

Une méthodologie couplant mesures géophysiques et ponctuelles afin d'estimer la perméabilité d'un site destiné à l'infiltration d'eau usée traitée

Sara Bisone¹, Rémi Clément², Nicolas Forquet^{1,*}

(1) Irstea, UR MALY, centre de Lyon-Villeurbanne, 5 rue de la Doua, BP 32108, 69616 Villeurbanne Cedex, France.

(2) Irstea, UR HBAN, F-92761 Antony, France.

*Auteur correspondant : nicolas.forquet@irstea.fr

RÉSUMÉ

Lorsqu'il n'existe pas d'autre exutoire possible ou que l'on souhaite réduire les volumes déversés vers le milieu récepteur superficiel, l'eau usée traitée à la sortie des stations d'épuration est infiltrée à proximité. Cette pratique fait émerger des questionnements d'ordre opérationnel et environnemental : comment dimensionner un ouvrage d'infiltration et quels sont les impacts éventuels sur le milieu récepteur souterrain ? Des études préalables sont recommandées pour les zones de rejet végétalisées et obligatoires dans le cas des zones d'infiltration mais aucun document ne précise comment prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des propriétés du sol. Ces dernières pouvant fortement influencer le cheminement de l'eau vers la nappe ainsi que les quantités susceptibles d'être infiltrées. Le présent article introduit une méthodologie couplant des mesures géophysiques spatialisées et des mesures ponctuelles afin de décrire au mieux la configuration de la proche surface, notamment sa conductivité hydraulique au champ. Le processus hiérarchique proposé permet, en allant de la mesure la plus rapide et la moins précise, à la mesure la plus longue et la plus précise, d'optimiser les plans d'échantillonnage et ainsi réduire le temps et le coût de l'étude. Deux exemples d'application de la méthodologie sont présentés mettant particulièrement en évidence la complémentarité des outils et l'apport de la géophysique notamment sur des milieux fortement remaniés par l'homme.

MOTS-CLÉS : eaux usées traitées, infiltration, ZRV, hétérogénéité, géophysique, conductivité hydraulique au champ

ABSTRACT

When water cannot be discharged to superficial water body or the discharge volume needs to be limited, treated wastewater downstream a treatment plant can be infiltrated. Operational and environmental challenges emerge from this practice: how to size infiltration facilities and what will be the impact of the treated wastewater on groundwater quality? Preliminary studies are recommended for soil-based constructed wetlands and compulsory when permanent infiltration is needed. Unfortunately there is no guideline on how to deal with spatial heterogeneity of soil properties. They can greatly influence water pathway in the soil and the quantities of treated wastewater that can infiltrate. The aim of this article is to introduce a methodology that associates geophysical measurements and more localized ones in order to better described the near-surface with a particular focus on field saturated hydraulic conductivity. Starting from the fastest and coarsest method, the suggested hierarchical process allows optimizing the sampling strategies for longer and more accurate measurements. Therefore, such a methodology, while increasing the quality of results, may also reduce the time and cost of preliminary studies. Two applications are presented demonstrating the advantages of associating several methods. They also underline the input of using geophysical methods on soil that have been largely modified by human activity.

KEYWORDS: treated wastewater, infiltration, soil-based constructed wetlands, heterogeneity, geophysics, field saturated hydraulic conductivity

Une méthodologie couplant mesures géophysiques et ponctuelles afin d'estimer la perméabilité d'un site destiné à l'infiltration d'eau usée traitée

Sara Bisone, Rémi Clément, Nicolas Forquet

INTRODUCTION

En milieu rural, les installations de traitement sont principalement conçues pour traiter la pollution carbonée. Or, en période d'étiage, les rejets de ces dernières peuvent fortement dégrader la qualité du milieu récepteur superficiel pour les paramètres azote et phosphore (Boutin et Prost-Boucle, 2012 ; Bosc et Boucheseiche, 2000). Il est à noter également que dans certaines régions, l'absence de milieu récepteur superficiel oblige à infiltrer les eaux usées traitées. Le recours à de l'infiltration par le sol, que ce soit au moyen d'aire d'infiltration (où la totalité des effluents s'infiltrer) ou au sein de Zones de Rejet Végétalisées (ZRV), (où une partie de l'effluent peut s'infiltrer sur cet ouvrage situé à l'aval de station d'épuration, entre le point d'autocontrôle et le milieu récepteur) est de plus en plus pratiqué.

Le recours au sol se justifie par le traitement complémentaire qu'il est susceptible de fournir notamment en termes de filtration mais également en termes de rétention du phosphore (Bekele *et al.*, 2011). Néanmoins une telle pratique pose des questions en termes d'impact sur le sol : risque de déstructuration et de dispersion des argiles (Bisone *et al.*, 2017), risque de contamination des masses d'eau souterraines par des pathogènes et par le relargage du phosphore notamment (Martins *et al.*, 2013), et durabilité de l'ouvrage au travers du risque de colmatage (McKinley and Siegrist, 2011). Ces problématiques sont en partie étudiées dans le cadre du programme de recherche ROSEEV (Rôle du Sol dans les zonEs de rEjets Végétalisées) financé par l'Agence Française de la Biodiversité (AFB).

Un autre aspect important est la quasi-absence de règles de dimensionnement. Ces dernières doivent reposer sur des hypothèses vraisemblables sur les flux hydriques dans le sol et s'appuyer sur une connaissance des caractéristiques intrinsèques du sol (conductivité hydraulique, porosité...), de leur distribution spatiale et des conditions initiales (teneur en eau initiale) et aux limites (niveau de la nappe). Cette connaissance nécessaire est aujourd'hui peu prise en compte que ce soit dans la réglementation (MEDDE, 2015) régissant la réalisation des études préalables pour les aires d'infiltration ou bien dans le guide des études préalables pour les Zones de Rejet Végétalisées (EPNAC, 2013) rédigé par le groupe de travail sur l'Évaluation des Procédés Nouveaux d'Assainissement des petites et moyennes Collectivités (EPNAC). Par exemple, dans ce dernier, il est fait mention que la mesure de perméabilité

doit s'effectuer « aux bonnes profondeurs et aux bons endroits, c'est-à-dire au niveau du sol sur lequel l'eau va s'écouler ». Sur des sols présentant de fortes hétérogénéités ou très stratifiés, le besoin d'une méthodologie existe afin d'en quantifier le mieux possible les capacités d'infiltration. Cette étude se présente donc comme un complément du guide ZRV et de la réglementation sur le point spécifique de l'estimation des propriétés du sol conditionnant les capacités d'infiltration.

La variabilité spatiale des propriétés est particulièrement importante à prendre en compte car elle peut significativement modifier le cheminement de l'eau dans le sol. En effet, les tests d'infiltration peuvent fournir des mesures en des points précis mais compte-tenu de leur faible couverture spatiale ils offrent une image incomplète du site. D'autre part la multiplication des mesures peut être trop invasive et/ou longue.

