

**PROJET HYDROGEOPHYSIQUE NIGER**  
**SONDAGES ELECTROMAGNETIQUES TDEM**  
**NOVEMBRE-DECEMBRE 2006**  
**RAPPORT DE MISSION**



Auteurs :  
Marc Descloitres, Guillaume Favreau, Jean-Michel Vouillamoz (IRD)  
Marie Boucher (BRGM, IRIS Instruments)

## Liste des acronymes

AMMA: Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine  
BRGM: Bureau de Recherche Géologique et Minière  
CT2, CT3: formations du Continental Terminal 2 et 3  
HSM : HydroSciences Montpellier  
LTHE: Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement  
RMP: Résonance Magnétique des Protons  
TDEM: Time Domain Electro-Magnetism  
UMR Unité Mixte de Recherche

## Liste des figures :

*Figure 1. Coupe géologique à l'Est de Niamey*

*Figure 2. Principe du TDEM*

*Figure 3. Dispositif de mesure TDEM employé sur les sites du Niger.*

*Figure 4. Localisation des 23 sondages TDEM*

*Figure 5. Détermination de la résistivité du substratum résistant*

*Figure 6. Sites avec substratum résistant profond*

*Figure 7. Exemple de la non résolution du terrain aquifère saturé sur le sondage de Wankama F1*

*Figure 8 : Corrélation entre la profondeur du mur de l'aquifère du CT3 déduite des forages, et calculées par l'interprétation TDEM.*

*Figure 9 : Corrélation entre l'épaisseur du mur de l'aquifère du CT3 déduite des forages, et calculées par l'interprétation TDEM.*

*Figure 10. Site de Bogol. Exemple de l'effet d'un terrain magnétique de surface*

## Liste des tableaux :

Tableau 1. Coordonnées des sites TDEM prospectés

Tableau 2. Incertitudes sur les valeurs de profondeur du toit, de la résistivité et de l'épaisseur des argiles

*Photo de couverture: Mesures TDEM sur le site de Bani Kossey au Niger en novembre 2006. L'appareillage, le Temfast 48, est un appareil léger (moins de 5 kg) connecté à une boucle de câble invisible sur ce cliché. Le Temfast est piloté par un palmHP.*

## 1. Introduction

Au sud-ouest semi-aride du Niger, comme souvent au Sahel, la nappe phréatique représente l'unique ressource permanente en eau douce. Dans cette région rurale à forte densité de population (près de 30 habitants/ km<sup>2</sup>, recensement 2001) le niveau statique de la nappe libre du Continental Terminal (CT3) a augmenté de près de 4 mètres depuis les années 1960 alors qu'une diminution significative des précipitations de mousson a été observée sur cette période. Sur la zone d'étude, ce paradoxe est expliqué par le déboisement qui, en favorisant le ruissellement, a augmenté l'apport en eau de surface aux mares temporaires, exutoires naturels d'une multitude de petits bassins versants endoréiques (Massuel, 2005). Ces mares, toujours en position perchée par rapport à la nappe, montrent une vidange rapide par infiltration qui représente la principale source de recharge pour l'aquifère. Des investigations hydrogéologiques et géochimiques ont permis de mieux comprendre la dynamique de cet aquifère (Favreau, 2000 ; Massuel, 2005). Cependant, les modélisations seraient améliorées par une meilleure connaissance des paramètres hydrogéologiques des réservoirs.

Dans le cadre du programme AMMA, de la convention cadre BRGM, IRD, IRIS-Instruments, et de l'accord-cadre de coopération scientifique et technique entre la République du Niger et l'IRD, un programme de reconnaissance géophysique basé sur la méthode de Résonance Magnétique Protonique (RMP) a été initié aux environs de Niamey afin de préciser la géométrie des réservoirs, leurs porosités et perméabilités. Ce programme scientifique de recherche est conduit par les UMR HSM et LTHE depuis 2005. Le financement a été assuré par ces deux unités, et avec un complément de 40% obtenu auprès du programme AMMA (<http://amma.mediasfrance.org/france/index>) .

L'objectif principal de ce projet est de caractériser les aquifères par résonance magnétique des protons afin de contribuer à mieux quantifier la recharge de l'aquifère libre. Les terrains argileux et parfois sablo-argileux sont parfois conducteurs comme en témoignent une coupe électrique 2D réalisée dans la zone d'étude (Massuel et al., 2006). De plus, on connaît l'existence d'un substratum argileux sous-jacent à la nappe phréatique du Continental terminal (Fig. 1). La résolution de la méthode RMP peut être affectée par la présence de ces terrains conducteurs, en limitant par exemple la profondeur d'investigation. Des études récentes (Legchenko et al., Journal of Applied Geophysics, soumis) montrent que les effets sont particulièrement significatifs pour des terrains de résistivité inférieure à 10 Ohm.m. Dans cette étude, une attention particulière est mise sur la caractérisation des terrains aquifères (géométrie, profondeur, épaisseur) pour réduire les incertitudes de la modélisation RMP. Cela implique de connaître le substratum de l'aquifère, cette couche argileuse conductrice, qui est une « cible » géophysique idéale pour les sondages électromagnétiques en domaine temporel. Une campagne de mesures TDEM (« Time Domain Electromagnetism ») a été réalisée en novembre et décembre 2006 sur 21 des 24 sites RMP proches de Niamey prospectés en 2005 (Boucher et al, 2006, Vouillamoz et al., 2007, soumis) et en 2006 (Boucher, thèse en cours).

