



Etude des sites contaminés par imagerie électrique : Cas du centre d'enfouissement technique de Berkane (Maroc) Electrical imaging study of contaminated sites: the case of a landfill site in Berkane (Morocco)

Amine Chaïeb (1), Driss Khattach (1), Olivier Kaufmann (2), Mohammed Chaïeb (3)

1 : Laboratoire des Géosciences appliquées et COSTE, Faculté des Sciences, Université Mohamed I, Oujda, Maroc

2: Faculté Polytechnique, Université de Mons, Belgique

3: B .E. MEDIGEOL Oujda, Maroc

Received 22 Apr 2016, Revised 15 Jun 2016, Accepted 18 Jun 2016

*Corresponding author. E-mail: chaieb.gc.2012@gmail.com Phone:0624659091

Abstract

The diagnosis and monitoring of landfill sites are important environmental issues. In this context, geophysical methods can give a lot of information, because the presence of a contaminant in soil or groundwater changes the electrical properties of the medium. This paper presents the results of the application of electrical tomography at Landfill of Berkane. Six profiles were carried out between 2006 and 2015 in and outside the Landfill with lengths ranging from 115 to 235m. They show the distribution of electrical resistivity in the basement at depths of 20 to 50m. The profile performed above the first cell indicates that the layer of waste mixed with leachate has a thickness of about 8m and very low electrical resistivity between 0.5 and 10 Ω m. Profiles performed in the vicinity of the cell show two electrical layers : a subsurface layer characterized by a thickness from 5 to 15 meters and very high resistivity values up to 200 Ω m; it overlies a highly conductive layer (resistivity values varies from 3 to 10 Ω m). This last layer is associated to the water table at depths ranging from 5 to 15m. The low resistivity values are related to the high mineralization of groundwater. The study attributes this mineralization mainly to geological and hydrogeological context; nevertheless it does not exclude a possible pollution due to leakage of leachate into groundwater.

Keywords: pollution, leachate, groundwater, electrical resistivity tomography of, groundwater.

Résumé:

Le diagnostic et le suivi des sites des décharges représentent des enjeux environnementaux importants. Dans ce cadre, les méthodes géophysiques peuvent apporter un grand nombre d'informations, car la présence d'un polluant dans un sol ou dans une nappe souterraine modifie les caractéristiques électriques du milieu. Cet article présente les résultats de l'application de la tomographie électrique au site du Centre d'Enfouissement Technique de Berkane (CET). Six profils ont été réalisés entre 2006 et 2015 à l'intérieur et à l'extérieur du CET avec des longueurs allant de 115 à 235m. Ils indiquent la répartition des résistivités électriques dans le sous-sol à des profondeurs allant de 20 à 50m. Le profil réalisé au dessus du premier casier montre que la couche de déchets mélangés au lixiviats à une épaisseur d'environ 8m et des résistivités électriques très faibles comprises entre 0.5 et 10 Ω m. Les profils réalisés à l'extérieur du casier indiquent la présence d'une couche superficielle caractérisée par une épaisseur allant de quelques mètres à 15m et de valeurs de résistivité très élevées dépassant, par endroits, 200 Ω m; elle surmonte une couche très conductrice (valeurs de résistivité 3-10 Ω m). Cette dernière couche correspond à la nappe phréatique située à des profondeurs qui varient entre 5 et 15m. Les faibles valeurs de résistivités sont liées à la forte minéralisation de cette nappe. Cette étude attribue cette minéralisation principalement au contexte géologique et hydrogéologique; néanmoins elle n'exclue pas une éventuelle pollution par le CET due à une fuite des lixiviats vers la nappe.

Mot clé : Décharge, pollution, eaux souterraines, tomographie de résistivité électrique.

1. Introduction :

Les décharges contrôlées ou Centres d'Enfouissement Techniques (CET) n'ont fait leurs apparition au Maroc que depuis une dizaine d'années. Ces centres de stockage de déchets ménagers et assimilés doivent avoir une

modalité de contrôle afin de prévenir toute fuite ou dysfonctionnement. Cette surveillance devrait être basée sur des analyses physico-chimiques régulières des eaux souterraines via des piézomètres implantés en amont et en aval hydraulique. Le CET de Berkane est l'une des premières décharges contrôlées du pays et qui a démarré en 2004. Les lixiviats du premier casier ont fait l'objet durant la période 2006-2008 d'une caractérisation physico-chimique [1, 2]. Les résultats de ces études ont révélé une forte minéralisation des lixiviats avec une salinité moyenne d'environ 20 g.L⁻¹ et une conductivité électrique autour de 25 mS.cm⁻¹. Par ailleurs une caractérisation physico-chimique des eaux souterraines a été menée au niveau des puits existant dans les alentours immédiats du site [3]. Les résultats ont mis en évidence une forte minéralisation de ces eaux et des teneurs élevées en Pb. Les auteurs attribuent cette dégradation des eaux souterraines principalement au contexte géologique et hydrogéologique et n'excluent pas une éventuelle contamination associée à une fuite de lixiviats. Cependant, il faut noter que le nombre et la disposition des puits existant sont insuffisants pour une évaluation environnementale. En effet, tous les puits sont situés en amont hydraulique. Pour pallier à l'absence d'un système de piézomètres, nous avons eu recours à l'application de l'imagerie électrique pour imager le sous-sol du site en se basant sur la mesure de la résistivité électrique. Cette méthode géophysique s'applique bien aux sous sols constitués de couches stratifiées présentant un bon contraste de résistivité entre elles. Elle a été utilisée par plusieurs auteurs dans le suivi et le diagnostic des sites contaminés [4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15]. Le but de ce travail est d'apporter des informations hydrogéologiques plus détaillées sur le site de la décharge (profondeur et épaisseur de la nappe) et de caractériser les zones saturées en eau par leur résistivité électrique.

