

# Étude de l'infiltration dans un remblai hétérogène urbain



Mwamba Tshibi-Tshiabu, Jean-Sébastien Dubé  
*École de Technologie Supérieure, Montréal, Québec, Canada*

Michel Chouteau, Abderrezak Bouchedda  
*École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada*

Erwan Gloalguen  
*Institut National de la recherche scientifique, Québec, Québec, Canada*

Myeong-Jong Yi  
*Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, Daejeon, Corée*

## ABSTRACT

The goal of this study was to assess the contribution of geophysical methods to understand the hydrodynamics of highly heterogeneous anthropogenic soils, namely urban fills. To characterize the influence of structure heterogeneity on flow dynamics, a large-scale controlled infiltration experiment was conducted and monitored using 3D electrical resistivity tomography. A four dimensional algorithm (4-D) was used to invert data, the latter are considered to be a function of x, y, z and time t. All data sets from monitoring are inverted simultaneously to obtain subsurface models by just one inversion process.

## RÉSUMÉ

L'objectif de l'étude que nous présentons ici est d'étudier l'apport des méthodes géophysiques à la caractérisation de l'écoulement dans un milieu très hétérogène, en l'occurrence les remblais urbains. L'étude a consisté en la réalisation et le suivi d'une infiltration par tomographie de résistivité électrique 3D. Une irrigation contrôlée a été réalisée à l'aide d'un simulateur de pluie. Des mesures de résistivités avant et après irrigation ont été effectuées avec des électrodes en surface et en forages. Les données ont été inversées à l'aide d'un algorithme d'inversion 4D. L'ensemble des données est inversé simultanément, celles-ci étant considérées comme des fonctions de l'espace (x, y, z) et du temps t.

## 1 INTRODUCTION

La zone non saturée du sol a fait l'objet d'étude pour analyser et comprendre ses propriétés de transfert et leurs conséquences sur les bilans hydriques ainsi que sur la qualité des réserves d'eau souterraine. Les méthodes classiques sont largement utilisées pour ce faire comme la réflectométrie dans le domaine temporel, TDR (Time Domain Reflectometry), la tensiométrie (mesure du potentiel matriciel), les sondes à neutrons ou gamma. Des observations visuelles directes (Wierenga, 1991; Glass R.J., 2005) ou par analyse d'images ont souvent été mises à contribution aussi. Un traceur colorant est souvent mélangé à l'eau d'infiltration pour mettre en évidence les schémas d'écoulement et la variabilité spatiale de la teneur en eau (Wang Z. et al, 2001 ; Kim J.G, 2004). L'instrumentation d'un site lors de la mise en application de ces méthodes exige que l'on place des tubes d'accès à différentes profondeurs ou que l'on creuse une tranchée pour placer les sondes de mesure (sondes à neutron, sondes TDR, capteur de température, etc.) ou encore que l'on réalise des coupes verticales dans le sol. Ces méthodes sont limitées en termes de volume pouvant être échantillonné et de densité d'échantillonnage. En outre, la multiplication des points d'échantillonnage amène à une déstructuration du milieu ou à la modification des conditions aux limites. D'autre part ces études se font souvent en colonnes (Bouwer et al., 1984) la plupart du temps, sur des monolithes (Buchter et al., 1995) ou à plus grande échelle mais sur des échantillons perturbés (Hagrey et al., 1999). Des

méthodes géophysiques non-invasives ont donc été préconisées pour s'affranchir de ces inconvénients. Ces méthodes permettent en théorie, un échantillonnage continu des propriétés du sol. Ceci se révèle particulièrement important dans le cas des milieux hétérogènes où pour modéliser les écoulements souterrains, on a besoin d'une grande densité de données pour être à mesure de tenir compte de toute la complexité du milieu poreux. D'où la pertinence d'évaluer l'apport des méthodes non-invasives dans la caractérisation des processus hydrologiques souterrains comme l'ont fait plusieurs auteurs (Barker et Moore, 1998; Tabbagh et al., 2000).

Nous présentons ici les résultats préliminaires d'une étude portant sur l'apport des méthodes géophysiques à la caractérisation de l'écoulement à l'échelle du terrain dans des milieux fortement hétérogènes. La zone d'étude est une parcelle de 5x4 m<sup>2</sup> d'un terrain situé dans l'arrondissement Sud-ouest de Montréal. Le terrain est en friche depuis 1981 et situé dans un secteur antérieurement à vocation mixte (résidentielle, commerciale et industrielle). Il est aujourd'hui utilisé comme stationnement. Une première caractérisation géophysique (résistivité électrique, électromagnétique, radar) du terrain avait été réalisée (Boudreault, 2005). Le sol est un remblai constitué de dépôts anthropiques composés d'un mélange de sol et de débris (blocs de béton, briques, bois, cendres etc.) totalisant une épaisseur moyenne de 2.6 m. La nappe d'eau se trouve à une profondeur de 3 m. Il présente une contamination mixte aux HAP et aux métaux.