L'utilisation de plus en plus fréquente d'outils géophysiques pour la description de la proche surface permet en partie de répondre à cette problématique (Binley *et al.*, 2015). Malheureusement les grandeurs mesurées ne peuvent pas directement être interprétées en matière de capacité d'infiltration. Cependant, en associant ces méthodes faiblement invasives et représentatives d'un point de vue spatial avec des mesures ponctuelles des caractéristiques hydrodynamiques des sols, une représentation conceptuelle de la proche surface peut être construite ainsi que des écoulements qui sont susceptibles de s'y produire. Cette approche a prouvé son efficacité pour la description des sites contaminés dans le cadre du programme ModelPROBE « Model-driven Soil Probing, Site Assessment and Evaluation » (Kastener *et al.*, 2012). Dans les résultats de cette étude, l'association des outils va encore plus loin car les informations fournies par les mesures géophysiques servent à la sélection des points de mesure ponctuels permettant une planification des sondages qui génère des coûts et des temps d'étude moins élevés qu'avec une approche plus traditionnelle reposant sur un échantillonnage pseudo-aléatoire (French *et al.*, 2014).

Dans cet article, nous proposons une démarche similaire adaptée aux spécificités de la problématique de l'estimation des capacités d'infiltration d'un site dédié à l'infiltration d'eau usée traitée. La méthodologie sera présentée via son application à deux cas réels : les aires d'infiltration des stations d'épurations de Vaux-Rouillac (16) et de Bègles (33).

I. Matériels et Méthodes

I.1. Une approche hiérarchique

La représentation conceptuelle que l'on souhaite obtenir doit permettre de décrire les structures du sol influençant le chemin de l'eau dans le sol et leur perméabilité afin (i) d'aider l'hydrogéologue dans son évaluation de l'impact du rejet sur les masses d'eau souterraines, et (ii) de servir au dimensionnement de l'ouvrage.

Pour cela, quatre étapes sont proposées. Elles mettent en œuvre des techniques qui vont des plus rapides et des moins spécifiques aux plus lentes et plus précises. Les trois premières étapes permettent d'identifier les grandes structures horizontales et verticales afin d'optimiser le positionnement, la profondeur et le nombre des essais d'infiltration. En effet, ces derniers sont particulièrement longs à réaliser (et donc coûteux en terme de personnel) et n'ont qu'une faible représentativité spatiale.

La première étape consiste à collecter les informations disponibles sur les bases de données publiques. Cette démarche est décrite en détail dans (EPNAC, 2013). Notons néanmoins que les photos aériennes (disponibles depuis les années 1920 sur le site Geoportail) fournissent une information utile sur l'évolution de l'usage du sol en surface. Cette information est particulièrement importante pour les anthroposols. Enfin, la banque du sous-sol (BSS), accessible via

la plateforme INFOTERRE™ donne accès aux informations collectées lors de forages effectués à proximité du site.

La deuxième étape consiste à vérifier si les informations recueillies aux préalables correspondent à l'état actuel du site. S'il a été mis en évidence que le site est susceptible de présenter des hétérogénéités horizontales du fait de sa nature ou par les remaniements dont il a fait l'objet, l'étape 2 est l'occasion d'en identifier les contours. Pour cela, nous avons utilisé un conductimètre électromagnétique. A la fin de cette étape, l'objectif est d'obtenir une carte identifiant des zones aux propriétés distinctes (Plan 1).

La troisième étape a pour objectif d'observer pour chacune des zones identifiées précédemment l'hétérogénéité verticale. A cette fin, nous avons choisi une association d'un outil géophysique : la tomographie de résistivité électrique (TRE) et un outil permettant des mesures plus ponctuelles : le pénétrromètre dynamique associé à un géo-endoscope. Le résultat est l'identification des principaux horizons pour chaque zone (Plan 2).

La quatrième et dernière étape consiste à réaliser les tests d'infiltration. Dans cette étude, nous avons choisi la méthode de Reynolds et Elrick (Elrick *et al.*, 1989). On parvient alors à une représentation conceptuelle associant à chaque zone et horizon une conductivité hydraulique (Plan 3).

La Figure 1 présente sous forme de workflow les différentes étapes et l'enrichissement progressif de la représentation conceptuelle de la proche surface.

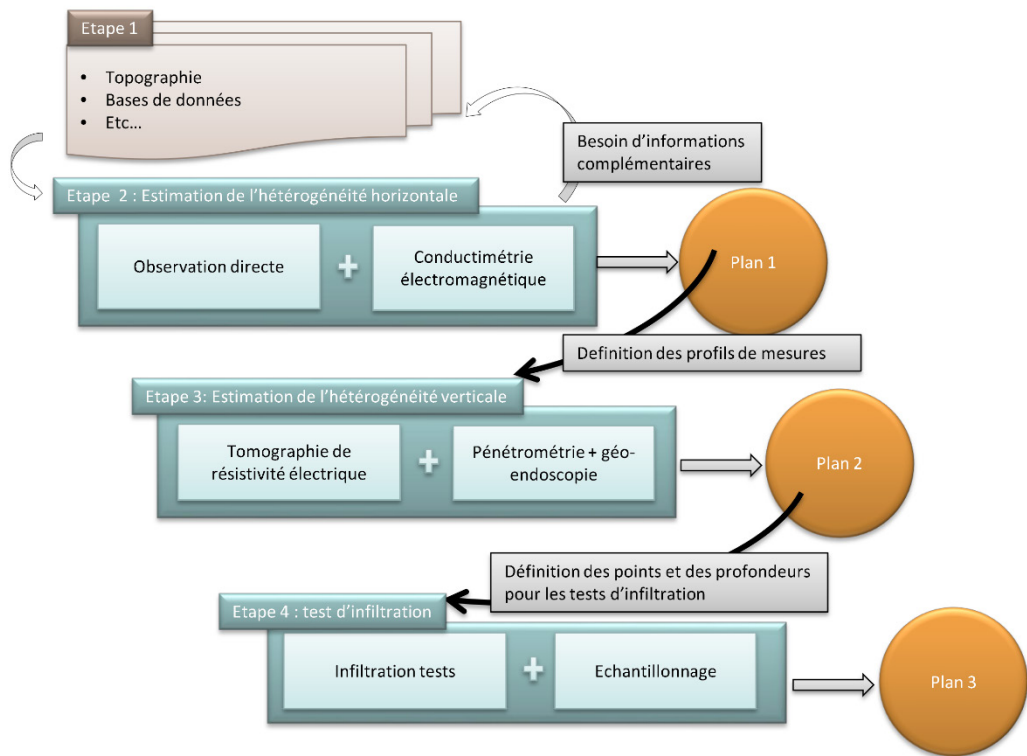


Figure 1 : Présentation synoptique de la méthodologie de caractérisation du site

L'approche hiérarchique suggérée peut être mise en œuvre avec d'autres outils que ceux présentés dans cette étude. Cela dépendra d'une adéquation entre la complexité du site à étudier et du risque environnemental associé à l'infiltration d'eau usée traitée. Par exemple, un relevé botanique rapide des grandes structures végétales (qui sont reliés aux propriétés topo-édaphiques du site) peut se substituer au conductimètre électromagnétique à l'étape 2 et une fosse pédologique peut être creusée pour identifier les horizons à l'étape 3.

