus élevées que les valeurs équivalentes ρ_{90° . Néanmoins, l'évolution des données de résistivité apparente, lorsque l'épaisseur de la fissure augmente, diffère dans les deux directions d'acquisition 0° et 90° (Fig. IV-16). Les valeurs de résistivité ρ_{0° augmentent lorsque l'épaisseur de la fissure augmente, tandis que la résistivité à ρ_{90° demeure stable. Ces changements de résistivité sont également observables à partir de l'étude de AAI. Dans le cas de ce scénario de simulation les valeurs de $\log_{10}(AAI)$ sont positives ce qui correspond à une fissure d'orientation préférentielle à 90° . Les valeurs varient de 0,06 à 0,09 lorsque l'épaisseur de la fissure augmente de 0,002 m à 0,01 m (Fig. IV-17). Le palier précédemment observé (Fig IV-14) disparaît, laissant place à une variation de l'indice AAI en fonction de la largeur de la fissure.

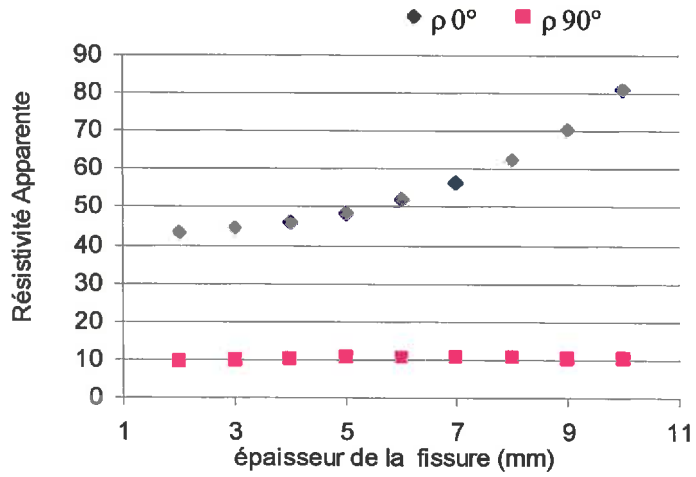


Figure IV-16 : Variation de la résistivité apparente ρ_{0° et ρ_{90° suivant l'épaisseur de la fissure.

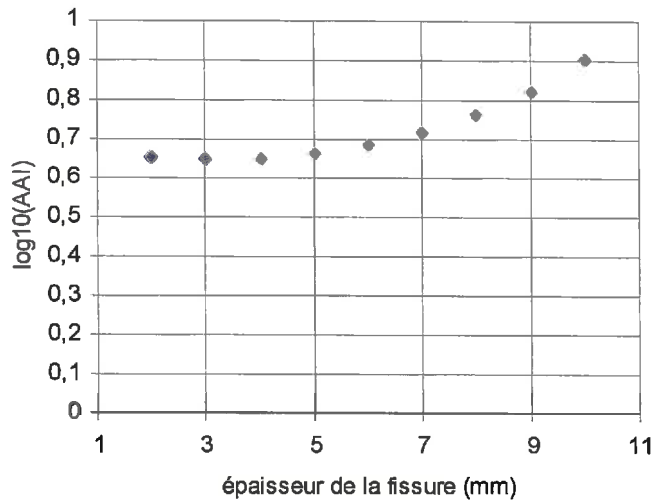


Figure IV-17 : Valeur de l'indice AAI en fonction de l'épaisseur de la fissure.

1.4.2.3. Effet du pendage de la fissure sur l'indice AAI

Le pendage de la fissure correspond à l'angle θ dans le plan (0, xz). Jusqu'à présent nous n'avons pas considéré des variations de pendage des fissures. Néanmoins l'observation directe, effectuée à l'état final de l'expérimentation naturelle sur des tranches verticales de bloc, nous a permis de noter des orientations de pendage différentes. Une fissure de 0,004 m d'épaisseur, 0,04 m de profondeur, orientée à 90° dans le plan (0, xy) et d'angle θ variable entre 0° et 50° , a été simulée (Fig IV-18), et nous avons déterminé l'influence du pendage sur l'indice AAI. Les valeurs de $\log_{10}(\text{AAI})$ sont supérieures à 0, ce qui correspond à l'orientation 90° dans le plan (0, xy). Néanmoins, l'indice AAI est également sensible aux variations de l'angle θ : il augmente et cet effet est particulièrement marqué à partir d'un pendage de 30° . Entre 30° et 50° , il augmente de 281 %, ce qui crée une forte variabilité dans la série de données.

1.4.2.4. Effet de la profondeur de la fissure sur l'indice AAI

Lors du phénomène de dessiccation, la profondeur de la fissure augmente au cours du temps. Nous avons utilisé pour la simulation la même séquence d'acquisition, et modélisé une fissure de 0,004 m d'épaisseur, orientée à 90° dans le plan (0,xy) et de profondeur variable entre 0,01 et 0,06 m (Fig. IV-19). Ce test a été effectué pour deux pendages de fissure θ égaux à 0° et 40° . Les valeurs de AAI augmentent lorsque la profondeur de la fissure augmente, atteignant un palier à partir de la profondeur 0,03 m. Au-delà de cette profondeur, les variations de valeurs de AAI deviennent très faibles. Cette évolution est identique pour les deux pendages testés. La profondeur de 0,03 m correspond à l'espacement inter-électrode utilisé. Ainsi, au-delà de cet espacement inter-électrode, un effet seuil masque l'influence de la profondeur de la fissure. L'indice AAI n'est alors plus sensible à la profondeur de la fissure lorsque celle-ci est égale ou supérieure à l'espacement inter-électrode.

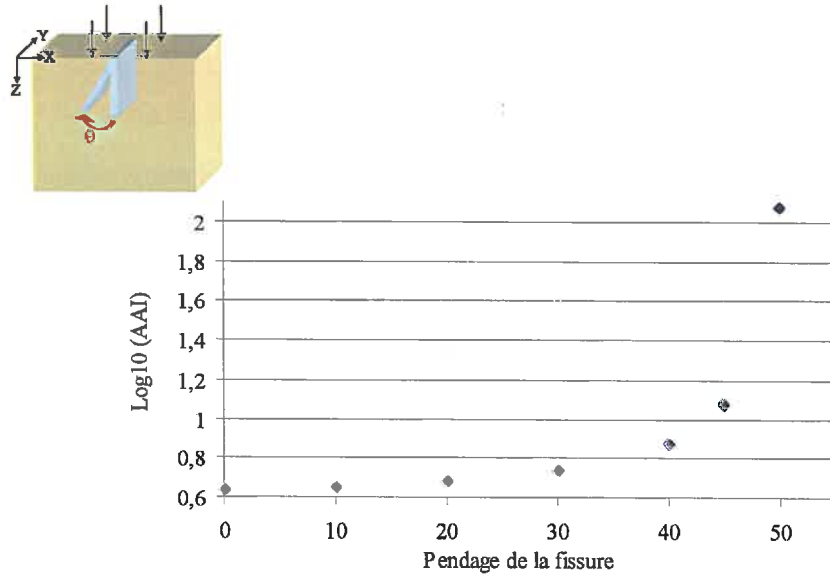


Figure IV-18 : Effet du pendage de la fissure sur l'indice AAI.

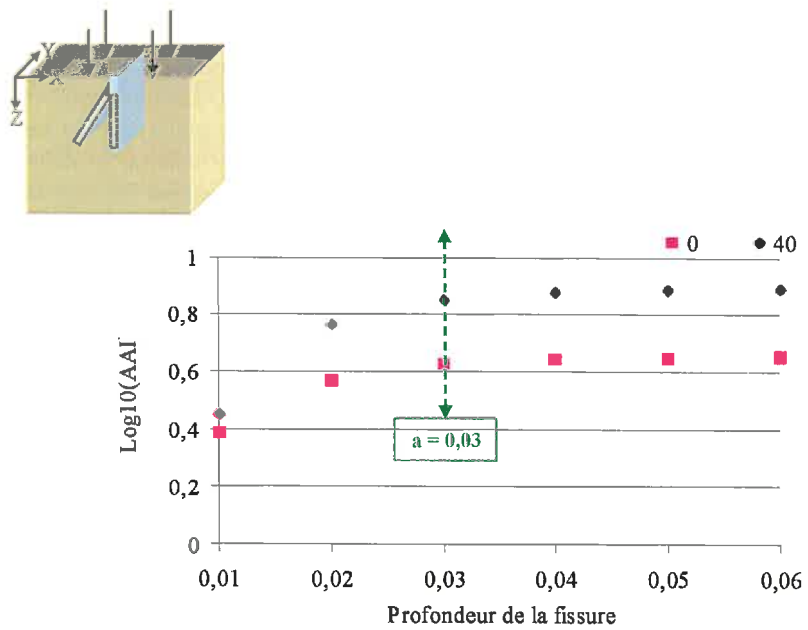


Figure IV-19 : Effet de la profondeur de la fissure sur l'indice AAI, pour deux pendages différents 0° et 40°.

L'indice d'anisotropie AAI a été mis au point afin de traiter les données issues des expérimentations 3D issus d'une configuration carré. Son calcul, très rapide, permet d'avoir accès à la répartition spatiale de la présence d'hétérogénéités dans le sol en fonction des différentes pseudo-profondeurs. L'exploitation des données « brutes » de résistivité apparentes au moyen de cet indice constitue une approche originale et innovante pour la description qualitative de la fissuration.

En effet, les tests numériques effectués, montrent la sensibilité de l'indice AAI aux variations des paramètres géométriques de la fissure. Celui-ci renseigne sur la direction préférentielle de la fissure mais est également dépendant de l'épaisseur, la profondeur et le pendage de la fissure.

L'utilisation de cet indice permet de fournir une première interprétation des données de résistivité apparente en vue de décrire un état de fissuration, ce qui a terme permettra de guider une éventuelle inversion des données de résistivité apparente.

2 Expérimentation et modélisation 3D en milieu contrôlé

2.1. Mise en place d'un état de fissuration artificielle

L'objectif de cette expérimentation est d'évaluer l'efficacité de la méthode électrique 3D pour détecter un réseau de fissures implanté artificiellement. En se plaçant volontairement dans des conditions connues de fissuration (géométrie, position, orientation) nous avons un moyen de valider directement la méthode employée.

Pour cela nous avons conduit une expérimentation dite contrôlée en implantant une fissuration artificielle de structure connue matérialisée par « un squelette » en plastique rigide (PVC) représentant le réseau de fissures (Fig.IV-20). Le squelette est implanté dans le bloc décrit précédemment ($x = 0,26$ m, $y = 0,36$ m, $z = 0,28$ m) d'une résistivité de $23 \Omega.m$. Ce squelette est électriquement résistant. Nous avons choisi de représenter trois fissures se rejoignant pour former un point triple. Chacune des trois fissures a une orientation différente. Comme le montre la figure IV-20, la fissure F1 a une orientation à 90° , la fissure F2 a une orientation à 0° , et la fissure F3 a une orientation à 45° , le point triple se situe à la position $x = 0$ et $y = 0$. F1 a une profondeur de $0,09$ m, F2 de $0,12$ m et F3 de $0,15$ m, c'est la fissure la plus profonde. L'épaisseur des fissures évolue avec la profondeur de $0,004$ m à $0,002$ m pour F1 et F2. La transition pour F1 se fait après les 3 premiers centimètres, pour F2 la transition se fait après les 6 premiers centimètres. L'épaisseur de F3 ($0,004$ m) est constante sur toute la longueur de la fissure.

L'acquisition électrique 3D a été conduite en utilisant la configuration carré, décrite précédemment. Nous avons utilisé une grille carrée 8×8 et les mesures ont été faites suivant deux directions correspondant aux acquisitions ρ_{0° et ρ_{90° et sur 6 pseudo-profondeurs. Nous avons effectué les mesures en deux temps. Dans un premier temps les mesures ont été faites sur le sol avant l'implantation des fissures, à l'état initial (E1), et dans un deuxième temps après avoir positionné « le squelette » de fissuration, à l'état final (E2) (Fig.IV-21).

Le modèle réduit de sol de texture limoneuse (20 % d'argile, 75 % de limon, 5 % de sable, 1.7 % de matière organique) a une forme parallélépipédique. Ses caractéristiques géométriques sont ($x = 0,26$, $y = 0,36$, $z = 0,28$ m), nous les reprendrons lors des simulations de calculs directs de la répartition des résistivités apparentes au moyen du logiciel « Fissel ». Rappelons que ces dimensions ont déjà été utilisées lors du calcul des effets de bord dans le paragraphe 1.3.

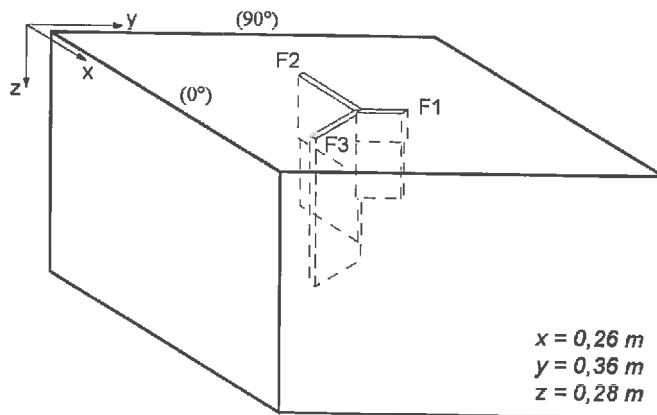


Figure IV-20 : Schéma 3D du squelette de fissures F1, F2 et F3.

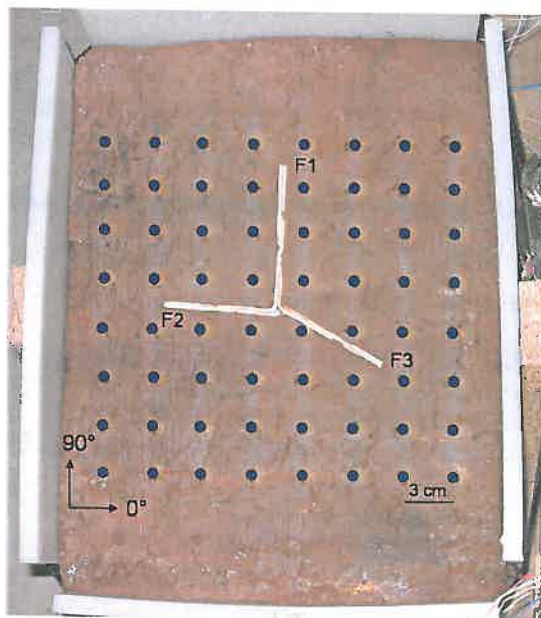


Figure IV-21 : Vue de dessus de l'échantillon à l'état final, avec l'implantation du squelette de fissures (F1, F2, F3) dans l'échantillon, et la position des 64 électrodes représentées par les points.

2.2. Résultats des mesures de résistivité

2.2.1. Présentation des données brutes et analyses statistiques

Les données acquises à l'état initial et final ont été décrites qualitativement puis à l'aide d'outils statistiques, afin d'évaluer l'influence de la fissuration sur les mesures de résistivité apparente.

2.2.1.1 Distribution de la résistivité à l'état initial et l'état final en fonction de la pseudo-profondeur

Les données de résistivité apparente ont été classées en fonction des 6 pseudo-profondeurs (Fig. IV-22). Comme nous avons pu le voir précédemment, dans le travail de modélisation numérique sur les effets de bord, on a pu constater que la résistivité augmente avec la profondeur. Nous nous attacherons donc à décrire l'évolution des résistivités apparentes entre l'état initial et final en gardant à l'esprit le profil des cartes des effets de bord (Fig. IV-7 et IV-8).

La distribution des résistivités apparentes à l'état initial (E1) ne présente pas de fortes fluctuations. La répartition des données évolue avec la profondeur, cette augmentation est plus importante pour les acquisitions à 90°. Ce résultat est en accord avec les simulations numériques des effets de bord. A l'état final (E2), la distribution est beaucoup plus contrastée, elle présente des valeurs significativement plus faibles et plus fortes que celles de l'état initial. L'évolution de la distribution des résistivités est d'autant plus contrastée que la pseudo-profondeur est faible. Ce comportement est associé à la présence de fissures à l'état final, qui correspondent à des hétérogénéités électriques.

2.2.1.2 Analyse statistique descriptive

Les données de statistiques descriptives de l'état initial et final, ont été représentées au moyen de box plots encore appelés « boîte à moustache » (Tukey, 1977).

La distribution des valeurs est subdivisée en un premier quartile (Q1) qui correspond à 25 % des effectifs et en un troisième quartile (Q3) qui correspond à 75 % des effectifs. Ces points haut et bas définissent la longueur de la boîte centrale qui correspond à l'écart interquartile (Q3-Q1). Cet écart est utilisé comme indicateur de dispersion, il correspond à 50 % des effectifs situés dans la partie centrale de la distribution. La médiane est représentée par un trait noir et correspond à 50 % des effectifs. La longueur des deux moustaches est délimitée par les valeurs dites adjacentes déterminées à partir de l'écart interquartile. Les valeurs situées au-delà des bornes inférieure et supérieure sont individualisées par rapport à l'ensemble des données, elles sont qualifiées d'extrêmes ou d'atypiques.

Nous avons traité les valeurs de résistivité à l'état initial et final pour les 4 premières pseudo-profondeurs en séparant les acquisitions ρ_{0° et ρ_{90° (Fig. IV-23).

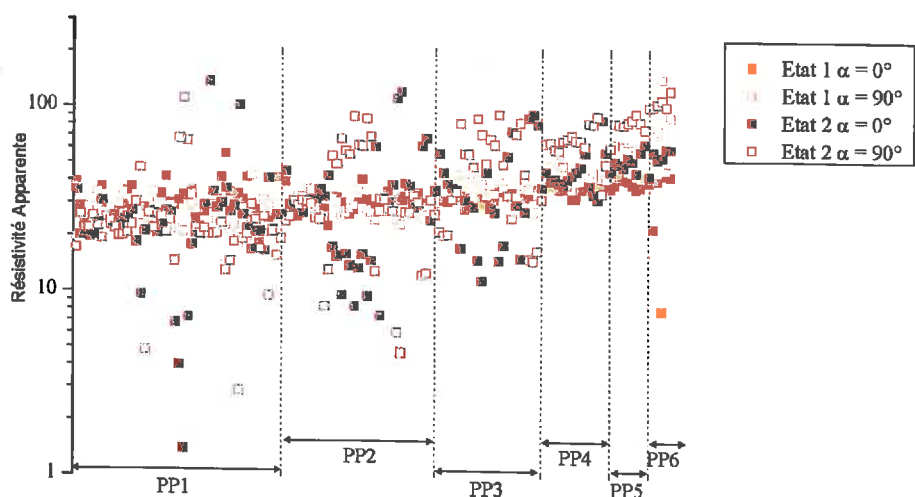


Figure IV-22 : Répartition aux états initial et final des résistivités apparentes acquises pour les deux orientations de quadripôle à 0° et à 90° en fonction de la pseudo-profondeur.

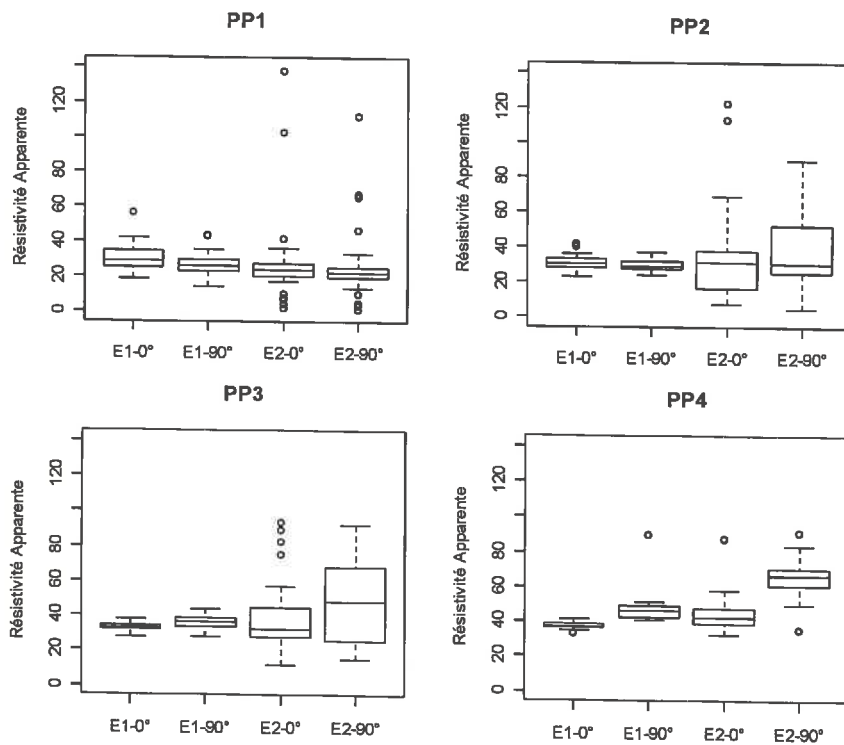


Figure IV-23 : Représentation des box plots pour les 4 premières pseudo-profondeurs, E1 correspond à l'état initial, E2 correspond à l'état final, 0° et 90° indiquent l'orientation du quadripôle ABMN lors de l'acquisition de la mesure.

De manière générale, pour les quatre pseudo-profondeurs, la distribution des valeurs est concentrée autour du box plot à l'état initial (E1). La médiane est centrée dans le box plot, la répartition des valeurs est donc symétrique. Les valeurs atypiques sont peu nombreuses et se situent uniquement dans la partie haute. Elles sont présentes : i) à PP1 pour les deux orientations de quadripôle (0° et 90°), ii) à PP2 pour l'acquisition orientée à 0° , iii) et à PP4 pour l'acquisition orientée à 90° . Les deux premiers cas sont situés à la surface de l'échantillon et pourraient être associés à une hétérogénéité de surface. Le troisième cas, plus en profondeur, est isolé par rapport à l'ensemble du groupe de données, et pourrait être assimilé à une acquisition défectueuse.

A l'état final la distribution des données est dissymétrique : la médiane n'est pas située au centre du box plot, les longueurs des moustaches inférieure et supérieure sont différentes ce qui reflète une importante dispersion. La présence des valeurs atypiques qui se situent dans les parties haute et basse est plus importante. Elles sont nombreuses à PP1 et sont associées à la présence des fissures. L'écart interquartile est plus important à PP2 et PP3, et peut être associé à la présence de fissures en profondeur et à leur détection lors des mesures de résistivité. A PP4 la dispersion est moins importante. Ce comportement a été associé à la présence des effets de bord, qui deviennent de plus en plus importants lorsque la pseudo-profondeur augmente (cf paragraphe 1.3. de ce chapitre).