Ce remblai est caractérisé par une hétérogénéité plus aléatoire que structurée. En effet, en dehors de la couche superficielle il n'y a pas d'entité horizontale ou verticale identifiable, les hétérogénéités étant sous la forme d'inclusions grossières constituées de débris de toutes sortes dans une matrice plus fine et parfois de structures d'anciennes constructions (murs, dalles etc.). Les vides créés par l'agencement de ces débris, lorsqu'ils ne sont pas comblés par des matériaux de remplissage, laissent des macroporosités qui laissent supposer la présence d'écoulements préférentiels lors des processus d'infiltration.



Figure 1. Vue du remblai.

## 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'irrigation a été réalisée à l'aide d'un simulateur de pluie. Des mesures de résistivités avec des électrodes en surface et en forages en configuration dipôle-dipôle ont été effectuées avant et après irrigation. Les mesures avant l'irrigation ont permis de caractériser le remblai. Cette caractérisation géophysique a par la suite été corrélée aux observations faites après une excavation. Des échantillons ont été prélevés pour chacun des matériaux identifiés pour une analyse granulométrique et la détermination de la densité des solides. L'analyse granulométrique a permis par la suite de déterminer les paramètres hydrauliques du remblai à l'aide du modèle d'Arya et Paris (1981). Des mesures de teneur en eau ont été prises pour confirmer les variations observées en résistivité.

### 2.1 Irrigation avec un simulateur de pluie

Le simulateur de pluie est constitué d'une structure métallique montée sur quatre roues. Cette dernière est surmontée d'un chariot portant trois groupes de quatre buses chacun soit un total de douze (Voir figure 2). Le chariot se déplace sur deux rails et est propulsé par un moteur électrique. L'ensemble est entièrement automatisé et piloté par un automate programmable. La surface d'arrosage peut atteindre 25 m<sup>2</sup> et les buses sont placées à une hauteur de 2.44 m de façon à atteindre une vitesse terminale des gouttes proche de celle des gouttes

naturelles. Bien que ce critère d'énergie cinétique des gouttes soit primordial dans une étude d'érosion, Amerman cité par El Idrisi (1996) estime que dans une étude d'infiltration, les critères majeurs sont le taux d'application et l'uniformité spatiale de la pluie déterminée par le coefficient d'uniformité de Christiansen.



Figure 2. Vue du site avec le simulateur et le câblage pour les mesures géophysiques.

Le simulateur de pluie que nous avons utilisé dans cette étude peut fournir plusieurs intensités de pluie jusqu'à une intensité maximale de 127 mm/h. L'intensité fournie dépend du choix des paramètres d'un cycle aller-retour du chariot autrement dit du temps d'arrosage en marche avant, du temps d'arrosage en marche arrière, du temps de pause et du nombre de buses ouvertes; et du nombre de séquences choisies pour une simulation c'est-à-dire du nombre de cycles nécessaires pour que toutes les buses aient arrosée une fois la surface sous étude. Quant au coefficient d'uniformité (CU), il a été calculé à 90.2 % à une intensité de pluie de 31.75 mm/h (F. Avendano, 1999). Les réglages ont été faits de manière à reproduire ce CU. Compte tenu du fait que la surface du terrain était compactée, des paramètres pré-réglés du simulateur de pluie ont été choisis de manière à obtenir une intensité de pluie de 31.75 mm/h pour ne pas créer de flaques d'eau et obtenir ainsi une infiltration uniforme sur toute la surface du sol. L'irrigation a été arrêtée au bout d'une heure dès l'apparition des premières des flaques.

### 2.2 Prospection électrique

La tomographie est une technique d'imagerie qui permet de reconstruire l'image d'un objet à partir de ses propriétés internes mesurées à l'extérieur de ce dernier. La tomographie de résistivité électrique dérive de la combinaison des méthodes classiques du sondage et du traîné électriques. Elle permet une imagerie continue 2D ou 3D des variations de résistivité électrique du sous-sol (Dahlin, 2001).