1.2. Techniques d'investigation géophysique

1.2.1. Mesure de la conductivité électromagnétique

Un conductimètre électromagnétique est équipé de deux bobines distantes : une bobine émettrice et une réceptrice. La bobine émettrice, parcourue par un courant d'amplitude et de fréquence donnée, génère un champ magnétique. Ce dernier induit dans le sol un champ magnétique secondaire, dont l'intensité dépend de la conductivité électrique du sol. L'intensité du champ est alors mesurée grâce à la deuxième bobine (Figure 2b). La fréquence du courant et la distance entre les bobines définissent la profondeur atteinte et la sensibilité. L'appareil utilisé (Profiler™EMP-400, GSSI, USA) permet de travailler à 3 fréquences, en arrivant à une profondeur estimée de 3 m. L'entière surface du site est rapidement balayée (le site de Bègles, d'une surface de 12 500 m² a été balayé en 45 minutes). La mesure intègre la conductivité électrique sur l'ensemble de la profondeur contribuant à la mesure. Elle permet donc d'obtenir une image de la variabilité sur le plan horizontal du sol mais ne permet pas de distinguer de couches.

La conductivité électrique du sol (σ en S m⁻¹) dépend du type de matériau traversé, de la porosité et de la teneur en eau (Robinson *et al.*, 2008). Les mesures EM sont donc peu sélectives mais permettent d'identifier les ensembles ainsi que les fortes anomalies.

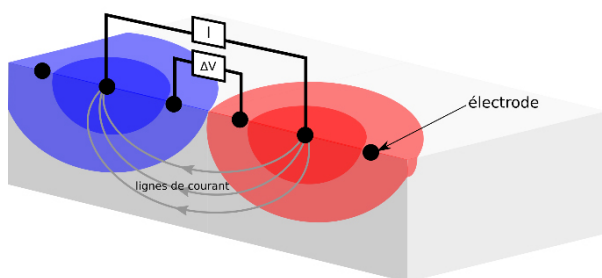
1.2.2. Tomographie de résistivité électrique (TRE)

La TRE permet la mesure de la résistivité électrique (ρ en Ω m⁻¹) qui est l'inverse de la conductivité électrique.

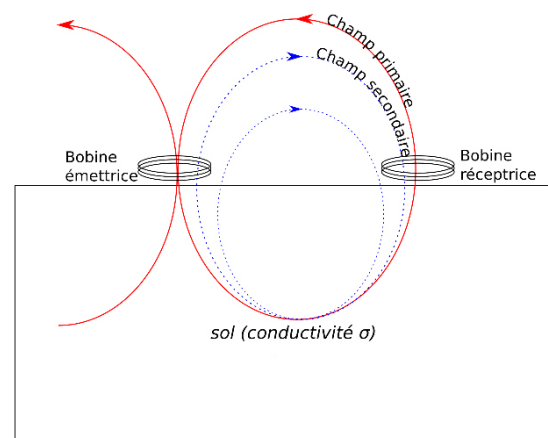
Une série d'électrodes est insérée dans le terrain à intervalles réguliers (le long d'une ligne pour une tomographie 2D et suivant une grille pour une tomographie 3D) et connectée à un résistivimètre. Un courant est ensuite injecté entre deux électrodes et un potentiel électrique est mesuré entre deux autres électrodes (Figure 2a). Le choix des électrodes d'injection et des électrodes de mesures se fait selon des schémas préétablis.

Le volume de la zone investiguée varie en fonction du schéma d'injection choisi ainsi que de l'espacement entre les électrodes. A la fin de la mesure, on obtient un ensemble de résistances apparentes obtenues en faisant le ratio entre le potentiel mesuré et le courant injecté et en le multipliant par un facteur géométrique qui dépend du schéma et de la distance entre les électrodes (Binley, 2005).

Dans cette étude un résistivimètre Syscal Pro (Iris Instruments) a été utilisé. Pour le site de Bègles les mesures ont été effectuées suivant des lignes de 35 m de long (tomographie 2D) composées de 96 électrodes (espacement de 37 cm). Pour le site de Vaux-Rouillac, 96 électrodes (correspondant au maximum de l'appareil utilisé) ont été disposées suivant une



a) Tomographie de Résistivité Électrique (TRE)



b) Conductimétrie électromagnétique

Figure 2 : Schémas de principe de la tomographie de résistivité électrique (a) et de la conductimétrie électromagnétique (b).

- (a) le courant est injecté entre deux électrodes (I) les différences de potentiel (champs bleu et rouge) induites sont mesurées au niveau de deux autres électrodes (ΔV)
 (b) la conductimétrie électromagnétique, la bobine émettrice génère un champ primaire qui induit un champ secondaire proportionnel à la conductivité du sol. L'intensité et le déphasage de ce dernier est mesuré à l'aide de la bobine réceptrice.

grille régulière de 1.3 m par 1 m couvrant une surface de 12 m par 8 m (tomographie 3D).

Les données ont ensuite été traitées par une étape appelée inversion qui repose sur l'utilisation d'un modèle numérique reproduisant la circulation du courant électrique dans le sol en fonction de sa résistivité. En partant d'un modèle ayant une résistivité homogène, on va progressivement la modifier jusqu'à ce que les résistances apparentes fournies par le modèle soient proches de celles observées sur le terrain.

1.3. Essais de pénétrométrie dynamique et géo-endoscopie

Les essais de pénétromètre sont communément utilisés pour déterminer les propriétés géotechniques des sols ou pour le contrôle du compactage. Ils permettent de connaître la résistance à l'enfoncement d'une pointe de section connue en fonction de la profondeur $qd(z)$. Cette grandeur est corrélée à la densité ($kN\ m^{-3}$) et permet à ce titre d'identifier des couches de nature différente (Benz Navarrete, 2009). La résistance de pointe, équivalente à une pression, est exprimée en MPa. Les mesures sont effectuées à une précision variant de quelques millimètres à 1 centimètre à l'aide d'un Panda 2 (Sol Solution).

Le pénétromètre seul ne permet pas une classification des matériaux traversés, mais un couplage avec d'autres sondages peut fournir une bonne image de la stratification d'un sol. Dans le cadre de cette étude les essais ont été couplés avec des sondages géo-endoscopiques qui permettent une acquisition in-situ d'images le long de la paroi du forage de l'essai de pénétrométrie (Forquet et al., 2012).

Un tube métallique, équipé d'une fenêtre latérale de 5 mm de largeur est inséré à la place du train de tige du pénétromètre. La sonde endoscopique est ensuite glissée dans le tube et des photographies sont prises à des intervalles réguliers de profondeur. L'appareil utilisé (Sol Solution) est équipé d'un capteur 640×480 pixels avec une résolution de $10\ \mu m$ par pixel.

La juxtaposition des pénétrogrammes et des courbes dérivées de l'analyse colorimétrique des images du géoendoscope peuvent confirmer les discontinuités identifiées avec le pénétromètre mais également mettre en évidence des changements de texture ou de structure qui n'induisent pas de différence de résistance de pointe. L'observation des images correspondantes aux couches identifiées aide à l'interprétation des discontinuités.

1.4. Tests d'infiltration

La mesure de la conductivité hydraulique à saturation est difficile compte-tenu de l'importance des effets transitoires dans la zone non saturée, de l'hétérogénéité du sol et de

l'influence des conditions initiales et aux limites. Il existe de très nombreuses techniques pour mesurer la conductivité hydraulique à saturation (Chossat, 2005). Certaines, reposant sur des hypothèses très fortes, nécessitent des temps de mise en œuvre très importants à l'instar du test de Porchet, souvent utilisé. D'autres, plus récentes, permettent une détermination plus rapide mais requièrent des mesures complémentaires comme la technique BEST (Lassabatère et al., 2006).