2.2.1.3. Analyse Factorielle Discriminante

La résistivité électrique apporte-t-elle des informations pertinentes pour discriminer les zones fissurées des zones non fissurées ? En d'autres termes, la seule connaissance des variables quantitatives permet-elle de réaffecter les individus dans leur propre groupe, et avec quelle erreur ? Pour répondre à cette question, nous avons conduit une analyse factorielle discriminante (AFD). Elle consiste à modéliser l'appartenance à un groupe d'individu en fonction des valeurs prises par plusieurs variables, puis de déterminer le groupe le plus probable pour n individu, connaissant uniquement les valeurs de variables qui le caractérisent. Les variables qui décrivent les individus sont des variables quantitatives ou encore dites explicatives, dans notre cas ce sont les valeurs de résistivité apparente ρ_{0° et ρ_{90° . Les groupes sont spécifiés par une variable qualitative qui correspond à la variable à expliquer. Chaque quadrat de mesures a été associé au préalable par l'expérimentateur à une des deux variables qualitatives soit : i) « fissuré » lorsque au moins une des trois fissures F1, F2 ou F3 traverse un quadrat de mesure, ou ii) « non fissuré » lorsque la fissure ne traverse pas le quadrat de mesure (Fig. IV-24).

L'AFD a été conduite à l'état final, sur la première et la seconde pseudo-profondeur. Les résultats sont résumés dans le tableau IV-1.

A la première pseudo-profondeur PP1, nous avons au total sur les 49 quadrats de mesure ; 40 affectés au groupe « non fissuré » et 9 au groupe « fissuré ». Tous les quadrats désignés au préalable comme appartenant au groupe « non fissuré » ont été retrouvés comme tels. Parmi les 9 quadrats appartenant au groupe « fissuré », 3 quadrats n'ont pas été réassociés correctement. Ces trois quadrats sont ceux traversés par la fissure F3 orientée à 45° . Le taux d'erreur apparent du classement est de 8 %.

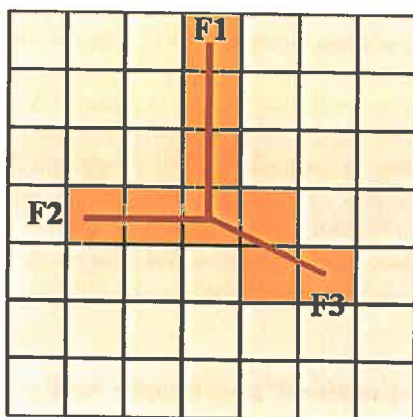


Figure IV-24 : Vue schématique de surface avec la position des fissures F1, F2 et F3 permettant la détermination de la variable qualitative : les quadrats jaunes appartiennent au groupe non fissuré, les quadrats oranges appartiennent au groupe fissuré.

Groupe	Non Fissuré		Fissuré		% Correct ^a	
	PP1	PP2	PP1	PP2	PP1	PP2
Non Fissuré	40	18	0	0	100	100
Fissuré	3	5	6	13	67	72
Total	43	23	6	13	92	86

^a représente le pourcentage de cas reclassés dans leur groupe d'origine

Tableau IV-1 : Résultats de l'AFD pour la première et seconde pseudo-profondeur (PP1 et PP2) à l'état final.

A la seconde pseudo-profondeur PP2, l'espacement inter-électrode passe de a à $2a$, il y a donc 32 quadrats de mesure au total, dont 18 appartiennent au groupe « non fissuré » et 18 au groupe « fissuré ». De la même manière que précédemment tous les quadrats « non fissurés » sont classés comme tels par l'AFD. Sur les 18 quadrats « fissurés », 13 sont correctement réassociés. Les 5 quadrats non désignés comme tels appartiennent également aux zones traversées par la fissure F3 orientée à 45° . Le taux d'erreur apparent du classement est de 14 %, soit plus important qu'à PP1.

Au vu de ces premiers résultats, la résistivité électrique permet donc de discriminer les zones « non fissurées » des zones « fissurées ». Les fissures, implantées à partir de la surface, se propagent en profondeur, leur présence se détecte toujours à la seconde pseudo-profondeur. Cependant l'orientation d'une fissure à 45° semble toutefois soulever quelques difficultés et n'est pas détectée correctement.

2.2.2. Application de l'indice d'anisotropie AAI

Les données brutes de résistivité apparente ont été traitées à l'aide de l'indice d'anisotropie AAI, décrit dans le paragraphe 1.4 équation (IV-4). Les tests numériques effectués au préalable nous ont montré que cet indice est sensible à la présence d'hétérogénéités électriques dues à de forts gradients de résistivité électrique initiés par la présence des fissures. Nous n'avons volontairement pas utilisé de variations relatives entre les deux états (E1) et (E2), qui auraient « nettoyé » les données à l'état final, fournissant ainsi l'influence stricte de la fissuration. Notre choix a été de mettre au point un indice d'anisotropie applicable à tout stade de fissuration, sans avoir nécessairement au préalable la connaissance de l'état initial du milieu. De cette manière, notre démarche s'inscrit dans une méthodologie générale, applicable directement à toute étude.

L'indice d'anisotropie AAI a été appliqué aux deux états initial (E1) et final (E2) et à chaque pseudo-profondeur (PP1 à PP6). Nous avons choisi de représenter graphiquement la variation du logdécimal de l'anisotropie \log_{10} (AAI). Entre l'état initial (E1) et final (E2), les variations les plus importantes se situent pour les trois premières pseudo-profondeurs (Fig.IV-25). L'état initial (E1) ne présente pas de contraste important, les valeurs de \log_{10} (AAI) sont proches de 0. De plus, il n'y a pas de variation importante entre les différentes pseudo-profondeurs. La pseudo-profondeur PP6 présente une valeur négative de \log_{10} (AAI), spatialement isolée. Nous l'avons attribuée à une mesure erronée. Le milieu est donc associé à un milieu isotrope et sans fissure, ce qui est en concordance avec l'état initial de l'échantillon de sol tel qu'il a été préparé en laboratoire.

L'état final (E2), qui correspond à l'état fissuré, présente des valeurs de \log_{10} (AAI) très contrastées. Comme le montre la superposition du schéma de fissures avec PP1, ces valeurs sont spatialement localisées et correspondent à la présence de zones fissurées. Nous retrouvons les directions préférentielles des fissures, dans la limite de ce que nous avons expliqué à l'aide de la figure IV-14 : à des valeurs positives de \log_{10} (AAI) correspondent une orientation proche de 90° (F1), à des valeurs négatives de \log_{10} (AAI) correspondent une orientation proche de 0° (F2). A ces deux zones sont associées les valeurs extrêmes, de 1,8 et -1,8. La zone associée à la fissure F3, orientée

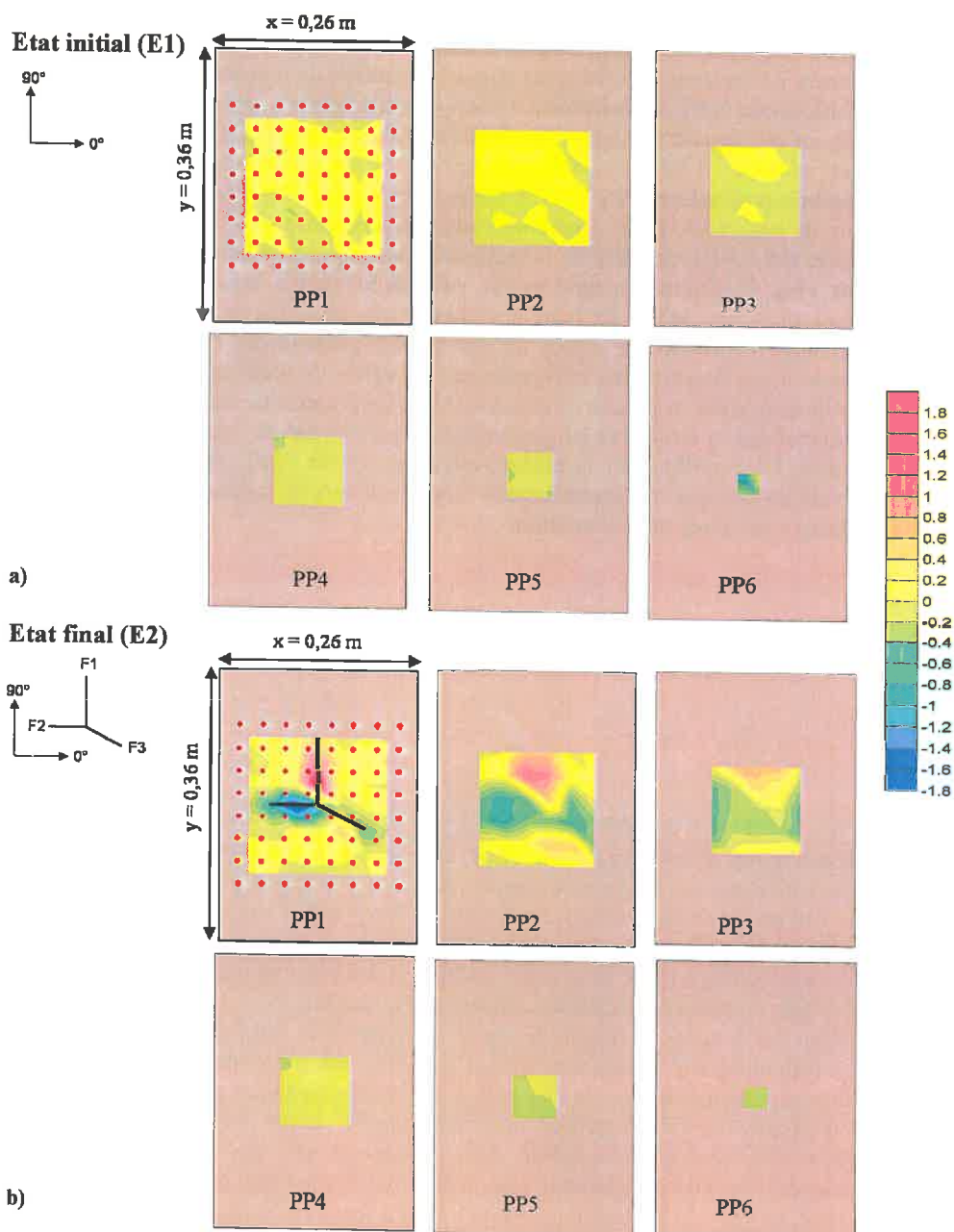


Figure IV-25 : Distribution de $\log_{10}(AAI)$ pour les pseudo-profondeurs PP1 à PP6. Les points rouges représentent la position des électrodes. a) calculé à partir des données mesurées à l'état initial (E1). b) calculé à partir des données mesurées à l'état final (E2), la position des fissures est annotée en noire à PP1.

à 45°, correspond à la zone de transition 30°-60°. Elle ne présente pas de contraste important, ce qui ne permet donc pas de la distinguer clairement de l'encaissant. En effet, la fissure F3 recoupe différemment plusieurs quadrats de mesure avec des angles différents. Le cas de la fissure orientée à 45° est « pathologique », puisqu'il ne peut être clairement distingué d'une zone non fissurée. Lorsque $\log_{10}(AAI)$ est proche de 0, le milieu est isotrope : il est soit non fissuré, soit fissuré avec une orientation à 45°. Pour les pseudo-profondeurs PP2 et PP3, les fissures F1 et F2 se distinguent toujours. Les valeurs de $\log_{10}(AAI)$ sont légèrement plus faibles, entre -1,02 et 1,41 à PP2 et entre -0,79 et 0,8 à PP3. Au-delà de la quatrième pseudo-profondeur PP4 les valeurs convergent vers 0. Comme nous l'avons vu précédemment au-delà de PP4 les perturbations dues aux effets de bord deviennent très importantes et supérieures à 50%. Les cartes de résistivité apparente des pseudo-profondeurs (PP4, PP5, PP6) correspondent à une mesure plus influencée par les effets de bord de l'échantillon de dimension finie, que par la structure interne du bloc. En d'autres termes, dans notre cas d'étude, la prospection électrique en profondeur ne permet pas de détecter les fissures présentes dans l'échantillon, car la mesure effectuée reflète l'influence des effets de bord. Les valeurs de $\log_{10}(AAI)$ convergent vers 0, soit vers un milieu isotrope et sans fissure détectant les bords de l'échantillon.

L'analyse statistique descriptive des données, et leur représentation graphique sous la forme de box plots permet d'une part d'avoir une vue synthétique, globale et en même temps une vue locale des données. La distribution des données est symétrique à l'état initial, elle est dissymétrique et dispersée à l'état final. L'analyse factorielle discriminante conduite à l'état final à PP1 et PP2, fournit des résultats encourageants pour la détection de fissures à partir des données de résistivité.

L'exploitation des données de résistivité apparente, à partir de l'indice AAI fournit une première information sur la structure du sol à différentes profondeurs. Les fissures d'orientation préférentielle à 0° et 90° sont clairement identifiées et distinguées des zones non fissurées. Ces résultats sont en accord avec l'analyse factorielle discriminante. Par contre, l'orientation d'une fissure à 45°, ne se distingue que difficilement de l'encaissant. Comme nous avons pu le constater lors du calcul des effets de bord, au-delà de la quatrième pseudo-profondeur PP4 le signal de mesure est fortement perturbé par les dimensions finies de l'échantillon. Nous obtenons avec la profondeur, des valeurs de $\log_{10}(AAI)$ convergeant vers 0, ce qui est une conséquence directe de l'influence des effets de bord sur les mesures.

2.3. Modélisation 3D directe

Cette étude de fissuration artificielle 3D a également été complétée par une modélisation directe, au moyen du logiciel « Fissel ». Nous avons utilisé la même géométrie du réseau de fissures (F1, F2, F3) décrite précédemment (Fig. IV-20), centrée dans un bloc de dimension identique à l'échantillon naturel ($x = 0,26$ m, $y = 0,36$ m, $z = 0,28$ m). La résistivité électrique de l'encaissant est égale à $23 \Omega.m$, ce qui correspond à la résistivité moyenne du bloc expérimental à l'état initial (E1). Le dispositif électrique est similaire à celui utilisé lors de l'expérimentation, basé sur la configuration carré. De cette manière, la simulation effectuée correspond à l'état final (E2) de l'expérimentation précédemment décrite.

Les résultats de la simulation fournissent un jeu de données de résistivité apparente suivant les deux orientations de quadripôles 0° et 90° , et pour les six pseudo-profondeurs prospectées. L'interprétation des données de résistivité apparente obtenues numériquement est faite au moyen de l'indice AAI.

2.3.1. Utilisation de l'indice d'anisotropie AAI sur les données numériques

L'utilisation de l'indice AAI permet de mettre en évidence l'effet des trois fissures F1, F2 et F3 pour chacune des six pseudo-profondeurs (PP1 à PP6). Les cartes présentées (Fig. IV-26), utilisent la même échelle de valeurs de $\log_{10}(AAI)$ que celle des données expérimentales (Fig. IV-25).

Nous retrouvons une bonne adéquation qualitative entre les données simulées et les données expérimentales. A la fissure F1, orientée à 90° , correspondent des valeurs positives de $\log_{10}(AAI)$, proches de 0,75 à PP1, *a contrario*, à la fissure F2, orientée à 0° , correspondent des valeurs négatives de $\log_{10}(AAI)$, proches de -0,70 et ceci pour la première pseudo-profondeur. La fissure F3, orientée à 45° , est plus difficilement décelable de l'encaissant, la valeur de $\log_{10}(AAI)$ associée étant proche de 0. Seule l'extrémité de cette fissure est reliée à une légère variation de résistivité, présentant une valeur légèrement négative. Aux pseudo-profondeurs PP2 et PP3, l'influence des trois fissures se fait toujours ressentir, néanmoins F1 et F2 sont les deux fissures qui perturbent le plus le signal électrique. Comme nous avons pu le constater déjà précédemment à partir de la quatrième pseudo-profondeur PP4 les effets de bord deviennent assez importants, masquant ainsi toute signature électrique due aux fissures. De manière similaire à l'expérimentation les valeurs de $\log_{10}(AAI)$ convergent, avec la profondeur, vers 0, ce qui correspond à un milieu isotrope. Nous remarquons néanmoins que les valeurs associées aux zones fissurées F1 et F2 sont dans les deux cas moins contrastées que les valeurs issues de l'expérimentation.

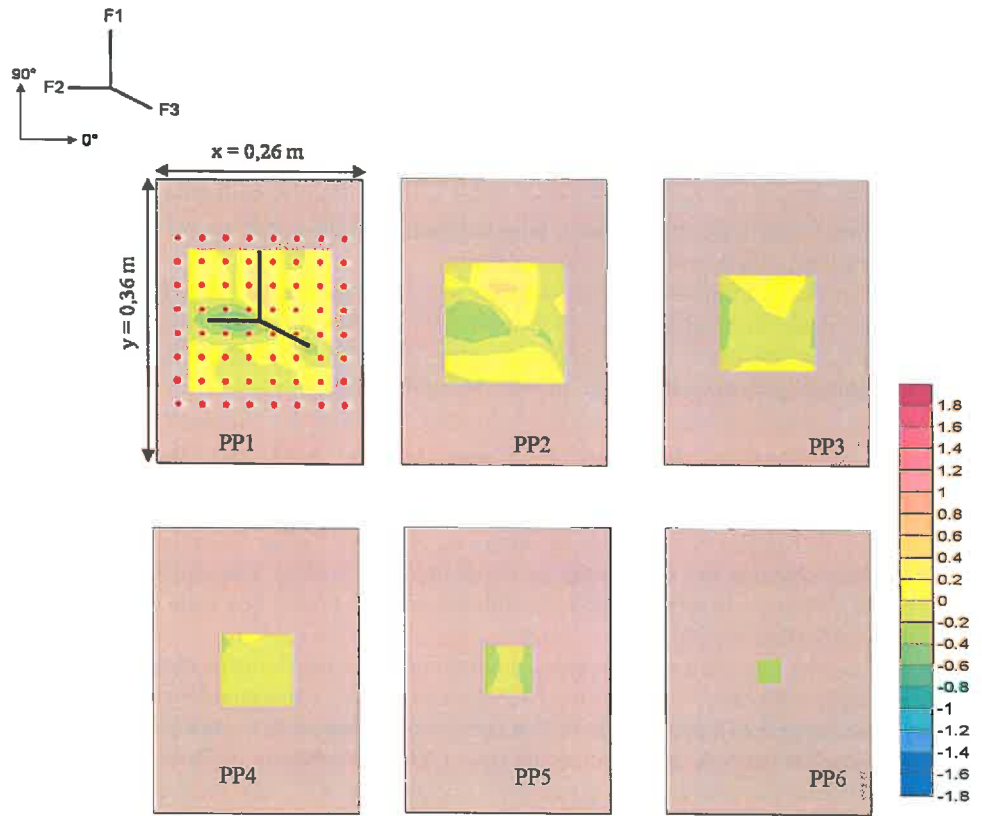


Figure IV-26 : Répartition des $\log_{10}(AAI)$ des données issues de la simulation numérique correspondant à l'état final (E2) de l'expérimentation de PP1 à PP6.

Le choix de la configuration carré pour l'acquisition des mesures de résistivité apparentes dans le cadre de la caractérisation de la fissuration fournit d'un point de vue expérimental et numérique des résultats satisfaisants. L'élaboration de l'indice AAI permet de décrire qualitativement un réseau de fissures. Les distributions spatiales de l'indice AAI pour les résultats de simulation et expérimentaux sont cohérentes avec l'orientation des fissures F1 et F2. Néanmoins l'adéquation quantitative entre les résultats de la simulation et de l'expérience n'est pas totale. Les données numériques, issues de la simulation par le logiciel « Fissel », présentent des valeurs inférieures à celles observées lors de l'expérimentation, synonymes d'une influence moins importante de la fissure. A l'heure actuelle, cet écart numérique n'est pas résolu.

3. Expérimentation en milieu naturel : Suivi tridimensionnel d'un réseau de fissures par résistivité électrique

Nous avons effectué une expérimentation 3D de suivi de la fissuration en laboratoire. Par opposition à la partie précédente, traitant de fissuration « artificielle », celle-ci est correspond à une expérimentation « naturelle » de fissuration. Le milieu étudié est plus complexe que celui de l'expérimentation artificielle, ne comportant pas un réseau de fissures de taille identique clairement délimité dans l'espace. Ces résultats sont publiés sous la forme d'un article accepté dans la revue *European Journal of Soil Science*. Le résumé en français qui suit en présente les principaux résultats.

Résumé en français.

L'échantillon de sol étudié a suivi un cycle de 18 jours de dessiccation en conditions contrôlées, développant ainsi un réseau de fissures depuis la surface (Fig. IV-28). Un dispositif carré d'électrodes prospectant sur six pseudo-profondeurs a été utilisé de manière identique à celle de l'expérimentation artificielle (Fig. IV-6). Nous avons mesuré conjointement la résistivité apparente selon deux orientations orthogonales (Fig. IV-3). Deux indices de fissuration, AAI et α_{\max} , ont permis de localiser et de fournir l'orientation des fissures les plus importantes.

L'indice AAI permet de localisation les fissures les plus larges (supérieures à 0,001 m d'épaisseur) (Fig. IV-32). Pour les fissures les plus fines, les perturbations induites sont moins importantes et donc plus difficilement identifiables. Cela nous a conduits à déterminer deux seuils, I_{cinf} et I_{csup} à l'aide de l'image de surface de l'échantillon (Fig. IV-34). Lorsque $\text{AAI} > I_{\text{csup}}$, les fissures sont préférentiellement orientées à 90° , lorsque $\text{AAI} < I_{\text{cinf}}$ les fissures sont préférentiellement orientées à 0° . Les quadrats de mesures correspondant à $I_{\text{cinf}} < \text{AAI} < I_{\text{csup}}$, sont : i) non fissurés, ii) avec des fissures orientées à 45° , iii) avec des fissures ne recoupant pas MN. Ces seuils ont été pris comme des règles de décision pour la réalisation d'une carte synthétique correspondant aux réseaux de fissures les plus importants à la première pseudo-profondeur PP1. Les résultats obtenus permettent de valider le choix de ces deux seuils. Néanmoins, ces seuils applicables à cette expérimentation ne sont pas généralisables car ils dépendent des conditions expérimentales (type de sol, humidité). L'utilisation de l'indice α_{\max} , indépendant des contraintes expérimentales, amène des résultats très similaires (Fig. IV-36). La méthode de calcul est « systématique », aucun seuil n'a été défini. Les valeurs comprises entre 0° - 35° et 55° - 90° sont associées aux quadrats fissurés d'orientation préférentielle respectivement 0° et 90° . La variabilité diminue avec la profondeur, les valeurs convergent vers 45° , ce qui correspond à un milieu sans hétérogénéité électrique. Seules les fissures les plus larges (supérieures à 0,001 m) se propagent en profondeur. Elles sont détectées à la deuxième et troisième pseudo-profondeur, spatialement référencées et associées aux valeurs extrêmes de α_{\max} . Les fissures initiées depuis la surface sont associées aux hétérogénéités électriques. Au fur et à mesure que l'espacement inter-électrode augmente, elles perdent de leur influence par rapport au volume de sol prospecté qui lui devient plus important. Le signal électrique est alors de moins en moins perturbé en profondeur.