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Le Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Berkane

Le CET est accessible à partir de la RN2 PK 508 avec une piste d'environ 1,4 km; Il se situe à environ 7 km à l'ouest de la ville de Berkane (sur la route de Nador). Sa superficie est environ 10 hectares. Le site reçoit quotidiennement environ 200 tonnes de déchets ménagers [15]. Les levés géophysiques par imagerie électrique du premier casier de cette décharge, effectués entre 2006 et 2015, indiquent des valeurs fortes élevées en conductivités.

1.2. Contexte géologique, hydrologique et hydrogéologique

1.2.1 Géologie

Le C.E.T est situé dans le flanc nord ouest du massif des Béni-Snassen (Fig.1). Cette localité est composée de formations géologiques datées du Callovo-oxfordien à Kimméridgien (Jurassique moyen –supérieur) puis d'une couverture quaternaire [15]. En profondeur (sondage de reconnaissance de Fezouane- 2008), on rencontre une série détritique fine composée d'alternances argilo-marno-silteuse essentiellement avec des passées de grés et de siltites à lamines dynamique à sédimentation de type laguno-marin (deltaïque) d'où une contamination salifère des sédiments (Fig.2). Ces alternances, d'une centaine de mètre de puissance appartiennent à la séquence IV de la formation des Grés de Béni Ourimeuche [15], à proximité du C.E.T. au nord et à l'est, cette lithologie est coiffée par une épaisse barre gréseuse d'une vingtaine de mètre de puissance du même âge que les alternances, le tout est fracturé et affecté par des décrochements à composantes inverses (Plan de faille NS- Strie 35° SSO - S0 NS 30 E) . Cette formation repose sur la formation d'Anou Midra (80m) d'âge bathonien inférieur, ces formations sont en série monoclinale d'inclinaison vers le nord d'une trentaine de degré. La couverture quaternaire est composée d'une croûte calcaire métrique du quaternaire moyen puis de limons bruns supérieurs et de cailloutis du quaternaire récent [15].

Dans la zone piémontaise (lieu du CET) il se peut qu'on rencontre des niveaux d'évaporites, puisqu'ils existent en plaine à quelques km au Nord du site. Ces évaporites appartenant au néogène, sont des roches marneuses à marno-calcaires constituées de sel, gypse, barytine etc.

Les terrains quaternaires coiffent l'ensemble des formations par le dépôt de conglomérat, de tufs et de croute calcaire.

1.2.2 Hydrologie-Hydrogéologie

A une altitude de 170 m, le CET se trouve dans la zone de piémont à 2km des sommets culminant à 400 m (Fig.1). Les écoulements des eaux superficielles connaissent un régime turbulent lors des périodes pluviales. (Pente topographique 8 %) vers le nord. Ces eaux de ruissèlements se dirigent vers l'Oued Chabrene vers le nord, confluent de l'Oued Chra affluent de la Moulouya

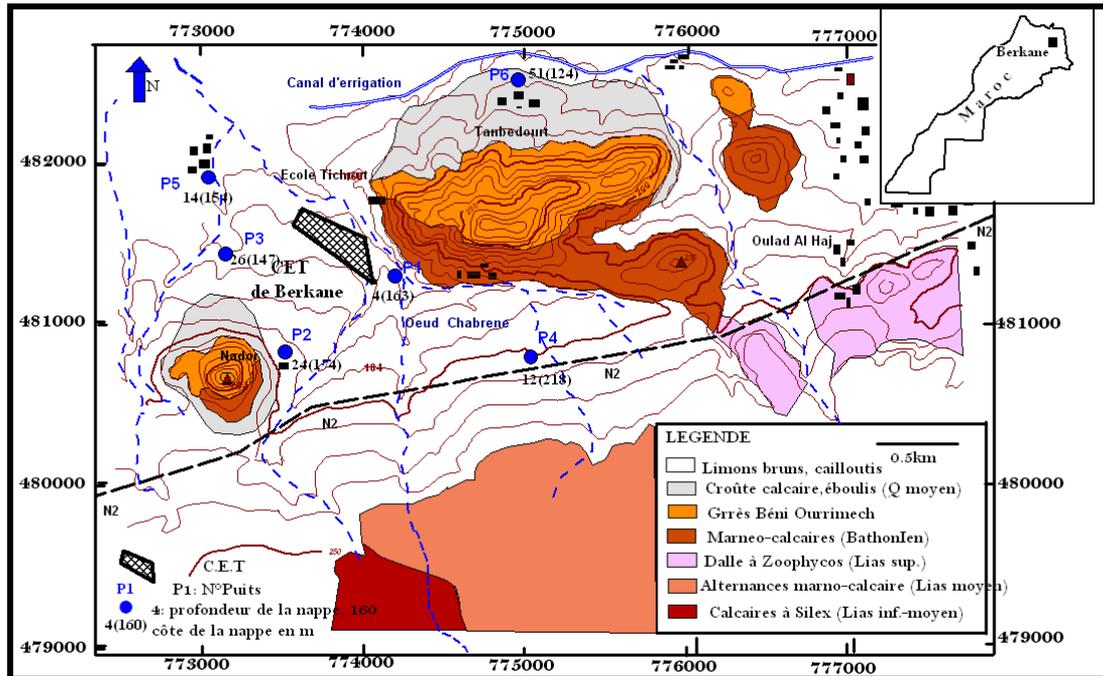


Figure 1: Carte géologique et localisation du CET de Berkane (coordonnées Lambert en m) [15].