La méthode choisie dans cette étude est un test en forage à charge constante : un trou d'un diamètre de 0.1 m est réalisé à la tarière jusqu'à la profondeur voulue. Un dispositif permet ensuite de maintenir une hauteur d'eau constante tout au long de l'essai et les volumes infiltrés sont mesurés au cours du temps. L'essai s'achève lorsque le débit devient stable. Les tests d'infiltration ont été effectués avec un perméamètre automatique (Aardvark 2840 – Soil Moisture, USA). Cet appareil est adapté pour la mesure de conductivité hydraulique au champ (K_{fs}) comprise entre 10^{-4} et 10^{-10} (ms^{-1}).

A partir du débit mesuré, la conductivité hydraulique est estimée selon l'équation de Reynolds et Elrick (Elrick et al., 1989). Elle s'applique lorsque l'influence de la nappe est négligeable et demande une connaissance, au moins générale, de la texture du sol. L'équation pour une seule charge a été utilisée :

$$K_{fs} = \frac{C \cdot Q}{2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi \left(\frac{H}{a'}\right)} \quad (1)$$

avec K_{fs} la conductivité hydraulique au champ ($cm\ s^{-1}$), C un facteur de forme lié à la classe granulométrique du sol et calculé sur la base de la charge appliquée (-), Q le débit au régime permanent ($cm\ s^{-1}$), H la charge hydraulique appliquée dans le forage (cm), a le rayon du forage (cm) et a' un paramètre de la longueur capillaire macroscopique (cm^{-1}), lié à la granulométrie du sol.

2. Résultats et Discussion

Les résultats présentent différentes étapes du workflow proposé sur deux cas réels. (1) Une zone de la station de traitement des eaux usées de Vaux-Rouillac destinée à l'infiltration d'eau usée après traitement sur filtres plantés de roseaux et lagune. (2) Une parcelle de la station d'épuration de Bègles où ont été installés des pilotes de différents types de ZRV. La démarche complète sera essentiellement présentée sur un sol naturel, le site de Vaux-Rouillac. Ensuite une partie de la méthode sera montrée sur le site de Bègles. Ce dernier, étant un anthroposol, présente des particularités et anomalies qui montrent l'intérêt des techniques géophysiques appliquées.

2.1. Site de Vaux-Rouillac

2.1.1. Recherche d'informations existantes

D'un point de vue pédologique le site est classifié comme une colluvion calcaire. Il s'agit de formations superficielles de versants qui résultent de l'accumulation progressive de matériaux pédologiques provenant des parties plus en hauteur du paysage. Ils sont généralement constitués d'argiles et d'éléments plus grossiers (Baize and Girard, 2008), et conservent certaines caractéristiques minéralogiques des sols dont ils dérivent. La zone étudiée était dans le passé occupée par des lagunes, par conséquent les horizons plus superficiels du sol ne sont plus présents ; de plus, sur la base des lagunes, une couche imperméable d'argile avait été appliquée. D'après les informations fournies par le constructeur de la nouvelle station, cette couche a été retirée lors de l'aménagement des zones d'infiltration et leur surface recouverte par 30-40 cm de gravier de type calcaire.

2.1.2. Etapes 2 et 3 : Identification des hétérogénéités horizontales et verticales

Si l'on néglige les mesures à la périphérie de zone d'investigation perturbées par la présence de talus, Les conductivités électriques mesurées avec l'EM sont relativement homogènes sur la totalité du site. Il n'y a pas d'anomalie à noter. Compte-tenu de l'homogénéité de surface, la TRE a été effectué suivant une grille régulière sur une moitié de la zone. Après inversion, le modèle numérique de la distribution de résistivité électrique estimée permet d'obtenir des résultats très proches des résistances apparentes mesurées ($RRMS^1 = 3.05\%$). Les résultats mettent en évidence une anomalie importante de forte résistivité à proximité du point d'alimentation (Figure 4). Cette anomalie n'avait pas été observée lors de la mesure avec le conductimètre électromagnétique car elle se trouve en bordure de la zone d'investigation et est de faible taille (la résolution de la TRE est supérieure à celle du conductimètre électromagnétique lorsque ce dernier est utilisé pour une exploration rapide). Partout ailleurs, les variations de résistivité sont négligeables ce qui corrobore les résultats obtenus avec le conductimètre électromagnétique. Nous avons donc choisi d'effectuer des sondages pénétrométriques (21) suivant une grille régulière ainsi qu'au niveau de l'anomalie. Le nombre important de sondage se justifie par le besoin de tester dans cette étude la méthodologie proposée, un nombre plus restreint aurait pu être sélectionné compte-tenu de l'homogénéité du site.

Les sondages pénétrométriques ont été effectués jusqu'à une profondeur de 2.5 m. Dans les mêmes forages ont été effectués les observations endoscopiques. Sur l'ensemble des essais effectués, nous avons pu identifier la présence d'une couche plus résistante. A titre d'exemple, la Figure 5 présente le résultat du sondage 8. Sur la droite figure le pénétrogramme donnant la résistance de pointe en fonction de la profondeur et sur la gauche se trouvent des photos du sondage géo-endoscopique correspondantes aux principales couches identifiées avec le pénétromètre.

(1) Erreur quadratique moyenne relative.

Les photos permettent de relier les résistances observées à la structure et à l'aspect du sol pour une première interprétation. On observe sur les 30-40 premiers centimètres le gravier reporté. La couche plus résistante (encadrée par des lignes rouges sur la Figure 5) semble être caractérisée par une texture plus fine et compacte. Cette couche n'est pas identifiée à la même profondeur (entre 50 et 100 cm) sur l'ensemble du site, de même la valeur de sa résistance et son épaisseur varient (entre 5 et 30 cm). Elle n'a pas été identifiée lors de la mesure de TRE car son épaisseur est trop faible. En dessous se retrouve un mélange de particules plus grossières dans une texture globalement fine et ensuite une couche plus claire sableuse.

Les tests d'infiltration ont été ciblés pour mesurer la conductivité hydraulique des trois couches identifiées (Tableau 1) : la couche ayant une résistance de pointe supérieure (couche intermédiaire) et les couches se trouvant au-dessus (couche supérieure) et en-dessous (couche inférieure).

2.1.3. Etape 4 : Mesure de la conductivité hydraulique à saturation

Des analyses granulométriques sur des échantillons prélevés (Tableau 2) n'ont pas mis en évidence de différences texturales significatives entre la couche supérieure et la couche intermédiaire si ce n'est un taux de limons légèrement plus élevé. Les différences semblent être d'ordre structural, avec une porosité moindre, comme l'indique la valeur de résistance de pointe plus élevée. La couche inférieure présente quant à elle une teneur en sable significativement plus élevée ce qui explique les valeurs plus élevées de conductivité hydraulique au champ.

Ces mesures indiquent que la couche intermédiaire est la couche limitante d'un point de vue hydraulique (tout du moins tant que la couche de surface n'est pas colmatée) et que son épaisseur et sa conductivité doivent être pris en compte dans l'estimation des débits susceptibles de s'infiltrer.

L'anomalie observée avec la TRE a pu également être expliquée grâce aux sondages. En effet sur cette partie du site la couche de gravier de surface avait une épaisseur beaucoup plus importante (70-80 cm).