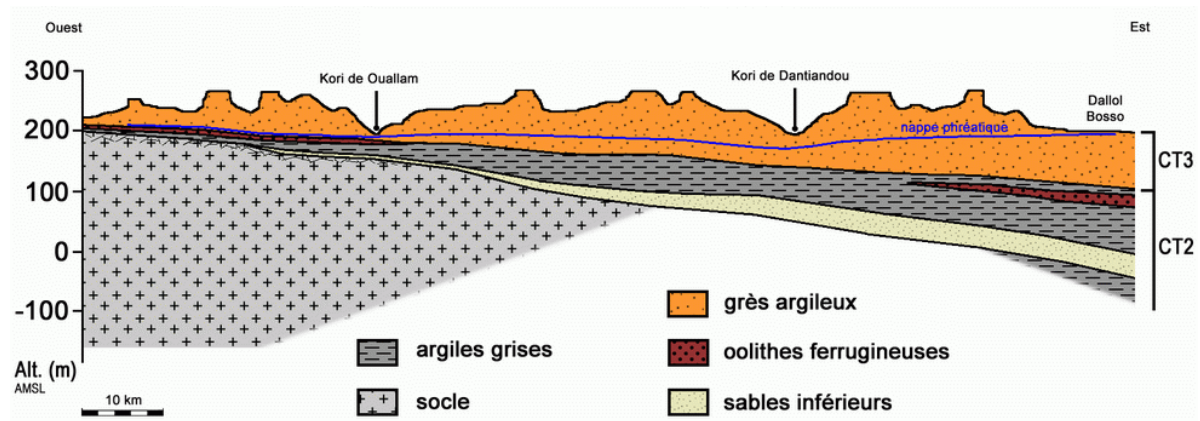


Figure 1. Coupe géologique à l'Est de Niamey. Les argiles grises (parties supérieures de la formation du Continental terminal 2) constituent le mur de l'aquifère des grès du continental terminal 3. Le toit des argiles grises s'approfondit vers l'est. L'érosion des périodes humides du quaternaire a entaillé les grès et fait que ce toit peut se situer plus ou moins profondément selon les sites.

Les objectifs de la prospection TDEM sont :

- La détermination du toit (interface CT3 - CT2) de la couche argileuse qui constitue le substratum de l'aquifère, et l'épaisseur de la couche argileuse.
- La caractérisation des résistivités des différentes unités à l'aplomb des sondages RMP réalisés au Niger en 2005 et 2006.

Cette étude permet aussi de confirmer que le TDEM peut être une méthode alternative pour la détection des formations conductrices aux sondages électriques classiques qui sont difficiles à mettre en œuvre en raison des sables de surface, très secs hors saison des pluies (saison sèche d'octobre à mai).

## 2. Principe de la méthode TDEM

La méthode TDEM est une méthode électromagnétique de sondage géophysique. Elle permet de sonder le sous-sol grâce à l'induction électromagnétique produite par la coupure brusque d'un champ magnétique statique établi en surface grâce à une boucle de câble déployée à la surface dans laquelle on a fait circuler un courant électrique (figure 2, en rouge). La différence de flux crée une induction dans le sol, sous forme de boucle de courant (en bleu) qui crée à son tour un champ secondaire enregistré soit par la même boucle de câble en surface (dispositif coïncident) soit par une boucle de câble plus petite placée au centre de la boucle d'émission (dispositif central). Le champ secondaire est décroissant dans le temps. Plus le temps considéré est grand, plus l'information obtenue est profonde. L'étude de la forme de sa décroissance se traduit par une courbe de sondage reliant la résistivité apparente (en ordonnée) au temps (en abscisse) de façon analogue aux sondages électriques à courant continu. Cette courbe est étudiée et inversée pour reconstituer la variation de la résistivité en fonction de la profondeur. L'hypothèse prise lors de cette étape est celle d'un terrain stratifié horizontalement (situation 1D). Cette hypothèse est considérée comme valide dans le cas du Niger, car la géologie de la région montre des couches sédimentaires monotones, à léger pendage vers l'est (Figure 1). Le modèle de résistivité en fonction de la profondeur est soumis à des règles d'équivalence et de suppression (analogue à celles connues pour l'électrique) ce qui fait qu'une interprétation n'est jamais unique et réclame souvent une

connaissance à priori sur la profondeur ou sur la résistivité des terrains qui peuvent être connus par une autre méthode (i.e. forage, diagraphie,...). La méthode TDEM est très sensible aux terrains conducteurs et à la position de leur toit et les définit de façon meilleure que les sondages électriques. En revanche, les terrains résistants (supérieurs à 500 Ohm.m) sont mal définis. Pour plus d'information sur la méthode TDEM, voir la thèse de Descloitres (1998).

