

ESSAI D'OPTIMISATION DE LA CAPACITE DE RETENUE D'EAU D'UN LAC PAR CARACTERISATION GEOPHYSIQUE DU RECOUVREMENT ARGILEUX

Bakkali, S. et Bouyalaoui, J.

Département des Sciences de la Terre Faculté des Sciences & Techniques de Tanger,
Université Abdelmalek Essaâdi BP 416 Tanger-Principal Tanger Maroc

RESUME:- Les auteurs proposent une étude géophysique par mesures de résistivités géoélectriques en vue d'optimiser les capacités de retenue d'eau d'un lac artificiel d'une commune rurale. Le lac Rahrah de la commune dite Rahrah dans la province de Tanger au Nord du Maroc est le réservoir principal de la dite commune pour ses besoins considérables en arrosage agricole. Cette étude a pour objectif la reconnaissance et la détermination de la profondeur optimale du lac : il s'agit de définir la nature géologique des terrains et de délimiter soit la base des couches imperméables soit le toit du substratum résistant. Afin de déterminer la nature lithologique des terrains et leurs épaisseurs, 25 sondages électriques Schlumberger de direction Nord-Sud ont été implantés et réalisés de manière à couvrir la surface totale du lac Rahrah.. L'appareil de mesure de la résistivité apparente est le résistivimètre GTR-2 à sommation de signaux et à compensation automatique de la polarisation spontanée de Geotrade Instruments. Le traitement des données de résistivités apparentes mesurées a été réalisé à l'aide du logiciel WinSev 3.3 de Geosoft. Les sondages électriques réalisés sont analogues et intègrent un modèle de terrain caractérisé par le passage d'une formation argileuse en surface à une formation gréso-calcaire en profondeur. Ces sondages électriques attestent également de l'homogénéité des terrains sur toute la surface du lac. Du Sud vers le Nord, il existe une variation de la profondeur du toit du substratum résistant, et par conséquent des épaisseurs du recouvrement argileux, qui peuvent atteindre 15 mètres vers le sud et 35m vers le nord. Les cartes de distribution des épaisseurs et des profondeurs, issues de l'interprétation des sondages électriques, sont réalisées à l'aide du logiciel Surfer (Win32) V.6.04 de Golden Software.

Mots clés: eau, résistivité électrique, sondage Schlumberger, lac

ABSTRACT:- This paper presents the results of a geophysical study by electric prospecting carried out to optimize the capacities of water reserves of the lake Rahrah. 25 electrical Schlumberger soundings were covering the total surface area of the lake. Resistivity measurements were done with the resistivity meter GTR-2. The resistivity data were analysed with the Geosoft software WinSev 3.3. Maps of distribution of thickness and depths were made using the software Surfer (Win32) V.6.04 of Golden software. Results of this work show that the electrical soundings are analogous and represent a ground model, which is characterized by the passage from a clayey formation at the surface to a sandy-chalky formation at depth. These electrical soundings also confirm the homogeneity of the lake and attest the absence of lateral variation.

Key Words: water, resistivity, sounding, Schlumberger, lake

INTRODUCTION

La problématique des ressources en eau est devenue une singularité récurrente tributaire des périodes aléatoires de la sécheresse au Nord du Maroc. De nombreuses industries de la région, grandes consommatrices d'eau (tourisme, industries chimiques et agroalimentaires, industries de la boisson, loisirs, etc.), sont durement affectées durant ces périodes de sécheresse. Ces variations saisonnières induisent une dégradation des outils de production avec pour corollaires un déficit de l'emploi et un <freinage> du développement durable à l'échelle régionale.

Afin d'amortir les effets aléatoires de la sécheresse et dans le but d'optimiser les potentialités des ressources en eau, des sondages électriques Schlumberger ont été effectués sur le site du Lac Rahrah. (Figure 1).

Du point de vue hydrologique, le lac affiche un taux de remplissage optimum durant la saison hivernale. Il est alimenté principalement par les eaux de pluies durant les périodes de l'automne et de l'hiver. Le volume des précipitations à Tanger est important et varie de 500 à 1500 mm par an. La moyenne annuelle des précipitations est de 800 mm dont 80% se réalise durant les cinq mois de novembre en mars (Thauvin, 1971) Malgré cette caractéristique la capacité de retenue du lac est très limitée voire faible et ceci pour diverses raisons telles l'envasement du lac et les fuites au niveau de la digue de retenue. Actuellement le lac présente une capacité de retenue proche des 100.000 m³ d'eau. Au mois de mars le lac Rahrah affiche un taux de remplissage estimé entre 70 et 80% de ses capacités. Au mois d'août le lac Rahrah, d'où la commune y puise des volumes considérables d'eau pour ses besoins d'arrosage domestique et agricole, s'est déjà asséché.

Cette étude géophysique se fixe pour but la reconnaissance et la détermination de la profondeur de retenue optimale du lac. Il apparaissait donc nécessaire, de reconnaître la nature des terrains qui forment le soubassement du lac. En définitive, il s'agissait de déterminer la nature géologique des terrains et de déterminer en profondeur la base des couches imperméables ou le toit du substratum résistant. Cette méthodologie permet éventuellement de détecter les zones de fuites au niveau du lac et d'identifier des zones d'envasement susceptibles d'être draguées. Les couches imperméables sont identifiées aux couches argileuses. En effet la nature rhéologique des argiles permet de qualifier

ces roches de formation imperméable. Ces roches une fois imbibées d'eau gonflent et forment ainsi un horizon étanche évitant toutes infiltrations en profondeur.