2.2. Site de Bègles

2.2.1. Recherche d'informations existantes

Les photos aériennes du site (Figure 6), disponible depuis 1924, montrent une utilisation agricole jusqu'aux années 80. Un chemin était présent au milieu de la parcelle. Dans les années 80 apparaît l'autoroute à l'ouest de la parcelle. En 2002 la station de d'épuration est construite et elle s'agrandit jusqu'en 2006, la zone d'étude est impactée par le chantier pendant cette période de travaux. Le sol est fortement perturbé par les travaux et des débris et déchets de construction sont enfuis dans la zone.

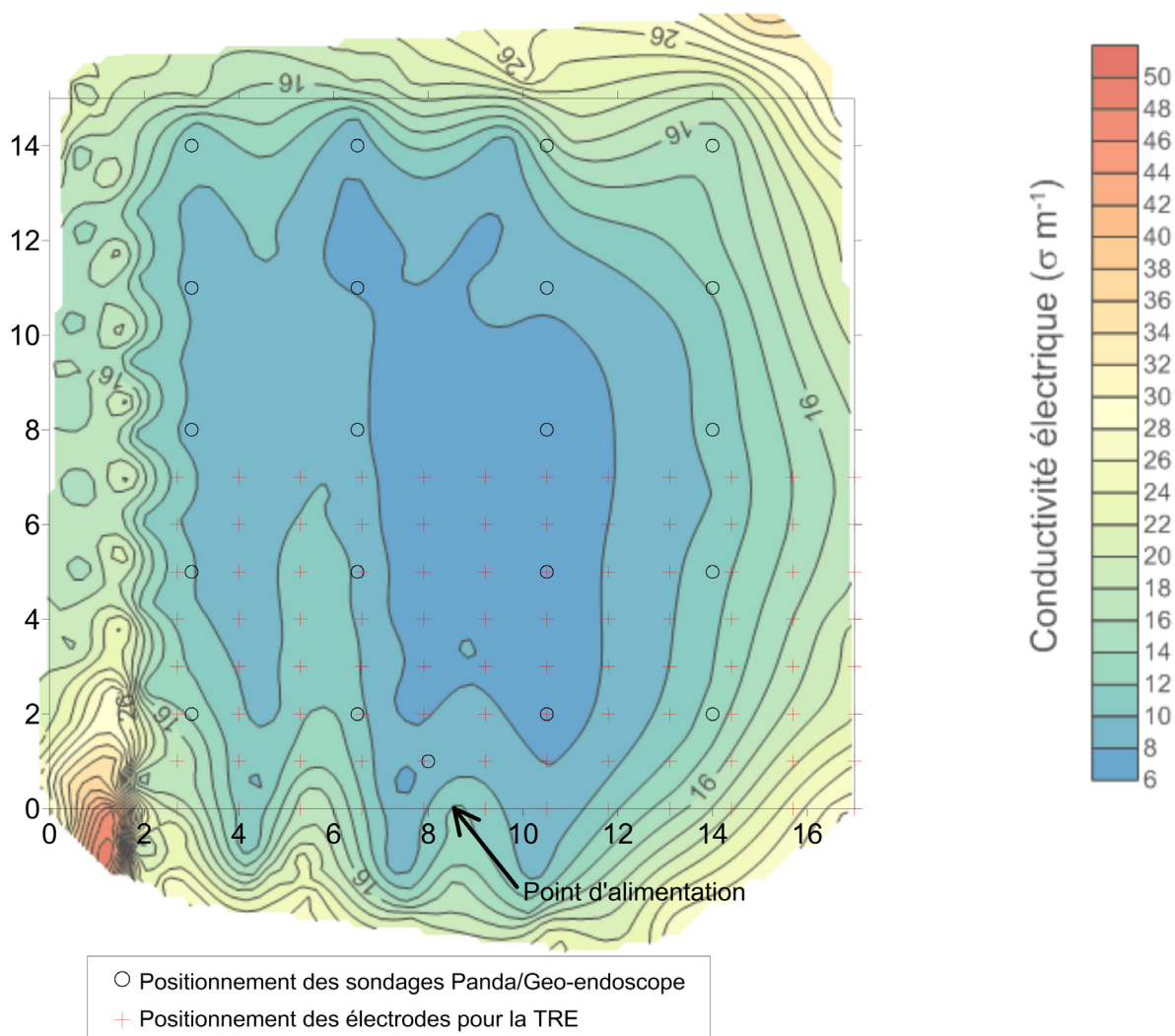


Figure 3 : Résultats de la mesure de la conductivité électrique et positionnement des électrodes de la tomographie de résistivité électrique ainsi que des sondages de pénétrométrie et de géo-endoscopie

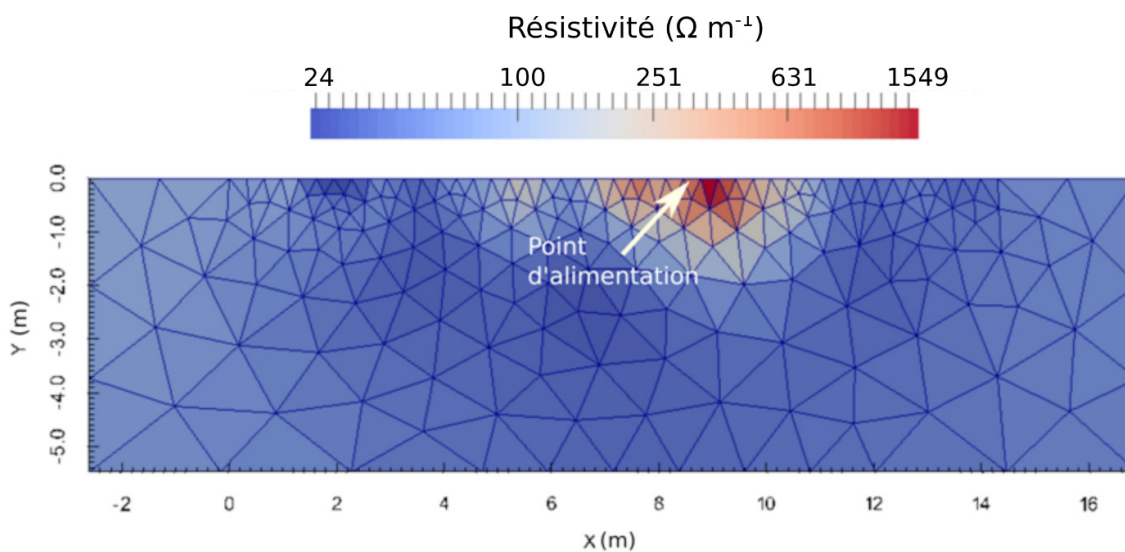


Figure 4 : Coupe obtenue par TRE mettant en évidence une anomalie au niveau du point d'alimentation de la paire d'infiltration

Tableau 1 : Conductivité hydraulique au champ des différentes couches

	Conductivité hydraulique au champ K_{fs} ($m\ s^{-1}$)
Couche supérieure	$[5.9\ 10^{-6}; 1.0\ 10^{-5}]$
Couche intermédiaire	$[8.6\ 10^{-8}; 3.5\ 10^{-7}]$
Couche inférieure	$[1.0\ 10^{-5}; 2.0\ 10^{-4}]$

Tableau 2 : Analyses granulométriques des différentes couches

	Argiles ($< 2\ \mu m$)	Limons ($2 - 50\ \mu m$)	Sables ($50 - 2\ 000\ \mu m$)
Couche supérieure	5 %	43 %	52 %
Couche intermédiaire	5 %	50 %	45 %
Couche inférieure	3 %	30 %	67 %