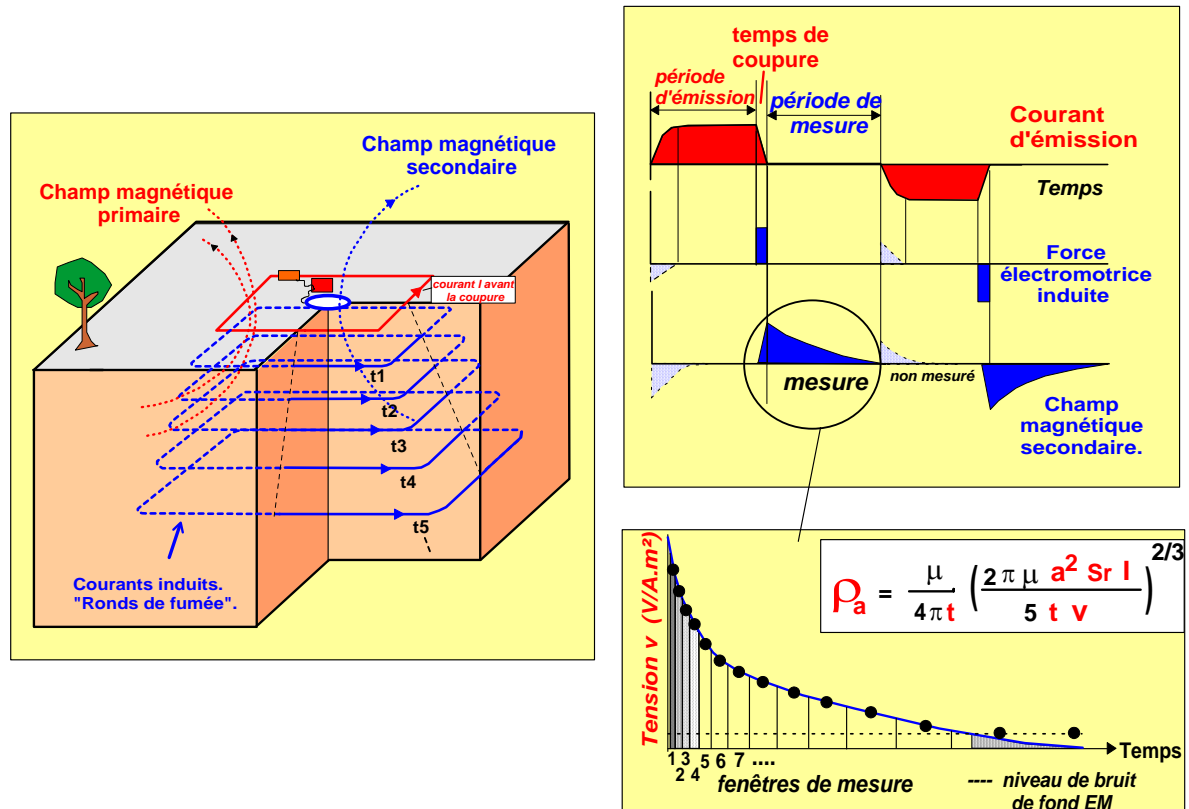


Figure 2. Principe du TDEM : On sonde le sol en étudiant les variations de champ magnétique secondaire en fonction du temps. La résistivité apparente dépend du temps  $t$ , de la surface d'émission  $a^2$ , de la surface de réception  $Sr$ , du courant d'injection  $I$  et du voltage  $V$  dans le récepteur. La formule donnée ici est celle dite « des temps longs ».

Au Niger, nous le verrons par la suite, des effets perturbateurs ont été observés systématiquement. Ces effets concernent les propriétés physiques intrinsèques des terrains explorés. Il s'agit a) d'effet de viscosité magnétique (« super-paramagnetism » ou SPM) et b) des effets de résistivité complexe (polarisation induite, IP). L'effet SPM, s'il n'est pas reconnu, se manifeste par des erreurs d'interprétation : un terrain conducteur profond, fictif, est déterminé. L'effet IP se traduit par des formes de courbe compliquées et souvent une sous-estimation des profondeurs des substratums conducteurs (Descloitres, 1998 ; Descloitres et al, 2000).

La procédure d'interprétation réclame à la fois la prise de données complémentaires sur le terrain (boucles de taille différentes par exemple) et la prise en compte des propriétés SPM et IP lors de l'interprétation. Le logiciel utilisé ici (TEM-RES) permet de traiter ces questions.

Pour résumer :

- les effets magnétiques (SPM) sont particulièrement visibles lorsqu'on utilise un dispositif coïncident, et d'autant plus intenses que la taille de boucle est

réduite. Dans cette étude, nous avons utilisé des acquisitions de 25x25 m en coïncident pour maximiser l'effet magnétique et le quantifier.

- Les effets de polarisation (IP ou PP) sont d'autant plus intenses que la taille de boucle d'émission est faible, indépendamment du type de dispositif (central ou coïncident). C'est pour cette raison que nous avons privilégié la mise en œuvre de boucle d'émission assez grande (100x100m) pour minimiser les effets de polarisation par rapport à celle du sol, qui nous intéresse.

### 3. Mise en œuvre

La mise en œuvre sur le terrain doit répondre à plusieurs objectifs, en tenant compte des possibilités de l'appareillage utilisé ici, un Temfast 48 (AEMR Technology, Université de Moscou). Nous avons mis en œuvre :

- une boucle de 25x25m, dispositif coïncident (signal plus fort), avec un temps de coupure court dans la boucle permettant d'obtenir des informations sur les premiers terrains, et permettant aussi de construire un récepteur central pour le dispositif 100x100 m en mode central.
- Une boucle de 100x100 m utilisée comme émetteur / récepteur en mode coïncident, et comme émetteur seul en mode central.

Sur le terrain, ces 2 boucles sont centrées, comme le montre la figure 3.

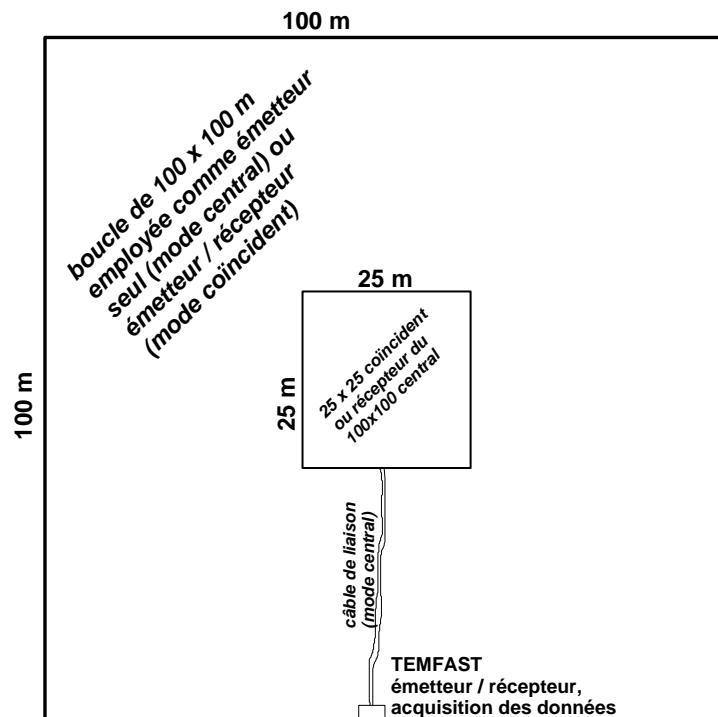


Figure 3. Dispositif de mesure TDEM employé sur les sites du Niger. Les puits ou forages se trouvent à l'intérieur ou à proximité immédiate de ce dispositif. Le positionnement variable d'un site à l'autre entre le TDEM et le forage n'est pas déterminant si on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de variation de résistivité latéralement à l'échelle du site. Cette hypothèse est valide lorsqu'on considère le toit des argiles comme cible principale. Dès lors, le positionnement de la boucle répond surtout à un critère de commodité en évitant les habitations, les clôtures etc.