Tenant compte du relief et de la géologie de la zone étudiée, la prospection électrique par sondages électriques Schlumberger a été utilisée pour cibler le réflecteur imperméable attribué à la formation argileuse. La cartographie du toit du substratum résistant correspondant aux formations gréso-calcaires permettra un aménagement territorial optimal pour les volumes de retenues d'eau du lac Rahrah. Cet aménagement pourrait se traduire soit par des opérations de décapage, soit par le dragage des zones envasées.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Tanger se situe au Nord-Ouest du continent africain entre le parallèle 35°47' nord et le méridien 35°48' ouest de Greenwich. Tanger est située sur le Détroit de Gibraltar qui délimite la Mer Méditerranée à l'ouest. La largeur du détroit varie de 44 km à l'ouest à 15 km à l'est. Elle est délimitée au nord par sa baie de sable blanc en forme de croissant long de 14 km. Les montagnes représentent 9 % du territoire contre 91 % de plaines. Le lac Rahrah est situé à l'ouest du Royal Golf Club de Tanger et du Stade International de Cricket. De forme sub-rectangulaire et allongée dans la direction Nord-Sud, il s'étend sur une superficie de 5 Ha (Figure 2 et Figure 3).

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Le site d'étude est singulièrement caractérisé par une série argileuse très épaisse à intercalations de niveaux calcaireux-gréseux. Cette succession de terrains argileux et de terrains gréso-calcaires caractérise le domaine géologique du Tangérois (Figure 4).

Du point de vue géologique, le lac Rahrah qui est le site de cette étude appartient à l'unité de Tanger externe, elle-même faisant partie de la zone rifaine du domaine mésozoïque. Sur le plan des ressources en eau, l'unité de Tanger externe est caractérisée par une pluviosité relativement abondante qui ne trouve que très peu de roches-réservoirs d'où une importante perte par ruissellement et par évapotranspiration. La majeure partie de l'unité externe de Tanger est constituée d'argiles et de marnes schisteuses, ou de flyschs schisto-gréseux, rarement schisto-calcaires. Ces faciès ne peuvent être considérés comme des aquifères : les grès numidiens contiennent certes de l'eau mais leur faible volume et les