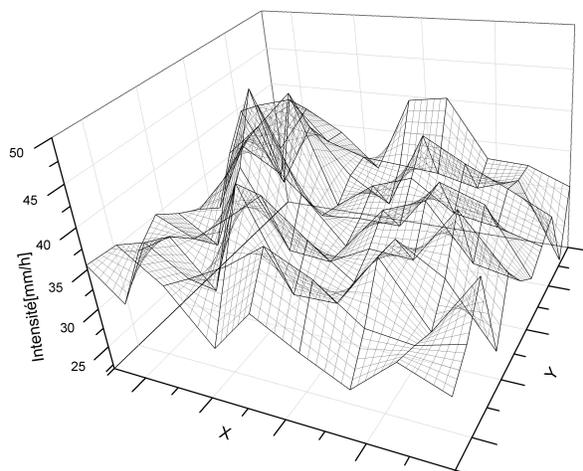


Figure 3. Profil de la pluie à une intensité de 31.75 mm/h et un CU de 90.2

Cette méthode est basée sur la mesure de la résistivité électrique (ou la conductivité) du sol, paramètre facilement mesurable sur le terrain. De plus ce paramètre a l'avantage de présenter une large gamme de valeurs mesurables dans les matériaux naturels, de 1  $\Omega$ m pour des sols à forte salinité jusqu'à des milliers de  $\Omega$ m pour des sols secs (Tabbagh et al., 2000). La méthode permet d'obtenir la distribution de la résistivité électrique dans le sol. Dans le cadre de cette étude, un ensemble de 9x7 électrodes avec un espacement de 1 m ont été installées dans le sol sur la parcelle sous étude (Voir figure 3). Cinq forages de 2 pouces de diamètre, placés dans chaque coin et au centre de la zone d'étude, ont aussi été réalisés pour accueillir des tubes porte-électrodes. Les électrodes sont constituées d'anneaux de cuivre montées sur des tubes en PVC de 1 pouce de diamètre extérieur. L'espacement des électrodes en forage est de 0.5 m. Le diamètre des forages a été choisi le plus petit possible pour ne pas perturber le sol mais suffisamment grand pour permettre un forage à la tarière dans ces matériaux avec des éléments grossiers de taille pluridécimétrique. L'espace annulaire entre la paroi du forage et les tubes porte-électrodes a été comblé avec de la bentonite. Les deux tubes côté Ouest ont été placés à une profondeur de 3 m, le tube central à 1.5 m et les deux tubes côté Est à 1 m compte tenu de la difficulté rencontrée à traverser le remblai à la tarière.

Les mesures de résistivités ont été réalisées avec un résistivimètre Syscal Pro. Elles ont été prises en trois différents temps : T1 (avant infiltration), T2 (immédiatement après infiltration) et T3 (24 heures après infiltration). Une inversion des données a été effectuée pour en faire l'interprétation. L'approche classique dans les problèmes de monitoring par tomographie consiste à inverser indépendamment les unes des autres les données prises à différents moments. Le résultat peut être affecté par des artefacts comme l'observation d'une augmentation de résistivité au cours d'une infiltration alors que c'est le contraire qui devrait normalement se produire.

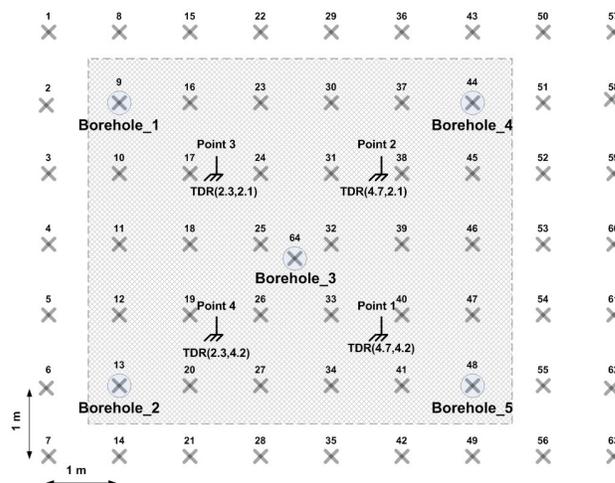


Figure 4. Disposition des électrodes. L'emplacement des forages est représenté par des cercles et la zone irriguée est ombragée.



Figure 5. Tubes porte-électrodes pour les mesures en forage.