Les coordonnées de chaque site sont recensées dans le Tableau 1. Vingt-trois sondages ont été réalisés du 16/11 au 05/12/2006. La carte de la figure 4 positionne les sondages TDEM. Sur la majorité des sites, des mesures de susceptibilité magnétique ont été faites en appliquant un susceptibilimètre KT9 (de Exploranium) à la surface en 10 endroits différents autour de la boucle d'émission. Le niveau statique et la conductivité électrique (CE) de l'eau ont été mesurés sur les puits les plus proches, généralement situés à moins de 200 m du centre des boucles. La représentativité spatiale et temporelle de ces mesures ponctuelles (effet des puisages sur le niveau statique, pollution éventuelle du puits ; Favreau et al., 2000) a été corrigée par comparaison avec les données des chroniques piézométriques et de CE en cours.

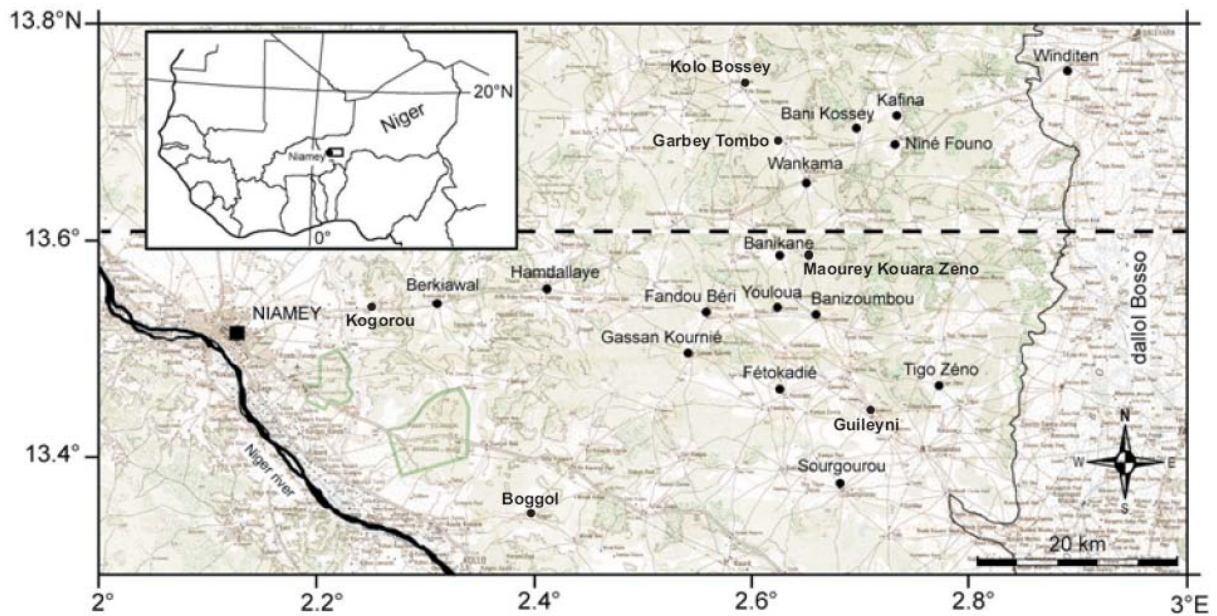


Figure 4. Localisation des 23 sondages TDEM réalisés à l'Est de Niamey au sud-ouest du Niger. Le tracé pointillé à 13.6° marque la coupe géologique représentée Figure 1 (3 sondages TDEM sont confondus à Wankama, P3, F1 et F2)

Site	Coordonnée Est (UTM, en m)	Coordonnée Nord (UTM, en m)	Conductivité de l'eau ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Niveau d'eau/référence (margelles, haut des tubes (m))	Susceptibilité magnétique des sables (10-3 SI)	Date	Heure	Commentaires
Kogorou	419 927	1 497 025	153		0.14 - 0.18	16/11/2006	16:30	
Gassan K.	450 370	1 492 111	36.8	35.4	0.13 - 0.15	17/11/2006		
Fandou Beri	452 191	1 496 218	115	27.17	0.05 - 0.06	17/11/2006	17:20	
Berkiawel	425 344	1 497 156	72	23.74	0.08 - 0.10	18/11/2006	08:00	
Hamdallay	436 053	1 498 485	210*	13.95	0.20 - 0.30**	18/11/2006	10:00	* sur le puit nord ** cuirasse affleurante
Wankama P3	461 753	1 509 039				18/11/2006		
Wankama F1	460 580	1 508 423	?	?	0.35	05/12/2006	07:15	forage rebouché
Wankama F2	460 524	1 508 641	?	?	0.25	05/12/2006	08:30	forage rebouché
Garbey Tombo	459 838	1 512 925	100	19.7		18/11/2006	14:00	
Winditen	488 198	1 520 682	143 ?	5.92	0.09	19/11/2006	09:00	Susceptibilité des fragments de cuirasse/scories(?): 0.25/1.35.
Kafina	470 616	1 516 877	106	47.5	0.18 - 0.25	19/11/2006	10:30	
Ninefouno	470 912	1 513 261	-	31.19	0.06 - 0.09	19/11/2006	12:00	
Banikossey	467 245	1 514 997	88	37.79	0.24 - 0.44	19/11/2006	14:30	
Kolo Bossey	455 700	1 518 479	128	26.94	0.11 - 0.19*	19/11/2006		* + une valeur à 0.44
Banizoumbou	463 182	1 495 750	71	14.96	0.05 - 0.07	20/11/2006		
Maourey K. Z.	462 420	1 502 660	290*	12.25	0.04 - 0.05	20/11/2006		puits ensablé et probablement contaminé par la mare rendue pérenne par le forage artésien à 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Banikane	459 534	1 501 763	42.7	22.71	0.04 - 0.06 0.12 - 0.18	20/11/2006	16:00	2 sables de couleurs différentes dans la boucle de mesure
Bogol	434 883	1 476 399	73.6*	9.57	0.26 - 0.36	21/11/2006	10:00	valeur faible selon d'autres relevés alentours Fiabilité non prouvée.
Sourgourou	465 440	1 478 505	50.5	30.25	0.07 - 0.11	21/11/2006	12:00	
Tigo Zeno	475 423	1 488 487	78.4	21.93	0.03 - 0.06	21/11/2006	14:00	
Guileni	468 411	1 485 802	211	6.5	0.02 - 0.12	21/11/2006	16:00	
Youloua	459 246	1 496 525	49.9	23.05	0.08	22/11/2006	08:30	
Fetokadie	459 327	1 487 899	46.8	42.21	0.05	22/11/2006	10:00	