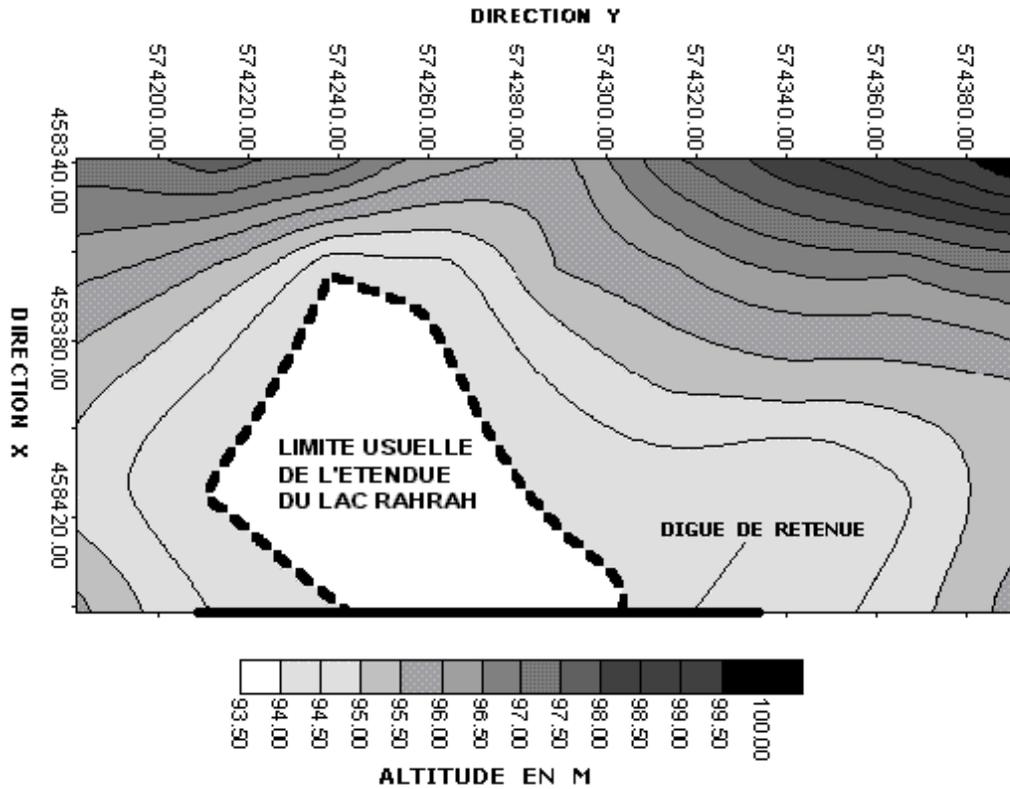


Figure 3: Topographie du site du lac Rahrah en coordonnées Lambert

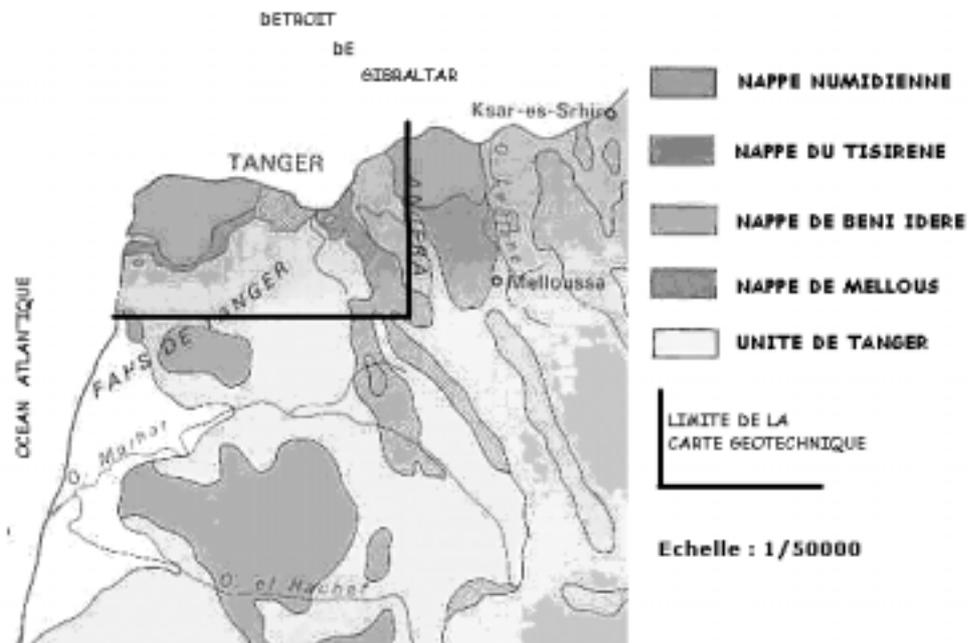


Figure 4: Cartographie des différentes nappes répertoriées de la région de Tanger (extraits de la carte géotechnique de Tanger, Ech : 1/250000)

médiocres conditions (porosité assez faible et intercalations de lits d'argilites) rendent leur importance hydrogéologique très relative. En définitive la prédominance des faciès argilo-schisteux dans l'unité de Tanger entraîne une extrême rareté de l'eau souterraine qui n'existe que dans les grès numidiens et les alluvions fluviales avec de très faibles débits (Humbert, 1971).

METHODE & MATERIEL

METHODE

La résistivité des matériaux est un bon indicateur et marqueur de la nature et de l'état d'altération. C'est ainsi que les méthodes de prospection électrique sont depuis longtemps utilisées en géologie de l'ingénieur et géotechnique. Ces méthodes, à la fois quantitatives et qualitatives, sont basées sur le principe de la loi d'Ohm: l'injection d'un courant continu à très basse fréquence dans le sol et la mesure du potentiel permettent de remonter à la résistivité vraie des formations traversées. Dans la zone étudiée, et tenant compte du contexte géologique, la méthode du sondage électrique a été utilisée pour déterminer les épaisseurs et la nature des formations à la verticale des stations de mesure. Les sondages électriques permettent en effet d'obtenir la succession verticale des résistivités. La profondeur d'investigation est proportionnelle à la longueur de la ligne. La méthode du sondage électrique est basée sur la mesure en surface de l'intensité et de la différence de potentiel existantes entre les différentes électrodes du dispositif de mesure. Le rapport de ces deux paramètres permet de calculer la

résistivité électrique des terrains sous-jacents. Les géométries sont très variées, la plus connue étant la géométrie Schlumberger.

En pratique sur le terrain il est fait usage de 2 électrodes en acier d'injection de courant A et B, ainsi que de 2 électrodes en cuivre de mesure du potentiel M et N entre lesquelles la différence de potentiel ΔV dû aux effets de A et B est mesurée; les 4 électrodes ABMN formant ainsi un quadripôle sont alignées (Figure 5)

Dans la présente étude, il a été utilisé un dispositif Schlumberger centré. La résistivité apparente ρ_{app}

Schlumberger est donnée par
$$\rho_{app} = \pi \frac{(L^2 - l^2)}{2l} \frac{\Delta V}{I}$$

ou STA est la station de mesure qui représente le centre du dispositif. Les électrodes de mesures M et N mesurent respectivement les potentiels P_1 et P_2 . L'interprétation des résultats est faite d'une manière qualitative (cartes d'iso-résistivités apparentes et pseudo-coupes) et quantitative (cartes en isopaques ou en isobathes et coupes géoélectriques).

L'interprétation quantitative consiste en l'interprétation des diagrammes $\rho_{app} = f(\frac{AB}{2})$ des 25 sondages électriques en déterminant le nombre, les épaisseurs, les résistivités réelles des couches pour en déduire leurs natures lithologiques. (Gasmi & al, 2004).

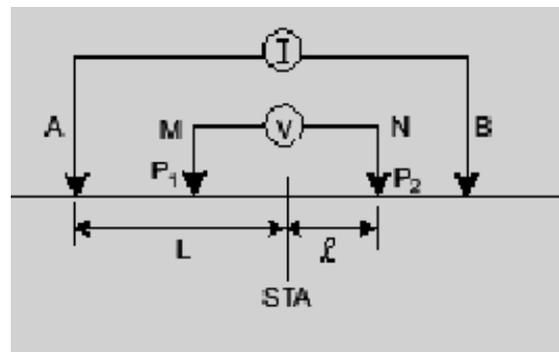
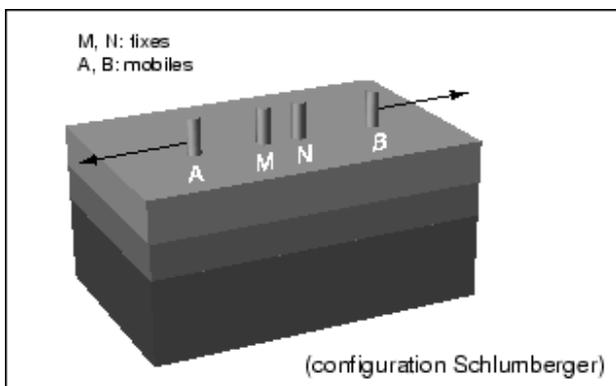


Figure 5: Principe et descriptif des sondages électriques Schlumberger (Chouteau, 2001)

Les méthodes de modélisation utilisées dans l'interprétation des mesures sont anciennes : l'inversion des sondages électriques est réalisée par approximation successive à partir d'un premier modèle en utilisant par exemple la méthode des moindres carrés (Tabbagh, 1995).