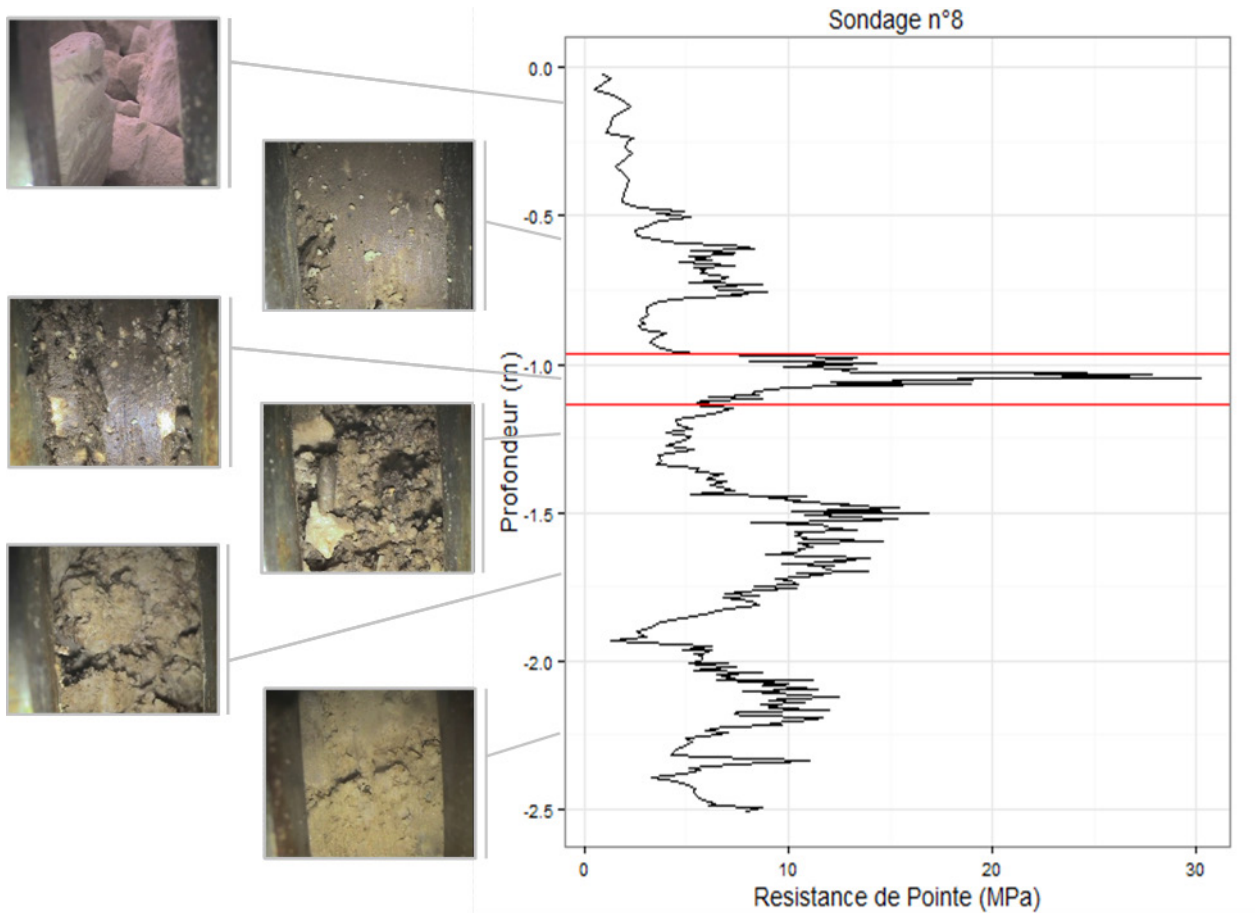


Figure 5 : Exemple de résultats pour les essais de pénétrométrie et photos prises avec le géo-endoscope relatives aux couches identifiées

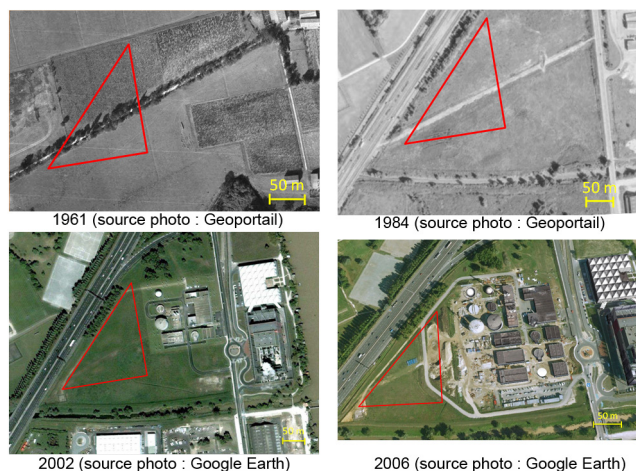


Figure 6 : Evolution de la parcelle dans le temps. Le triangle rouge représente la zone étudiée.

Le mélange de sol naturel et de débris de construction et la forte perturbation des horizons font classer ce sol en anthroposol artificiel (Baize and Girard, 2008) avec des matériaux anthropologiques mélangés à des matériaux originaux du site. Les éléments grossiers, comme souvent observé dans ce type de sol, sont abondants; on y retrouve des fragments de roche mais également des artefacts (maçonneries...). L'hétérogénéité est l'une des caractéristiques récurrentes de ces sols, par conséquent les sondages géophysiques sont particulièrement adaptés pour distinguer les zones différentes et pour identifier la présence d'éléments de grande taille.

2.2.2. Etape I

Le premier essai effectué est la mesure de la conductivité électromagnétique dont les résultats sont présentés en Figure 7.

Cette méthode, non-invasive, permet rapidement d'avoir une bonne couverture spatiale et d'avoir une première identification des variations d'un site. Puisque les mesures intègrent les valeurs sur toute la profondeur elles ne permettent pas d'apprécier les variations sur la verticale ni de localiser précisément la profondeur des anomalies.

Sur le site étudié, l'EM a mis en évidence la présence de fortes anomalies. En tenant compte des informations disponibles sur le site, les résultats conduisent à une première interprétation de ces anomalies (Plan I - Figure 7). Au nord de la parcelle (zone bleu clair) on trouve une zone d'anomalie importante conséquence de l'exploitation pour le stockage des matériaux lors de la construction de la station. Au centre de la parcelle (zone grise) on observe des valeurs de résistance électrique plus importante, dues aux restes d'une conduite en béton armé et d'une ancienne voirie bien visible sur la photo aérienne de 1961 (Figure 6). Cette méthode a également permis d'identifier la