Tableau 1. Coordonnées des sites TDEM prospectés, conductivité de la nappe et niveau statique à proximité, susceptibilité magnétique sur affleurement et sur le sol sableux. La susceptibilité magnétique est donnée en Système International (SI)

## 4. Interprétation

### 4.1 Stratégie d'interprétation.

En milieu homogène ou 1D, non magnétique et non polarisable, toutes les configurations géométriques d'émission/réception TDEM peuvent être ajustées par un même modèle de résistivité. Les différences se traduisent seulement sur l'information obtenue: pour des petits dispositifs, les temps de coupure sont plus courts, et cela permet d'obtenir une information sur les terrains les plus proches. En revanche, avec de petites boucles, l'induction reste faible et le champ magnétique secondaire aussi. Le signal utile se noie plus vite dans le bruit de fond et cela limite la profondeur d'investigation. Au Niger, des phénomènes magnétiques et de Polarisation Induite (IP), appelée aussi Polarisation Provoquée (PP) perturbent la plupart du temps légèrement les mesures et peuvent conduire à des erreurs d'interprétation ou des interprétations différentes selon les dispositifs considérés. Dans ce cas, il faut impérativement mettre en œuvre sur le terrain des dispositifs différents pour évaluer l'intensité des ces phénomènes (Descloitres et al., 2000). L'interpréteur doit ensuite avoir pour objectif d'harmoniser les interprétations : un seul modèle de terrain doit pouvoir ajuster toutes les courbes de terrain. Pour cela, on doit procéder par étapes successives, singulièrement compliquées par le fait qu'au Niger, les deux phénomènes déforment les courbes de sondages. Ces étapes sont les suivantes :

- a) les courbes sont nettoyées des points aberrants : les distorsions en début de courbe sont éliminées automatiquement par le logiciel. Les points correspondants au bruit de fond en fin de courbe sont éliminés après affichage des barres de dispersion et sélection sévère (la barre de dispersion doit être inférieure à 10% de la valeur de la résistivité apparente calculée pour qu'un point soit jugé valide).
- b) une première inversion des données 25×25m du dispositif coïncident a été réalisée sans introduire de paramètre magnétique ou IP. Le premier terrain est alors noté (résistivité et épaisseur) et entré comme premier terrain fixé pour les interprétations avec la boucle émettrice 100×100m.
- c) Les courbes de sondage 100×100 sont interprétées. Leur modèle est ensuite « ré-injecté » comme modèle de départ pour une seconde inversion avec les données 25×25, en fixant tout les terrains, *sauf le premier*.
- d) Le premier terrain est alors redéfini plus précisément grâce aux données 25×25. De plus, à ce stade, comme le 25×25 coïncident est le dispositif le plus sensible aux effets magnétiques, on tente manuellement d'ajuster la courbe 25×25 avec des paramètres magnétiques. Cet ajustement se fait de la façon suivante :
  - on introduit une susceptibilité magnétique égale à celle mesurée sur le terrain. On laisse l'inversion se réaliser.
  - on fait varier manuellement la susceptibilité pour obtenir un meilleur ajustement de la courbe de sondage. La prise en compte des paramètres magnétiques dans l'interprétation des sondages est la plupart du temps nécessaire pour les sites où les terrains sont résistants (signal d'induction faible).
  - souvent, il faut aussi prendre en compte un effet de polarisation (IP). Les paramètres sont entrés manuellement, puis inversés automatiquement dans le programme.
- e) Après avoir ajusté au mieux la courbe de sondage 25×25, avec adjonction éventuelle de paramètres magnétiques et IP, le modèle 25×25 est proposé pour une inversion pour les sondages 100×100, coïncident et central. La résistivité

et l'épaisseur du premier terrain est *fixé* et les autres laissés libres. Dans un premier temps, les paramètres IP ne sont pas pris en compte. Le paramètre de magnétisme est par contre *conservé*, car il modifie la fin des courbes parfois de façon notable. Pour certains sondages, il n'est pas possible de laisser le premier terrain fixé pour obtenir un ajustement correct de la courbe 100×100 (ces cas sont expliqués par des variations latérales de la résistivité).