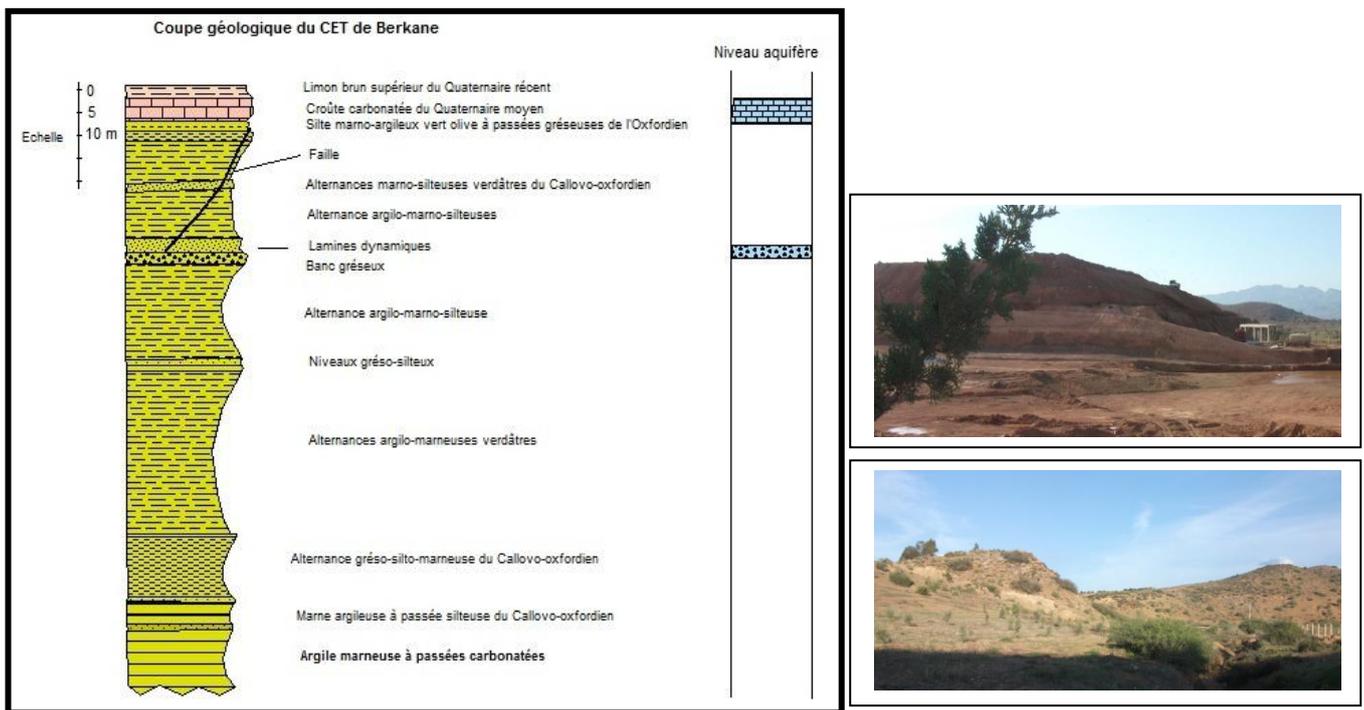


Figure 2: Coupe géologique au niveau du C.E.T. de Berkane, à droite photo en haut et au fond affleurement de marne argilo-silteuses verdâtres ; en bas alternance marne argileuse et silts en contact anormal (trace blanchâtre) avec la barre gréseuse oxfordienne

Vu son substratum carbonaté, le massif des Béni Snassen constitue le château d'eau pour la plaine de Triffa. Le flanc nord du massif des Béni-Snassen et sa zone piémontaise comportent deux unités hydrogéologiques distinctes. La 1^{er} unité est composée de :

- la nappe profonde captive encaissée dans les dolomies du Lias inférieur (continuité de la nappe profonde vers l'Oued de Fezouane, Ichoun et Aghbal) sa profondeur est de 700 m son débit est de 2 l/s et la qualité de ses eaux est bonne. La puissance de l'aquifère est supérieure à 150 m