Pour pallier à cet inconvénient, le modèle de départ est pris comme référence pour inverser les données subséquentes. Ceci a comme conséquence que ces dernières peuvent être fortement dépendantes du modèle de référence. Pour notre étude, une autre approche a été préconisée. L'inversion a été réalisée à l'aide d'un code d'inversion 4D (Four-Dimensional Least-squares Inversion algorithm) développé au laboratoire d'imagerie géoélectrique de l'institut coréen de Géoscience et de Ressources minérales (Yi M-J et al., 2008). L'inversion est basée sur la méthode « smoothness constraint least-squares inversion method » associée à la technique ACB (Active Constraint Balancing). Les résistivités mesurées et la structure géoélectrique du sous-sol sont supposées être en 4D : trois dimensions spatiales (x, y, z) et une dimension temporelle (t). Cette méthode consiste à inverser simultanément l'ensemble des mesures

obtenues à différents temps de mesure  $T_i$ . Ceci permet d'obtenir un seul modèle du sous-sol pour tous les  $T_i$  lors d'un même processus d'inversion.

Des mesures de teneur en eau ont été réalisées à mi-distance entre le forage central et chacun des autres forages pour corrélérer la variation de la résistivité (conductivité) à celle de la teneur en eau. Pour valider les observations structurales du remblai obtenues par tomographie de résistivité électrique, celles-ci ont été confrontées aux observations directes de terrain dans quatre tranchées réalisées sur la parcelle à l'étude. Des échantillons ont aussi été prélevés dans le but de déterminer les propriétés de rétention des différents matériaux identifiés en vue d'une modélisation hydrologique (travail à en cours).

### 2.3 Analyse granulométrique et détermination des paramètres hydrauliques

Des protocoles basés sur les normes BNQ 2501-025 et BNQ 2560-040 ont été utilisées pour les tamisages grossier et fin des échantillons ainsi que la sédimentométrie. La norme BNQ 2501-070 a été utilisée pour la détermination de la densité des solides. Les courbes de rétention ont été dérivées de la distribution granulométrique par la méthode de Arya et Paris (Arya et al., 1981). Elles ont par la suite été corrigées par la méthode de Gardner pour tenir compte de la présence des graviers et éléments grossiers (Khaleel et Relyea, 1997). Les paramètres du modèle capillaire de Van Genuchten ont par suite été déterminés par ajustement sur ces courbes de rétention corrigées.

## 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 Caractérisation du remblai

La structure du remblai a été caractérisée de manière directe par une observation de visu de sa structure dans quatre tranchées creusées sur le site, deux longitudinales et deux transversales. Ces observations ont été confirmées de manière indirecte par la tomographie de résistivité électrique. De façon générale l'observation a permis de mettre en évidence une couche superficielle de 30 à 50 cm d'épaisseur, relativement compacte, couverte de pierre concassée et étendue sur toute la surface de la zone d'étude. Elle est constituée d'une matrice sableuse, mélangé à de la pierre concassée dans une proportion de 5 à 20 % et des matières résiduelles dans une proportion d'environ 5 %. Dans la partie sous-jacente, on distingue deux zones principales : un dépôt de compacité moyenne dans la partie Ouest et un dépôt plus lâche côté Est constitué de débris hétérométriques (briques, béton de ciment etc.) dans une proportion de 50 à 80 % mélangé à du sable qui en constitue le matériau de remplissage (Voir figure 5). Dans cette même partie, on rencontre vers le milieu de la zone d'étude un mur de fondation et une dalle à 1.5 m de profondeur. Cette dalle est visible dans les deux tranchées longitudinales, laissant supposer qu'elle traverse toute la zone d'étude.

Les tomographies obtenues après inversion des données de résistivité aux temps  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  montrent

que la géométrie du remblai restituée au cours de ces trois temps. Le modèle 3D obtenu montre une zone plus ou moins homogène dans les 50 premiers centimètres dont les résistivités varient de 65 à 120  $\Omega\text{m}$ , correspondant à la couche superficielle du remblai observée dans les tranchées.

Au-delà de 50 cm, des zones plus résistives apparaissent. Les images montrent une très forte variabilité de la résistivité tant horizontalement que verticalement (Voir figure 7 et 8). Les zones beaucoup plus résistives se retrouvent sur la partie Est avec des résistivités supérieures à 1000  $\Omega\text{m}$  associées au remblai de briques, blocs de béton de ciment. D'autre part, sur la partie Ouest on rencontre une gamme de résistivités allant de 120 à 1000  $\Omega\text{m}$ . Ces résistivités sont associées à un remblai gris-brun constituée d'une matrice sableuse avec 20 à 40 % de matières résiduelles dont la proportion de briques peut atteindre 30 % par endroit. Au centre de l'image de la figure 10, on voit une zone présentant des valeurs de résistivité très élevées (5000  $\Omega\text{m}$ ), correspondant à la zone où se situent le mur de fondation et la dalle mis en évidence par l'excavation. On voit donc qu'il existe une correspondance entre les gammes de résistivités et la structure du remblai.