MATERIEL & MESURES

Les mesures de résistivité apparente ont été acquises à l'aide du RÉSISTIVIMÈTRE GTR-2 de GEOTRADE-INSTRUMENTS. Pour couvrir l'ensemble de la zone utile d'étude 25 sondages électriques Schlumberger ont été réalisés selon une maille de 25m x 25m. (Figure 6)

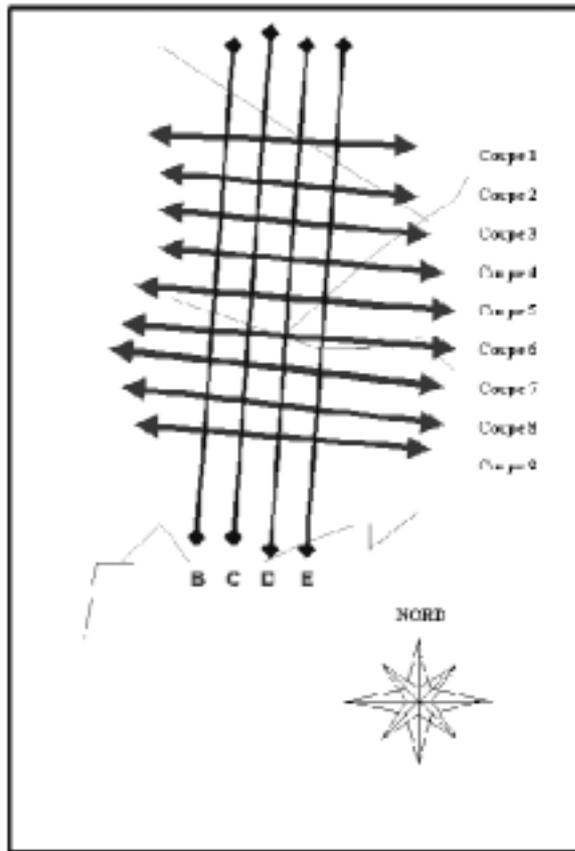


Figure 6: Croquis de répartition des sondages électriques Schlumberger (les sondages électriques Schlumberger ont été réalisés aux intersections des profils BCDE et des coupes 1 à 9. Ils sont équidistants de 25m)

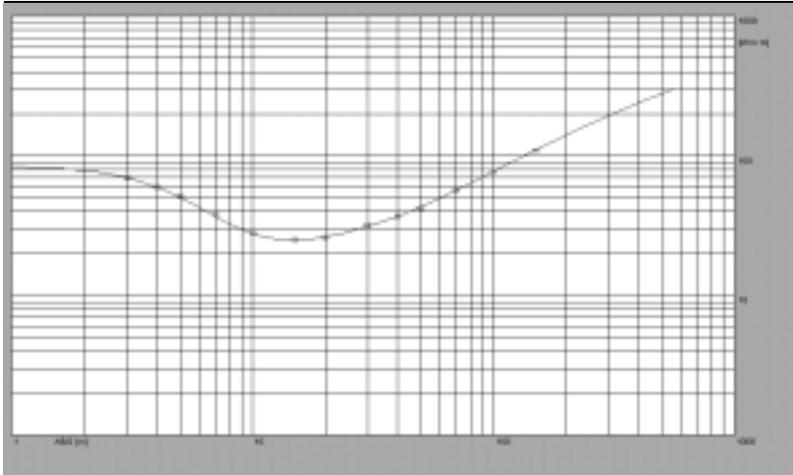
Cette maille a été dimensionnée par rapport au levé topographique (Figure 3) du lac dont les coordonnées ont été exprimées en méridiens Lambert. La longueur de la ligne AB maximale a été fixée à 200 m afin de cibler la reconnaissance lithologique des terrains sur une profondeur moyenne proche des 35 mètres. Les mesures ont été exécutées durant les mois août et septembre lors de l'assèchement du lac. Pour éviter les inconformités liées aux anisotropies des formations géologiques, tous les sondages électriques ont été réalisés selon la direction Nord-Sud. Le traitement des résistivités apparentes des sondages électriques a été réalisé avec le logiciel WinSev 3.3 de GEOSOFT (Jenny & al, 1999). L'analyse des sondages électriques a permis d'estimer la profondeur du toit du substratum à la verticale de chacun des sondages. Les sondages électriques sont repérés par leurs centres de mesure que sont les stations STA. La profondeur du toit du substratum est équivalente à l'épaisseur du recouvrement conducteur. Les cartes de distribution des épaisseurs et des profondeurs, issues de l'interprétation des sondages électriques, sont réalisées à l'aide du logiciel Surfer (Win32) V.6.04 (Golden Software, 1997).

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Tous les sondages électriques réalisés attestent de l'homogénéité de la zone d'étude à l'échelle du lac. La zone d'étude est représentée par un seul et même modèle de terrain caractérisé par le passage d'une formation conductrice (résistivités faibles) en surface à une formation grésocalcaire (résistivités plus élevées) en profondeur. Aucune variation latérale de faciès n'a été décelée. Les terrains conducteurs affichant des résistivités faibles comprises entre 2 et 10 $\Omega.m$ sont interprétés comme des couches argileuses. Les terrains résistants affichant des résistivités élevées et supérieures à 100 $\Omega.m$ sont assimilées aux couches de nature grésocalcaire. Les formations grésocalcaires sont considérées comme des roches perméables du fait de la fracturation qui peut affecter pareilles horizons.