La méthode utilisée est adaptée à la détection de fissures « naturelles » et au suivi temporel de la mise en place du réseau de fissures. L'interprétation de la résistivité apparente renseigne non seulement sur la présence de fissures mais aussi sur leur orientation et leur extension en profondeur. Néanmoins comme les résultats précédents le montraient lors de l'expérimentation artificielle, les fissures orientées à 45° ne sont pas discernables des quadrats non fissurés.

Erratum

L'article présenté ci-après a été publié dans la revue *European Journal of Soil Science*. A l'issue de sa parution nous avons détecté une erreur de calcul que nous corrigeons ici.

Lors du calcul de α_{max} les données de résistivité apparente ρ_{0° et ρ_{90° ont été traitées comme un vecteur, et non comme un tenseur. Ce qui nous a amené à une simplification de l'équation IV-10, permettant de retrouver l'orientation de α_{max} .

La mesure de la résistivité apparente en configuration carré représente une grandeur physique dont l'écriture mathématique est un tenseur (IV-5) qui s'exprime suivant les deux directions de l'espace X et Y.

$$\begin{pmatrix} \rho_{0_0} & \rho_{0_90} \\ \rho_{90_0} & \rho_{90_90} \end{pmatrix} \quad IV-5$$

Le calcul de α_{max} utilise la propriété que la résistivité apparente est maximum lorsque la fissure a une orientation perpendiculaire aux électrodes d'injection (A et B). En effectuant une rotation du tenseur de résistivité dans le plan (0, xy), ceci nous permet ainsi de retrouver toutes orientations possible de fissures. Ainsi la notion d'orientation préférentielle de fissure à 0° et 90° pourrait être précisé. L'expression (IV-6) permet de calculer le tenseur de résistivité pour chaque orientation α du quadripôle à partir des données de résistivité apparente acquise expérimentalement.

$$\begin{pmatrix} \rho_{\alpha_\alpha} & \rho_{\alpha_{\alpha+90}} \\ \rho_{\alpha+90_\alpha} & \rho_{\alpha+90_{\alpha+90}} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} \rho_{0_0} & \rho_{0_90} \\ \rho_{90_0} & \rho_{90_90} \end{pmatrix} R^{-1} \text{ avec } R = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad IV-6$$

La matrice résultante de ce calcul correspond au terme IV-7.

$$\begin{pmatrix} \rho_{0_0} \cos^2 \alpha + \rho_{90_0} \sin \alpha \cos \alpha + \rho_{0_90} \sin \alpha \cos \alpha + \rho_{90_90} \sin^2 \alpha & -\rho_{0_0} \cos \alpha \sin \alpha - \rho_{90_0} \sin^2 \alpha + \rho_{0_90} \cos^2 \alpha + \rho_{90_90} \sin \alpha \cos \alpha \\ -\rho_{0_0} \sin \alpha \cos \alpha + \rho_{90_0} \cos^2 \alpha - \rho_{0_90} \sin^2 \alpha + \rho_{90_90} \cos \alpha \sin \alpha & \rho_{0_0} \sin^2 \alpha - \rho_{90_0} \cos \alpha \sin \alpha - \rho_{0_90} \sin \alpha \cos \alpha + \rho_{90_90} \cos^2 \alpha \end{pmatrix}$$

Néanmoins à l'heure actuelle il subsiste une difficulté métrologique et méthodologique qui est de pouvoir mesurer expérimentalement les termes non-diagonaux du tenseur de résistivité soit ρ_{0_90} et ρ_{90_0} au laboratoire. Ainsi le résultat IV-C ne peut être calculé entièrement, seul les termes en \cos^2 et \sin^2 sont connus. Ainsi l'état actuel du calcul de α_{max} ne fournit pas d'informations qualitatives supplémentaires par rapport à l'indice AAI.

Three-dimensional crack monitoring by electrical resistivity measurement³

Summary

Soil cracks formed by natural processes play a key role in water and gas transfer. Patterns of soil cracks are, however, difficult to characterize. Our aim here is to assess the effectiveness of three-dimensional electrical resistivity surveys in detecting soil crack networks. A three-dimensional electrical survey was carried out by a square array quadripole with Cu-CuSO₄ electrodes (electrode spacing of 3 cm). The measurements were made with two orientations (0° and 90°) on a block (26 cm × 30 cm × 40 cm) of soil while it dried for 18 days under controlled conditions. Two indexes, calculated from the apparent resistivity values, were evaluated to detect the degree soil heterogeneity: (i) an anisotropy index based on the ratio between the apparent resistivity at 0° and that at 90°; and (ii) the angle-array orientation corresponding to the preferential anisotropic orientation (maximum resistivity). The anisotropy index provided information on the presence of cracks and the orientation for crack width > 1 mm in the first pseudo-depth (i.e. depth of investigation), while the angle-array orientation provided information on crack extension for the whole pseudo-depth. Information about the presence, position, orientation and extension of cracks can be obtained from an analysis of apparent resistivity obtained by a three-dimensional electrical survey. Such direct analysis will help the resistivity inversion to detect the crack network.

3.1. Introduction

Cracking of soil is related to shrinking and swelling and plays a significant role the transport of in water and gas. The geometry of soil cracks is usually described by one- and two-dimensional analyses (Ringrose-Voase & Sanidad, 1996; Stengel, 1988; Hallaire, 1988a), whereas three-dimensional description is required to relate the geometry of soil cracks to mass transfer characteristics (Vogel *et al.*, 1993). The current methods available for the three-dimensional analysis of crack geometry are limited in various ways. As examples, the three-dimensional analysis of soil porosity by the study of serial sections (Cousin *et al.*, 1996) is a destructive technique and requires the samples to be dried and impregnated with resin; and X-ray tomography as used by Macedo *et al.* (1998) can be applied only to small samples under laboratory conditions. As a consequence, these techniques do not enable us to describe cracking dynamics when the soil dries or is rewetted. The geometrical analysis of the opening and closing of cracks requires a non-destructive method applicable both in the field and laboratory and on a wide range of volumes, thus enabling the study of crack

³ Samouëlian, A., Richard, G., Cousin, I., Guérin, R., Bruand, A., Tabbagh, A. (Article accepté à European Journal of Soil Science)

geometry at different scales. Three-dimensional electrical prospecting is an emerging technique that can assess properties of both top and subsoil non-destructively and at several scales. Using an adapted quadripole strategy, three-dimensional electrical prospecting enables one to make measurement directly over a wide range of soil volumes and to make three-dimensional analysis of their characteristics (Tabbagh *et al.*, 2000). Three-dimensional electrical resistivity surveys are commonly collected by a network of in-line survey arrays, such as those of Wenner, Schlumberger, or Dipole–Dipole arrays (Ogliviy *et al.*, 1999; Xu & Noel, 1993; Zhou *et al.*, 2002). Meheni *et al.* (1996) emphasize that the resulting apparent resistivity maps vary according to array orientation and electrical discontinuities. Indeed, asymmetric bodies and anisotropic materials exhibit different behaviours depending on which direction the current passes through them (Scollar *et al.*, 1990). This is all the more true for a medium having contrasted resistivities, such as cracked soil. In this case, the electrical current does not encounter the same resistance when it passes perpendicularly to, or parallel with resistant bodies such as cracks. Indeed, apparent resistivity depends on the location and orientation of the current source relative to the body under study (Bibby, 1986). Chambers *et al.* (2002) emphasized that in a heterogeneous medium, three-dimensional electrical resistivity model resolution was sensitive to the orientation of the electrode configuration orientation. Habberjam & Watkins (1967) showed that the square array provides a measurement of resistivity less dependent on orientation than that given by an in-line array. Previous work by Samouëlian *et al.* (2003) emphasizes the need for significant advances in the mathematical inversion of apparent resistivity relating to electrical heterogeneities such as cracks. So we can get more accurate three-dimensional inversion in a context of soil cracking, we have chosen to improve the acquisition of three-dimensional electrical resistivity data by using a square array quadripole.

This work is part of a study that aims at monitoring the spatial and temporal progression of the soil cracking pattern by three-dimensional electrical resistivity prospecting. We first assess the ability to detect soil cracks through three-dimensional apparent electrical resistivity, before focusing on the progression of the soil cracking pattern during drying.

3.2. Materials and Methods

3.2.1. Soil

The experiment was done on a soil block ($x = 26$ cm, $y = 30$ cm, $z = 40$ cm) collected at the INRA Experimental Centre at Mons-en-Chaussée (Somme, France). The soil, formed from loess, is an orthic Luvisol (Richard *et al.*, 2001). The soil block was sampled from the surface in a place where the soil had been compacted by traffic under wet conditions. The soil was initially massive with a volumetric water content of 0.43 and a bulk density of 1.60 g cm^{-3} . The experiment was done during summer, and the sample, enclosed in a box, dried out through the upper surface only. The soil block was dried for 18 days: in the afternoon for 4 hours daily in the open air and then in the laboratory at controlled conditions of both temperature ($20\text{--}22^\circ\text{C}$) and relative humidity (55–65 %) for the rest of the time. After a drying period of 18 days, the

volumetric water content was 0.34. During the drying, air-filled porosity increased, with cracks appearing at the soil surface and spreading downwards. The measurements were taken in the morning either daily or every two days according to crack development to record electrical resistivity measurements at similar temperatures. In this way, we obtained a set of 12 electrical resistivity measurements over the 18-day drying period.

3.2.2. The principles of the three-dimensional electrical measurement

We used a pair of near-orthogonal current source electrode arrays to acquire the three-dimensional resistivities. This type of square quadripole avoids directional preferences introduced by an in-line electrode layout. As shown in Figure IV-27a, the current electrodes A and B, and potential electrodes M and N are not on the same line of measurement but on two parallel lines, so that they form a square. For each square two electrode configurations were used at 90° to each other. The first pseudo-depth (i.e. depth of investigation) was recorded at the shortest inter-electrode spacing a (Fig. IV-27b). When the inter-electrode spacing increased by a to $2a$, the measurements corresponded to the second pseudo-depth investigation. As the inter-electrode spacing increased to $3a$, $4a$, $5a$, $6a$ and $7a$, the corresponding pseudo-depth was respectively 3, 4, 5, 6 and 7. For each spacing, the maximum number of squares was used within the 8×8 grid – i.e. 49 for the smallest spacing and 1 for the largest (Figure IV-27b). The number of data decreased as the depth increased, i.e. when the inter-electrode spacing increased. The apparent electrical resistivity (ρ) measurements corresponding to the array orientation $\alpha=0^\circ$ or 90° were denoted ρ_{0° and ρ_{90° respectively and expressed in $\Omega.m$. The experiment was performed by eight inline Cu–CuSO₄ electrodes installed in the central part of the 8×8 grid with a spacing of 3 cm. As a consequence the measurement area was 21 cm \times 21 cm. The minimum inter-electrode spacing a was 3 cm, which was judged from a previous experimental display by Samouëlian *et al.* (2003) to be adequate for detecting cracks 1 mm wide. Cracks were detected by their resistive electrical signal compared with boxing. All the measurements were taken with specific electrodes, manufactured from small, saturated, cone-shaped ceramic cups (2 mm external diameter) linked to a Cu–CuSO₄ complex as proposed by Samouëlian *et al.* (2003). The copper wire had a section of 0.6 mm, and the concentration of the CuSO₄ solution was 0.05 M. The ceramic cup was joined to a transparent plastic rigid tube (3 mm external diameter and 2 mm internal diameter). The saturated ceramic cup placed on the soil surface facilitated a wet contact at given points. Measurements were made with a programmable multi-electrode system (Multinode) and a resistivity meter (Syscal R1 Plus, Iris Instrument, Orléans). The experiment lasted 41 minutes. It resulted in 280 measurements distributed among seven pseudo-depths. Each pseudo-depth contained the electrical resistivity related to ρ_{0° and ρ_{90° acquisition. Thus one half of the total number of acquisitions for each pseudo-depth corresponded to ρ_{0° , and the other half to ρ_{90° . The first pseudo-depth (electrode inter-spacing $a = 3$ cm) comprised 98 measurements, 49 of them corresponding to ρ_{0° and 49 to ρ_{90° . The other pseudo-depths studied had electrode

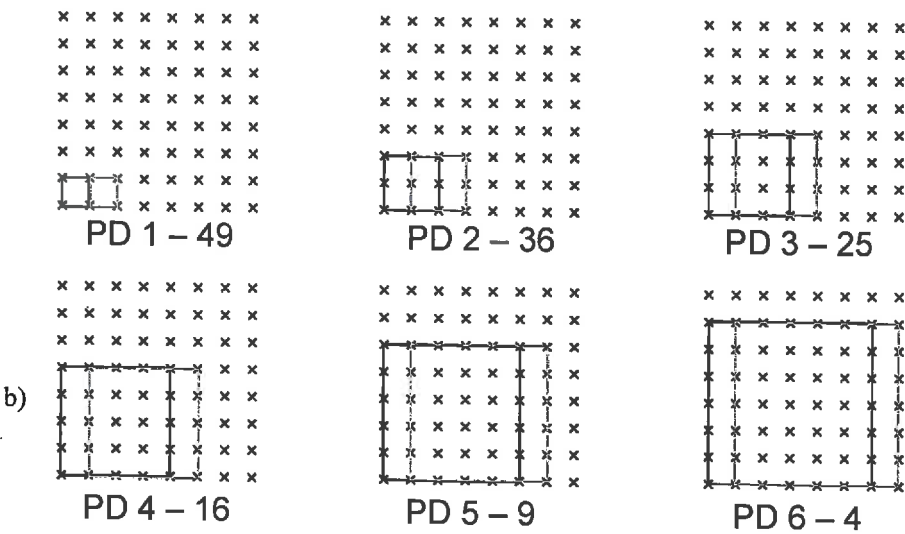
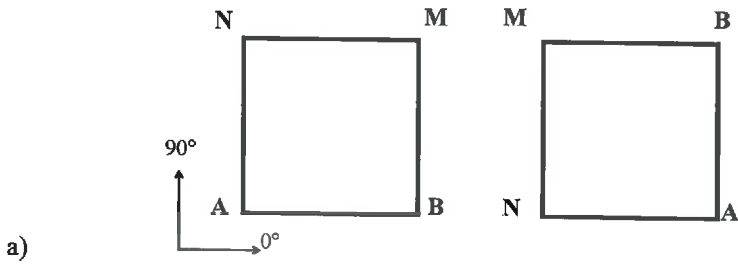


Figure IV-27: Square array configuration a) the location of the current (A and B) and potential (M and N) electrodes for the two array orientation and b) inter-electrode spacing corresponding to the different pseudo-depths 1-6, with specified the number of acquisition for each square array orientation.

inter-spacing of 6, 9, 12, 15, 18 and 21 cm contained respectively 72, 50, 32, 18, 8 and 2 measurements. The seventh pseudo-depth was not taken into account because it contained only 2 values, one for each array orientation.

3.3. Results and discussion

3.3.1. Description of the crack network at the soil surface at the end of the experiment

Figure IV-28 shows the cracking network pattern after desiccation at the end of the experiment. The top surface of the block was divided into square areas 3 cm × 3 cm numbered from 1 to 49. The length of the area side corresponded to the smallest inter-electrode spacing ($a = 3$ cm), i.e. the electrode square array position for the first pseudo-depth. The cracks had various widths, lengths and orientations (Figure IV-28). We determined the mean crack width (mm) and the area proportion within each unit area. The binary photography showed the cracks in black and the solid parts in white. We evaluated the mean crack width for each unit area by manually counting the number of pixels perpendicular to the crack direction, and we calculated the crack proportion by comparing the proportion of black pixels to white ones. As expected, crack width increased with the proportion of surface cracks and the two variables were closely related ($r = 0.93$, $n=49$). The three widest cracks were linked to the major triple point located in the unit area 19 (Figure IV-28).

3.3.2. Overall description of the change in 3D apparent resistivity data

The mean apparent resistivity and the median, minimum, maximum, and the standard deviation were calculated for each set of data corresponding to each of the six pseudo-depths (PD1 to PD6) at the initial and final stages and the two array directions (ρ_{0° and ρ_{90°) (Table IV-2). At the initial stage, the mean and the median increased slightly with pseudo-depth whatever the direction of the array. We attribute this slight increase to side effects during measurement that may have been caused by the small thickness of the soil sample compared with the wide inter-electrode spacing. The standard deviation remained small and similar for pseudo-depths PD1 to PD5, and was even smaller for pseudo-depth PD6 (Table IV-2). Maximum and minimum values of ρ were 54 and 12 $\Omega.m$ respectively. At the final stage, the mean and median varied less as a function of pseudo-depth than at the initial stage, and there was no progressive increase from PD1 to PD6. Maximum and minimum ρ values of 128 and 6 $\Omega.m$ respectively were from the first pseudo-depth. The mean apparent resistivity for all the pseudo-depths and for the two array orientations was 27 $\Omega.m$ for the initial stage and 44 $\Omega.m$ for the final stage.

The values of ρ recorded at the initial and final stages are plotted in Figure IV-29 with respect to the pseudo-depth. Compared with the initial stage, ρ was more variable. Such dispersion of the ρ values indicates the emergence of electrical heterogeneities.

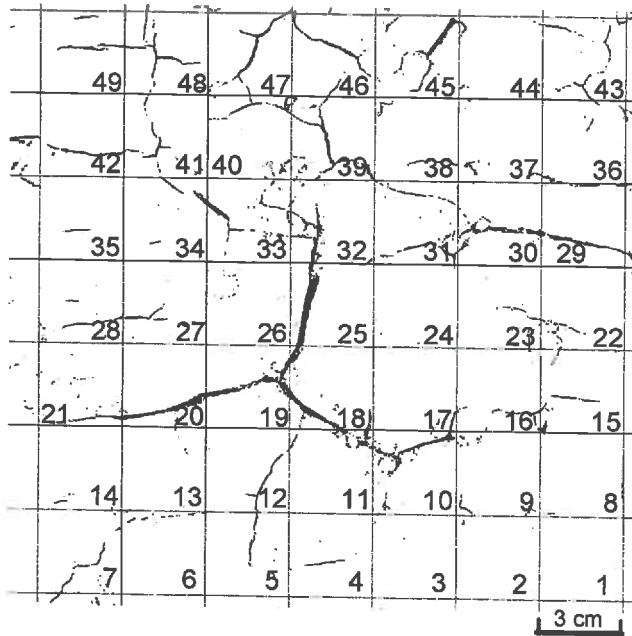


Figure IV-28: Binary image of the top surface of the block showing the cracking network pattern after desiccation at the end of the experiment. The grid nodes correspond to the electrode position and the square cells to the unit areas for the first pseudo-depth.

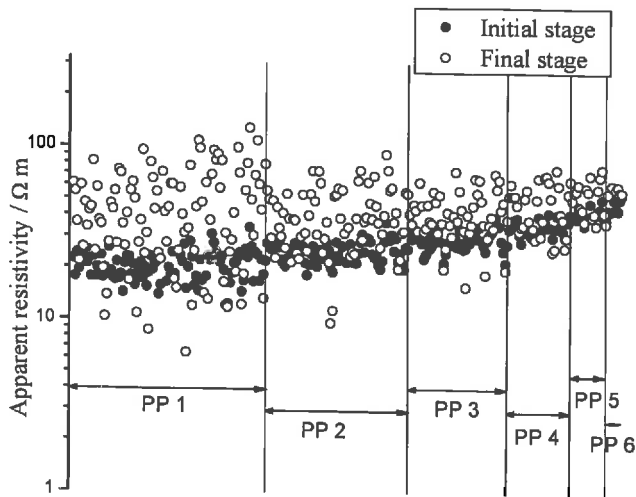


Figure IV-29: Initial and final measurement distributions for the 6 pseudo-depths.

	Initial stage						Final Stage						
	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	PD6	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	PD6	
ρ_{0e}	Mean	21	26	31	36	40	44	43	44	52	53	58	
	Median	21	25	30	35	40	44	39	40	53	57	59	
	Minimum	14	20	26	31	36	44	21	31	31	36	55	
	Maximum	34	37	40	41	45	46	128	91	73	75	69	61
	Std	4	3	3	3	3	1	26	16	12	13	10	2
ρ_{90e}	Mean	19	24	28	35	43	53	47	40	42	51	58	
	Median	19	23	28	34	41	52	41	41	35	44	56	
	Minimum	12	18	22	28	39	51	9	10	16	25	37	56
	Maximum	25	28	36	42	51	54	108	108	65	67	76	61
	Std	3	3	4	4	4	1	27	16	14	14	14	2
AAI	Mean	1.16	1.13	1.12	1.05	0.95	0.85	1.71	1.58	1.41	1.15	1.00	
	Median	1.07	1.13	1.06	1.03	0.97	0.84	1.06	1.18	0.92	1.29	1.04	
	Minimum	0.57	0.80	0.73	0.74	0.71	0.82	0.07	0.38	0.50	0.48	0.90	
	Maximum	2.57	1.67	1.84	1.35	1.16	0.89	9.63	7.54	4.64	2.84	1.86	1.08
	Std	0.43	0.24	0.25	0.20	0.14	0.03	2.01	1.51	1.08	0.78	0.43	0.08
α_{max}	Mean	43	42	42	44	48	50	46	42	43	40	46	
	Median	45	40	45	45	45	50	45	40	45	35	45	
	Minimum	20	30	30	35	40	50	5	10	10	20	45	
	Maximum	60	50	55	55	55	50	85	70	65	65	50	
	Std	10	6	6	6	6	0	24	18	15	16	12	2

Table IV-2: Mean, median, minimum, maximum, and standard deviations (Std) of ρ_{0e} , ρ_{90e} , AAI and α_{max} , at the initial and final stages for the 6 pseudo-depths.

3.3.3. Spatial distribution of three-dimensional apparent resistivity at the end of the experiment

Figure IV-30 shows horizontal sections of ρ values at each pseudo-depth at the end of the experiment and for the two array orientations. Each ρ measurement was attributed by convention to the geometric centre point of the square array shown in Figure IV-27. Though the soil volume investigated increased with the pseudo-depth, the size of the representative maps decreased because the acquisition quadripoles are overlapped with depth, and the unit area representation remained constant (Figure IV-27). The patterns of resistivity displayed in the sections corresponding to the two array directions are different. Indeed, a large ρ for one array orientation usually corresponds to a small ρ for the other. The variation of ρ corresponds to local ρ anomalies. The shapes of the anomalies are roughly similar at pseudo-depths 1 to 5 when recorded with one array direction. The two resistivity patterns were similar for the sixth pseudo-depth.

We assumed that the complementary distribution of apparent resistivity was related to the change of the soil structure due to drying. Indeed at the final stage air-filled porosity increased and a crack network appeared at the soil surface.