- f) La résistivité du dernier terrain (qui correspond au socle ou à la formation géologique des sables inférieurs) est déterminée avec le sondage 100×100 *central*, qui n'est pas affecté par les effets magnétiques, et en utilisant 2 stations TDEM où le substratum est proche de la surface : Kogorou et Bogol (figure 5). La résistivité obtenue est en général proche de 200 Ohm.m (190 et 220 Ohm.m respectivement). Le socle est ici de nature granitique altéré. La résistivité calculée par le TDEM est toutefois relativement basse pour ce type de formation : on sait qu'une altération granitique peut prendre des valeurs de l'ordre de 200 Ohm.m, mais il faut imaginer une altération d'au moins 100 à 150 m d'épaisseur (calcul non présenté dans ce rapport), ce qui semble incompatible avec la géologie. Cette question n'est pas tranchée dans ce rapport en l'absence de mesure de résistivité en forage. Pour la formation des sables inférieurs, la valeur de 200 Ohm.m peut être cependant être considérée comme assez haute pour ce type de terrain si l'eau contenue dans ce terrain présente une minéralisation relativement forte (1250 à 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  -soit 8 à 6.5 Ohm.m- Favreau, 2000).

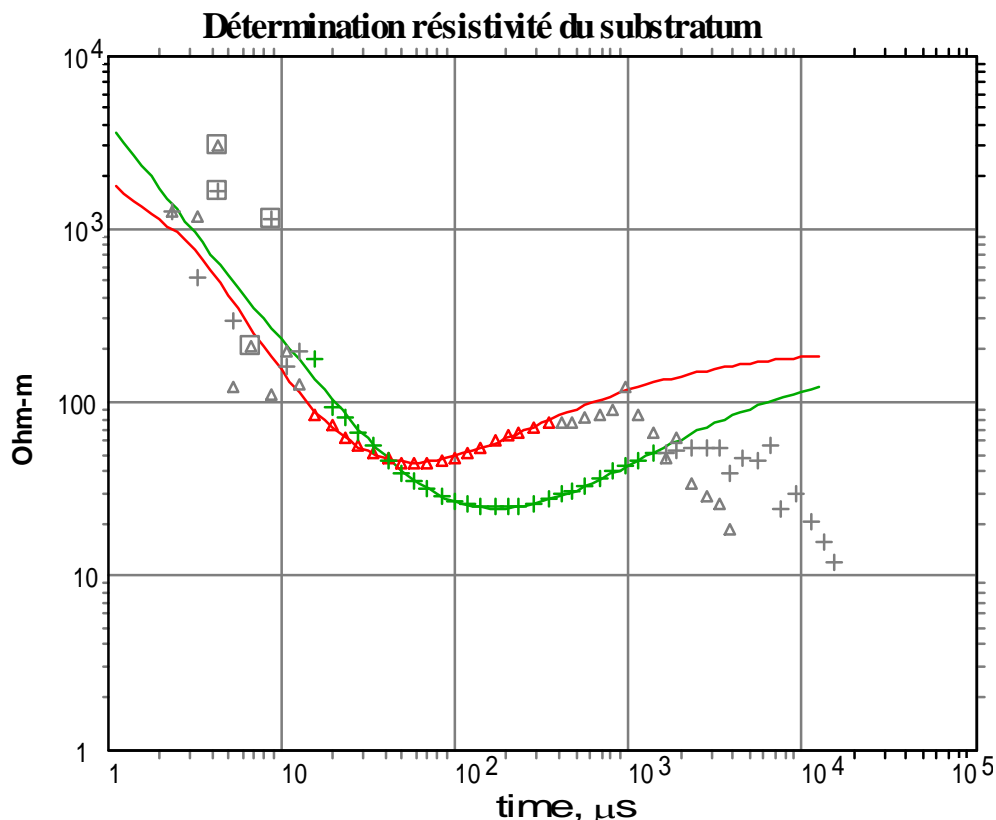


Figure 5. Détermination de la résistivité du substratum résistant pour les stations de Kogorou (en rouge) et de Bogol (en vert), 220 et 190 Ohm.m respectivement d'après le calcul de l'inversion, et qui sont les valeurs vers lesquelles tendent les 2 courbes. Pour ces stations, le nombre de points définissant la résistivité du substratum est suffisant pour discriminer une valeur d'environ 200 Ohm.m d'une valeur plus élevée de 500 Ohm.m par exemple. On note aussi qu'un effet magnétique perturbe les

courbes de sondage à la fin, infléchissant ces courbes vers le bas. Les points correspondants n'ont pas été considérés par l'inversion et apparaissent en gris sur la figure.

Pour l'ensemble des sondages on fixe la résistivité de ce substratum à 220 Ohm.m (figure 6). Cela permet de réduire les équivalences possibles et de concentrer l'analyse des équivalences sur le terrain sus-jacent, les argiles grises.