Cette succession de terrains argileux et de terrains grésocalcaires caractérise le domaine géologique du Tangérois ou unité de Tanger externe.

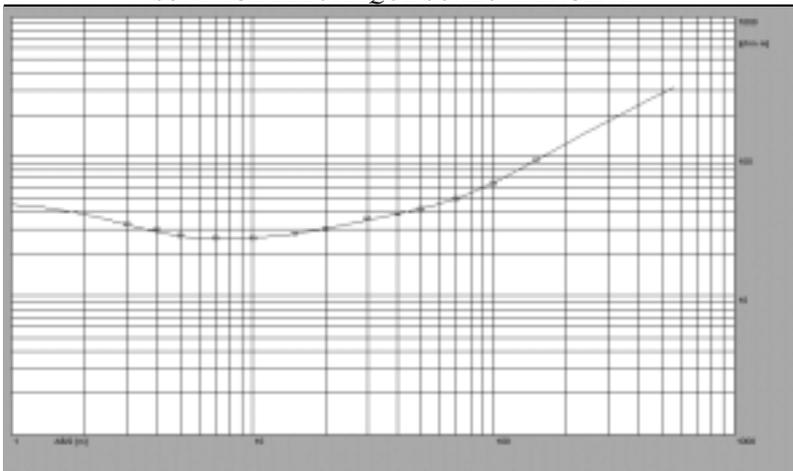
Les résistivités élevées de certaines couches argileuses sont singulièrement dues à l'envasement récent du lac, qui en pareil cas est généralement plus hétérogène, et telles qu'attestées par les sondages B5, B6 et B7 (Figure 7).



SONDAGE ELECTRIQUE SCHLUMBERGER B5

Couche	Résistivité	Epaisseur	Prof. Toit
N°	en ohm.m	en m	en m
1	9	2	0
2	2	12	2
3	4	5	14
4	1	5	19
5	>100	infini	24

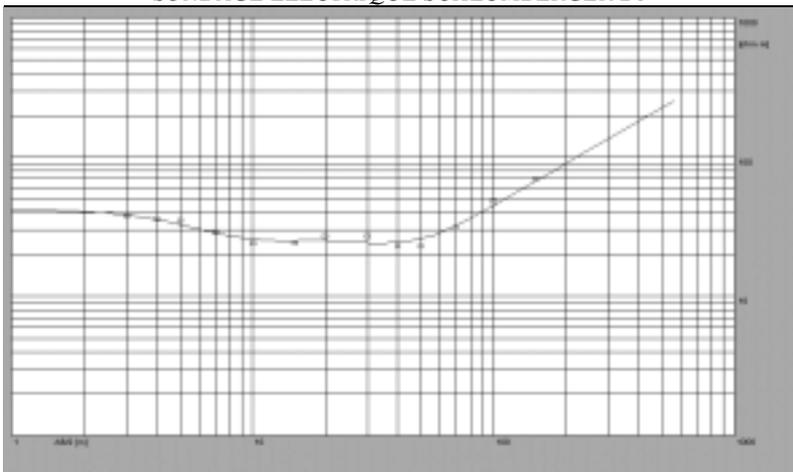
L'épaisseur du recouvrement conducteur est de 24 m



SONDAGE ELECTRIQUE SCHLUMBERGER B6

Couche	Résistivité	Epaisseur	Prof. Toit
N°	en ohm.m	en m	en m
1	5	1.2	0
2	2	3	1.2
3	7	1.5	4.2
4	1	2.5	5.7
5	15	6	8.2
6	1	8	14.2
7	>100	infini	22.2

L'épaisseur du recouvrement conducteur est de 22.2 m



SONDAGE ELECTRIQUE SCHLUMBERGER B7

Couche	Résistivité	Epaisseur	Prof. Toit
N°	en ohm.m	en m	en m
1	4.4	3	0
2	1.5	3.5	3
3	5	6	6.5
4	1	15	12.5
5	>100	infini	27.2

L'épaisseur du recouvrement conducteur est de 27.2 m

Figure 7: Profils des sondages électriques Schlumberger B5, B6, B7 et leurs interprétations

Essai D'Optimisation de la Capacité de Retenue d'Eau d'un Lac par
Caractérisation Géophysique du Recouvrement Argileux

Le recouvrement conducteur est essentiellement formé des argilites. Le traitement des données des résistivités apparentes montre que la profondeur du toit du substratum est variable. Il en est de même pour les épaisseurs de la formation argileuse. Vers le sud du lac, le substratum présente une profondeur de 17 mètres confirmée par les profils des sondages B9 et E9 (Figure 8).

Vers le Nord il affiche une profondeur moyenne de l'ordre de 35m ; cette valeur est attestée conjointement par le traitement des sondages électriques D1, E1 et E3 (Figure

9).

Les profondeurs du toit du substratum du lac ont fait l'objet d'une carte dressée avec le logiciel Surfer (figure 10) . Cette carte des isohypses des profondeurs du toit du substratum permet d'accéder à la distribution des épaisseurs du recouvrement conducteur à l'échelle du lac. Elle reproduit une imagerie géophysique du sous-sol. Elle représente l'outil de prise de décision et d'orientation des travaux de décapage (figure 11) afin d'augmenter le volume de retenue du lac.