Using the two-array orientations $\alpha = 0^\circ$ and $\alpha = 90^\circ$, we calculated a dimensionless apparent anisotropic index (AAI) as follows:

$$AAI = \frac{\rho_{0^\circ}}{\rho_{90^\circ}} \quad (IV-8)$$

The determination of the electrical anisotropy index proved suitable since it highlighted the presence of heterogeneity. It also enabled the electrical resistivity measurements to be summarized on a single map for each pseudo-depth (Figure IV-31). When ρ_{0° and ρ_{90° are similar, AAI is close to 1 and the soil volume investigated is homogeneous, and there is no electrical heterogeneity. The major anisotropic zones were indicated by large and small AAI. As expected, they were found more at the soil surface than at depth: AAI ranged from 0.07 to 9.63 at pseudo-depths 1, 2 and 3. Minimum AAI increased with pseudo-depth whereas maximum AAI decreased with it (Table IV-2), because the size of the array was probably larger than the extent of the cracks.

3.3.4 Using the apparent anisotropic index for crack detection

In terms of electrical resistivity, cracks are anisotropic discontinuities in the electrical field. As a consequence, AAI can be considered as an indicator for crack detection. We calculated the average AAI at the final stage and the mean crack width for each unit area by using the crack network shown in Figure IV-28. The cracks that did not cross the in-line measurement MN were also taken into account. The in-line measurement MN represented the space between the electrodes M and N where electrical potential is measured. Figure IV-32 shows the variation of AAI

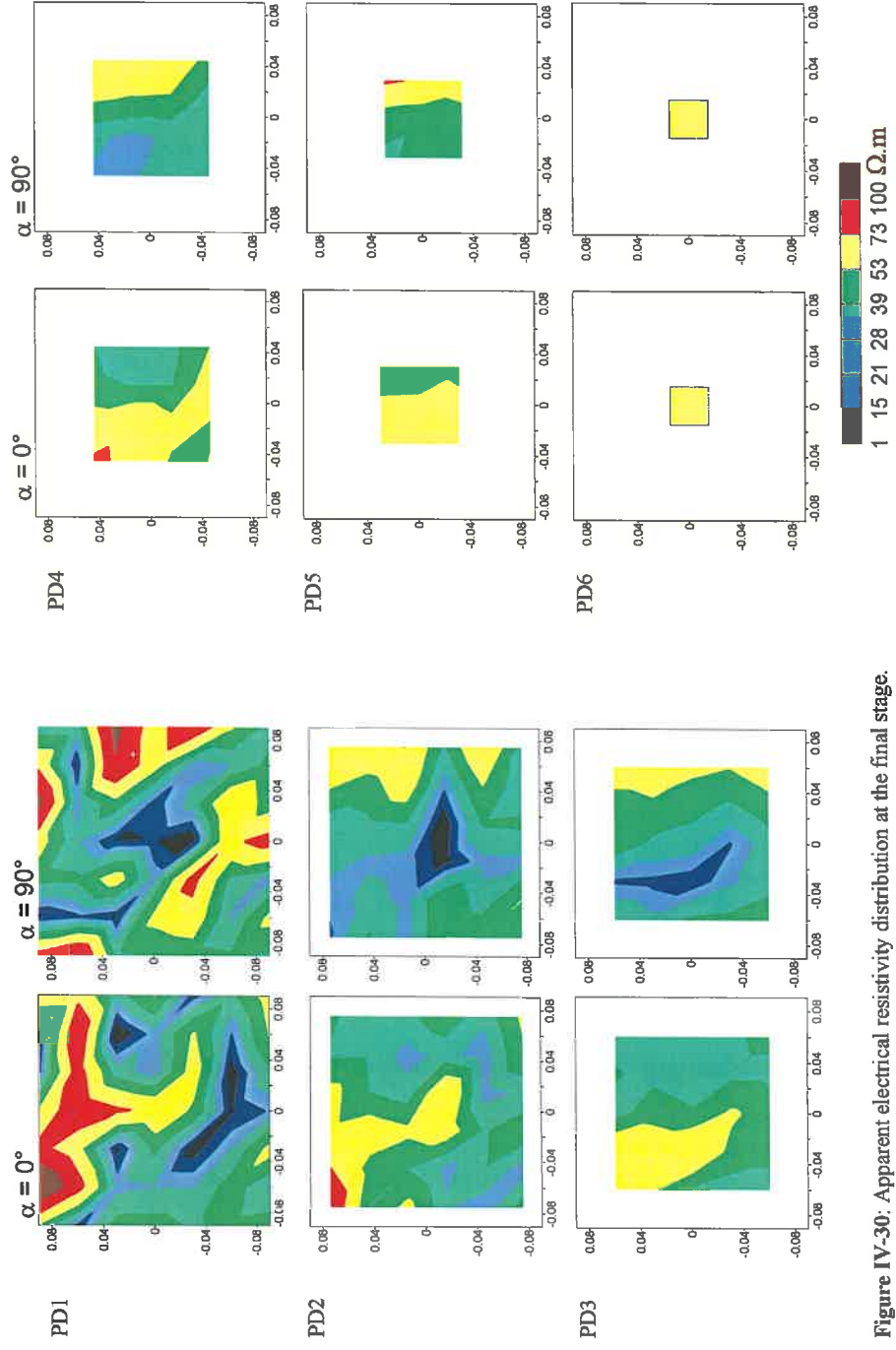


Figure IV-30: Apparent electrical resistivity distribution at the final stage.

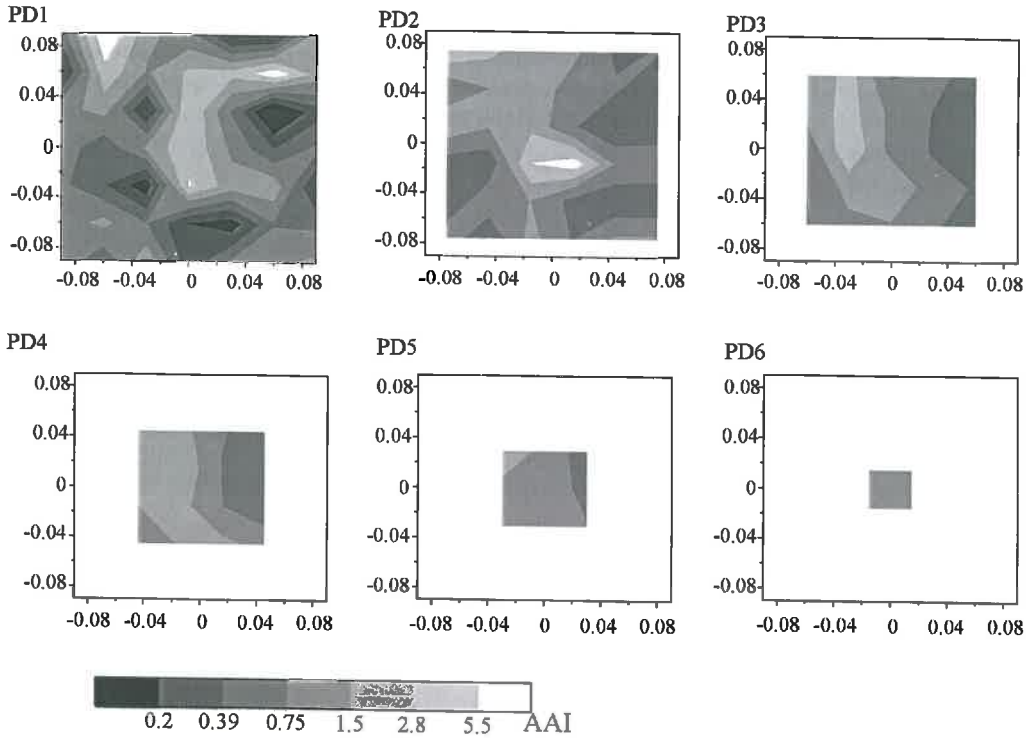


Figure IV-31: Spatial distribution of the apparent anisotropy index (AAI) at the final stage for the six pseudo-depths (PD1 to PD6).

with respect to mean crack width per unit area. When $AAI = 1$, the soil volume investigated was isotropic, when $AAI \neq 1$, the volume contained anisotropic electrical heterogeneities. When crack width was > 1 mm, AAI values were either larger than 2.83 or less than 0.42 (Figure IV-32). These two thresholds are linked, indeed one is the inverse ratio of the other, the first threshold was called I_{csup} and the second one I_{cinf} . Most cracks with a width < 1 mm, including all those that did not cross the MN in-line measurements, had an AAI value between I_{cinf} and I_{csup} . The limited extent of such cracks laterally and with depth does not lead to strong electrical heterogeneity.

We also examined the relation between AAI and preferential crack orientation (Figure IV-33). Three cases were distinguished:

- (i) when the crack had a preferential orientation close to 90° , $AAI > 1$,
- (ii) when the orientation was close to 45° , $AAI \cong 1$,
- and (iii) when the orientation was close to 0° , $AAI < 1$.

We constructed the map in Figure IV-34 by considering that elements with $I_{cinf} < AAI < I_{csup}$ had no crack recognizable with the electrode inter-spacing and array geometry

used in this study. For unit areas with $AAI < I_{cinf}$ or $AAI > I_{csup}$, cracks were considered to be present and to be separated according to their preferential orientation ($\alpha = 0^\circ$ or 90°). Cracks oriented at 45° were not detected, because their AAI was included within I_{cinf} and I_{csup} . Comparison of the crack network pattern shown in Figure IV-28 (the cracks not crossing the in-line measurement MN are excluded) with this map of AAI for each units shows that the triple point is clearly recognized at the limit of three zones with two distinct cracking orientations. Moreover, AAI values reflected the orientation of main cracks that were recognized at the soil surface. However, cracks with $\alpha \cong 45^\circ$, as in unit areas 7, 46, 47 (Figure IV-28) or cracks that do not cross the in-line measurement MN, as in the unit areas 21, 28, and 49, were not detected. The AAI is directly calculated by the mean experimental data and as a consequence, the I_{cinf} and I_{csup} threshold values given in this paper cannot be applied to another soil or different experimental conditions. Moreover, I_{cinf} and I_{csup} were defined with regard to the soil surface photograph and our observations (Figure IV-32), and they were used for only the first pseudo-depth. Indeed, observation of soil surface gave an initial approximation of the cracking network, which was linked for reasons of accuracy only to the first pseudo-depth, since this was the smallest soil volume studied.

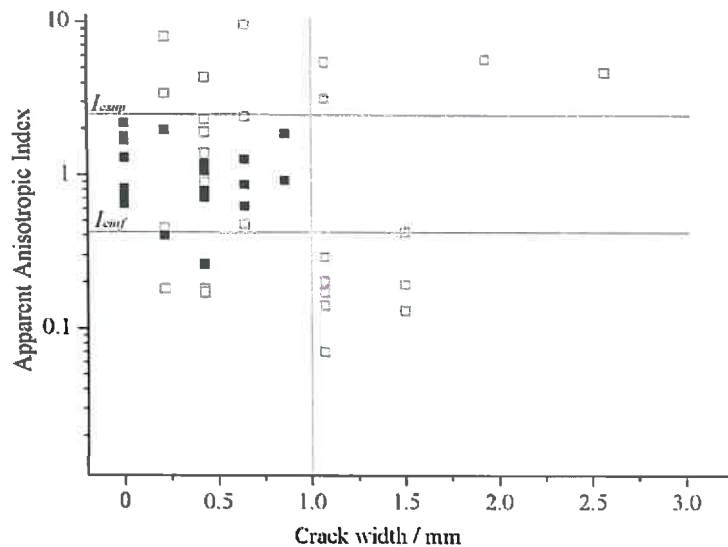


Figure IV-32: Variation of the apparent anisotropic index (AAI) with respect to average crack width within each unit area: \square cracks that do not cross and \blacksquare cracks that cross the in-line MN (I_{cinf} and I_{csup} are the two thresholds determined for crack identification $> 1\text{mm}$).

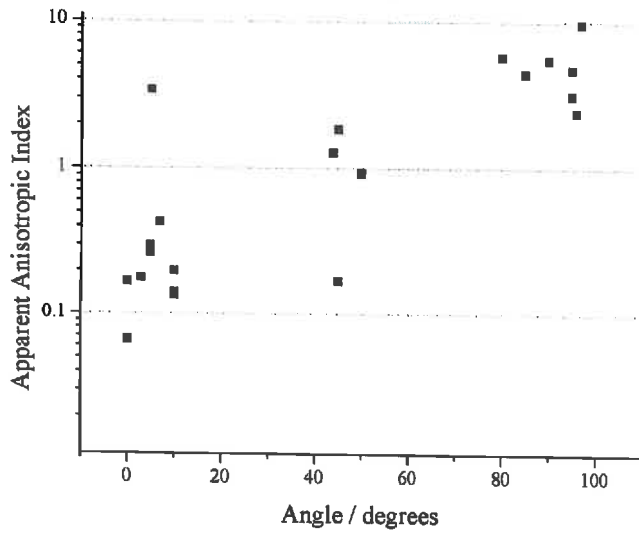


Figure IV-33: Anisotropic apparent index (AAI) and main crack orientation.

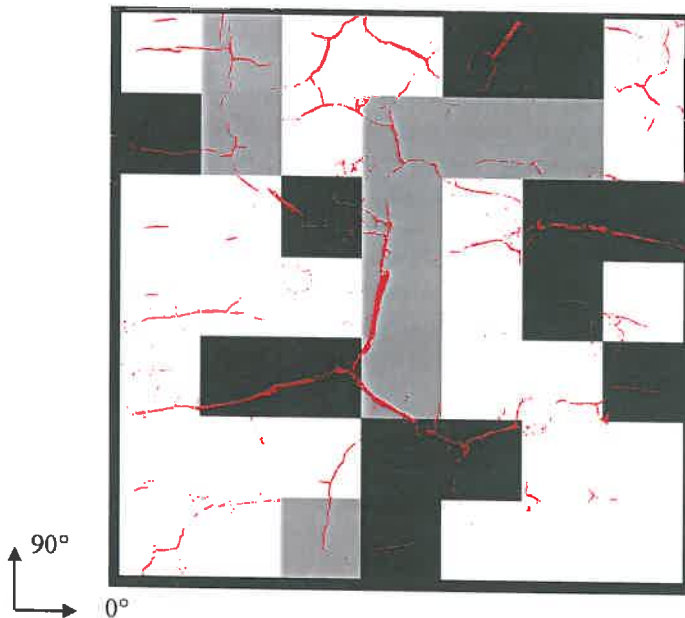


Figure IV-34: Mean crack orientation at the final stage: white squares represent units with $I_{cinf} < AAI < I_{csup}$, grey squares represent units with $AAI > I_{csup}$ and the black squares represent units with $AAI < I_{cinf}$.

3.3.5 Use of the preferential anisotropic orientation for crack detection

The AAI calculated from the first pseudo-depth data and I_{cinf} and I_{csup} , which were defined on the basis of surface observation, can be considered as an initial approximate description of the crack network. The apparent resistivity distribution is highly dependent on the orientation of the current source with respect to the anisotropy of electrical heterogeneity. To go further with our analysis, we calculated the array orientation corresponding to the maximum apparent resistivity values, α_{max} -array orientation. The primary data set was transformed by the rotation matrix \mathbf{R} defined as follows:

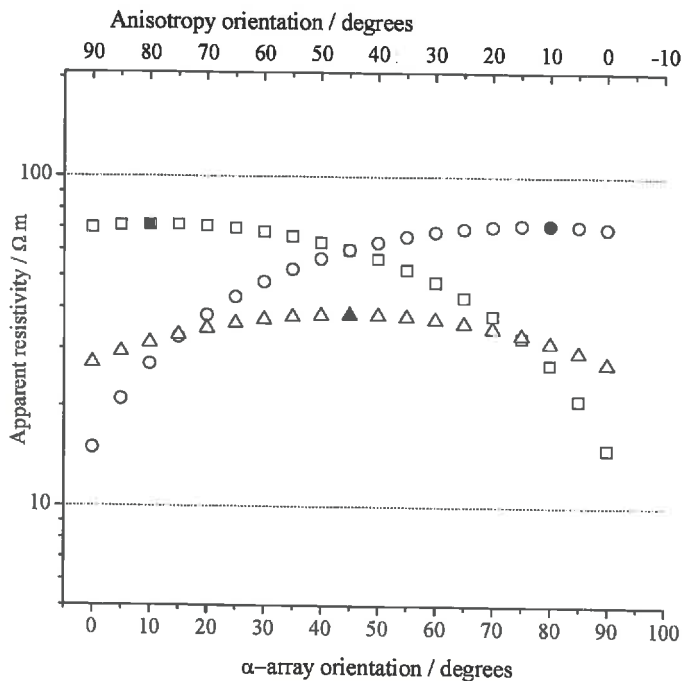
$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{IV-9})$$

where α is the angle relative to the measurement grid. The resistivity values ρ_{α} and $\rho_{\alpha+90^\circ}$ obtained by Equation IV-8 formed the calculated data.

$$\begin{bmatrix} \rho_{\alpha} \\ \rho_{\alpha+90^\circ} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} \rho_{0^\circ} \\ \rho_{90^\circ} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-10})$$

These data were calculated for α values, at 5° intervals from 0° to 90° . The rotation matrix highlighted particular features such as the position and orientation of a resistivity discontinuity. Figure IV-35 shows the calculated apparent resistivity according to Equation (IV-10) of three theoretical situations of apparent resistivities: $\rho_{0^\circ} = \rho_{90^\circ} = 27 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_{0^\circ} = 15 \Omega \cdot \text{m}$ and $\rho_{90^\circ} = 70 \Omega \cdot \text{m}$, and $\rho_{0^\circ} = 70 \Omega \cdot \text{m}$ and $\rho_{90^\circ} = 15 \Omega \cdot \text{m}$. In an isotropic medium ($\rho_{0^\circ} = \rho_{90^\circ}$), the maximum calculated apparent resistivity value is recorded for $\alpha = 45^\circ$. In an anisotropic medium ($\rho_{0^\circ} \neq \rho_{90^\circ}$) the maximum calculated resistivity value is recorded for $\alpha \neq 45^\circ$. The crack is also oriented perpendicular to the value of α for which the apparent resistivity recorded is maximal. Thus, the value of α_{max} provides information on crack orientation. Based on calculations of α_{max} using an experimental data set we can conclude that, when $\alpha_{\text{max}} = 45^\circ$, the medium does not include anisotropic electrical heterogeneity; and when $\alpha_{\text{max}} \neq 45^\circ$, it includes anisotropic electrical heterogeneity whose orientations can be determined.

For our experimental dataset, we calculated α_{max} for each unit area and each pseudo-depth (Table IV-2). The results show that the mean α_{max} and its median were close to 45° whatever the pseudo-depth. On the other hand, the results also show that the range of α_{max} and its standard deviation decreased as the pseudo-depth increased. This indicates that α_{max} converged at 45° when the pseudo-depth increased, with a corresponding reduction of anisotropic electrical heterogeneity when the volume investigated increased.



- $\rho_{0^\circ} = 70 \Omega \text{ m} > \rho_{90^\circ} = 15 \Omega \text{ m}$ / ■ maximum value
- $\rho_{0^\circ} = 15 \Omega \text{ m} < \rho_{90^\circ} = 70 \Omega \text{ m}$ / ● maximum value
- △ $\rho_{0^\circ} = \rho_{90^\circ} = 27 \Omega \text{ m}$ / ▲ maximum value

Figure IV-35: Variation of the apparent resistivity measurement with the square array orientation.

For the first pseudo-depth, the α_{max} values ranging between 40° and 50° corresponded to the unit areas where $I_{\text{cinf}} < \text{AAI} < I_{\text{esup}}$ (Figures IV-31 and 36a) and can be considered as an isotropic medium. The α_{max} values ranging from 0° to 35° and from 55° to 90° corresponded to an anisotropic medium where cracks were present. The anisotropy directions illustrated in Figure 36a for the first pseudo-depth agree with the crack directions shown in Figure IV-34. The orientation of the electrical heterogeneity in unit areas 18, 19 and 11 agrees closely with the geometry of cracks linked to the major triple point. In the unit areas 29 and 30, the orientations also correlated well with the crack orientation shown in Figure IV-34. Between the first and the second pseudo-depth, the orientation of electrical heterogeneity was preserved or shifted to 45° but never inverted. The third pseudo-depth showed a single major electrical heterogeneity oriented at 75° and located in three neighbouring unit areas. The following pseudo-depths, four, five, and six, displayed an orientation α_{max} converging at 45° . In Figure IV-36a, all the α_{max} values at the different pseudo-depths were calculated for unit areas with a size corresponding to the smallest size. However, the effective unit area increased with increasing depth, leading to overlapping the area units. In Figure IV-36b, the α_{max} values were calculated for areas corresponding to the unit area of the second pseudo-depth (36 cm^2). Thus, four maps were required to represent all the

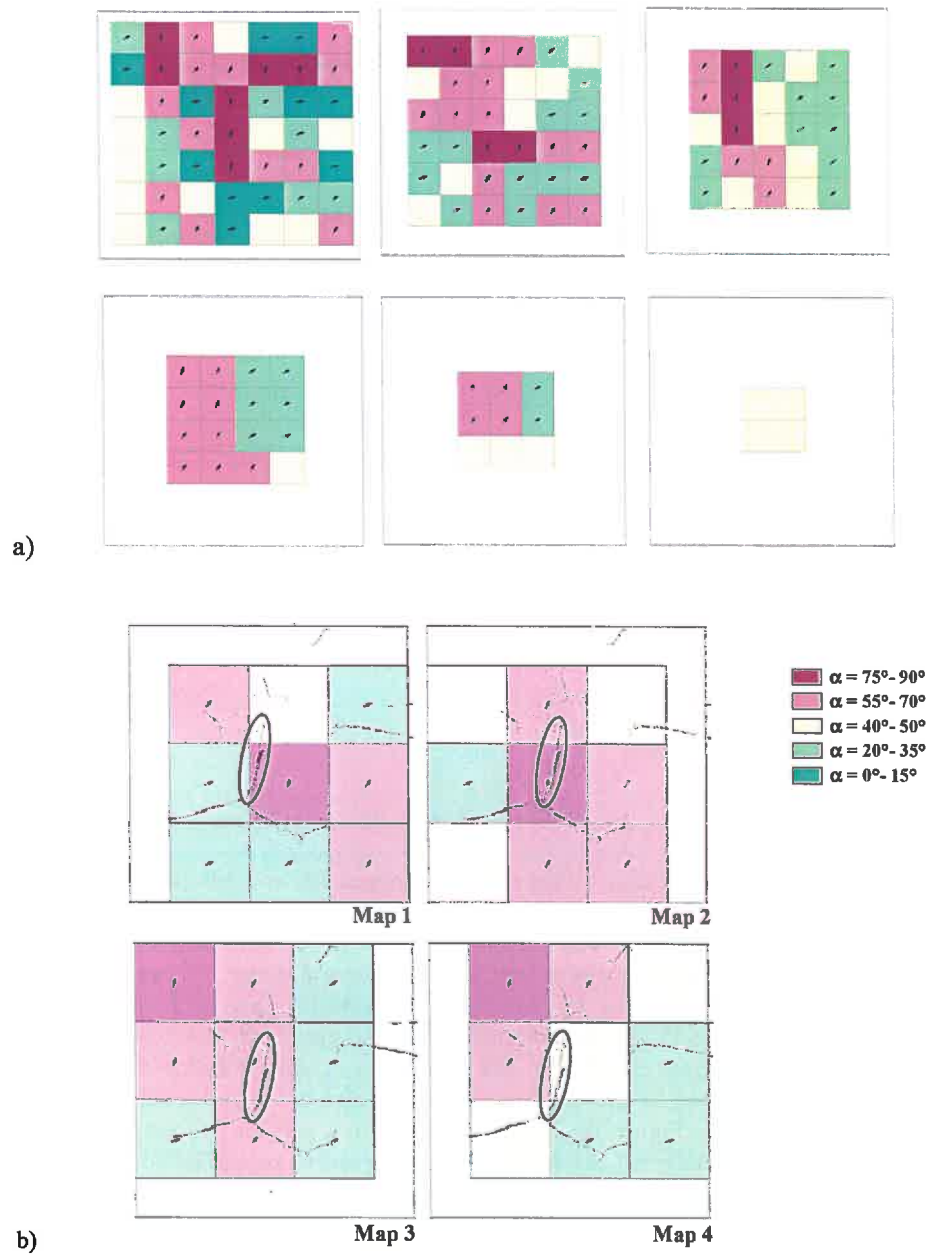


Figure IV-36 : a) Preferred anisotropy orientation for the 6 pseudo-depths at the final stage, b) Details of the triple point.

apparent resistivity measurements at the second pseudo-depth. Only cracks > 1 mm were overwritten in Figure IV-36b. The ringed crack in Figure IV-36b corresponded to the widest crack of the major triple point and showed a preferential orientation of 90° . Maps 1, 2, 3 and 4 show orientations of this crack at respectively 80° , 80° , 65° and 45° . Thus, in map 4 the unit area containing the major crack was not clearly identified as a crack since $\alpha_{\max} = 45^\circ$. Generally, cracks > 1 mm are detected except when

- i) crack orientation is equal to 45° ,
- ii) cracks do not cross the MN in-line measurement. In these two cases, the unit area is not different from that of a non-cracked area.