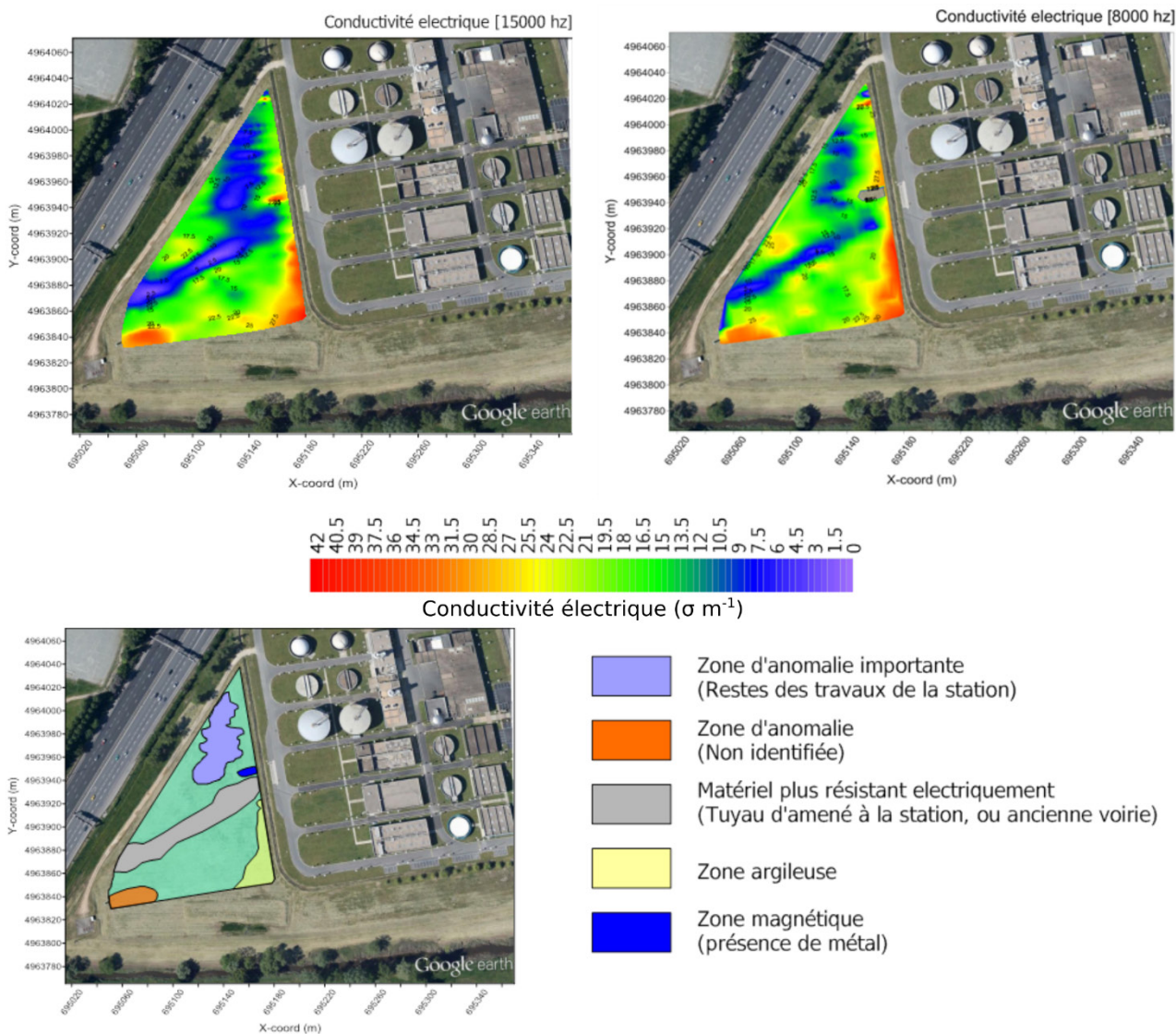


Figure 7 : Résultats des mesures de conductivité électromagnétique à 8000 Hz et 15000 Hz et définition du Plan I

présence de déchets métalliques (zone bleu foncé) ainsi qu'une zone plus conductrice. Cette identification, croisée avec les éléments obtenus par les recherches d'informations existantes, permet de faire l'hypothèse de la présence d'une couche argileuse dans la zone colorée en jaune.

2.2.3. Etape 2

Pour compléter les résultats de conductimétrie électromagnétique avec des informations sur la variabilité verticale, des sondages TRE sur plusieurs lignes ont été effectués. Le choix des lignes (visibles sur la Figure 8) a été fait afin d'avoir une vision d'ensemble de la parcelle et de mieux définir les anomalies et discontinuités observées avec le conductimètre électromagnétique.

Les sondages TRE sont cohérents avec les observations précédentes. On peut par exemple observer sur les lignes ERT-09 et ERT-08 (Figure 8) une zone de forte résistance centrale et sur la ligne ERT-01 la zone plus conductrice. La TRE permet d'identifier la profondeur des anomalies et la variabilité verticale du sol. Ainsi on peut observer qu'une couche plus conductrice est présente en profondeur sur la presque totalité de la parcelle. Cette information, couplée aux informations géologiques sur le site, nous permet d'établir l'hypothèse que cette couche plus conductrice correspond aux argiles des palus (formation géologique fluviatile caractéristique du secteur de Bègles). La présence de cette couche est très importante car elle contrôle l'hydrodynamique du site. L'eau qui s'infiltrer par le remblai va glisser sur cette couche et suivre son inclinaison jusqu'aux fossés de drainage entourant la parcelle.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La méthodologie présentée permet d'obtenir en un temps raisonnable (de un à deux jours suivant la résolution souhaitée et l'hétérogénéité du site à investiguer) un modèle conceptuel des structures du sol susceptibles d'influencer l'infiltration de l'eau usée traitée avec une large couverture spatiale et un bon détail d'information grâce à la superposition des différentes techniques. De plus les méthodes proposées ont une perturbation nulle ou minimale sur le sol (il n'est pas nécessaire de creuser de fosse d'observation).

Le workflow proposé n'est pas à considérer comme un protocole fixe mais comme un exemple. Selon les conditions du site (accessibilité par ex.) certaines techniques peuvent être plus difficiles à appliquer. D'autres techniques peuvent être appliquées en substitution ou en complément de celles proposées dans cette étude.

Cette méthodologie a permis de guider le positionnement des tests d'infiltration ainsi que leur profondeur. Avec un nombre limité de test d'infiltration, on obtient ainsi une meilleure représentativité des caractéristiques hydrauliques par rapport à un plan de mesure aléatoire.

Tell qu'il a été observé sur le site de Bègles, les méthodes géophysiques sont très intéressantes pour l'étude des anthroposols, caractérisés par une forte hétérogénéité et la présence d'artefacts.