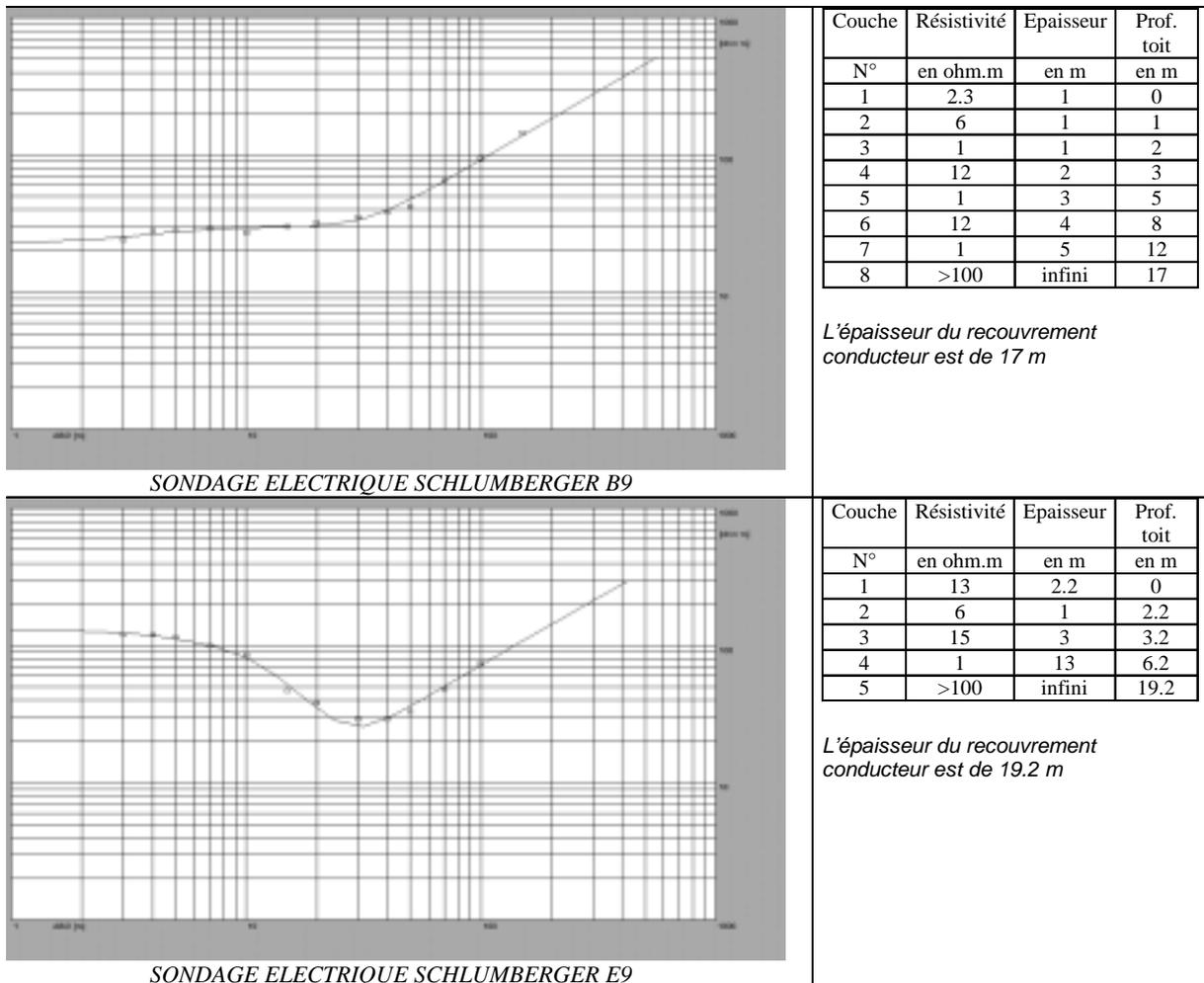
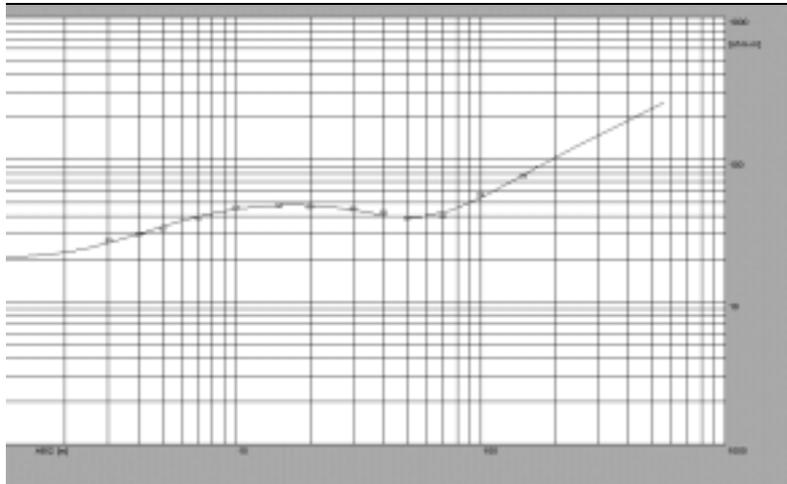


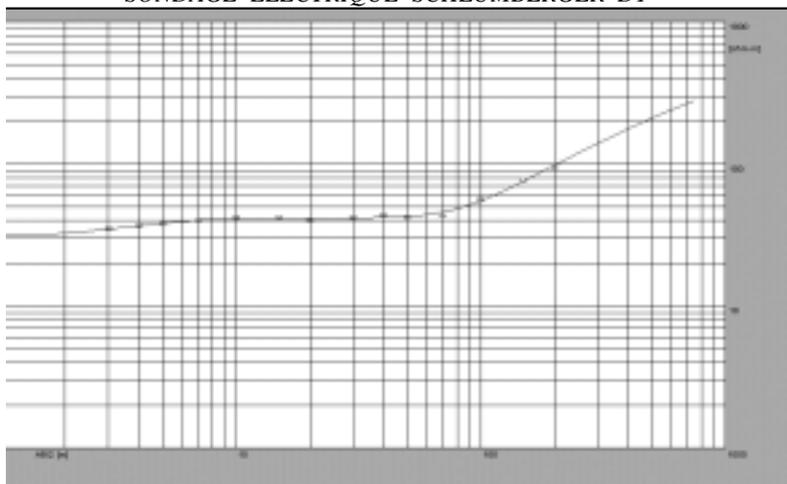
Figure 8 : Profils des sondages électriques Schlumberger E9, B9 et leurs interprétations