When the inter-electrode spacing increased from a to $2a$ (second pseudo-depth), only the major cracks were distinguished. The widest cracks were detected down to the third pseudo-depth. Cracks spread downwards into the soil with a preferential orientation initiated from the surface. It can be assumed that as mean crack width increased, the corresponding crack depth increased also. As the pseudo-depth increased, the soil volume investigated also increased and the related influence of the cracks decreased. The electrical signal then became less disturbed by the heterogeneity.

3.3.6 Temporal variation of the crack network pattern

By comparing the initial and final apparent resistivity values, we showed that the electrical resistivity method could detect the effect of drying on the soil block. Our results indicate that the distribution of electrical resistivity during the drying changes with both depth and time.

Our analysis first focused on data from the first pseudo-depth and on the unit areas 19, 20 and 25 where major cracks were present, and unit area 24 where there was no crack at the final stage (Figure IV-28). At the final stage, the cracks within the unit areas 19 and 20 had a preferred orientation close to $\alpha = 0^\circ$, whereas the crack within the unit area 25 had a preferred orientation close to $\alpha = 90^\circ$. Unit area 24 with no crack showed no preferred orientation. The variations of ρ_{0° and ρ_{90° and of AAI during the drying (18 days) for the four unit areas are presented in Figures IV-37 and IV-38. Variation of ρ_{0° and ρ_{90° showed that cracks in the unit areas 19 and 25 were clearly initiated on the third day (Figure IV-37). Then, the apparent resistivity values changed suddenly between the third and the sixth day, ρ_{0° decreased as ρ_{90° increased in area 19, whereas variation was the opposite in area 25. In the unit area 20, an apparent resistivity differentiation between ρ_{0° and ρ_{90° was observed from the fifth day. The crack had the same orientation as the crack in area 19. In fact, these two latter unit areas were adjacent, the crack observed in the unit area 20 constituting the growth of the crack initiated in the unit area 19. The cracks progressed and conserved their orientation through time. In the unit area 24, ρ_{0° and ρ_{90° remained stable throughout the experiment.

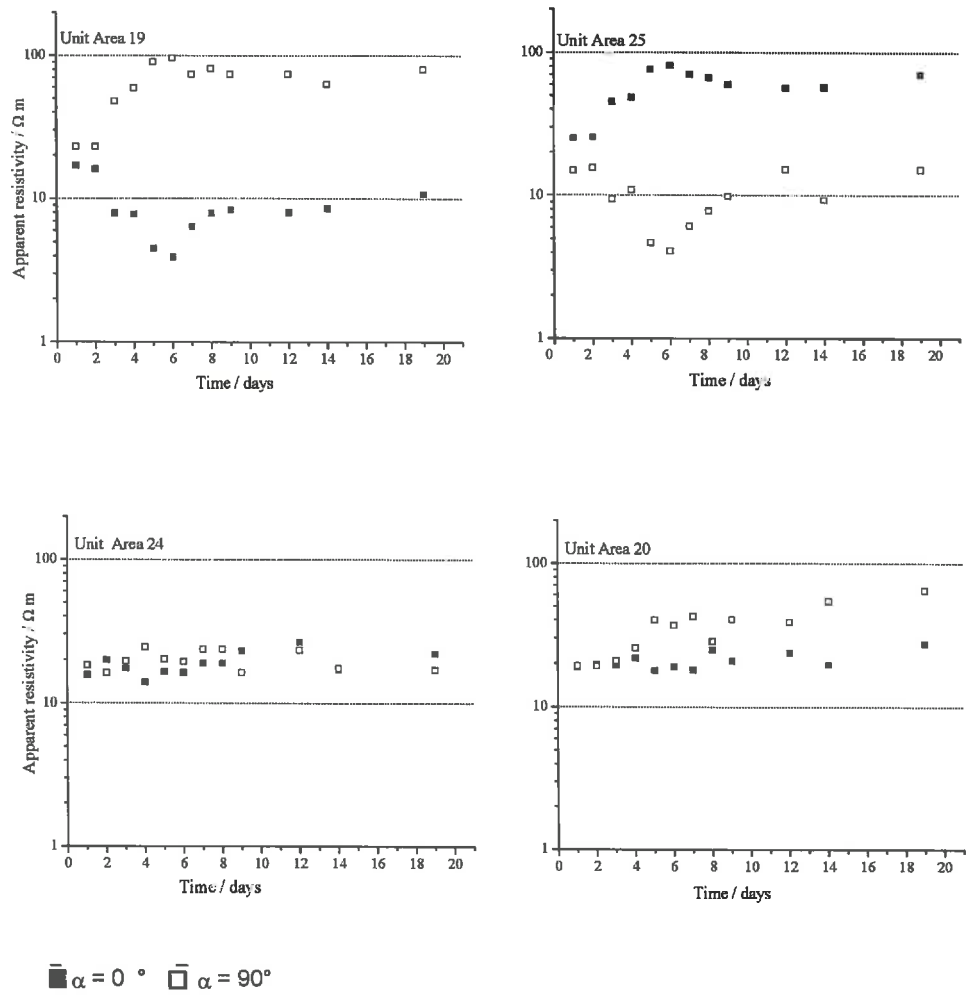
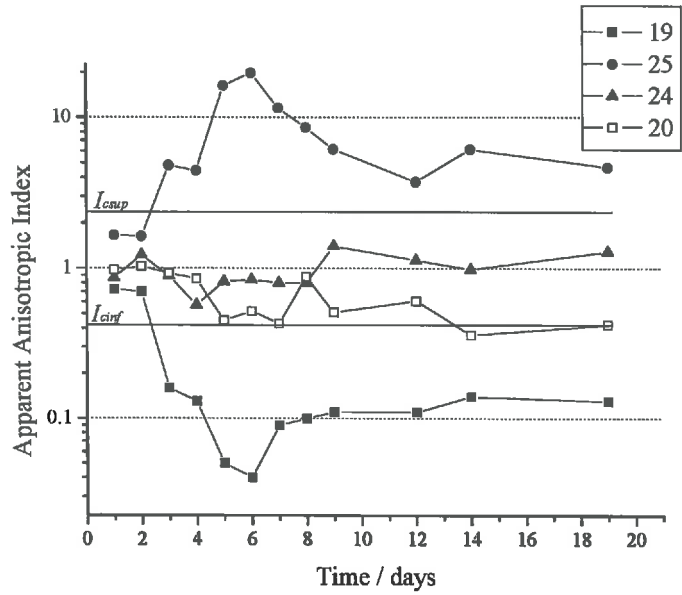


Figure IV-37: Apparent resistivity monitoring over 18 days, for the four unit areas 19, 25, 24 and 20 and at the first pseudo-depth.

At the initial stage, the AAI values of the fourth unit area selected were between I_{cinf} and I_{csup} . From the third day AAI changed suddenly: it decreased from 0.70 to 0.16 in unit area 19, and increased from 1.6 to 4.7 in unit area 25. Both thresholds I_{cinf} and I_{csup} were exceeded, and the areas were also considered as cracking areas. The values of AAI in the unit area 20 approached I_{cinf} from the fifth day. During the rest of the experiment, AAI oscillated around I_{cinf} . In unit area 24, AAI varied around 1 and never exceeded the thresholds. No crack was visible at the soil surface, in agreement with this observation. Thus, unit areas 19 and 25 on the one hand, and area 20 on the other, had two different cracking initiations. The first is abrupt and quick; it is related to the initiation of the triple point. The second crack initiation progressed more slowly and corresponded to the spread of one arm of the triple point. Non-destructive acquisition through time permitted monitoring crack initiation, growth and extension.

As shown previously, the widest crack spread to the second pseudo-depth (Figure IV-36b). The orientation of preferential heterogeneities for two specific areas labelled A and B was monitored through time (Figure IV-39). The surface area corresponded to 36 cm² and was related to the inter-electrode spacing at the second pseudo-depth. Area A corresponded to the unit areas 17, 18, 24 and 25, whereas area B corresponded to the unit areas 19, 20, 26 and 27. Thus area A included the main crack of the triple point at 90°, and area B the left arm of the triple point oriented at 0°. At the initial stage α_{max} of the two areas was about 45°, indicating an electrically homogeneous medium. From the fifth day, $\alpha_{\text{max}} > 70^\circ$ for area A, and $\alpha_{\text{max}} < 30^\circ$ for area B. Cracks then reached the second pseudo-depth. It can be seen that the orientation of the main cracks was preserved through time and depth.



Unit Area: 19 ■ 25 ● 24 ▲ 20 □

Figure IV-38: Variation of AAI and comparison with I_{cinf} and I_{csup} thresholds during drying for the four unit areas 19, 25, 24 and 20.

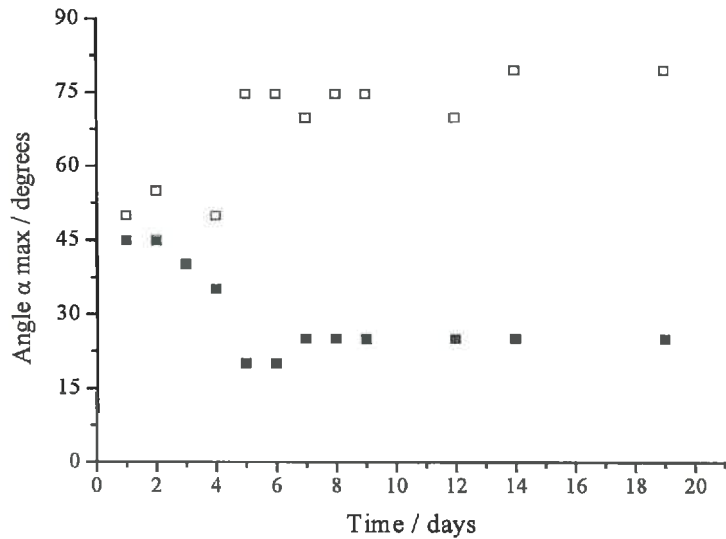


Figure IV-39: Orientation of heterogeneity for the second pseudo-depth, and during drying for the two areas A □ and B ■ corresponding respectively to unit areas 17, 18, 24, 25; and 19, 20, 26, 27.

3.4. Conclusion

As expected, our results indicate that the measurements of electrical resistivity set depend on electrical heterogeneity and that variations in the signal were detectable, even at this scale. These measurements also enabled us to monitor the development of cracking patterns during drying. The I_{cinf} and I_{csup} thresholds resulting from the apparent anisotropic index AAI and the orientation of the α_{max} -array are two methods useful for detecting electrical heterogeneities. The first was calculated for a specific electrical device, related to a specific soil texture and experimental conditions, and was applied for the first pseudo-depth. Nevertheless, it can be applied to the other temporal stages of drying. The second method took longer, but it has the advantage that it can be applied to the entire volume of the soil. The calculation of these two indexes gives an idea of the structure of the medium prior to data inversion. Indeed, it provided information on the presence, position, and extension of the cracks. The variation of these two indexes over time helps to explain how cracks develop. Nevertheless, neither method can distinguish units where cracks are oriented close to $\alpha = 45^\circ$, or cracks that do not cross the in-line measurement MN, or non-cracked units. In future experiments measurements along the diagonal could also be done. This would increase the acquisition time needed by about 20 minutes but would help to detect cracks oriented at 45° .

Acknowledgement

We are grateful to Keith Hodson for improving the original English text.

Les résultats obtenus permettent de valider l'utilisation de l'indice AAI pour la détection et la caractérisation de la fissuration naturelle sur un sol en dessiccation. L'orientation préférentielle des fissures à 0° et 90° est retrouvée. Néanmoins les fissures orientées à 45° n'ont pu être distinguées de l'encaissant. Deux seuils I_{cinf} et I_{csup} ont été définis à partir de l'indice AAI, et sont fonction de l'épaisseur de la fissure. Les fissures les plus larges, supérieures à 1mm ont été détectées. En l'absence de modèle d'inversion satisfaisant, dans le cas d'un milieu fissuré qui présente de forts gradients de résistivité à une échelle centimétrique, l'application de ces indices aux mesures de résistivité apparente fournit une information qualitative préliminaire de l'état de fissuration.

3.5. Evaluation de l'indice AAI pour le suivi temporel de la fissuration

L'évolution temporelle de la fissuration a été brièvement abordée dans la partie précédente. Nous analysons ici plus en détail ces variations en nous appuyant sur les valeurs de AAI des quadrats 19 et 25 à la première pseudo-profondeur, et sur des résultats issus de la modélisation.

En fin d'expérimentation, comme on peut le constater sur la figure (Fig. IV-28), les quadrats 19 et 25 ont deux orientations différentes dans le plan (0, xy), respectivement proche de 0° et de 90°. Comme nous avons pu le voir précédemment (Fig. IV-14, IV-17, IV-18 et IV-19), l'indice AAI est sensible aux paramètres géométriques de la fissure : orientation dans le plan (0, xy), épaisseur, pendage (dans le plan (0, xz)) et profondeur. Les variations temporelles de AAI, en plus de préciser l'initiation et l'orientation de la fissure, fournissent des indications supplémentaires (Fig. IV-40). Au premier et deuxième jour les valeurs de LogAAI sont proches de zéro, ce qui correspond à l'état initial du bloc qui n'est alors pas encore fissuré. Ce n'est qu'à partir du troisième jour, que les valeurs de LogAAI sont associées à l'initiation de la fissuration. Le quadrat 25, où la fissure a une orientation préférentielle à 90°, les valeurs de LogAAI sont positives, et inversement pour le quadrat 19 où l'orientation de la fissure est préférentiellement à 0°. Entre le troisième et le dix-neuvième jour, les valeurs présentent des variations significatives avec un pic au sixième jour. Comme nous l'avions présenté précédemment, l'indice AAI est non seulement sensible à l'orientation de la fissure mais également à son épaisseur (Fig. IV-17). Le suivi photographique de surface que nous avons effectué nous permet d'abonder dans ce sens, la largeur des fissures dans les quadrats 19 et 25 tend à augmenter au cours du temps. La profondeur de la fissure tend également à augmenter au cours du temps. Cependant l'influence de ce paramètre sur l'indice AAI n'est plus prépondérante lorsque la profondeur de la fissure est équivalente à l'espacement inter-électrode. Il se produit un effet seuil qui masque l'effet de la profondeur de la fissure (Fig. IV-19). Ainsi les deux paramètres, épaisseur et profondeur, ne peuvent expliquer l'évolution de AAI après le sixième jour. Nous interprétons cette évolution par un changement de pendage au cours du temps et avec la profondeur. En effet, au cours du temps la fissure se propage en profondeur, mais son pendage, strictement vertical peut aisément être dévié par la présence de contraintes locales. Les résultats de la simulation (Fig. IV-19) nous ont montré que l'indice AAI était, au-delà d'un pendage $\theta = 30^\circ$, fortement influencé.

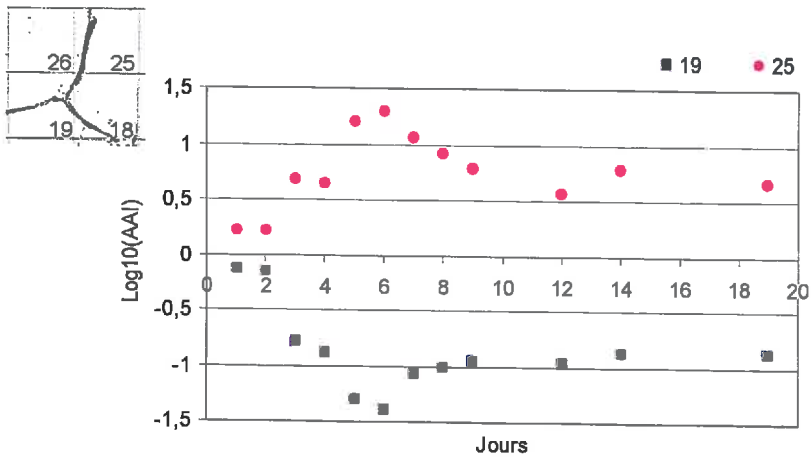


Figure IV-40 : Evolution temporelle de l'indice AAI calculé à partir des données expérimentales des quadrats 19 et 25.

L'analyse de l'indice AAI permet une interprétation de l'évolution temporelle de la fissuration. L'indice AAI est sensible à l'orientation de la fissure mais également à d'autres paramètres géométriques tels que l'épaisseur, la profondeur et le pendage de la fissure. Dans le cadre de l'expérimentation naturelle de dessiccation, l'épaisseur et la profondeur de la fissure augmentent au cours du temps. La variation de pendage au cours du temps est une hypothèse à retenir qui permettrait d'expliquer le pic observé au sixième jour du suivi temporel.

4. Conclusion du chapitre IV

L'acquisition électrique 3D a été mise en place au moyen de la configuration carré. Cette configuration montre, d'une part une grande sensibilité de la mesure à la fissuration suivant l'orientation du quadripôle ABMN, et d'autre part ne nécessite pas de connaissance *a priori* du milieu prospecté. Les fissures d'orientation préférentielle à 0° et 90° sont reliées à de forts gradients de résistivité. Ces fissures recourent avec une incidence identique les quadripôles ABMN. Elles sont à l'origine de zones anisotropes spatialement très localisées. Il est donc relativement aisé de les détecter et de suivre leur progression en profondeur. Lorsque l'orientation de la fissure est à 45° , celle-ci ne recoupe pas les quadrats de mesure de manière identique, il est alors impossible de la détecter par rapport à l'encaissant.

L'expérimentation ayant été conduite sur des échantillons de taille relativement réduite par rapport au dispositif électrique, nous avons, au moyen du logiciel « Fissel », estimé les effets de bord. Au delà de la troisième pseudo-profondeur, les données acquises s'avèrent fortement influencées par les bords de l'échantillon.

L'expérimentation artificielle fournit des résultats encourageants pour la détection de la fissuration par la mesure de résistivité électrique. La simulation numérique, au moyen du logiciel « Fissel », de l'expérimentation artificielle fournit également des distributions cohérentes de l'indice d'anisotropie proposé AAI en fonction de l'orientation des fissures. Néanmoins, il subsiste un écart quantitatif entre données numériques et expérimentales ; le modèle s'avère moins sensible que l'expérimentation, ce qui entraîne par modélisation, des valeurs de résistivité moins influencées par la présence des fissures.

L'expérimentation naturelle constitue une première étape de suivi dynamique 3D de la fissuration. Les données recueillies fournissent des indications sur les variations de paramètres géométriques au cours du temps.

L'indice d'anisotropie développé AAI s'applique directement aux mesures de résistivité apparente. Son utilisation permet une description qualitative de l'état de fissuration. Cet indice est sensible à l'orientation de la fissure mais également aux paramètres géométriques de la fissure tels que l'épaisseur, la profondeur et le pendage. Ainsi, nous obtenons des informations qualitatives concernant l'état de fissuration du milieu prospecté, ceci fournissant une étape préliminaire à la conduite de l'inversion guidée par la distribution spatiale de l'indice AAI.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail de thèse était la mise au point d'une méthode expérimentale permettant la description géométrique 3D du développement d'un réseau de fissures lors de la dessiccation. Un tel suivi expérimental nécessitait que l'on puisse acquérir des données 3D de manière non destructive. Peu d'études expérimentales tiennent compte de ces deux aspects. Afin de mener à bien notre étude, nous avons exploité les potentialités de la méthode de la résistivité électrique qui, d'une part, présente ces deux atouts, et d'autre part détecte aisément les structures résistantes telles que peuvent l'être les fissures remplies d'air lors de la dessiccation.

Principaux résultats obtenus

La démarche d'étude mise en place repose sur un couplage entre expérimentation et modélisation.

Cet aller-retour nous a permis, dans un premier temps, de valider le logiciel « Fissel » élaboré par A. Tabbagh et J. Tabbagh (à paraître) au moyen des données expérimentales en 2D, et nous a fournis par la suite une aide pour la mise en place de l'expérimentation 3D. Les tests de sensibilité effectués ont révélé que la mesure de résistivité électrique est sensible aux paramètres géométriques de la fissure tels que la profondeur, l'épaisseur, le nombre, l'orientation et le pendage. La configuration carré utilisée pour l'acquisition 3D a été testée numériquement préalablement à l'expérimentation, fournissant ainsi des indications sur la variation de la résistivité apparente en fonction des paramètres géométrique de la fissure. De cette façon, un indice d'anisotropie AAI a été développé et adapté à l'analyse de la fissuration. Les simulations ont montré en particulier la sensibilité de cet indice à l'orientation, à l'épaisseur, au pendage et à la profondeur de la fissure.