### 3.2 Teneurs en eau

A  $T_1$  on constate une diminution de la teneur avec la profondeur excepté au point 4. Entre  $T_1$  et  $T_2$ , on a une augmentation des teneurs en eau qui varie de 25 à 270 %. On observe une différence notable dans les teneurs en eau mesurées à différentes profondeurs et au temps  $T_2$ . Ceci dénote une infiltration non uniforme. A ce même moment le sol avait déjà atteint la saturation à 0.5 m, preuve d'une infiltration rapide. En effet, il s'est écoulé 4 heures entre  $T_1$  et  $T_2$ . On remarque en outre qu'entre  $T_2$  et  $T_3$ , on a une diminution des teneurs en eau sur les différents points qui varie de 17 à 43 % (Tableau 1). Une des sondes TDR du point 2 n'a pas fonctionné.

Tableau 2. Teneurs en eau mesurées

		$T_1$	$T_2$	$T_3$
Point 1 (4.7, 4.2)	0.1 m	18.6	29.7	24.7
	0.3 m	12.8	16.1	18.8
	0.5 m	9.5	29.5	18.8
Point 2 (4.7, 4.2)	0.1 m	15.8	28.8	20
	0.3 m	10.3	30.6	21.2
	0.5 m			
Point 3 (2.3, 2.1)	0.1 m	10.7	25.7	16.5
	0.3 m	9.3	26.5	18.4
	0.5 m	6.1	22.3	15.5
Point 4 (2.3, 4.2)	0.1 m	11	20.8	17
	0.3 m	19.4	31.2	24.3
	0.5 m	18.1	37.6	21.5

### 3.3 Analyses granulométriques

Les classes granulométriques ont été définies selon la classification de l'USDA (United States Department of Agriculture). Les analyses granulométriques ont montré que la fraction fine du remblai est constituée d'un sable. Tous les échantillons prélevés contiennent plus de 85 % de sable à l'exception d'un seul correspondant au sol naturel qui est un sable silteux. L'analyse granulométrique a montré aussi que cette matrice sableuse contient de 25 à 75 % de graviers (pierre concassée, débris, briques, blocs de béton). Le coefficient d'uniformité **Cu** varie de 12 à 48 tandis que le coefficient de courbure varie de 0.14 à 1.3. Selon Holtz et Kovacs (1991), on considère qu'un sol a une granulométrie bien étalée si son Cu est plus grand que 4 pour les graviers et plus grand que 6 pour les sables et si son coefficient de courbure est entre 1 et 3. Ce qui n'est pas le cas de tous les échantillons analysés ici.

Tableau 1. Distribution granulométrique (pourcentage massique) des échantillons pris sur le site.

	Gravier >2mm	Sable 50µm- 2mm	Silt 2µm- 50µm	Argile <2µm
TR1-1-1.2	48.70	45.33	4.72	1.26
TR1-2-1.5	24.43	54.50	16.68	4.39
TR1-2-2	36.42	57.61	4.28	1.69
TR1-3-1.5	60.20	36.66	2.36	0.78
TR2-1-0.5	55.98	39.01	5.01	0.74
TR2-1-0.7	72.33	25.14	2.53	0.51
TR2-1-1.2	59.18	40.82	2.66	0.54
TR2-1-1.8	42.18	52.57	4.58	0.67
TR2-1-2.6	43.48	50.45	5.22	0.85
TR2-2-0.5	68.88	28.39	2.22	0.51
TR2-2-1	55.07	41.08	3.31	0.54
TR2-2-1.7	46.41	48.74	4.22	0.63
TR2-2-2.1	59.78	37.38	2.44	0.40
TR3-0.5	48.76	47.13	3.46	0.65
TR3-1.2	48.06	49.00	2.57	0.37
TR3-1.7	50.95	46.42	2.26	0.37
TR3-1.9	48.81	47.12	3.35	0.72
TR4-0.6	65.88	31.18	2.43	0.51
TR4-0.8	46.49	49.95	3.11	0.45
TR4-1.9	52.51	43.99	2.94	0.57
TR4-2.7	54.31	42.53	2.71	0.45

### 3.4 Paramètres hydrauliques

La figure 6 montre les courbes de rétention obtenues par la méthode de Arya et Paris et ces mêmes courbes avec une correction pour tenir compte de la fraction grossière. On voit sur cette figure que la forme des courbes n'a pas changé mais on note par contre l'influence des éléments grossiers sur le paramètre d'échelle. En effet, le faisceau des courbes de rétention avec la correction de la fraction grossière devient plus évasé à sa base contrairement à ce qui est observé sur les courbes sans la correction.