SONDAGE ELECTRIQUE SCHLUMBERGER D1

Couche N°	Résistivité en ohm.m	Epaisseur en m	Prof. Toit en m
1	2	2	0
2	9	4.5	2
3	2.5	4.5	6.5
4	9	5	11
5	1.5	21	16
6	>100	infini	37

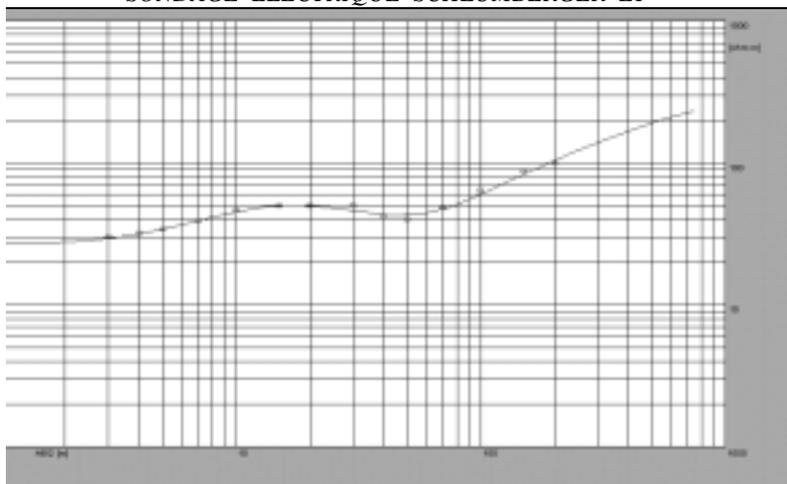
L'épaisseur du recouvrement conducteur est de 37 m



SONDAGE ELECTRIQUE SCHLUMBERGER E1

Couche N°	Résistivité en ohm.m	Epaisseur en m	Prof. Toit en m
1	3	1.5	0
2	5	4	1.5
3	2	4	5.5
4	12	6	9.5
5	2	25	15.5
6	>100	infini	40.5

L'épaisseur du recouvrement conducteur est de 40.50 m



SONDAGE ELECTRIQUE SCHLUMBERGER E3

Couche N°	Résistivité en ohm.m	Epaisseur en m	Prof. Toit en m
1	3	2.7	0
2	9	4.8	2.7
3	2	4.5	7.5
4	10	4	12
5	2	20	16
6	>100	infini	36

L'épaisseur du recouvrement conducteur est de 36 m

Figure 9 : Profils des sondages électriques Schlumberger D1, E1, E3 et leurs interprétations