L'étude expérimentale a consisté, dans un premier temps, en la réalisation technique de la mesure à l'échelle centimétrique sur un sol sec. Cette étude a été menée à partir d'un panneau électrique 2D sur un modèle réduit de sol. A cette occasion nous avons testé la sensibilité de la mesure pour différents états de fissuration artificielle variant selon l'approfondissement de la fissure. La comparaison de ces données avec les résultats de simulation a permis la validation du logiciel « Fissel ». Dans un deuxième temps nous avons abordé le volet expérimental 3D. Deux expériences ont été conduites, la première qualifiée d'artificielle, et la seconde effectuée également en laboratoire mais en conditions naturelles de dessiccation. Cette dernière apporte, dans le domaine de l'étude de la fissuration des sols, un exemple de suivi temporel 3D de la mise en place d'un réseau de fissures. L'application de l'indice AAI élaboré à partir des résultats préliminaires de simulations, a permis lors des deux expériences, de retrouver les orientations préférentielles des fissures lorsque celles-ci sont proches de 0° et 90° dans le référentiel du quadripôle de mesure.

Un second indice (α_{\max}), permettant la détection de l'orientation préférentielle des fissures entre 0° et 180° a été proposé. Certaines données expérimentales manquantes ne nous ont pas permis de mettre en œuvre concrètement cet indice sur nos expériences.

Atouts de la méthode pour la détection des fissures dans un sol en dessiccation.

La méthode électrique est une méthode indirecte et non destructive qui, suivant la configuration d'électrodes choisie, permet la mise en place d'expérimentations 3D. Sa mise en œuvre, depuis la surface, fournit des informations sur la structure du milieu prospecté. Les résultats expérimentaux et numériques obtenus ont montré que cette méthode est très sensible aux paramètres géométriques de la fissure. L'indice AAI proposé s'applique aux données de résistivité apparente, et permet de détecter la présence des fissures selon certaines orientations préférentielles. Cet indice est également sensible à l'épaisseur, à la profondeur et au pendage de la fissure, ce qui dans le cadre de l'expérimentation artificielle fournit des hypothèses de variation de pendage avec la profondeur. De plus, l'utilisation d'une méthode expérimentale, couplée à la modélisation, nous a permis d'évaluer et de tenir compte des effets de bords.

Limites de la méthode

A l'heure actuelle, l'expérimentation 3D réalisée au moyen de la configuration carré (orientée à 0° et 90°) ne nous a pas permis de détecter de manière satisfaisante les fissures orientées à 45° . Celles-ci n'ont pu être distinguées des zones non fissurées. La description 3D que nous pouvons faire actuellement apporte des renseignements précis sur la position et l'orientation, mais la profondeur ou l'épaisseur de la fissure ne sont connues qu'imparfaitement. En effet, connaître la profondeur réelle de la fissure nécessite d'inverser les données de résistivité apparente. Dans le cadre de notre étude nous n'avons pas abouti à cette étape ; nos interprétations reposent uniquement sur les données de résistivité apparente, fonction de la pseudo-profondeur, et non de la profondeur réelle d'investigation. L'indice AAI est sensible à l'épaisseur de la fissure, et nous a amené à établir deux seuils I_{cinf} et I_{csup} reliés à une épaisseur de fissure supérieure à 1.10^{-3} m. Néanmoins aucune relation directe ne peut être ajustée étant donné que cet indice est également fonction de la profondeur, et du pendage de la fissure.

Perspectives

Détecter des fissures quelle que soit leur orientation

Pour aller plus loin, il apparaît nécessaire de coupler une nouvelle fois modélisation et expérience afin de résoudre le problème de la détection des fissures orientées à 45° . Pour cela, l'effet d'une rotation de 45° du quadripôle ABMN est à analyser par modélisation, de telle façon que la fissure recoupe perpendiculairement les électrodes d'injections A et B et d'acquisitions M et N. Si cette rotation à 45° fournit des résultats satisfaisants, la séquence expérimentale de mesure devra être complétée afin d'automatiser l'acquisition.

Afin de poursuivre l'effort sur la détermination mathématique de α_{\max} , il est indispensable de pouvoir définir les termes non diagonaux du tenseur de résistivité $\rho_{0,90}$ et $\rho_{90,0}$. Néanmoins cette acquisition au laboratoire s'heurte à une difficulté d'ordre méthodologique et métrologique.

Inverser les résistivités apparentes pour aboutir à la géométrie réelle du réseau de fissures

Jusqu'à maintenant, l'interprétation des données « brutes » de résistivité apparente, à partir de l'indice AAI nous a fourni des informations qualitatives sur la position et l'orientation des fissures en fonction de la pseudo-profondeur. L'inversion des données de résistivité apparente devrait nous fournir des résultats plus précis sur la géométrie du réseau de fissures. Cependant, les logiciels d'inversion actuellement disponibles ne permettent pas de décrire avec précision des structures fines. Cette impossibilité repose sur la méthode de discrétisation spatiale du milieu qui est associée soit aux différences finies, soit aux éléments finis. En effet, le maillage mis en place dépend de l'espacement inter-électrode et découpe l'espace de manière régulière suivant des mailles relativement importantes par rapport à la taille des fissures. Les résultats d'une telle inversion renseignent sur une densité de fissures et non sur la géométrie du réseau de fissures. La poursuite de l'élaboration du logiciel « Fissel », vers un module d'inversion basé sur la méthode des moments, permettrait en revanche de connaître la géométrie du réseau de fissures. Cette inversion nécessite d'avoir *a priori* une connaissance de la localisation de la fissure afin de pouvoir proposer un maillage initial. Ainsi, l'application de l'indice d'anisotropie, AAI aux mesures de résistivité apparente, tels qu'il a été développé dans ce travail de thèse, constitue une première étape de localisation spatiale des fissures. Ce travail préliminaire à l'inversion nous permet donc de proposer un maillage axé sur la position des fissures.

Appliquer la méthode à d'autres contextes

La méthode électrique, appliquée à la détection des fissures et présentée dans ce travail de thèse, n'est dépendante ni du milieu étudié, ni de l'échelle d'investigation. La configuration carré utilisée ici et l'interprétation des données de résistivité apparente par l'indice AAI peuvent être appliquées à d'autres matériaux (béton, asphalte, roche etc...) afin de caractériser différents états de fissuration. En contexte agronomique, elle peut être appliquée directement au champ pour un suivi dynamique saisonnier, notamment lorsque l'on veut discuter de l'effet type de sol ou de l'itinéraire de technique cultural. Le dispositif de mesure devra, le cas échéant être réadapté à la maille de fissuration rencontrée. Il faudra cependant attacher une attention particulière aux variations de température et de teneur en eau du sol. Leurs effets sur la mesure de résistivité électrique peuvent néanmoins être partiellement corrigés par certains modèles analytiques (Campbell, 1948 pour la température, par exemple).

Modéliser le fonctionnement du sol

Enfin, ce travail constitue une étape préliminaire à la description des phénomènes de transport dans les milieux poreux déformables. Une fois l'inversion du modèle achevée, la localisation précise des fissures ainsi que leurs paramètres géométriques seront connus. Cette description du milieu pourra alors être couplée à un modèle de transfert.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aaltonen, J., 2001. Seasonal resistivity variations in some different swedish soils. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 6: 33-45.
- Abdelatif, M.A. Sulaiman, W.N., 2001. Evaluation of groundwater and soil pollution in a landfill area using electrical resistivity imaging survey. *Environmental Management*, 28: 655-663.
- Acworth, R.I., 1999. Investigation of dryland salinity using the electrical image method. *Australian Journal of Soil Research*, 37: 623-636.
- al Hagrey, S.A., Michaelsen, J., 1999. Resistivity and percolation study of preferential flow in vadose zone at Bokhorst, Germany. *Geophysics*, 64: 746-753.
- al Hagrey, S.A., Schubert-Klempnauer, T., Wachsmuth, D., Michaelsen, J., Meissner, R., 1999. Preferential flow: first result of a full-scale flow model. *Geophysical journal international*, 138: 643-654.
- Anderson, S.H., Peyton, R.L., Gantzer, C.J., 1990. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography. *Geoderma*, 46: 13-29.
- Andrews, R.J., Barker, R., Loke, M.H., 1995. The application of electrical tomography in the study of the unsaturated zone in chalk at three sites in Cambridgeshire, United Kingdom. *Hydrogeology Journal*, 3: 17-31.
- Archie, G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AM. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, 146: 54-62.
- Arshad, M.A., Franzluebbers, A.J., Azooz, R.H., 1999. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil & Tillage Research*, 53: 41-47.
- Azooz, R.H., Arshad, M.A., Franzluebbers, A.J., 1996. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in Northwestern Canada. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 1197-1201.
- Bandyopadhyay, K.K., Mohanty, M., Painuli, D.K., Misra, A.K., Hati, K.M., Mandal, K.G., Ghosh, P.K., Chaudhary, R.S., Acharya, C.L., 2003. Influence of tillage practices and nutrient management on crack parameters in a Vertisol of central India. *Soil and Tillage Research*, 71: 133-142.
- Banton, O., Seguin, M.K., Cimon, M.A., 1997. Mapping field scale physical properties of soil with electrical resistivity. *Soil Science Society of America Journal*, 61: 1010-1017.
- Barriuso, E., Calvet, R., Cure, B., 1991. Incidence de la simplification du travail du sol sur le comportement des produits phytosanitaires : conséquences sur les risques de pollution, *Simplification du travail du Sol. Les colloques de l'INRA n°65*. INRA, Versailles, pp. 85-104.
- Batayneh, A., 2001. Resistivity imaging for near-surface resistive dyke using two-dimensional DC resistivity techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 48: 25-32.
- Benderitter, Y., Schott, J.J., 1999. Short time variation of the resistivity in an unsaturated soil: the relationship with rainfall. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4: 37-49.
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T., Hogland, W., 1998. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excitation surveys. *Environmental Geology*, 39: 360-371.
- Bertrand, Y., 1967. La prospection électrique appliquée aux problèmes des Ponts et Chaussées. *Bulletin Liaison des Laboratoires Routiers Paris -XV*.

- Bevan, B.W., 2000. An early geophysical survey at Williamsburg, USA. *Archaeologica Prospection*, **7**: 51-58.
- Bibby, H.M., 1986. Analysis of multiple-source bipole-quadrupole resistivity surveys using the apparent resistivity tensor. *Geophysics*, **51**: 972-983.
- Binley, A., Cassiani, G., Middleton, R., Winship, P., 2002. Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, **267**: 147-159.
- Binley, A., Shaw, B., Henry-Poulter, S., 1996. Flow pathways in porous media : electrical resistance tomography and dye staining image verification. *Measurement Science Technology*, **7**: 384-390.
- Blackwell, P.S., Ward, M.A., Lefevre, R.N., Cowan, D.J., 1985. Compaction of a swelling clay soil by agricultural traffic ; effects upon conditions for growth of winter cereals and evidence for some recovery of structure. *Journal of Soil Science*, **36**: 633-650.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., 1995. Scale Issues in hydrological modelling : a review. *Hydrological Processes*, **9**: 251-290.
- Boizard, H., Richard, G., Roger-Estrade, J., Dürr, C., Boiffin, J., 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. *Soil and Tillage Research*, **64**: 149-164.
- Bottraud, J.C., Bornand, M., Servat, E., 1984a. Mesures de resistivité appliquées à la cartographie en pédologie. *Science du sol*, **4**: 279-294.
- Bottraud, J.C., Bornand, M., Servat, E., 1984b. Mesures de resistivité et étude du comportement agronomique d'un sol. *Science du sol*, **4**: 295-308.
- Bouma, J., 1990. Using morphometric expressions for macropores to improve soil physical analyses of field soils. *Geoderma*, **46**: 3-11.
- Bouma, J., Jongerius, A., Boersma, O., Jager, A., Schoonderbeek, D., 1977. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. *Soil Science Society of America Journal*, **41**: 945-950.
- Bourennane, H., King, D., Le Parco, R., Isambert, M., Tabbagh, A., 1998. Three-dimensional analysis of soils and surface materials by electrical resistivity survey. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **3**: 5-23.
- Bruand, A., Prost, R., 1987. Effect of water content on the fabric of a soil material : an experimental approach. *Journal of Soil Science*, **38**: 461-472.
- Brunner, I., Friedel, S., Jacobs, F., Danckwardt, E., 1999. Investigation of a tertiary maar structure using three-dimensional resistivity imaging. *Geophysical journal international*, **139**: 771-780.
- Bullock, P., Murphy, C.P., 1980. Toward the quantification of soil structure. *Journal of Microscopy*, **120**: 317-328.
- Butler, J., Roper, T.J., Clark, A.J., 1994. Investigation of badger setts using soil resistivity measurements. *The Zoological Society of London*, **232**: 409-418.
- Campbell, R.B., Bower, C.A., Richards, L.A., 1948. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. *Soil Science Society of America Proceedings* **13**: 66-69.
- Chambers, J., Oglivy, R., Meldrum, P., Nissen, J., 1999. 3D resistivity imaging of buried oil- and tar-contaminated waste deposits. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **4**: 3-15.

- Chambers, J.E., Oglivy, R.D., Kurus, O., Cripps, J.C., Meldrum, P.I., 2002. 3D electrical imaging of known targets at a controlled environmental test site. *Environmental Geology*, **41**: 690-704.
- Chertkov, V.Y., Ravina, I., 1998. Modeling the crack network of swelling clay soils. *Soil Science Society of America Journal*, **62**: 1162-1171.
- Chertkov, V.Y., Ravina, I., 2000. Shrinking-swelling phenomenon of clay soils attributed to capillary-crack network. *Theoretical and Applied Fracture mechanics*, **34**: 61-71.
- Choudhury, K., Saha, D.K., Chakraborty, P., 2001. Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain. *Journal of Applied Geophysics*, **46**: 189-200.
- Christensen, B.N., Sorensen, K., 1998. Surface and borehole electric and electromagnetic methods for hydrological investigation. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **3**: 75-90.
- Colman, E.A., Hendrix, T.M., 1949. The fibreglas electrical soil-moisture instrument. *Soil Science*, **67**: 425-438.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M., 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*, **95**: 455-471.
- Cousin, I., Levitz, P., Bruand, A., 1996. Three-dimensional analysis of a loamy-clay soil using pore and solid chord distribution. *European Journal of Soil Science*, **47**: 439-452.
- Cousin, I., Porion, P., Renault, P., Levitz, P., 1999. Gas diffusion in a silty-clay soil: experimental study on an undisturbed soil core and simulation in its three-dimensional reconstruction. *European Journal of Soil Science*, **50**: 249-259.
- Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, A., 1989. Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Science du sol*, **27**: 65-68.
- Dabas, M., Tabbagh, A., Tabbagh, J., 1994. 3D inversion in subsurface electrical surveying- I. Theory. *Geophysical journal international*, **119**: 975-990.
- Dahlin, T., 2000. Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, **48**: 181-187.
- Dahlin, T., Loke, M.H., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics*, **38**: 237-249.
- Dannowski, G., Yaramanci, U., 1999. Estimation of water content and porosity using radar and geoelectrical measurements. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **4**: 71-85.
- Darboux-Afouda, R., Louis, P., 1989. Contribution des mesures de l'anisotropie électrique à la recherche des aquifères de fractures en milieu cristallin au Bénin. *Geophysical Prospecting*, **37**: 91-105.
- Dathe, A., Eins, S., Niemyer, J., Gerold, G., 2001. The surface fractal dimension of the soil-pore interface as measured by image analysis. *Geoderma*, **103**: 203-229.
- Delapierre, A., 1998. Représentation en 3D d'une partie des vestiges d'une villa gallo-romaine à l'aide des méthodes électriques (Site gallo-romain d'Orbe-Boscéaz, Vaud, Suisse). *Mémoire de Master Institut de géophysique de Lausanne*, pp. 200
- Delerue, J.F., 2001. Segmentation 3D, application à l'extraction de réseaux de pores et à la caractérisation hydrodynamique des sols. *Thèse, Paris XI*, pp. 194

- Demant, D., Renardy, F., Vanneste, K., Jongmans, D., Camelbeeck, T., Meghraoui, M., 2001. Case History The use of geophysical prospecting for imaging active faults in the Roer Graben, Belgium. *Geophysics*, **66**: 78-89.
- Depountis, N., Harris, C., Davies, M.C.R., 2001. An assessment of miniaturised electrical imaging equipment to monitor pollution plume evolution in scaled centrifuge modelling. *Engineering Geology*, **60**: 83-94.
- Dey, A., Morrison, H.F., 1979. Resistivity modelling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, **44**: 753-780.
- Duchaufour, P., 1984. *Abrégé de pédologie*. Masson, Paris, pp. 220
- During, R.A., Hosz, T., Gath, S., 2002. Depth distribution and bioavailability of pollutants in long-term differently tilled soils. *Soil and Tillage Research*, **66**: 183-195.
- Edwards, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, **42**: 1020-1036.
- FAO, 1975. Soil map of the world (1 : 5 000 000). *Paris*.
- Favre, F., Boivin, P., Wopereis, M.C.S., 1997. Water movement and soil swelling in a dry, cracked Vertisol. *Geoderma*, **78**: 113-123.
- Fiès, J.C., 1984. Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelettes : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie*, **4**: 891-899.
- Fiès, J.C., Bruand, A., 1990. Textural porosity analysis of a silty clay soil using pore volume balance estimation, mercury porosimetry and quantified backscattered electron scanning image (BESI). *Geoderma*, **47**: 209-219.
- Fiès, J.C., Stengel, P., 1981. Densité texturale de sols naturels. I Méthode de mesure. *Agronomie*, **1**: 651-658.
- Fiès, J.C., Stengel, P., 1981. Densité texturale de sols naturels II. Eléments d'interprétation. *Agronomie*, **1**: 659-666.
- FitzParick, E.A., Mackie, L.A., Mullins, C.E., 1985. The use of plaster of Paris in the study of soil structure. *Soil Use and Management*, **1**: 70-72.
- Forrer, I., Papritz, A., Kasteel, R., Fluhler, H., Luca, D., 2000. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing. *European Journal of Soil Science*, **51**: 313-322.
- Freeland, R.S., Yoder, R.E., Ammons, J.T., 1998. Mapping shallow underground features that influence site-specific agricultural production. *Journal of Applied Geophysics*, **40**: 19-27.
- Frohlich, R.K., Parke, C.D., 1989. The electrical resistivity of the Vadose Zone - Field Survey. *Ground Water*, **27**: 524-530.
- Frohlich, R.K., Urish, D.W., Fuller, J. O'Reilly, M., 1994. Use of geoelectrical methods in groundwater pollution surveys in a coastal environment. *Journal of Applied Geophysics*, **32**: 139-154.
- Fukue, M., Minatoa, T., Horibe, H., Taya, N., 1999. The micro-structure of clay given by resistivity measurements. *Engineering Geology*, **54**: 43-53.
- Garambois, S., Senechal, P., Perroud, H., 2002. On the use of combined geophysical methods to assess water content and water conductivity of near-surface formations. *Journal of Hydrology*, **259**: 32-48.
- Gautronneau, Y., Manichon, H., 1987. *Guide méthodologique du profil cultural*, Paris, pp. 130

- Giao, P.H., Chung, S.G., Kim, D.Y., Tanaka, H., 2003. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *Journal of Applied Geophysics*, **52**: 157-175.
- Gimenez, D., Allmaras, R.R., Nater, E.A., Huggins, D.R., 1997. Fractal dimensions for volume and surface of interaggregate pore-scale effects. *Geoderma*, **77**: 19-38.
- Göbel, B., Michaelsen, J., Danckwardt, E., Hagrey, S.A., Meyer, C., Petzold, G., Stolte, C., Thierbach, R., 1993. Geophysikalische Methoden zur Erfassung von Wasserverteilungen und Wassertransportvorgängen in Böden. *Mitteilungen. Deutsche Bodenkunde Gesellschaft*, **72**: 111-114.
- Gomez, J.A., Giraldez, J.V., Pastor, M., Fereres, E., 1999. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil & Tillage Research*, **52**: 167-175.
- Goyal, V.C., Gupta, P.K., Seth, P.K., Singh, V.N., 1996. Estimation of temporal changes in soil moisture using resistivity method. *Hydrological Processes*, **10**: 1147-1154.
- Greco, R., 2002. Preferential flow in macroporous swelling soil with internal catchment: model development and application. *Journal of Hydrology*, **269**: 150-168
- Griffiths, D.H., Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, **29**: 211-226.
- Guéguen, Y., Gavrilenko, P., Le Ravalec, M., 1996. Scales of rock permeability. *Surveys in Geophysics*, **17**: 245-263.
- Guérif, J., 1994. Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structural des horizons de surface : conséquences sur leurs propriétés physiques et leurs comportement mécaniques, *Simplification du travail du Sol. Les colloques de l'INRA n°65*. INRA, Versailles, pp. 14-33.
- Guérin, R., Pannissod, C., Thiry, M., Benderitter, Y., Tabbagh, A., Huet-Tailanter, S., 2002. La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59) -III- Approche méthodologique d'étude géophysique non-destructive des sites pollués par des eaux fortement minéralisées. *Bulletin Société Géologique France*, **173**: 471-477.
- Gupta, S.C., Hanks, R.J., 1972. Influence of water content on electrical conductivity of the soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, **36**: 855-857.
- Haberjarm, G.M., Watkins, G.E., 1967. The use of a square configuration in resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting*, **15**: 445-467.
- Haines, W.B., 1923. The volume-changes associated with variations of water content in soil. *Journal Agricultural Science*, **13**: 296-310.
- Hallaire, V., 1984. Evolution des réseaux de fissure lors du retrait d'un sol argileux. *Compte rendu du colloque Fonctionnement hydrique et comportement des sols AFES* : 323-327.
- Hallaire, V., 1988. La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. I Description in situ. *Agronomie*, **8**: 139-145.
- Hallaire, V., 1988. La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. II Modélisation morphologique. *Agronomie*, **8**: 273-280.
- Hallaire, V., Curmi, P., Widiatmaka, 1997. Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé. Cas des horizons d'un système pédologique armoricain. *Etude et Gestion des Sols*, **4**: 115-125.