- La nappe captive de la dalle à Zoophycos est caractérisée par une capacité moyenne et une bonne qualité des eaux. La puissance de l'aquifère est d'une soixantaine de mètres
 Dans la zone piémontaise du CET du massif des Béni Snassen, on a une deuxième unité hydrogéologique constituée par la nappe libre dans les Grés de Béni Ourimeuche. Sa profondeur est de quelques dizaines de mètres, son débit est de 1 l.s^{-1} et la qualité des eaux est médiocre (contaminée par les évaporites néogènes).
 Le dernier aquifère de la seconde unité hydrogéologique est celui lié aux terrains quaternaires d'une profondeur moyenne d'une dizaine de mètres. La qualité des eaux de cet aquifère est médiocre à cause d'une forte salinité qui peut être liée aux sels constituant les roches évaporitiques du néogène (Fig.3). La concentration en sel des eaux varie de 4 à plus de 8 g.L^{-1}

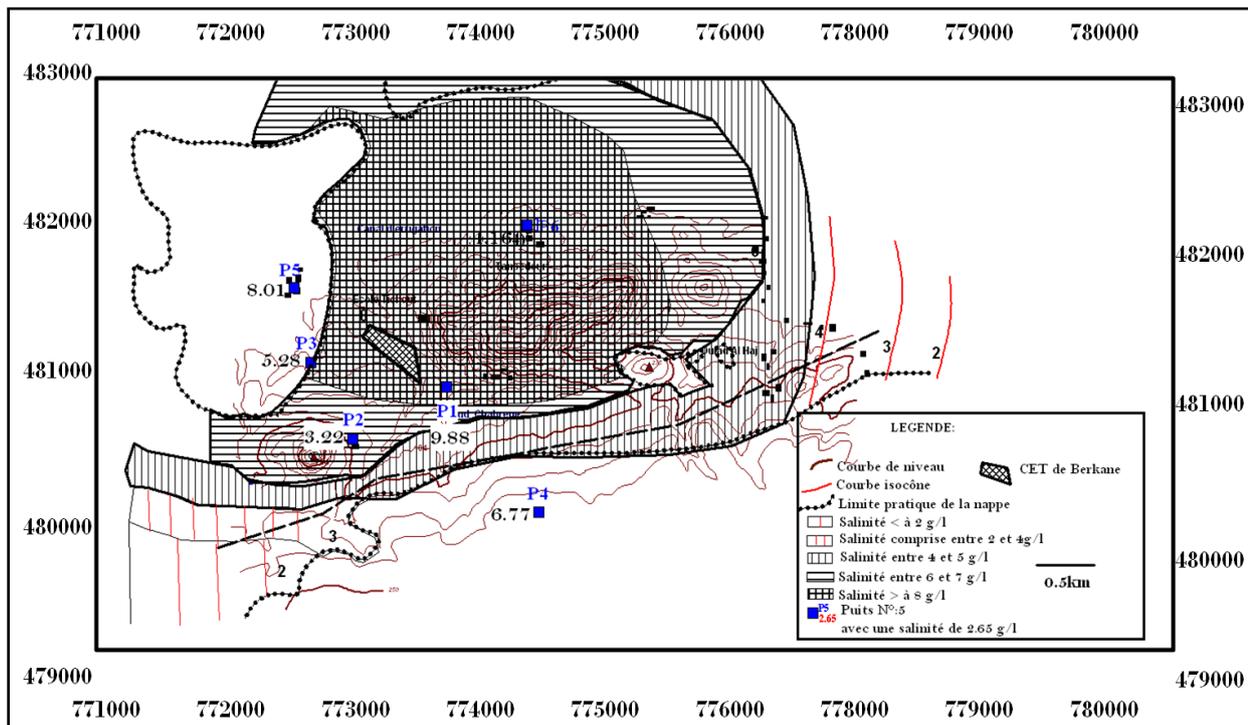


Figure 3 : Carte de salinité des eaux de la nappe d'après les mesures faites en 1966 [16] et les valeurs mesurées en novembre 2013 au niveau de six puits (P1 à P6) avoisinant le C.E.T. [3]

2. Matériel et méthode

Une prospection par tomographie électrique a été réalisée au niveau du site d'étude pour cartographier la distribution des résistivités dans le sous-sol. Deux campagnes ont été effectuées l'une en 2006 et l'autre en 2014. Au total six profils ont été réalisés selon les dispositifs Wenner et Dipôle-Dipôle et en utilisant le système Syscal Pro (Iris Instruments). Les caractéristiques des différents profils sont résumées dans le tableau I. Pour améliorer le rapport signal sur bruit un stack d'ordre 3 à 6 a été adopté. Les mesures obtenues ont été d'abord filtrées par le logiciel Prosys II pour éliminer les données de mauvaise qualité. Pour passer des résistivités mesurées aux résistivités vraies les données ont été inversées en utilisant le logiciel RES2DINV. Les sections obtenues indiquent la distribution des résistivités électriques sous les lignes des profils réalisés (Fig.4).

3. Résultats et discussion

Les sections montrent les modèles de résistivité issus de l'inversion des données (Figs.5-9). Le dispositif Dipôle-dipôle a permis d'atteindre, pour les profils P1, P4, P5 et P6, une profondeur d'investigation allant jusqu'à 53 m, alors que le dispositif de Wenner a permis d'atteindre, pour les profils P4, P5 et P6, une profondeur d'investigation de 35 m. Les sections de résistivités obtenues par les deux dispositifs donnent globalement les mêmes images pour les faibles profondeurs.