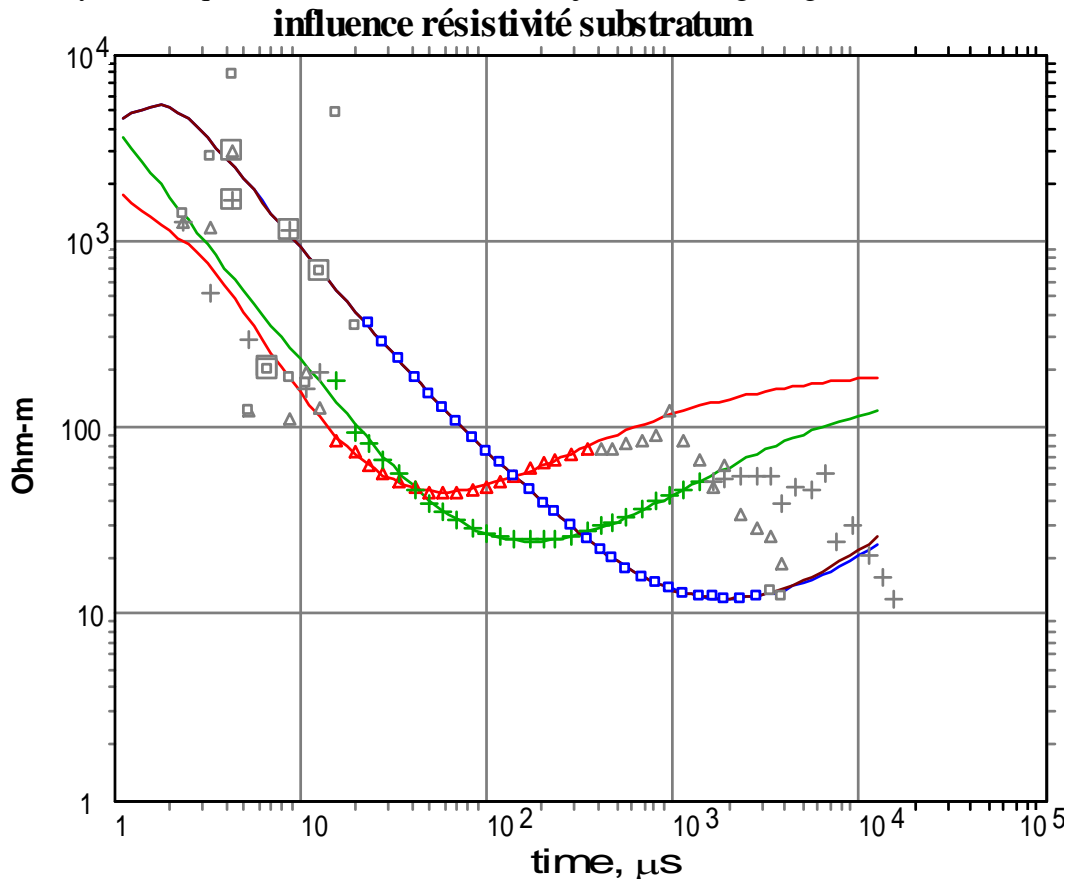


Figure 6. Pour des stations où le substratum résistant est plus profond (ici Fandou Beri, courbe bleue), la valeur de la résistivité de ce substratum n'est pas importante pour l'ajustement de la courbe (200 Ohm.m en bleu, et 10000 Ohm.m en marron).

- g) Une fois les inversions pour le dispositif 100x100 coïncident et central réalisées individuellement, elles sont comparées entre elles. Des ajustements manuels les harmonisent éventuellement.
- h) Les paramètres IP sont ensuite réintroduits (s'ils avaient été nécessaires à l'interprétation du 25x25). Une inversion avec les paramètres de résistivité-épaisseur laissés libres (sauf premier terrain toujours) conduit à valider ou modifier les paramètres IP obtenus en 25x25 m. L'absence de données en début de courbe pour les dispositif 100x100 m (saturation des amplis, élimination automatique de données distordues) a pour conséquence probable une mauvaise estimation des paramètres IP, qui peuvent se révéler différents de ceux initialement retenus en 25x25 m, considérés comme plus fiables. En conséquence, les paramètres IP calculés en 100x100 m ne doivent pas être considérés comme validés. De toute façon, l'introduction de paramètres IP dans les inversions TDEM ne modifient pas notablement les interprétations du terrain argileux (profondeur, résistivité, épaisseur), cible principale de la prospection.

- i) Les 3 modèles (25×25 m coïncidant, 100×100 m coïncidents, 100×100 m, central) sont extraits et présentés en annexe, avec les courbes de terrain et les courbes synthétiques.

#### 4.2 Estimation des incertitudes sur les profondeurs, les épaisseurs et les résistivités des terrains principaux.

- Le 2eme terrain, proche de la surface, est généralement résistant. Dans cette formation se situe la nappe. Peut-on séparer ce terrain en 2 pour y distinguer la nappe ?

Pour cela, il faut faire une hypothèse sur la résistivité de l'aquifère que nous décidons d'évaluer grâce à la loi d'Archie (Archie, 1942) donnée par :

$$\rho_f = a \frac{\rho_w \Phi^{-m}}{S_w^n}$$

avec :

- $\rho_f$  : résistivité de la formation ( $\Omega.m$ ),
- $\rho_w$  : résistivité de la solution ( $\Omega.m$ ),
- $\Phi$  : porosité (rapport du volume des vides au volume total, sans dimension),
- $S_w$  : saturation (rapport du volume des vides remplis par l'eau au volume total des vides, sans dimension). Pour les aquifères (saturés),  $S= 1$ .
- $a$  : coefficient de saturation tel que, en général,  $a \cong 1$  (sans dimension),
- $m$  : facteur de cimentation proche de 1.4 pour les sable et grès,
- $n$  : exposant de saturation, proche de 2, (sans dimension).

La conductivité moyenne des nappes dans la région est de 100  $\mu S/cm$  (100 Ohm.m), moyenne des valeurs mesurées dans les nappes lors des sondages TDEM.

En appliquant la loi d'Archie à des sables saturés de porosité 25% (valeur au-delà du maximum de 19.7% obtenu par mesures RMP), et en prenant une valeur extrême de conductivité des eaux mesurés (290  $\mu S/cm$ , 35 Ohm.m) on sait, si la loi Archie est valide dans cette zone, que la résistivité de la formation sera au moins de 240 Ohm.m.