- Hallof, P.G., 1957. On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. *Ph.D Thesis, Massachusetts*, pp. 256
- Hangen, E., Buczko, U., Bens, O., Brunotte, J., Huttl, R.F., 2002. Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. *Soil and Tillage Research*, **63**: 181-186.
- Harrington, R.F., 1968. *Field computation by moment methods*. Mc Millan Co, New York, 240 pp.
- Heijs, A.W.J., de Lange, J., Schoute, J.F.T., Bouma, J., 1995. Computed tomography as a tool for non-destructive analysis of flow patterns in macroporous clay soils. *Geoderma*, **64**: 183-196.
- Hénin, S., Gras, R., Monnier, G., 1969. Le profil cultural : L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. *Masson, Paris*, 332 pp.
- Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, A., 1986. New prospects in shallow depth electrical surveying for archeological and pedological applications. *Geophysics*, **51**: 585-594.
- Hillel, D., 1974. *L'eau et le sol : principes et processus physiques*. Vander Edition, Paris.
- Hohmann G.W., 1975. Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling, *Geophysics*, **40**: 309-324.
- Hoffmann, H., 2000. The dynamics of crack patterns in soil induced by desiccation. *Diploma Thesis, University of Environmental Physics, Heidelberg*, 1-63 pp.
- Horgan, G.W., Young, I.M., 2000. An empirical stochastic model for the geometry of two-dimensional crack growth in soil (with discussion). *Geoderma*, **96**: 263-276.
- Jackson, P.D., Northmore, K.J., Meldrum, P.I., Gunn, D.A., Hallam, J.R., Wambura, J., Wangusi, B., Ogutu, G., 2002. Non-invasive moisture monitoring within an earth embankment - a precursor to failure. *Non destructive Testing and Evaluation International*, **35**: 107-115.
- Jones, J.W., 1995. Scale-dependent resistivity measurements of oracle granite. *Geophysical Research Letters*, **22**: 1453-1456.
- Kalinski, R.J., Kelly, W.E., 1993. Estimating Water Content of soils from electrical resistivity. *Geotechnical Testing Journal*, **16**: 323-329.
- Kampke, A., 1999. Focused imaging of electrical resistivity data in archaeological prospecting. *Journal of Applied Geophysics*, **41**: 215-117.
- Karlik, G., Kaya, M.A., 2001. Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste-disposal site: a case study from Isparta, Turkey. *Environmental Geology*, **40**: 725-731.
- Kearey, P., Brooks, M. Hill, I., 2002. *An introduction to geophysical exploration*. Blackwell Science. 262 pp.
- Kemna, A., Vanderborght, J., Kulesa, B., Vereecken, H., 2002. Imaging and characterisation of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models. *Journal of Hydrology*, **167**: 125-146.
- Lamotte, M., Bruand, A., Dabas, M., Donfack, P., Gabalda, G., Hesse, A., Humbel, F.-X., Robain, H., 1994. Distribution d'un horizon à forte cohésion au sein d'une couverture de sol aride du Nord-Cameroun : apport d'une prospection électrique. *Comptes Rendus à l'Académie des Sciences. Earth and Planetary Sciences*, **318**: 961-968.

- Lane, J.W., Haeni, F.P., Watson, W.M., 1995. Use of a square-array direct-current resistivity, method to detect fractures in crystalline Bedrock in New Hampshire. *Ground Water*, **33**: 476-485.
- Lataste, J.F., Breysse, D., Sirieix, C., Frappa, M., Bournazel, J.P., 2002. Fissuration des ouvrages en béton armé, Auscultation par mesure de résistivité électrique. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **239**: 79-91.
- Lataste, J.F., Sirieix, C., Breysse, D., Frappa, M., 2003. Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. *Non destructive Testing and Evaluation International*, **36**: 383-394.
- Le Bayon, R.C., Moreau, S., Gascuel-Odoux, C., Binet, F., 2002. Annual variations in earthworm surface-casting activity and soil transport by water runoff under a temperate maize agroecosystem. *Geoderma*, **106**: 121-135.
- Lile, O.B., Backe, H.R., Elvebakk, H., Buan, J.E., 1994. Resistivity measurements on the sea bottom to map fractures zones in the bedrock underneath sediments. *Geophysical Prospecting*, **42**: 813-824.
- Lima, L.A., Grismer, M.E., 1992. Soil Crack Morphology and Soil Salinity. *Soil Science*, **153**: 149-153.
- Loke, M.H., 2001. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Course Notes for USGS Workshop "2-D and 3-D Inversion and Modeling of Surface and Borehole Resistivity Data"*, Torr, CT, 59 pp.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**: 131-152.
- 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.
- Mackie-Dawson, L.A., Mullins, C.E., Fitzpatrick, E.A., Court, M.N., 1989. Seasonal changes in the structure of clay soils in relation to soil management and crop type. I Effects of crop rotation at Cruden Bay, NE Scotland. *Journal of Soil Science*, **40**: 269-281.
- Malone, R.W., Logsdon, S., Shipitalo, M.J., Wheatherington-Rice, J., Ahuja, L.R. Ma, L., 2003. Tillage effect on macroporosity and herbicide transport in percolate. *Geoderma*, **116**: 191-215.
- Manichon, H., 1985. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés, Proceedings of the workshop on soil compaction : consequence and structural regeneration processes, Avignon, France, 17-18/09/1985, pp. 39-52.
- Mauriello, P., Monna, D., Patella, D., 1998. 3D geoelectric tomography and archaeological applications. *Geophysical Prospecting*, **46**: 543-570.
- McCarter, W.J., 1984. The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Geotechnique*, **34**: 263-267.
- McGarry, D., Bridge, B.J., Radford, B.J., 2000. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil & Tillage Research*, **53**: 105-115.
- Meheni, Y., Guérin, R., Benderitter, Y. Tabbagh, A., 1996. Subsurface DC resistivity mapping : approximate 1-D interpretation. *Journal of Applied Geophysics*, **34**: 255-270.
- Meyer de Stadelhofen, C., 1991. *Application de la géophysique aux recherches d'eau*. Lavoisier, Paris, 183 pp.

- Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoullaud, B., King, D., Tabbagh, A., 2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, **39**: 1138.
- Michot, D., Dorigny, A., Benderitter, Y., 2000. Mise en évidence par résistivité électrique des écoulements préférentiels et de l'assèchement par le maïs d'un calcisol de Beauce irrigué. *Comptes Rendus à l'Académie des Sciences*, **332**(Série, II a): 29-36.
- Militzer, H., Rösler, R., Lösch, W., 1979. Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods. *Geophysical Prospecting*, **27**: 640-652.
- Miller, J.J., Kokko, E.G., Kozub, G.C., 1998. Comparison of porosity in a Chernozemic clay loam soil under long-term conventional tillage and no-till. *Canadian Journal of Soil Science*, **78**: 619-629.
- Monnier, G., Stengel, P., Fiès, J.-C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux : application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Annales Agronomiques*, **24**: 533-545.
- Moreau, E., 1997. *Etude de la morphologie et de la topologie 2D et 3D d'un sol argileux par analyse d'images: Application à la décontamination des sols par champs électriques*. Thèse, Poitiers, 285 pp.
- Moreau, E., Sardini, P., Touchard, G., Velde, B., 1996. 2D and 3D morphological and topological analysis of a clay soil. *Microsc. Microanal. Microstruct.*, **7**: 499-504.
- Nowroozi, A.A., Horrocks, S.B., Henderson, P., 1999. Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia : a reconnaissance electrical resistivity survey. *Journal of Applied Geophysics*, **42**: 1-22.
- Oglivvy, R., Meldrum, P., Chambers, J., 1999. Imaging of industrial waste deposits and buried quarry geometry by 3-D resistivity tomography. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **3**: 103-113.
- Olayinka, A.I., Yaramanci, U., 2000. Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data. *Geophysical Prospecting*, **48**: 293-316.
- Oldenburg, D.W., Li, Y., 1994. Inversion of induced polarization data. *Geophysics*, **59**: 1327-1341.
- Olsen, P.A., Binley, A., Henry-Poulter, S., Tych, W., 1999. Characterizing solute transport in undisturbed soil cores using electrical and X-ray tomographic methods. *Hydrological Processes*, **13**: 211-221.
- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N., Pellegrini, S., 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil and Tillage Research*, **73**: 119-129.
- Panissod, C., Dabas, M., Jolivet, A., Tabbagh, A., 1997. A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: the 'Vol-de-Canards' array. *Geophysical Prospecting*, **45**: 983-1002.
- Panissod, C., Lajarthe, M., Tabbagh, A., 1997. Potential focusing: a new multielectrode array concept, simulation study and field tests in archaeological prospecting. *Journal of Applied Geophysics*, **38**: 1-23.
- Pardini, G., Vigna Guidi, G., Pini, R., Regüés, D., Gallart, F., 1996. Structure and porosity of smectitic mudrocks as affected by experimental wetting-drying cycles and freezing-thawing cycles. *Catena*, **27**: 149-165.

- Park, S., 1998. Fluid migration in the vadose zone from 3-D inversion of resistivity monitoring data. *Geophysics*, **63**: 41-51.
- Perrier, E., 1994. *Structure géométrique et fonctionnement hydrique des sols simulations exploratoire*. Thèse Université Paris VI.
- Perrier, E., Bird, N., Rieu, M., 1999. Generalizing the fractal model of soil structure : the pore-solid fractal approach. *Geoderma*, **88**: 137-164.
- Pierret, A., Capowiez, Y., Belzunces, L., Moran, C.J., 2002. 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. *Geoderma*, **106**: 247-2371.
- Pozdnyakova, L., Pozdnyakov, A., Zhang, R., 2001. Application of geophysical methods to evaluate hydrology and soil properties in urban areas. *Urban Water*, **3**: 205-216.
- Preston, S., Griffiths, B.S., Young, I.M., 1997. An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry. *European Journal of Soil Science*, **48**: 31-37.
- Raiche, A., 1974. An integral equation approach to three dimensional modelling, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **36**: 363-376.
- Rhoades, J.D., Kaddah, M.T., Halvorson, A.D., Prather, R.J., 1977. Establishing soil electrical conductivity salinity calibration using four electrodes cells containing undisturbed soil cores. *Soil Science*, **123**: 137-141.
- Rhoades, J.D., Raats, P.A.C., Prather, R.J., 1976. Effect of liquid-phase Electrical Conductivity, Water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, **40**: 651-655.
- Rhoades, J.D., van Schilfgaarde, J., 1976. An electrical conductivity probe for determining soil salinity. *Soil Science Society of America Journal*, **40**: 647-651.
- Richard, G., Cousin, I., Roger-Estrade, J., Coquet, Y., Garnier, P., Baumgartl, T., Horn, R., 2003. Modeling water transfer in agricultural soils at the field scale, 16th International Conference of the International Soil Tillage Research Organization, Brisbane, Australia, 13-18/07/2003, pp. 985-990.
- Richard, G., Sillon, J.F., Marloie, O., 2001. Comparaison of inverse and direct evaporation methods for estimating soil hydraulic properties under different tillage practices. *Soil Science Society of America Journal*, **65**: 215-224.
- Rieu, M., Sposito, G., 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I Theory. *Soil Science Society of America Journal*, **55**: 1231-1238.
- Ringrose-Voase, A.J., Sanidad, W.B., 1996. A method for measuring the development of surface cracks in soils : application to crack development after lowland rice. *Geoderma*, **71**: 245-261.
- Ritz, M., Robain, H., Pervago, E., Albouy, Y., Camerlynck, C., Descloitres, M., Mariko, A., 1999. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical Prospecting*, **47**: 85-101.
- Robain, H., Descloitres, M., Ritz, M., Atangana, Q.Y., 1996. A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Journal of Applied Geophysics*, **34**: 237-253.
- Robain, H., Lajarthe, M., Florsch, N., 2001. A rapid electrical sounding method The "three-point" method: a Bayesian approach. *Journal of Applied Geophysics*, **47**: 83-96.

- Roger-Estrade J., Richard G., Caneill J., Boizard H., Coquet Y., Défossez P., Manichon H., 2004 Morphological characterisation of soil structure in tilled fields. From a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil & Tillage Research* (à paraître).
- 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*, **67**: 1319-1326.
- Sandberg, S.K., Slater, L.D., Versteeg, R., 2002. An intergrated geophysical investigation of the hydrogeology of an anisotropic unconfined aquifer. *Journal of Hydrology*, **267**: 227-243.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A., Herzog, I., 1990. *Archaeological prospecting and remote sensing*. University press, Cambridge, 674 pp.
- Scott, G.J.T., Webster, R., Nortcliff, S., 1986. An analysis of crack pattern in clay soil : its density and orientation. *Journal of Soil Science*, **37**: 653-668.
- Scott, G.J.T., Webster, R., Nortcliff, S., 1988. The topology of pore structure in cracking clay soil I. The estimation of numerical density. *Journal of Soil Science*, **39**: 303-314.
- Seaton, W.J., Burbey, T.J., 2002. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane. *Journal of Applied Geophysics*, **51**: 21-41.
- Senos Matias, M.J., 2002. Square array anisotropy measurements and resistivity sounding interpretation. *Journal of Applied Geophysics*, **49**: 185-194.
- Shaaban, F.F., Shaaban, F.A., 2001. Use of two-dimensional electric resistivity and ground penetrating radar for archaeological prospecting at the ancient capital of Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, **33**: 661-671.
- Shea, P.F., Luthin, J.N., 1961. An investigation of the use of the four-electrode probe for measuring soil salinity in situ. *Soil Science*, **92**: 331-339.
- Shipitalo, M.J., Dick, W.A., Edwards, W.M., 2000. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil and Tillage Research*, **53**: 167-183.
- Slater, L., Binley, A., Versteeg, R., Cassiani, G., Birken, R., Sandberg, S., 2002. A 3D ERT study of solute transport in a large experimental tank. *Journal of Applied Geophysics*, **49**: 211-229.
- Slater, L., Binley, A.M., Daily, W., Johnson, R., 2000. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection. *Journal of Applied Geophysics*, **44**: 85-102.
- Slater, L., Reeve, A., 2002. Investigation peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics. *Geophysics*, **67**: 365-378.
- Slater, L.D., Binley, A., Brown, D., 1997. Electrical Imaging of Fractures Using Ground-Water Salinity Change. *Ground Water*, **35**: 436-442.
- Stadler, D., Stähli, M., Aeby, P., Flühler, H., 2000. Dye tracing and image analysis for quantifying water infiltration into frozen soils. *Soil Science Society Journal of America*, **64**: 505-516.
- Stengel, P., 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Annales Agronomiques*, **30**: 27-51.
- Stengel, P., 1986. Simplification du travail du sol en rotation céréalière : conséquences physiques. *Les rotations céréalières intensives. Dix années d'études concertées INRA-ONIC-ITCF, 1973-1983 INRA, Paris 1986*, 15-44 pp.

- Stengel, P., 1988. Cracks formation during swelling : effect on soil structure regeneration after compaction. In: H. ISTRO (Editor), 11th International Conference of the International Soil Tillage Research Organization, Edinburgh, Great Britain, 11-15/07/1988, pp. 147-152.
- Stengel, P., 1988. Etude expérimentale de la fissuration au cours du dessèchement et de l'humectation, *Les phénomènes de transport dans les milieux poreux déformables. Séminaire du département de Science du Sol*, Isle sur la Sorgue, 161-183 pp.
- Stengel, P., 1990. Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. *La structure du sol et son évolution, Edition INRA*, 15-36 pp.
- Stengel, P., Bourlet, M., 1987. Fissuration d'un sol argileux gonflant après compactage : effet de l'humectation, Soil compaction and regeneration, Consequences and Structural Regeneration Process, Avignon, France 17/18 September 1985, 95-110 pp.
- Tabbagh, A., 1985. The response of a three-dimensional magnetic and conductive body in shallow depth electromagnetic prospecting. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **81**: 215-230.
- Tabbagh, A., Dabas, M., Hesse, A., Panissod, C., 2000. Soil resistivity : a non-invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma*, **97**: 393-404.
- Tebbrügge, F., During, R.-A., 1999. Reducing tillage intensity : a review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, **53**: 15-28.
- Tri, B.H., Monnier, G., 1973. Etude quantitative de la granulation des sols sous prairies de graminées. *Annales Agronomiques*, **24**: 651-677.
- Trojan, M.D., Linden, D.R., 1998. Macroporosity and hydraulic properties of earthworm-affected soils as influenced by tillage and residue management. *Soil Science Society of America Journal*, **62**: 1687-1692.
- Tukey, J.W., 1977. *Exploratory data analysis*. Addison Wesley, Reading, Massachussets.
- Tuong, T.P., Cabangon, R.J., Wopereis, M.C.S., 1996. Quantifying flow processes during land soaking of cracked rice soils. *Soil Science Society Journal of America*, **60**: 872-879.
- Van Dam, J.C., Meulenkaamp, J.J., 1967. Some results of the geo-electrical resistivity method in groundwater investigations in the Netherlands. *Geophysical Prospecting*, **15**: 92-115.
- Van Damme, H., 1995. Scale invariance and hydric behaviour of soils and clays. *Comptes Rendus à l'Académie des Sciences*, **320**(Série, II a): 655-681.
- VandenBygaert, A.J., Protz, R., 1999. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. *Geoderma*, **89**: 333-346.
- VandenBygaert, A.J., Protz, R., Tomlin, A.D., 1999. Changes in pore structure in a no-till chronosequence silt loam soils, southern Ontario. *Canadian Journal of soil science*, **79**: 149-160.
- Vaz, C.M.P., Crestana, S., Mascarenhas, P.E., Cruvinel, P.E., Reichardt, K., Stolf, R., 1989. Using a computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. *Soil Technology*, **2**: 313-321.
- Velde, B., 2001. Surface cracking and aggregate formation observed in a Rendzina soil, La Touche (Vienne) France. *Geoderma*, **99**: 261-276.
- Velde, B., Moreau, E., Terrible, F., 1996. Pore networks in an italian Vertisol : quantitative characterisation by two dimensional image analysis. *Geoderma*, **72**: 271-285.

- Vogel, H.J., 1997. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections. *European Journal of Soil Science*, **48**: 365-377.
- Vogel, H.J., Cousin, I., Roth, K., 2002. Quantification of pore structure and gas diffusion as a function of scale. *European Journal of Soil Science*, **53**: 465-473.
- Vogel, H.J., Kretzschmar, A., 1996. Topological characterization of pore space in soil - sample preparation and digital image-processing. *Geoderma*, **73**: 23-38.
- Vogel, H.J., Weller, U., Babel, U., 1993. Estimating orientation and width of channels and cracks at soil polished blocks - a stereological approach. *Geoderma*, **56**: 301-316.
- Voltz, M., Cabidoche, Y.M., 1995. Non-uniform volume and water content changes in swelling clay soil : I Theoretical analysis. *European Journal of Soil Science*, **46**: 333-343.
- Voorhees, W.B., 1983. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Science Society of America Journal*, **47**: 129-133.
- Warner, G.S., Nieber, J.L., Moore, I.D., Geise, R.A., 1989. Characterizing macropores in soil by computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, **53**: 653-660.
- White, P.A., 1988. Measurement of Ground-Water Parameters using Salt-Water Injection and Surface Resistivity. *Ground Water*, **26**: 179-186.
- White, P.A., 1994. Electrode arrays for measuring groundwater flow direction and velocity. *Geophysics*, **59**: 192-201.
- Xu, B., Noel, M., 1993. On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, **41**: 791-801.
- Yaramanci, U., 2000. Geoelectric exploration and monitoring in rock salt for the safety assessment of underground waste disposal sites. *Journal of Applied Geophysics*, **44**: 181-196.
- Yoon, G.L., Park, J.B., 2001. Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils. *Journal of Hazardous Materials*, **B84**: 147-161.
- Young, I.M., Crawford, J.W., 1991. The fractal structure of soil aggregates : its measurements and interpretation. *Journal of Soil Science*, **42**: 187-192.
- Zanolin, A., 2003. *Irrigation de précision en Petite-Beauce: mesures au champ et modélisation stochastique spatialisée du fonctionnement hydrique et agronomique d'une parcelle de maïs*, Paris VI, Paris, 187 pp.
- Zhou, Q.Y., Shimada, J., Sato, A., 2001. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, **37**: 273-285.
- 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.

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Liste des figures

Figure 1 Bilan de la création disparition de la porosité (d'après Richard *et al.*, 2003)

Figure 2 : Evolution de la porosité totale dans les couches non travaillées (d'après Stengel, 1986)

Figure I-1 : Schéma d'organisation de l'espace poral du sol, organisation structurale et texturale. (d'après Stengel, 1979).

Figure I-2 : Evolution schématique de la fissuration d'un sol (d'après Hallaire, 1988b)

Figure I-3 : Méthode du profil cultural, a) exemple de relevé d'un profil cultural (d'après Gautronneau et Manichon, (1987), b) photographies de mottes présentant un état interne Δ , Γ et Φ (Roger-Estrade *et al.*, 2004 à paraître).

Figure I-4 : Technique de mesure des caractéristiques morphologiques des fissures au champ et estimation de la géométrie de la fissure. (d'après Ringrose-Voase et Sanidad, 1996)

Figure I-5 : Principe des coupes sériées (d'après Cousin *et al.*, 1996)

Figure I-6 : Image tridimensionnelle du sol par tomographie à rayon X. (d'après Delerue, 2001)

Figure I-7 : Courbe de retrait gonflement pour des échantillons de tailles différentes a) micrométriques, b) millimétriques, c) centimétriques, d) décimétriques. (d'après Bruand et Prost, 1987)

Figure I-8 : Quatre stades de formation des fissures 1) départ aléatoire des fissures, 2) propagation jusqu'aux bords de la boîte, 3) et 4) re-découpage des surfaces spécifiques. (d'après Horgan et Young, 2000).

Figure I-9 : Modèle morphologique du sol et des phénomènes de fissuration : arrangement des éléments structuraux, a) peds, b) mottes, et c) couches. (d'après Hallaire, 1988b)

Figure II-1: Distribution of the current flow in a homogeneous soil.

Figure II-2: Establishment of a 2D electrical resistivity pseudo-section.

Figure II-3: MUCEP "Multi Continuous Electrical Profiling".

Figure II-4: Influence of the array device in electrical resistivity prospecting, simulation of a apparent resistivity pseudo-section over a vertical resistant structure of 4 mm width and 40 mm length located at $x = 0$ in an homogeneous medium of 40 Ω .m, a) Dipole-Dipole array, b) Wenner array.

Figure II-5: Relationship between the volumetric water content and the electrical resistivity for different soil types. (Values issues from Fukue, *et al.*, 1999, McCarter, *et al.*, 1984, Michot *et al.*, 2003).

Figure II-6 : Relationship between the volumetric water content and resistivity for different values of pore water conductivity. (Values issues from Kalinski *et al.*, 1993).

Figure III-1 : Electrical distribution of current lines (dashed) and equipotential surface between two current electrodes A and B, measure of electrical potential across the electrodes M and N in a Wenner configuration.

Figure III-2 : Electrode device.

Figure III-3 : The measurement sequence for building up a pseudo-section.

Figure III-4 : Measurement map of apparent electrical resistivity pseudo-section in a Wenner configuration for 15 electrodes. The measurement sequence for building up a pseudo-section.

Figure III-5 : Arrangement of model blocks and resistivity datum points for a 15 electrodes in a Wenner array.

Figure III-6 : Mathematical inversion of Res2Dinv model.

Figure III-7 : Apparent resistivity pseudo-section for the 5 stages, crack localisation between the electrodes 8 and 9.

Figure III-8 : Resistivity anomalies during the different stages along the profile.

Figure III-9 : Interpreted resistivity pseudo-section for the stages A, B, C, D and E.

Figure III-10 : Interpreted resistivity variation between the electrodes 8 and 9 during the following cracking stages and for different depth investigation.

Figure III-11 : Lateral variation of interpreted resistivity as a function of crack localisation for the first depth layer 0-0.8-cm.

Figure III-12 : Cartes de résistivité apparente modélisées des états B, C, D et E présentant une augmentation de la fissure n profondeur de 0,01 à 0,04 m (sa largeur est fixe et égale à 0,004 m. L'échelle de couleur est donnée en ohm.m. Les croix rouges correspondent aux points de mesure aux pseudo-profondeurs successives PP1, PP2, PP3 et PP4).