Tableau 1 : Caractéristiques des profils d'imagerie électrique W : Wenner DD : Dipôle-Dipôle

Profils	Dispositif	Nombre des électrodes	Espace inter-électrodes (m)	Mesures	Longueur (m)	Profondeur max (m)	Itérations	Erreur (%)
P1	DD	40	5	325	200	36	5	8.1
P2	DD	20	5	145	100	24	7	4.7
P3	DD	20	5	182	120	24	6	6.1
P4	DD	48	5	1102	200	53	5	9
P4	W	48	5	265	200	40	7	3.4
P5	DD	48	5	914	235	53	6	7.2
P5	W	48	5	230	235	35	7	2.7
P6	DD	48	5	975	235	53	4	8
P6	W	48	5	260	235	35	6	2.8

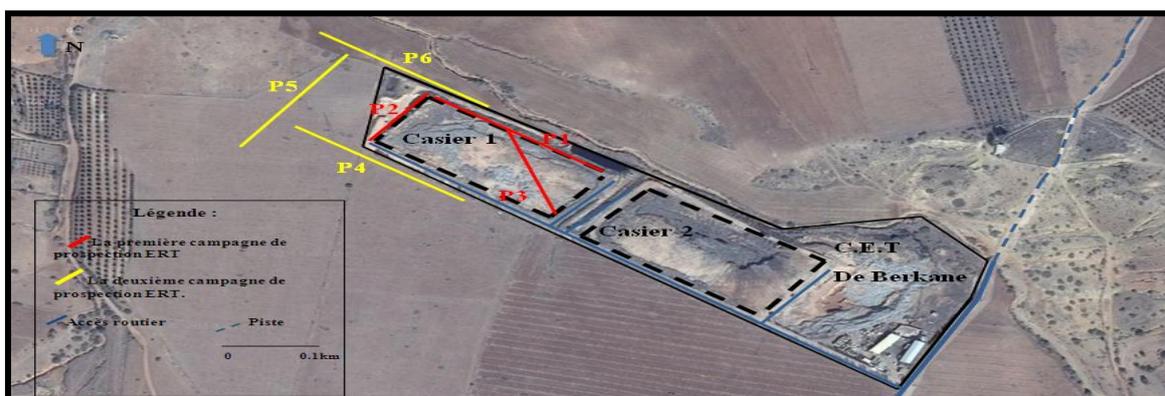


Figure 4 : Localisation des profils 2D d'imagerie électrique effectués en 2006, 2014 (Image Google earth 2013).

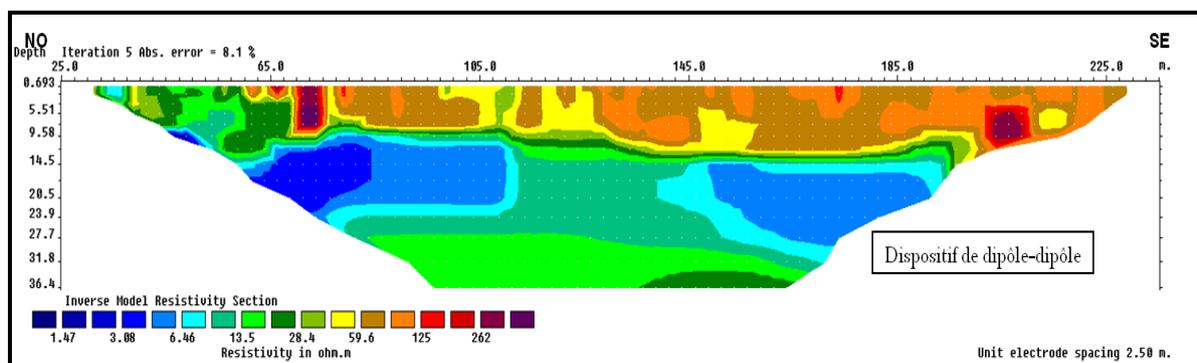


Figure 5 : Profil d'imagerie électrique P1 situé en bordure du casier N°1 du CET de Berkane (direction : SE-NO, longueur : 200 m, profondeur maximale : 36 m)

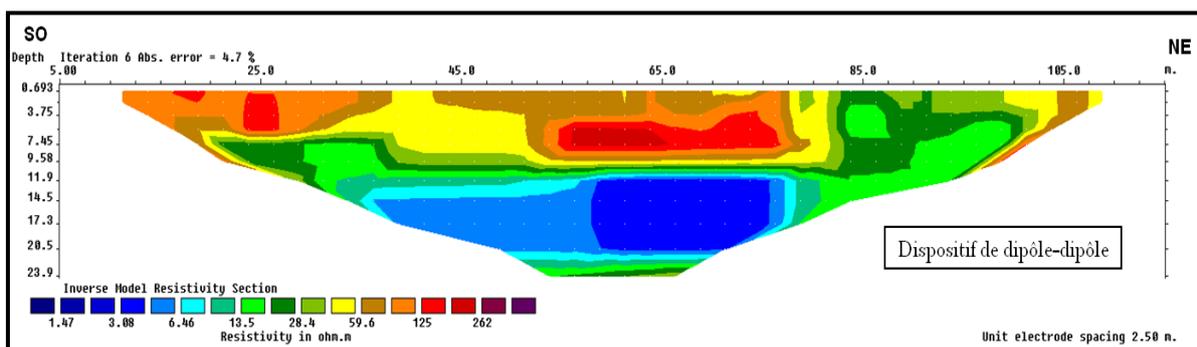


Figure 6 : Profil d'imagerie électrique P2 situé en bordure du casier N°1 du CET de Berkane (direction : SO-NE, longueur : 100 m, profondeur maximale : 24 m)