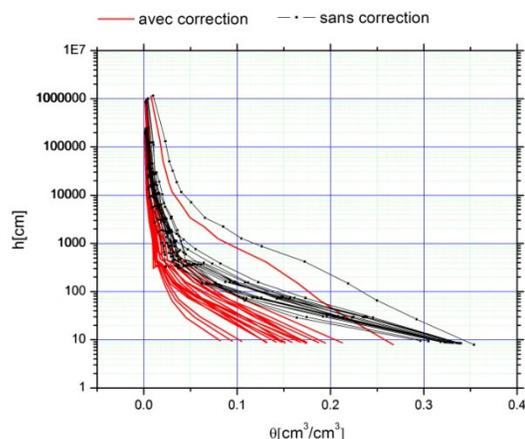


Figure 6. Courbes de rétention.

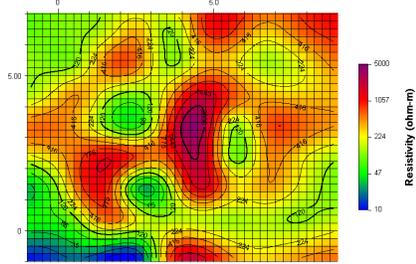
### 3.5 Suivi de l'infiltration

Les figures 6 et 7 présentent les cartes de résistivité obtenues à T1, T2 et T3. Les coupes horizontales montrent que jusqu'à 0.5 m de profondeur la zone investiguée reste plus ou moins homogène et les résistivités à T1 > aux résistivités à T2 suggérant une avancée uniforme du front d'infiltration. Entre 0.5 m et 0.8 m de profondeur, on constate une différence beaucoup plus marquée dans les valeurs de résistivité entre T1 et T2, alors que la distribution des résistivités est presque identique entre T1 et T3. Plus en profondeur, la zone de faibles résistivités continue à s'étendre dénotant une redistribution de l'humidité du sol.

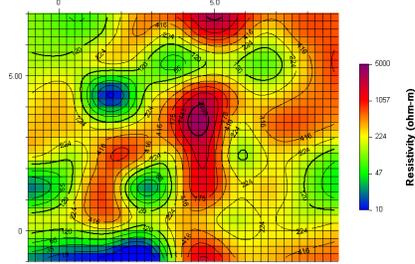
Sur les coupes horizontales à T2, on constate des zones de faibles résistivités (< 30 Ωm) à partir de 0.75 m de profondeur suggérant des écoulements concentrés dans ces zones. Au-delà de 1.75 m, on constate une coalescence de ces points de faible résistivité, due probablement à une redistribution de l'eau dans cette plus homogène (constituée de sol naturel). On constate le même comportement du remblai sur les images à T3 à la seule différence que dans ce cas les gammes de résistivités un peu plus élevées dans ces zones d'écoulements préférentiels.

Les coupes verticales montrent une zone centrale de très faible résistivité correspondant à un chemin d'écoulement préférentiel. On remarque en outre l'influence du mur et de la dalle dans la forme de cette zone, suggérant le contournement de ces derniers par l'écoulement.

Coupes à T1 (0.5, 1.3 et 1.8 m)



Coupes à T2 (0.5, 1.3 et 1.8 m)



Coupes à T3 (0.5, 1.3 et 1.8 m)