Figure III-13 : Evolution de la résistivité apparente à l'emplacement de la fissure (i.e. entre les électrodes 8 et 9) pour les 4 états B, C, D, et E à chaque pseudo-profondeur PPI à PP4.

Figure III-14 : Résultats issus de simulations électriques de l'effet d'une fissure résistante (ρ_2), dans un milieu encaissant homogène de résistivité (ρ_1) à la première pseudo-profondeur et pour une acquisition de type Wenner. (d'après Militzer *et al.*, 1979).

Figure III-15 : Carte de distribution des anomalies de résistivité apparente pour les états B, C, D et E des données issues de l'expérimentation et de la simulation numérique. L'échelle de couleurs est exprimée en pourcentage.

Figure III-16 : Répartition des résistivités apparentes modélisées pour différentes géométries de fissures. a) fissure de 0,002 m de large et 0,03 m de profondeur entre les électrodes 8 et 9, b) fissure de 0,004 m de large et 0,03 m de profondeur entre les électrodes 8 et 9, c) 2 fissures entre les électrodes 7 – 8 et 9 – 10 de 0,004 m de large et 0,03 m de profondeur.

Figure III-17 : Evolution de la résistivité apparente à la position de la fissure, de 0,03 m de profondeur et d'épaisseur variable 0,002 et 0,004 m.

Figure III-18 : Répartition des résistivités apparentes modélisées pour une fissure de 0,004 m de large et 0,030 m de profondeur entre les électrodes 9 et 10, orientée à 45° vers la gauche, a) échelle identique aux autres cartes de résistivité, b) échelle réduite.

Figure IV-1 : Dispositif 3D en ligne sur une grille carrée (8 x 8) de 64 électrodes, les flèches représentent la direction des panneaux électriques : a) suivant une direction, b) suivant deux directions, c) suivant quatre directions.

Figure IV-2 : Dispositif utilisé par Panissod *et al.* (1997), présentant l'évolution de la configuration circulaire de 16 à 2 électrodes de potentiel P, (C, étant l'électrode centrale d'injection).

Figure IV-3 : Dispositif carré ABMN.

Figure IV-4 : Cas d'une fissure orientée perpendiculairement aux électrodes A et B. a) carte de résistivité apparente calculé à partir de « Fissel », b) distribution des lignes de courant.

Figure IV-5 : Cas d'une fissure orientée parallèlement aux électrodes A et B. a) carte de résistivité apparente calculé à partir de « Fissel », b) distribution des lignes de courant.

Figure IV-6 : Principe de l'acquisition 3D avec un dispositif carré, sur 6 pseudo-profondeurs.

Figure IV-7 : Effets de bord calculés pour 6 pseudo-profondeurs dans un milieu homogène (taille du bloc : $x = 0,26\text{m}$, $y = 0,36\text{m}$ et $z = 0,28\text{m}$) pour une configuration d'électrodes en carré orienté. a) à 0° et b) à 90° . Les points rouges représentent la position des électrodes.

Figure IV-8 : Effets de bord calculés pour 6 pseudo-profondeurs dans un milieu fissuré (taille du bloc : $x = 0,26\text{m}$, $y = 0,36\text{m}$ et $z = 0,28\text{m}$) et pour une configuration d'électrodes en carré orienté. a) à 0° et b) à 90° . Les points rouges représentent la position des électrodes.

Figure IV-9 : Schéma synthétique du volume prospecté par un dispositif carré ABMN, centré par rapport à X et Y dans un milieu homogène.

Figure IV-10 : Test de sensibilité de la taille de l'échantillon sur les effets de bord (E_{fb}). a) schéma du dispositif, x et y sont variables, z est fixe considéré comme infini. b) variation de E_{fb} en fonction de la distance D/a.

Figure IV-11 : Test de sensibilité de la taille de l'échantillon sur les effets de bord (E_{fb}). a) schéma du dispositif, x et y sont fixes et z varie. b) variation de E_{fb} en fonction de la distance Z/a.

Figure IV-12 : Schéma des scénarios de modélisation de la variation de l'orientation de la fissure entre 90° et 0° dans le plan (0,xy) ; les points noirs représentent la position des électrodes.

Figure IV-13 : Variation de la résistivité apparente ρ_{0° et ρ_{90° suivant l'orientation de la fissure.

Figure IV-14 : Valeur de l'indice AAI en fonction de l'orientation de la fissure.

Figure IV-15 : Schéma des scénarios de modélisation dans le plan (0,xy), avec une variation de l'épaisseur de la fissure entre 0,002 m et 0,01 m ; les points noirs représentent la position des électrodes.

Figure IV-16 : Variation de la résistivité apparente ρ_{0° et ρ_{90° suivant l'épaisseur de la fissure.

Figure IV-17 : Variation de l'indice AAI en fonction de l'épaisseur de la fissure.

Figure IV-18 : Effet du pendage de la fissure sur l'indice AAI.

Figure IV-19 : Effet de la profondeur de la fissure sur l'indice AAI, pour deux pendages différents 0° et 40° .

Figure IV-20 : Schéma 3D du squelette de fissures F1, F2 et F3.

Figure IV-21 : Vue de dessus de l'échantillon à l'état final, avec l'implantation du squelette de fissures (F1, F2, F3) dans l'échantillon, et la position des 64 électrodes représentées par les points.

Figure IV-22 : Répartition aux états initial et final des résistivités apparentes acquises pour les deux orientations de quadripôle à 0° et à 90° en fonction de la pseudo-profondeur.

Figure IV-23 : Représentation des box plots pour les 4 premières pseudo-profondeurs, E1 correspond à l'état initial, E2 correspond à l'état final, 0° et 90° indiquent l'orientation du quadripôle ABMN lors de l'acquisition de la mesure.

Figure IV-24 : Vue schématique de surface avec la position des fissures F1, F2 et F3 permettant la détermination de la variable qualitative : les quadrats jaunes appartiennent au groupe non fissuré, les quadrats oranges appartiennent au groupe fissuré.

Figure IV-25 : Distribution de $\log_{10}(AAI)$ pour les pseudo-profondeurs PP1 à PP6. Les points rouges représentent la position des électrodes. a) calculé à partir des données mesurées à l'état initial (E1). b) calculé à partir des données mesurées à l'état final (E2), la position des fissures est annotée en noir à PP1.

Figure IV-26 : Répartition des $\log_{10}(AAI)$ des données issues de la simulation numérique correspondant à l'état final (E2) de l'expérimentation de PP1 à PP6.

Figure IV-27 : Square array configuration a) the location of the current (A and B) and potential (M and N) electrodes for the two array orientation and b) inter-electrode spacing corresponding to the different pseudo-depths 1-6, with specified the number of acquisition for each square array orientation.

Figure IV-28: Binary image of the top surface of the block showing the cracking network pattern after desiccation at the end of the experiment. The grid nodes correspond to the electrode position and the square cells to the unit areas for the first pseudo-depth.

Figure IV-29: Initial and final measurement distributions for the 6 pseudo-depths.

Figure IV-30: Apparent electrical resistivity distribution at the final stage.

Figure IV-31: Spatial distribution of the apparent anisotropical index (AAI) at the final stage for the six pseudo-depths (PD1 to PD6).

Figure IV-32: Variation of the apparent anisotropic index (AAI) with respect to average crack width within each unit area: □ cracks that do not cross and ■ cracks that cross the in-line MN (I_{cinf} and I_{csup} are the two thresholds determined for crack identification $> 1mm$).

Figure IV-33: Anisotropic apparent index (AAI) and main crack orientation.

Figure IV-34: Mean crack orientation at the final stage: white squares represent units with $I_{cinf} < AAI < I_{csup}$, grey squares represent units with $AAI > I_{csup}$ and the black squares represent units with $AAI < I_{cinf}$.

Figure IV-35: Variation of the apparent resistivity measurement with the square array orientation.

Figure IV-36: a) Preferred anisotropy orientation for the 6 pseudo-depths at the final stage, b) Details of the preferred anisotropy orientation for the second pseudo-depth; the ring outlines the widest crack of the triple point.

Figure IV-37: Apparent resistivity monitoring over 18 days, for the four unit areas 19, 25, 24 and 20 and at the first pseudo-depth.

Figure IV-38: Variation of AAI and comparison with I_{cinf} and I_{csup} thresholds during drying for the four unit areas 19, 25, 24 and 20.

Figure IV-39: Orientation of heterogeneity for the second pseudo-depth, and during drying for the two areas A □ and B ■ corresponding respectively to unit areas 17, 18, 24, 25; and 19, 20, 26, 27.

Figure IV-40 : Evolution temporelle de l'indice AAI calculé à partir des données expérimentales des quadrats 19 et 25.

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Récapitulatif des techniques expérimentales de détermination de la structure

Tableau II-1 : Example of 2D in-line electrodes array pannel, and 3D electrode device : A and B current electrodes, M and N potential electrodes, A: spacing between electrodes used in a particular measurement, n: spacing factor (integer values 1-6), x: distance to "infinite electrodes" in pole-pole array

Tableau II-2: Characteristics of different 2D array configuration types.

Tableau IV-1 : Résultats de l'AFD pour la première et seconde pseudo-profondeur PP1 et PP2 à l'état final.

Table IV-2: Mean, median, minimum, maximum, and standard deviations (Std) of ρ_{0° , ρ_{90° , AAI and α_{max} , at the initial and final stages for the 6 pseudo-depths.

ANNEXE

Annexe I : Présentation mathématique du logiciel « Fissel »¹

Principle of the method of moments applied to the static d. c. case

This method, proposed by Harrington (1968), was first used in geophysical prospecting to model 3D electromagnetic cases (Raiche 1974, Hohmann 1975, Tabbagh 1985) and later extended to the static case corresponding to electrical prospecting (Dabas *et al.*, 1994). It establishes the equivalence between the presence of heterogeneities of differing properties and the presence of "secondary" sources of current.

Consider a body of electrical conductivity σ_b located in a uniform medium of electrical conductivity σ_0 , one notes (E, H) as the total EM field and (E_p, H_p) as the "primary" field, the field that would exist in the absence of the body. Both fields satisfy the Maxwell's equations, and their difference, the secondary field $(E-E_p, H-H_p)=(E_s, H_s)$ satisfies:

$$\nabla \times (E - E_p) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times (H - H_p) = \sigma_0 (E - E_p) + (\sigma_b - \sigma_0) E \quad (2)$$

In equation (2), the term $(\sigma_b - \sigma_0)E$ associated to the body appears as a secondary current source. Thus, the body can be considered as equivalent to the presence of a secondary current density $J = (\sigma_b - \sigma_0)E$, proportional to the total field. In the presence of a series of different bodies, a series of corresponding sources will be considered. The intensity of each source depends on the total field E and thus all the sources are coupled together.

To solve the coupled equations (1) and (2), for secondary fields (E_s, H_s) the potential vector A is defined by:

$$H_s = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times A \quad (3)$$

Substitution of (3) into (2) results in:

$$E_s = \frac{1}{\mu_0 \sigma_0} \nabla \times (\nabla \times A) - \frac{J}{\sigma_0} \quad (4)$$

From equation (1), one can write: $E_s = -\nabla U$, and by introducing the Lorentz gauge, $\nabla \cdot A - \mu_0 \sigma_0 U = 0$, one has,

¹ Cette annexe constitue une partie d'un article en cours de rédaction, avec Tabbagh, J., Tabbagh, A., Samouëlian, A., et Cousin I.

$$\nabla^2 A = -\mu_0 J \quad (5)$$

The solution of equation (5) which is the potential vector created by the heterogeneity at a point r can thus be expressed as the following integral:

$$A(r) = -\mu_0 \iiint_V J(r') \tilde{G}(r-r') d\tau' \quad (6)$$

where V is the volume of the heterogeneity and \tilde{G} is the dyadic Green tensor (with $\tilde{G}(r-r') = G(r-r') \tilde{\delta}$ where $\tilde{\delta}$ is the dyadic unity tensor, $G(r-r') = \frac{1}{4\pi|r-r'|}$ inside a homogeneous medium). From equations (4) and (6), the secondary field inside the heterogeneity is obtained:

$$E_s(r) = -\frac{1}{\sigma_0} \iiint_V J(r') \nabla \times [\nabla \times \tilde{G}(r-r')] d\tau' - \frac{J}{\sigma_0} \quad (7)$$

and outside one has:

$$E_s(r) = -\frac{1}{\sigma_0} \iiint_V J(r') \nabla \times [\nabla \times \tilde{G}(r-r')] d\tau' \quad (8)$$

By dividing the volume of the body (or of the bodies) into N cells and assuming that the total electrical field and conductivity are constant in each cell the integral (7) can be approximated by a finite summation:

$$E(r) - E_p(r) = -\sum_{n=1}^N \left(\frac{\sigma_n - \sigma_0}{\sigma_0} \right) \iiint_{V_n} \nabla \times [\nabla \times \tilde{G}(r-r')] d\tau' E^n - \left(\frac{\sigma_b(r) - \sigma_0}{\sigma_0} \right) E(r) \quad (9)$$

where the integral $\iiint_V \nabla \times [\nabla \times \tilde{G}(r-r')] d\tau'$ is numerically computed.

Therefore, from equation (9), a system of $3N$ linear equations with $3N$ unknowns which are the three components of the total electrical field in the center of each elementary cell (*i.e.* E_x , E_y and E_z) can be written in matrix form:

$$E_p = a_{EE} E \quad (10)$$

In the matrix a_{EE} , each term represents the coupling between one component of the electric field in one cell to one component of the electrical field in another (or the same) cell. When J is known, the effect of the heterogeneities at a point outside the volume is calculated by a simple integration (8) of the effect of each secondary source.

Fracture description

In the MoM, fractures only need to be meshed. Each fracture is considered as a thin planar feature of rectangular shape and of zero conductivity. Eight geometrical parameters are necessary: the thickness, the length, the width, the three coordinates of the center inside the soil block and two angles (dip and strike) defining the orientation of the direction perpendicular to the plane of the fracture. As fractures can be rotated there is no reason why choosing an irregular mesh grid, each fracture is thus divided in a series of squared surface flat cells of unique size. The couplings between different cells, the non-diagonal terms of a_{EE} , are directly calculated in the soil block coordinate system, the effect of one cell on itself is first calculated in the fracture coordinate system and after projected in the soil block coordinate system to get the diagonal terms of a_{EE} .

Effect of the limits of the block

Both the Green's functions and the primary field are modified from the homogeneous half-space expressions by the presence of the six faces limiting the block. The conditions at these limits have to be taken into account in the Green's functions and in the primary field themselves. Fortunately the block is parallelepiped, the faces are planar and orthogonal and it is possible to apply the image method.

For the primary field, by first considering the z dimension, a first image corresponds to the symmetric of the injection pole by reference to the bottom of the block, the second image is the symmetric of this point by reference to the surface of the block and so on. To each image of this 'vertical' infinite series correspond infinite series of 'horizontal images' generated by the two x faces and the two y faces of the block.

The same process is applied to the Green's functions that correspond to dipolar source fields. For a dipole parallel to a planar face the image is a symmetric dipole of same sign, for a dipole perpendicular to a planar face the image is a symmetric dipole of opposite sign. In this case the series is alternate.

TABLE DES MATIERES

Sommaire	1
Introduction générale	3
Chapitre I : Evolution de la structure du sol par fissuration lors de la dessiccation : Analyse bibliographique des méthodes et modèles de prévision	11
1. Approche expérimentale	16
1.1. Observations directes	16
1.1.1. Sur le terrain	16
1.1.1.1. Le profil cultural	16
1.1.1.2. Visualisation directe du réseau de fissuration au champ	16
1.1.1.3. Détermination des paramètres de la fissuration à partir de la surface	18
1.1.2. Au laboratoire	18
1.1.2.1. Paramètres globaux	18
1.1.2.2. Analyse d'images 2D	18
1.1.2.2.1. Analyse de photos de surface	18
1.1.2.2.2. Analyse de lames minces	19
1.1.2.3. Analyse d'images 3D	19
1.1.2.3.1. Coupes sériées	29
1.1.2.3.2. Tomographie aux rayons X	20
1.2. Observations indirectes	22
1.2.1. Porosimètre à mercure	22
1.2.2. Courbe de retrait	22
2 Approche par la modélisation	25
2.1. Modèle de structure	25
2.1.1. Modélisation géométrique	25
2.1.1.1. Géométrie aléatoire	25
2.1.1.2. Géométrie fractale	27
2.1.2. Modélisation morphologique	27
2.1.3. Modélisation mécanique	28
2.2. Modèle structure-fonctionnement	28
3. Conclusion : Synthèse et démarche adoptée	30
Chapitre II : Apports des méthodes utilisant la résistivité électrique : Théorie et exemples d'application en Géosciences	33
1. Introduction	38
2. Theory and basic principles	39
3. One-, two-and three-dimensional surveys	42
3.1. One-Dimensional survey	42
3.2. Two-Dimensional survey	42
3.3. Three-Dimensional survey	44
4. Recent technological improvements	45

5. Interpretation of electrical resistivity variation	46
5.1. Apparent resistivity	46
5.2. Interpreted resistivity	46
5.2.1. Effective depth evaluation	46
5.2.2. Inversion Process	48
6. Variation of electrical resistivity as a function of soil properties	49
6.1. Nature and arrangement of solid constituents	49
6.2. Water content	49
6.3. Pore fluid composition	51
6.4. Temperature	53
7. Advantages, limitations and new prospects for soil survey	53
7.1. Advantages	53
7.1.1. Non-destructive mapping technique	54
7.1.2. Temporal monitoring	54
7.1.3. Various scale application	55
7.1.4. Data acquisition facilities	55
7.1.5. Large sensitivity of the measurement	55
7.1.6. Numerical modelling advancement	55
7.2. Limitations	56
7.2.1. Contact between the soil and the electrodes	56
7.2.2. Calibration	56
7.2.3. Duration of the time of measurement	56
7.2.4. Adequacy between heterogeneity and configuration	57
7.2.5. Inversion process and non-uniqueness of the solution	57
7.3. New Prospect	58
8. Conclusion	59
9. Conclusion : Application de la méthode de la résistivité électrique à la détection de fissures	60
Chapitre III : Faisabilité de l'application de la méthode électrique à la détection de fissures : modélisation et expérimentation	61
1. Approche expérimentale : Utilisation de la résistivité électrique pour la détection de fissures à l'échelle centimétrique	64
1.1. Introduction	66
1.2. Principle of electrical measurement profile	68
1.3. Material and Methods	69
1.3.1. The soil studied	69
1.3.2. Micro-electrodes	70
1.3.3. Two-dimensional vertical pseudo-section	71
1.3.4. Resistivity inversion	73
1.4. Results	75
1.4.1. Apparent resistivity interpretation	75
1.4.2. Quantitative resistivity interpretation: Resistivity inversion	75
1.5. Discussion	79
1.6. Conclusion	80
2. Approche numérique : Evaluation et analyse de sensibilité d'un modèle de calcul de la résistivité apparente d'un milieu fissuré	82
2.1. Bases du modèle	82
2.2. Evaluation du modèle de calcul	83

2.2.1. Distribution de la résistivité apparente modélisée pour différentes profondeurs de fissures	84
2.2.2. Comparaison des résistivités apparentes modélisées et expérimentales	87
2.2.1.1 Anomalies positives	87
2.2.1.2. Anomalies négatives	90
2.3. Tests numériques de sensibilité de la méthode électrique appliqués à la fissuration	91
2.3.1. Influence de l'épaisseur de la fissure sur la résistivité apparente	91
2.3.2 Influence du nombre de fissures sur la résistivité apparente	92
2.3.3. Influence du pendage de la fissure sur la résistivité apparente	95
3. Conclusion du chapitre III	96
Chapitre IV : Analyse tridimensionnelle de la géométrie d'un réseau de fissures	97
1. Acquisition 3D des données de résistivité apparente	100
1.1. Choix d'un dispositif d'acquisition électrique	100
1.1.1 Dispositif en ligne	100
1.1.2 Dispositif Carré	103
1.1.2.1. Description du dispositif et intérêts de son utilisation	103
1.1.2.2. Influence de l'orientation d'une fissure sur la mesure de résistivité électrique	104
1.2. Mise en œuvre expérimentale	106
1.3. Calcul des effets de bord	109
1.3.1 Répartition des effets de bord sur le bloc expérimental	109
1.3.1.1. Cas d'un milieu homogène	110
1.3.1.2. Cas d'un milieu fissuré	112
1.3.2. Variation des effets de bords en fonction de la taille de l'échantillon	114
1.3.2.1. Influence de la taille de l'échantillon en x et y sur la mesure	114
1.3.2.2. Influence de la taille de l'échantillon en z sur la mesure	114
1.4 Traitement des données de résistivité apparente	118
1.4.1 Définition de l'indice d'anisotropie apparent : AAI	118
1.4.2. Signification de l'indice AAI dans le cas d'un milieu fissuré	118
1.4.2.1. Effet de l'orientation de la fissure sur l'indice AAI	118
1.4.2.2. Effet de l'épaisseur de la fissure sur l'indice AAI	121
1.4.2.3. Effet du pendage de la fissure sur l'indice AAI	123
1.4.2.4. Effet de la profondeur de la fissure sur l'indice AAI	123
2. Expérimentation et modélisation 3D en milieu contrôlé	126
2.1. Mise en place d'un état de fissuration artificielle	126
2.2. Résultats des mesures de résistivité	128
2.2.1. Présentation des données brutes et analyses statistiques	128
2.2.1.1 Distribution de la résistivité à l'état initial et l'état final en fonction de la pseudo-profondeur	128
2.2.1.2 Analyse statistique descriptive	128
2.2.1.3. Analyse Factorielle Discriminante	130
2.2.2. Application de l'indice d'anisotropie AAI	132
2.3. Modélisation 3D directe	135
2.3.1. Utilisation de l'indice d'anisotropie AAI sur les données numériques	135
3. Expérimentation en milieu naturel : Suivi tridimensionnel d'un réseau de fissures par résistivité électrique	138
3.1. Introduction	140
3.2. Materials and Methods	141
3.2.1. Soil	141

3.2.2. The principles of the three-dimensional electrical measurement	142
3.3. Results and discussion	144
3.3.1. Description of the crack network at the soil surface at the end of the experiment	144
3.3.2. Overall description of the change in 3D apparent resistivity data	144
3.3.3. Spatial distribution of three-dimensional apparent resistivity at the end of the experiment	147
3.3.4. Using the apparent anisotropic index for crack detection	147
3.3.5. Use of the preferential anisotropic orientation for crack detection	152
3.3.6. Temporal variation of the crack network pattern	155
3.4. Conclusion	159
3.5. Evaluation des indices AAI et α_{\max} pour le suivi temporel de la fissuration	160
4. Conclusion du chapitre IV	162
Conclusion Générale	163
Références bibliographiques	169
Listes des figures et tableaux	183
Annexe	189
Table des matières	195