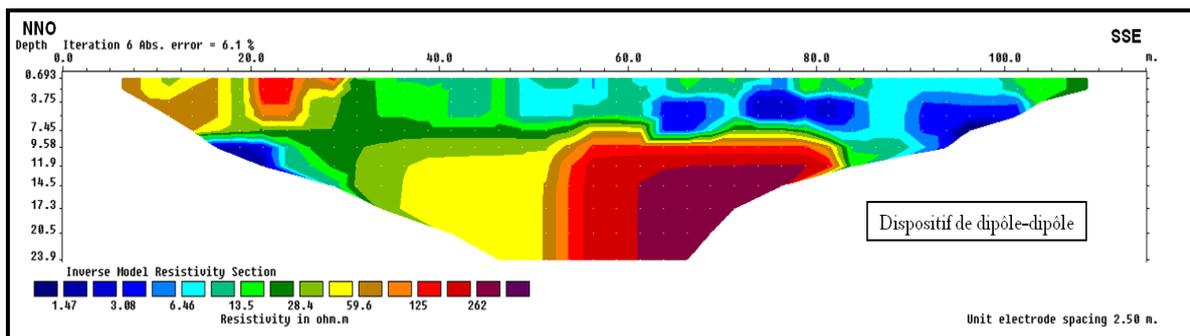


Figure 7: Profil d'imagerie électrique P3 réalisé au dessus du casier N°:1 du CET de Berkane (direction : NNO-SSE, longueur : 120 m, profondeur maximale : 24 m)

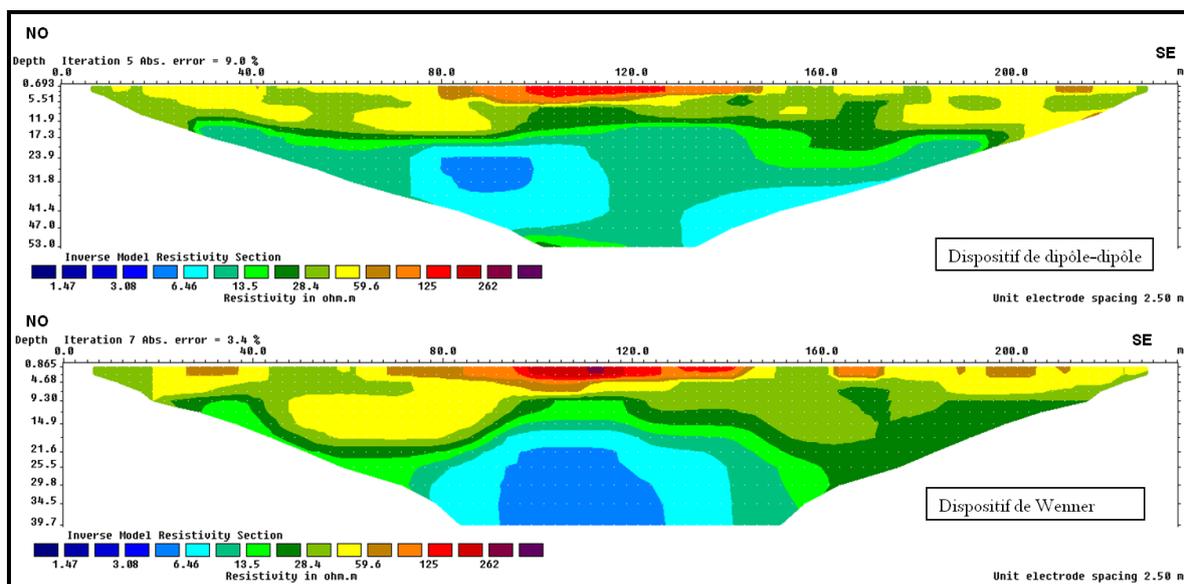


Figure 8 : Profil d'imagerie électrique P4 réalisé à l'extérieur du CET de Berkane (direction : NO-SE, longueur : 200 m, profondeur maximale : 50 m)