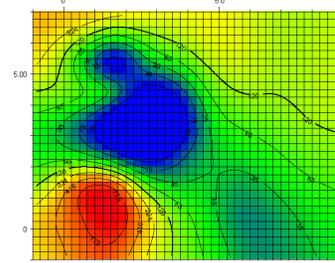
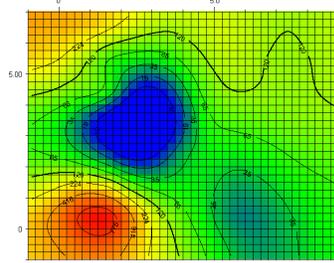
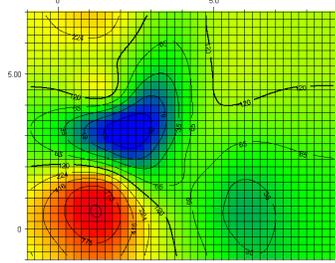
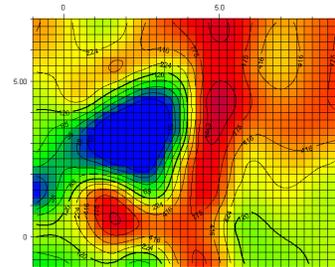
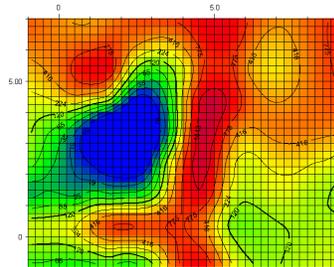
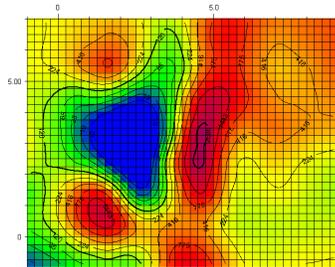
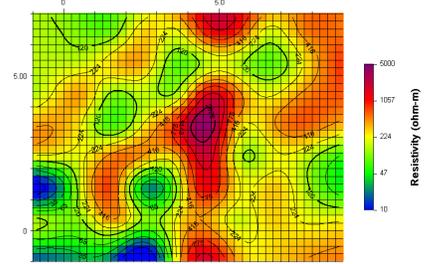
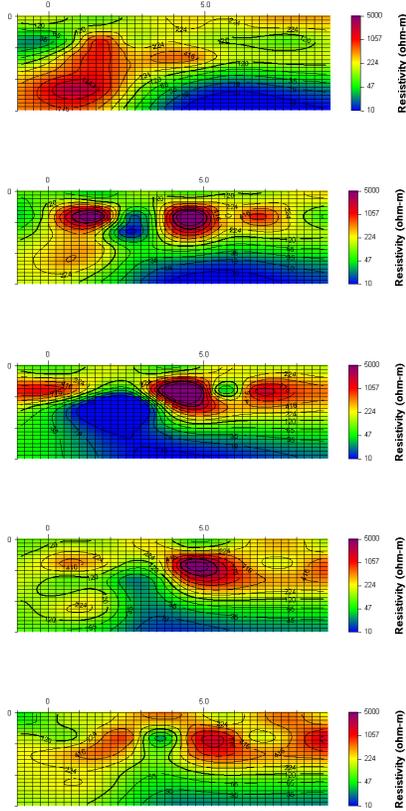
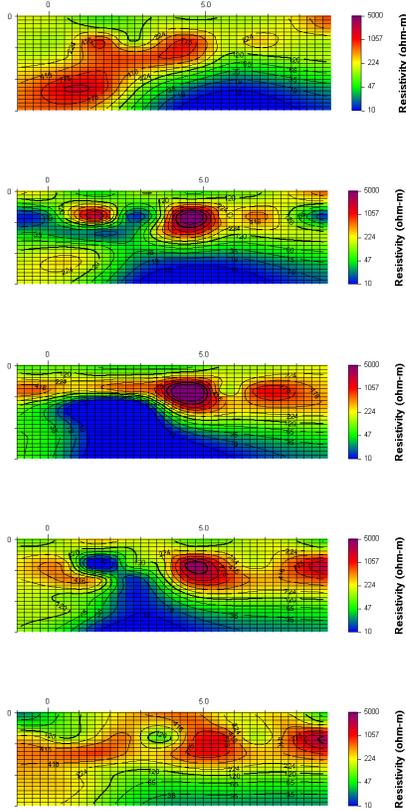


Figure 7. Coupes horizontales

Coupes à T1 (y=0.5, 1.75, 3, 4.25 et 5.75 m)



Coupes à T2 (y=0.5, 1.75, 3, 4.25 et 5.75 m)



Coupes à T3 (y=0.5, 1.75, 3, 4.25 et 5.75 m)

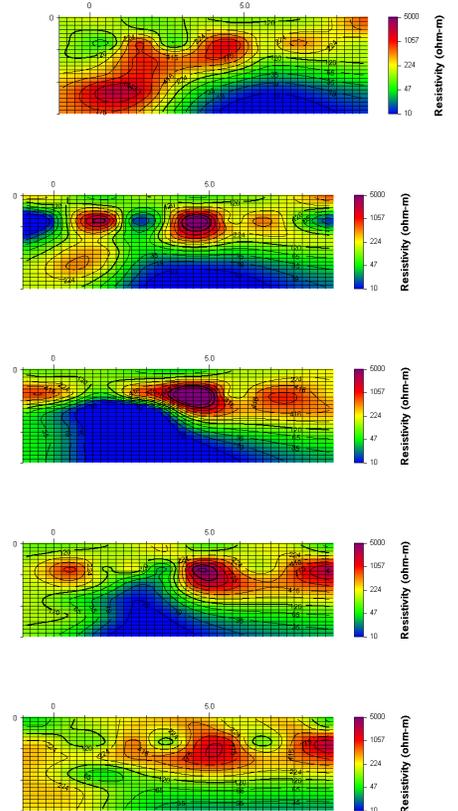


Figure 8. Coupes verticales.