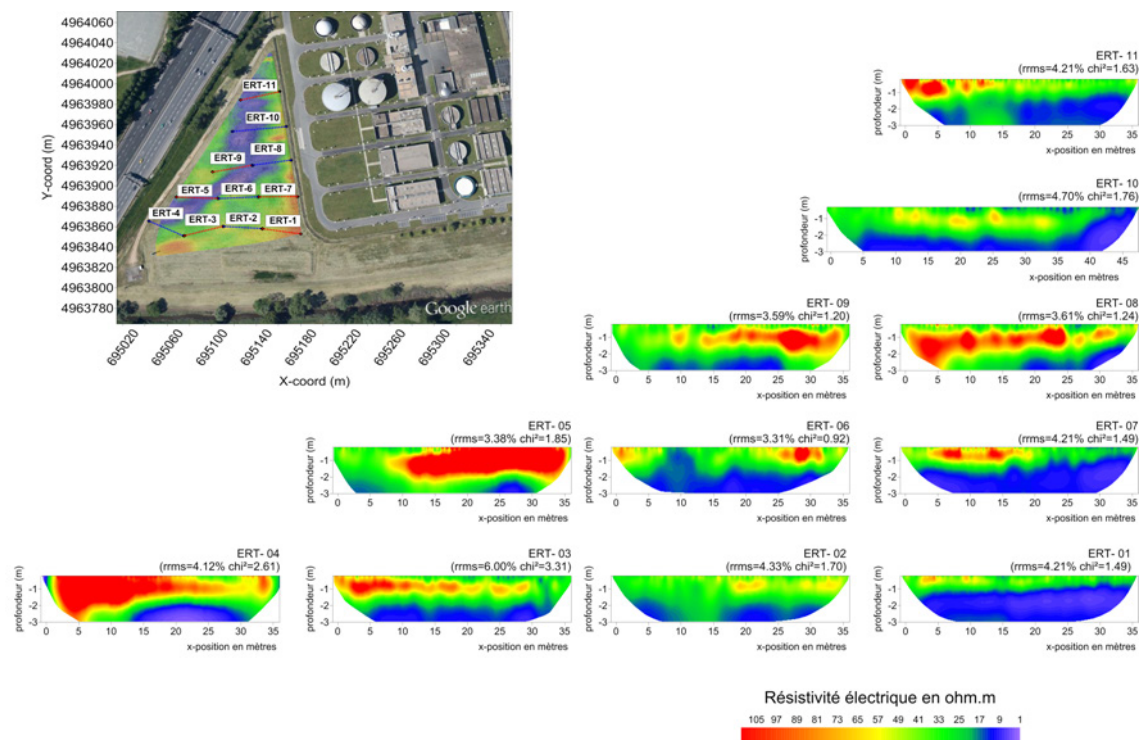


Figure 8 : Profils de TRE obtenus sur le site de Bègles. Le plan en haut à gauche reprend les résultats de conductimétrie électromagnétique et situe les différents profils de TRE

Les informations obtenues sont indispensables pour effectuer un bon dimensionnement de la zone d'infiltration ou de la ZRV. Les plans obtenus peuvent notamment être directement inclus dans un modèle numérique en y associant des données complémentaires provenant de piézomètres et de relevés météorologiques afin de modéliser les écoulements de la surface jusqu'à la nappe et ainsi mieux estimer les volumes pouvant être infiltrés.

Références bibliographiques

- Baize D. & Girard M.-C., (2008). Référentiel pédologique 2008, Editions Quae, Savoir Faire. Versailles, 359 p. En ligne : http://www.afes.fr/afes/docs/Referentiel_Pedologique_2008.pdf - lien valide le 11 juillet 2017.
- Bekele E., Toze S., Patterson B. & Higginson S., (2011). Managed aquifer recharge of treated wastewater: Water quality changes resulting from infiltration through the vadose zone. *Water Research* 45, pp: 5764–5772. <https://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.058>
- Benz Navarrete M.A., (2009). Mesures dynamiques lors du battage du pénétrromètre Panda 2. Thèse GC, Université Blaise Pascal – Clermont II, 230 p. En ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00725564> - lien valide le 11 juillet 2017.
- Binley A., Hubbard S.S., Huisman J.A., Révil A., Robinson D.A., Singha K. & Slater L.D., (2015). The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water Resources Research* 51, pp: 3837–3866. <https://dx.doi.org/10.1002/2015WR017016>.
- Binley A., (2005). DC Resistivity and Induced Polarization Methods. In: *Hydrogeophysics*, Springer, pp 129-156. https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_5
- Bisone S., Gautier M., Masson M. & Forquet N., (2017). Influence of loading rate and modes on infiltration of treated wastewater in soil-based constructed wetland. *Environmental Technology* 38. <https://dx.doi.org/10.1080/09593330.2016.1185165>
- Bosc N., Boucheische, C., (2000) Les rivières eutrophisées prioritaires du SDAGE. Stratégies d'actions. Note technique n° 3 SDAGE Rhône Méditerranée Corse. <http://siem.eaurmc.fr/sdage/documents/note-tech-3.pdf> - lien valide le 11 juillet 2011
- Boutin C., Prost-Boucle, S., (2012) Note de présentation : Les zones de rejet végétalisées. *Sciences Eaux & Territoires* 9, pp : 36-43. En ligne : https://www.cairn.info/load_pdf.php?ID_ARTICLE=SET_009_0004 - lien valide le 11 juillet 2017.
- Chossat J.C., (2005). La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols. Tec et Doc – Lavoisier, 720 p.
- Erick D.E., Reynolds W.D. & Tan K.A., (1989). Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Groundwater Monitoring Remediation* 9, pp: 184–193. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6592.1989.tb01162.x>
- EPNAC, (2013). Contenu des études préalables à la réalisation d'une Zone de Rejet Végétalisée. En ligne : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2013/04/Guide-etudes-sols-ZRV_EPNAC_mars2013.pdf - lien valide le 11 juillet 2017
- French H.K., Kästner M. & van der Zee S.E.A.T.M., (2014). New approaches for low-invasive contaminated site characterization, monitoring and modelling. *Environmental Science Pollution Research* 21, pp: 8893-8896. <https://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-2840-9>
- Forquet N., Boutin C., Breul P., (2012) Contrôle des installations d'assainissement non collectif : l'apport déterminant des outils de diagnostic non destructifs. *Sciences Eaux et Territoires* 9 : pp : 98-101. En ligne : <https://www.cairn.info/revue-sciences-eaux-et-territoires-2012-4-page-98.htm> - lien valide le 11 juillet 2017.
- Kästner M., Braeckvelt M., Doberl G., Cassiani G., Prestangeli Papini M., Leven-Pfister C. & van Ree D., (2012). Model-driven soil probing, site assessment and evaluation - Guidance on technologies. Sapienza Università Editrice, Rome.
- Lassabatère L, Angulo-Jaramillo R., Soria Ugalde J.M., Cuenca R., Braud I., Haverkamp R., 2006. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through infiltration experiments –BEST. *Soil Science Society of America Journal*. 70, pp : 521-532. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0026>
- Martins J.M.F., Majdalani S., Vitorge E., Desaunay A., Navel A., Guiné V., Daian J.F., Vince E., Denis H. & Gaudet J.P., (2013). Role of macropore flow in the transport of *Escherichia coli* cells in undisturbed cores of a brown leached soil. *Environmental Sciences: Processes and Impacts* 15, pp: 347–356. <https://dx.doi.org/10.1039/C2EM30586K>
- McKinley J.W. & Siegrist R.L., (2011). Soil Clogging Genesis in Soil Treatment Units Used for Onsite Wastewater Reclamation: A Review. *Critical Reviews in Environmental Sciences and Technology* 41, pp: 2186 - 2209. <https://dx.doi.org/10.1080/10643389.2010.497445>
- MEDDE (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie), (2015). Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5. Journal Officiel de la République Française, 19 août 2015. En ligne : <http://www.assainissement-non-collectif.developpement-durable.gouv.fr/publication-de-l-arrete-du-21-juillet-2015-anc-20-a650.html> - lien valide le 11 juillet 2017.
- Robinson D.A., Binley A., Crook N., Day-Lewis F.D., Ferré T.P.A., Grauch V.J.S., Knight R., Knoll M., Lakshmi V., Miller R., Nyquist J., Pellerin L., Singha K. & Slater L., (2008). Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: a vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods. *Hydrological Processes* 22, pp : 3604–3635. <https://dx.doi.org/10.1002/hyp.6963>