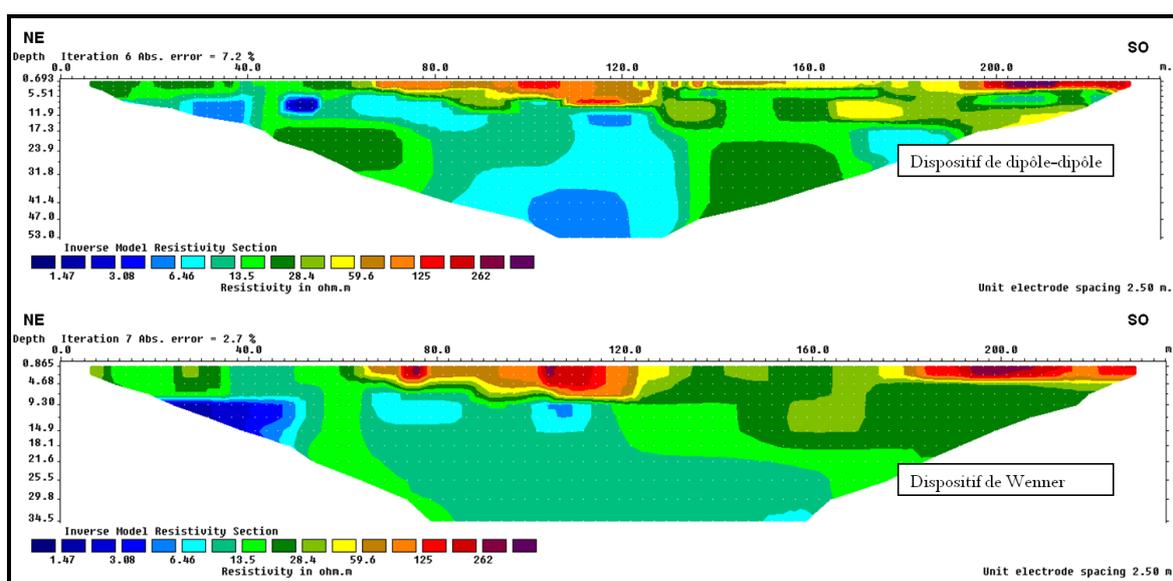


Figure 9 : Profil d'imagerie électrique P5 à l'extérieur du CET de Berkane (direction : NE-SO, longueur : 235 m, profondeur maximale : 54 m)

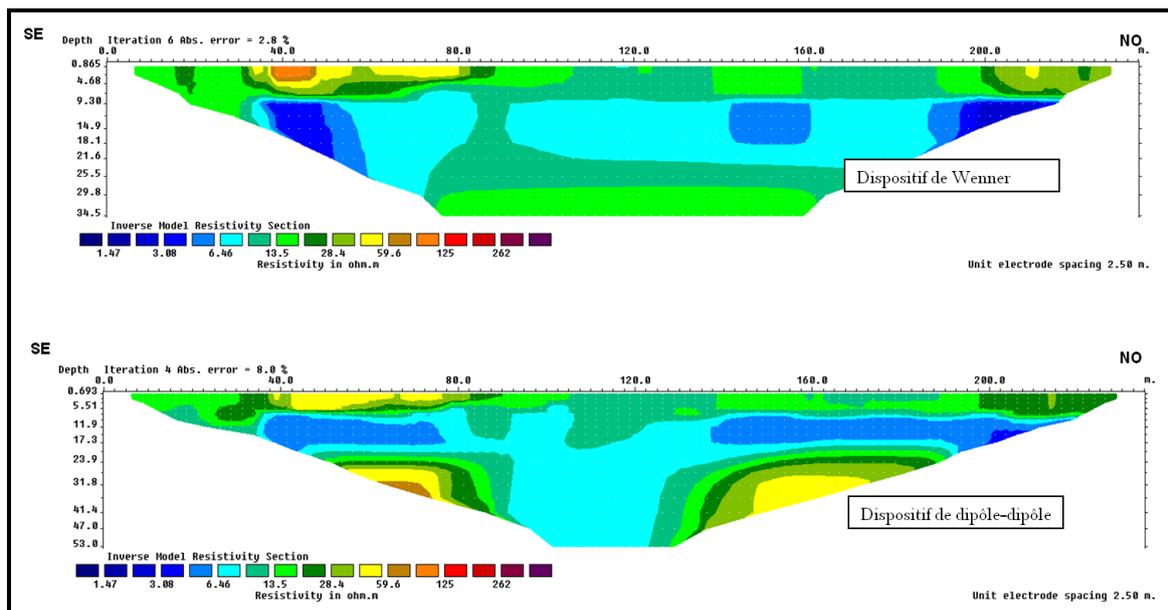


Figure 10: Profil d'imagerie électrique P6 réalisé à l'extérieur du CET de Berkane (direction : SE-NO, longueur : 235 m, profondeur maximale : 54 m)

Le profil au dessus du casier P3 : Le profil P3, situé au dessus du premier casier remplie de déchets, montre une couche très conductrice (0.5 à 10 Ω m) allant de 0 à 8m de profondeur ; elle correspond à la couche de déchets mélangés aux lixiviats. Selon [2], la conductivité du lixiviat de la décharge était en 2006 de l'ordre de 30 mS/cm (soit une résistivité de 0.33 Ω m). Elle surmonte une couche très résistive (résistivité >200 Ω m). La couche résistante serait due à l'effet de la géo-membrane, située au fond du casier, qui empêche la propagation du courant électrique vers la couche sous-jacente.

Les profils P1, P2, P4, P5 et P6, situés en dehors du casier, mettent en évidence la présence de deux couches : une couche superficielle caractérisée par une épaisseur allant de quelques mètres à 15m et de valeurs de résistivité très élevées dépassant, par endroits, 200 Ω m ; elle surmonte une couche très conductrice (valeurs de résistivité 3-10 Ω m). D'après les données géologiques, le Quaternaire, composé de limons, croute calcaire et de cailloutis, surmonte une formation plus anciennes composée de niveaux marno-argileux avec des passées gréseuses. Par ailleurs les données hydrogéologiques indiquent la présence d'une nappe phréatique à quelques mètres de profondeur. En se basant sur ces informations nous pouvons attribuer la couche résistive à la partie non saturée en eau et la couche conductrice au niveau saturé. A la base de cette dernière couche, on note sur certains profils (P1, P2, P4 et P6) une augmentation progressive de la résistivité qui serait liée au substratum dont la profondeur varie de 23 à plus de 50 m.