Des cinq types d'écoulement préférentiel définis par Nieber (2001), deux pourraient être associés à ce qui est observé sur les cartes de résistivités. Ce sont l'écoulement contrôlé par l'hétérogénéité (heterogeneity-driven flow) et l'écoulement dans les macropores.

#### 4 CONCLUSION

La tomographie de résistivité électrique a permis de mettre en évidence les structures remarquables du remblai. L'inversion 4D a permis de restituer la structure du remblai entre les différents temps de mesure, rendant ainsi l'interprétation plus aisée. L'infiltration non uniforme suggérée par les résultats de l'inversion a été confirmée par les valeurs de teneurs en eau mesurées à différents points. Les résultats obtenus montrent qu'une information pertinente sur l'écoulement de l'eau peut être acquise à l'aide d'une méthode non invasive dans des matériaux à la géométrie aussi complexe.

#### 5 RÉFÉRENCES

- Arya, L. M. and Paris, J.F. 1981. Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-size Distribution and Bulk Density Data, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:1023-1030.
- Barker, R and Moore, J. 1998. The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies, *The leading edge*, October 1998, 1454-1458.
- Benderriter, Y and Scott, 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.
- Binley A., Shaw B., Henry-Poulter S. 1999. Flow pathways in porous media: electrical resistance tomography and dye staining image verification, *Meas. Sci. Technol.* 7(1996) 384-390.
- Boudreault, J-P. and Dubé, J-S. 2005. Projet pilote sur la caractérisation des remblais hétérogènes urbains, *Americana 2005*, Montréal, QC, Canada.
- Dahlin, T.2001. The development of DC resistivity imaging techniques, *Computers and Geosciences* 27:1019-1029.
- El Idrissi A. 1996. *Effet de l'humidité initiale du sol sur le processus de ruissellement à l'échelle de la parcelle et du bassin versant*, Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique.
- Glass, R.J., Brainard, J.R., Jim Yeh T.-C. 2005. Infiltration in unsaturated layered fluvial deposit at Rio Bravo: Macroscopic anisotropy and heterogeneous transport, *Vadose Zone Journal*, Soil Sci. Soc. Am. J., 5:22-31.
- Hagrey S.A., Schubert-Klempnauer T., Wachsmuth D., Michaelsen J., 1999. Preferential flow: first results of a full-scale flow model, *Geophys. J. Int.* 138, 643-654.
- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D. 1991. *Introduction à la géotechnique*, Presses internationales Polytechnique, Montréal, QC, Canada.
- Kim, J-H., Yi, Park, S.-G., Yi, M.-J. and Kim, J.-G. 2006. 4-D inversion of geophysical monitoring data acquired over dynamically changing 4-D earth model.
- Michot, D., Benderitter Y., Dorigny A., Nicoullaud B., King D., Tabbagh A.2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with a irrigated corn crop cover using surface resistivity tomography, *Water resources research* 35, n°5:1138-1158.
- Nieber, J. 2001. The relation of preferential flow to water quality, and its theoretical and experimental quantification, *Preferential flow water: Movement and chemical transport in the environment*, ASAE, Honolulu, Hawaii, USA, Proc. 2<sup>nd</sup> Intl. Symp. 1-10.
- Samouelian, A. Cousin, I, Tabbagh, A, Bruand, A. Richard, G.2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review, *Soil and Tillage Research* 83:173-193.
- Tabbagh, A., Dabas, M., Hesse, A., Panissod, C. 2000. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma* 97:393-404.
- Wierenga, P.J., Hills, R.G., Hudson, D.B. 1991. The Las Cruces trench site: Characterization, experimental results, and one-dimensional flow predictions, *Water resources research* 27, n°10:2695-2705.
- Yi, M-J, Kim, J.H, Son, J.S. 2008. 4-D Inversion of 3-D Resistivity Monitoring Data from LNG Storage Pilot Plant, *Near surface 2008*, Krakow, Poland, 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.
- 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, n°2, 273-285.