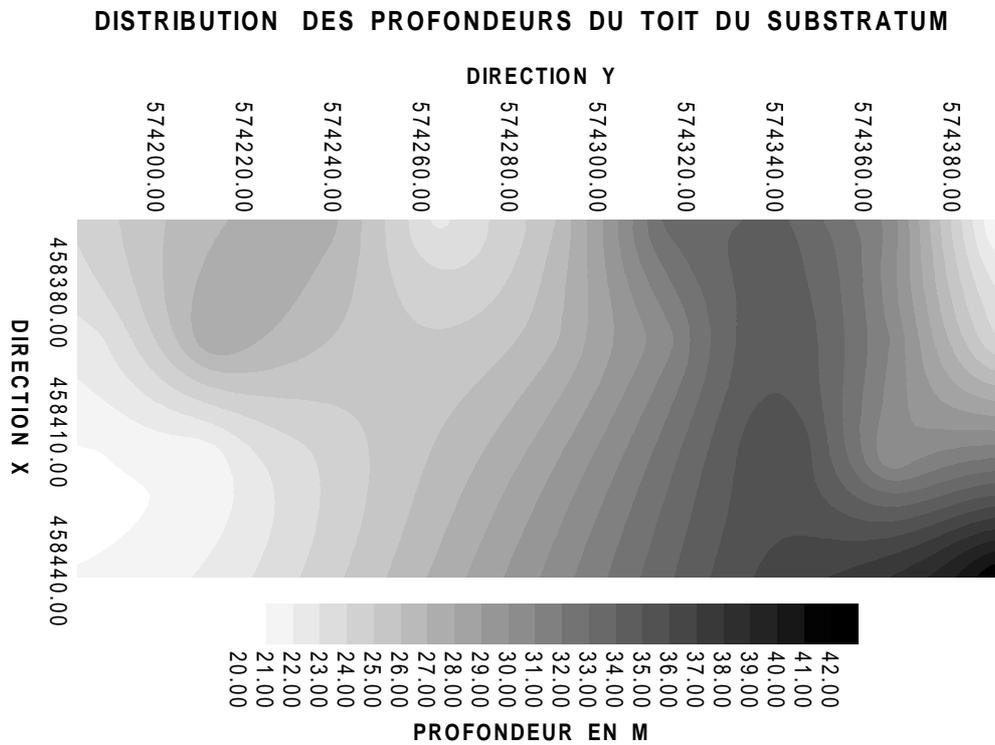


Figure 10 : Distribution des profondeurs du toit du substratum

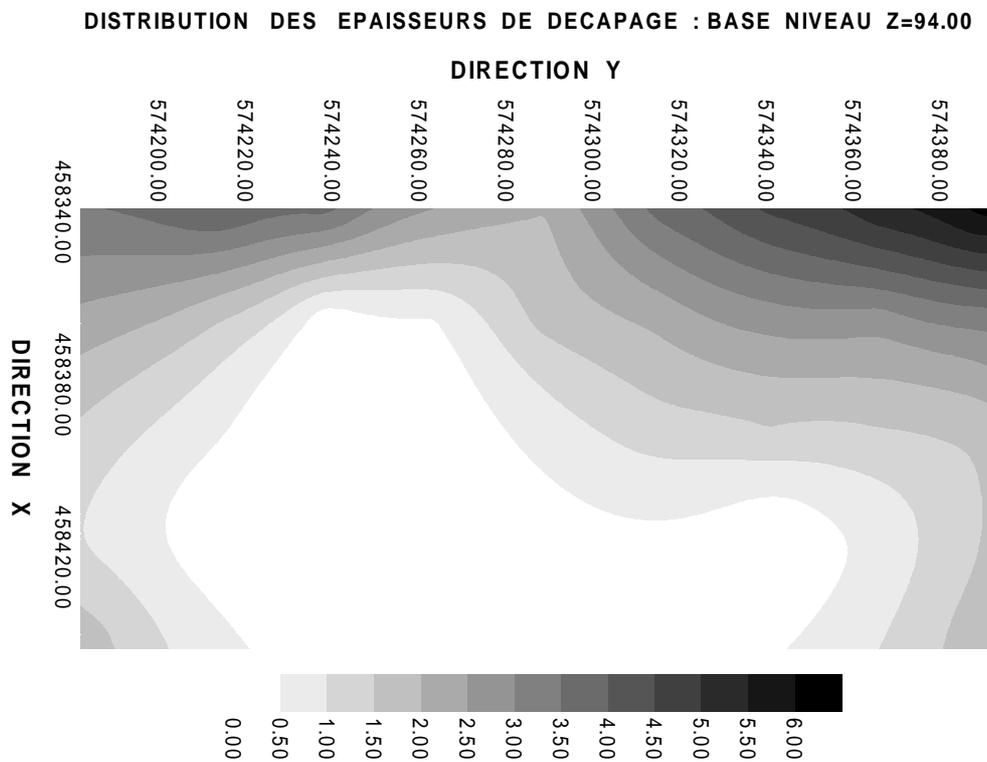


Figure 11 : Distribution des épaisseurs de décapage base niveau 94.00
(le niveau 94.00 correspond à l'altitude la plus basse du lac asséché)

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Au vu des résultats issus de cette étude, il a été recommandé d'effectuer un décapage uniquement dans la formation argileuse imperméable et d'éviter d'atteindre les roches grésocalcaires correspondant au substratum résistant. En effet, en profondeur et en fonction de la charge des sédiments, les roches argileuses se transforment en ardoises ou schistes qui du fait de l'individualisation de la schistosité et des fractures peuvent permettre la perte d'eau. Du Sud vers le Nord, il existe une variation spatiale de la profondeur du toit du substratum résistant et par conséquent des épaisseurs du recouvrement argileux. De 15 mètres vers le sud, ces épaisseurs peuvent atteindre 35m vers le nord. Ainsi il a été préconisé de s'arrêter au moins à deux mètres du toit du substratum. L'épaisseur minimale de 2 m de la couche d'argile pour les opérations de décapage résulte de données de sondage mécanique réalisé antérieurement par une étude privée de génie civil. En décapant les formations argileuses le risque de diminuer davantage la capacité de rétention du lac est certes accrue par la création éventuelle d'autres fuites à travers la couche argileuse amincie. De même, force est de souligner que le colmatage des fuites au niveau de la digue, ainsi que le dragage des zones envasées furent réalisés et déclarés inefficaces par le passé. En conséquence, et en se basant sur les évaluations financières des différentes solutions envisageables, il a été considéré que les décapages proposés sont jugés les plus à même de répondre à l'objectif de cette étude géophysique.

Cette étude géophysique puise son originalité dans son domaine d'application. L'essai d'optimisation de la capacité de retenue d'eau du lac Rahrah a trouvé une

réponse géophysique à sa réalisation. Les résultats issus de cette étude ont permis aux ingénieurs civils et topographes d'orienter les travaux de décapage. De plus ces résultats permettent de dresser une estimation des volumes à décaper et par delà de fixer le coût de la réalisation.

REFERENCES

- Chouteau T, (2001), Les méthodes électriques, Notes de cours, Publications Ecole Polytechnique, Montréal
- Gasmi M., Ben dhia H., Andrieux P., Amri F. (2004), Contribution de la prospection électrique à l'étude hydrogéologique des aquifères dans la plaine de Segui-Sud (Tunisie méridionale). Science et changements planétaires / Sécheresse, Vol.15, No. 2.
- Humbert M., (1971), Géologie & Morphologie, Contribution à la connaissance du Tangerois, Notes & Mémoires No. 222 Bis, Service Géologique du Maroc.
- Jenny J., Borreguero M., (1999) *Interprétation des sondages électriques sous Windows*. W-Geosoft , Geotrade S.A Lausanne
- Tabbagh A., (1995), Méthodes électriques et électromagnétiques appliquées à l'archéologie et à l'étude de l'environnement, Revista Fisica de la Tierra, Vol.7, pp161-192.
- Thauvin J.P, (1971), Hydrologie et Hydrogéologie, Contribution à la connaissance du Tangerois, Notes & Mémoires No. 222 Bis, Service Géologique du Maroc.