Le profil P6 montre une différence entre les sections de résistivité obtenues par les dispositifs dipôle-dipôle et Wenner concernant le toit du substratum. Ce dernier est discontinu au centre du profil réalisé par dipôle-dipôle, alors qu'il est continu sur le profil effectué par Wenner; ceci est probablement lié à la résolution plus élevée du dispositif de mesure dipôle-dipôle. Les faibles valeurs de résistivité observées au niveau de la nappe sont liées à la forte minéralisation de ses eaux. En effet, les résultats de l'étude menée par Chaieb et Khattach (2016) montrent qu'au niveau du site d'étude, les valeurs de la salinité sont comprises entre 3.22 à 9.88 g.L⁻¹ et celles de la conductivité électrique varient entre 6 et 17 mS.cm⁻¹.

Les cartes de la salinité de la nappe de Triffa montrent plusieurs zones à salinité excessive (conductivité électrique > 6 mS.cm⁻¹) dont le site de la décharge étudiée. [16] Entre les Beni Snassen et les petits massifs, la salinité serait due aux écoulements très réduits à cause des faibles transmissivités et l'obstacle que constituent ces massifs. Les fortes minéralisations s'expliqueraient par le contact des eaux avec les affleurements marno-calcaires de ces petits massifs et les faibles circulations de l'eau (contact avec le réservoir et temps de séjour élevés) qui ne favorisent pas le renouvellement des eaux.

La salinité élevée des eaux de la nappe au niveau du site peut être liée au réservoir, à une fuite des lixiviat vers la nappe ou à une contribution des deux. Les données historiques [16] montrent la présence d'une forte salinité des eaux au niveau du site de la décharge avant la mise en place de cette dernière. En se basant sur ces données, il est difficile de soupçonner la présence d'une pollution par les lixiviat liée à un dysfonctionnement du CET.

Conclusion

L'application de la tomographie électrique au niveau du site du CET de Berkane a permis la détermination de la répartition des résistivités électriques dans son sous sol. Le profil réalisé au dessus du casier indique que la couche de déchets mélangés aux lixiviats avait une épaisseur d'environ 8m et des résistivités électriques comprises entre 0.5 et 10 Ω m, cette couche surmonte une couche résistive qui serait liée à la présence de la géomembrane à la base du casier empêchant la propagation du courant électrique vers les couches sous-jacentes. Les profils réalisés à l'extérieur du casier indiquent la présence d'une nappe phréatique à quelques mètres de profondeur (5 à 15 m). Certains profils ont atteint le substratum de cette nappe à une profondeur allant de 23 à plus de 50m. La nappe est très conductrice, elle affiche des valeurs de résistivité comprises entre 3-10 Ω m associées à la forte minéralisation des eaux. Cette étude attribue cette minéralisation au contexte géologique et hydrogéologique; néanmoins elle n'exclue pas une éventuelle pollution par le CET due à une fuite des lixiviats vers la nappe. Pour palier à cette indétermination, il importe de compléter cette étude par l'installation de piézomètres en amont et en aval hydraulique du CET et d'un suivi de la qualité des eaux basé sur l'analyse d'indicateurs pertinents de pollution autre que la salinité.

Bibliographies

- 1- Nhari F., Sbaa M., Vassel J. L., Fekhaoui M., El Morhit M., *J. Internat. Aqua. Sci.* 5 (2014) 198
- 2- Quintin F. *Mém. grd Bio-ing. Sci. Tech. Envir. Fac.d'ing. Biol. Agr. Envir. Univ. Catho. Louvain-la-Neuve*
- 3- Chaieb A., Khattach D., *J. Mater. Environ. Sci.* (2016) *In press*
- 4- Deceuster J., Kaufmann O. J., *Contam. Hydr.* 136 (2012) 25
- 5- Clément R., *J. Waste Manag.* 30 (2010) 452
- 6- Vaudelet P., *Thès.3^{ème} Cyc. Univ. Michel de Montaigne, Bordeaux III* (2011).
- 7- Casado I., Mahjoub H., Lovera R., Fernández J., Casas A., *J. Sci. Tot. Env.* 506 (2015) 546
- 8- Hacini Y., *Thèse 3^{ème} cyc. Fac. Géos. Env. Univ. Lausanne* (2006)
- 9- Vaudelet P., *Thès.3^{ème} cyc Univ. Michel Montaigne Bordeaux III* (2011)
- 10- Marescot L., *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*90.1 (2006) 23
- 11- Genelle F., *Thès.3^{ème} cyc Univ. Bordeaux, France* (2012)
- 12- Samouëlian A., *Soil Till. Res.* 83 (2005) 173
- 13- Grellier S., *Proc. SWANA Conf., Charlotte,* (2006)
- 14- Lindsay N., *Meads Rev. Canad. de géotec.,* 40 (2003) 551
- 15- Chaieb M., *Edit. Serv. Géol. Maroc,* 453 (2004)
- 16- Carlier J., *Mem. Edit. Serv. Géol. Mar.* (1971)

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com/>