Le sondage de Wankama F1 peut être pris comme exemple (figure 7): le terrain représentant la nappe modifie la courbe synthétique obtenue dans une proportion à peine perceptible. Sur ce sondage, la présence d'une faible distorsion due à un phénomène de polarisation augmente l'écart entre les courbes

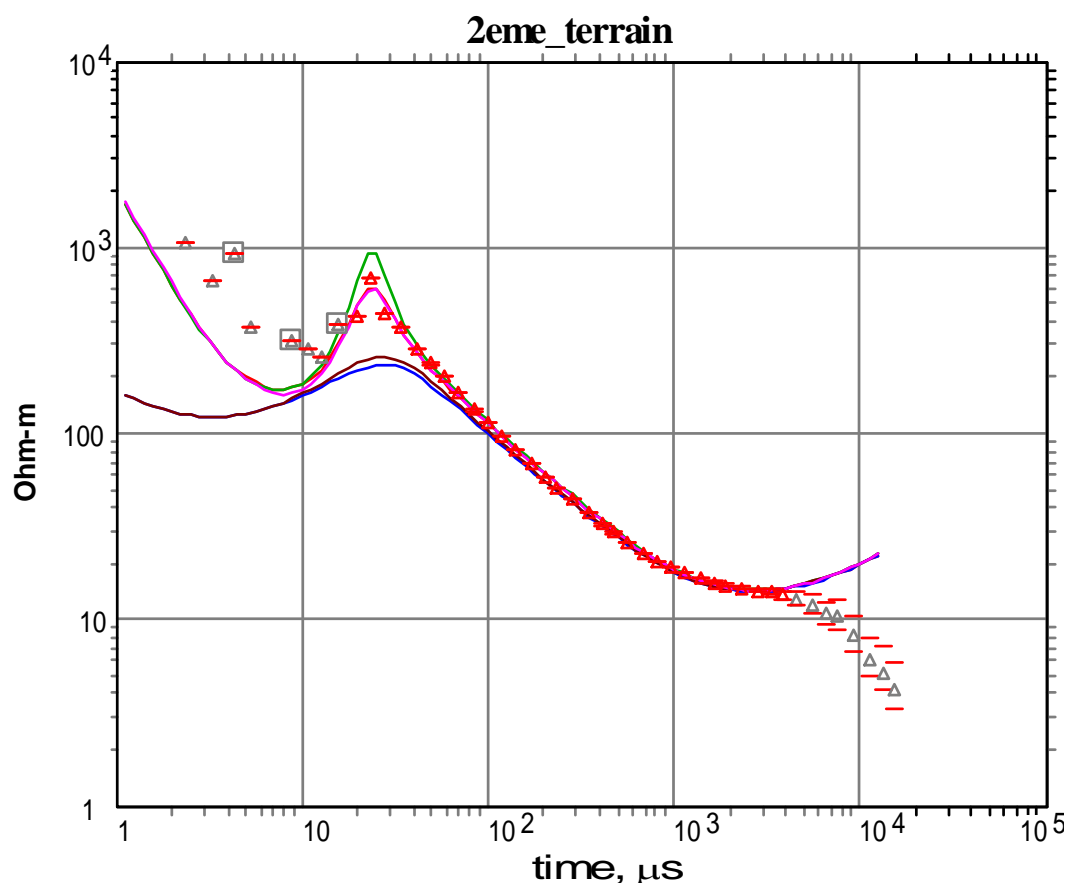


Figure 7. Exemple de la non-résolution du terrain aquifère saturé sur le sondage de Wankama F1. Le terrain (CT3) situé juste au dessus des argiles grises est plus résistant. Il provoque la remontée de la courbe marron vers 30  $\mu$ s. Ce terrain fait 65 mètres d'épaisseur et 2000 Ohm.m. Lorsqu' on cherche à y distinguer l'aquifère saturé (situé à 35 mètres de profondeur ici), on sépare ce terrain résistant en 2 parties: la partie supérieure, non saturée, à 2000 Ohm.m et la partie inférieure, saturée plus conductrice (240 Ohm.m). Le résultat correspond à la courbe bleue, et la différence est peu notable (bleu). Sur ce site, il faut en plus tenir compte d'un effet de polarisation : un terrain polarisable doit être introduit pour ajuster les données (courbe rouge). La séparation en rajoutant un aquifère saturé (courbe verte) se distingue mieux. Mais le RMS entre les 2 scénarios est le même, interdisant concrètement la définition fiable du terrain aquifère saturé de 200 Ohm.m

Ces modélisations montrent que, sur les courbes de sondage type, il n'est pas possible de distinguer le terrain aquifère saturé dans les interprétations TDEM si celui-ci a une résistivité de l'ordre de 200 Ohm.m ou plus. L'introduction des données des forages (profondeur de l'aquifère, conductivité de l'eau et hypothèse d'Archie) dans l'interprétation des courbes TDEM n'a pas été tentée à ce stade de l'étude.

- Le substratum conducteur est présent sur tous les sondages TDEM. Il correspond aux argiles grises. Quelle est l'incertitude sur le calcul du toit, de la résistivité et de l'épaisseur de ce terrain ?

Les sondages TDEM 100×100m en mode central servent de référence pour la présentation des résultats dans cette étude, car ils ne sont pas distordus par les effets magnétiques. La profondeur du toit des argiles, la résistivité des argiles et leur épaisseur sont analysées en première approche en proposant à l'inversion des valeurs de résistivité et d'épaisseur nettement plus petites et plus grandes ( $\pm 50\%$ ) que la valeur moyenne obtenue après l'interprétation sans contraintes (interprétation qu'on peut qualifier d'« optimale » et qui est présentée avec une couleur bleue en annexe pour chaque site). Les itérations d'inversion sont conduites jusqu'à un résultat qui ne fait pas varier l'interprétation de plus de 1% par rapport à

l'itération précédente. Par exemple, si l'interprétation moyenne indique 6 Ohm.m et 50 mètres d'épaisseur, on rentre comme solution de départ deux valeurs de résistivité de 3 Ohm.m et 9 Ohm.m, et 2 valeurs d'épaisseur de 25 et 75 m pour les 2 inversions. On fixe lors de ces inversions les valeurs de résistivité et d'épaisseur du premier terrain, qui correspond généralement à un terrain sableux de faible épaisseur dont la partie supérieure peut être magnétique. Seul les sondages à 4 terrains (et pour lesquels le 3ème terrain à partir de la surface est le terrain conducteur correspondant aux argiles) sont considérés pour cette estimation des incertitudes. On bloque dans tous les cas la résistivité du substratum résistant à 220 Ohm.m (qui est le 4<sup>ème</sup> terrain, qu'il soit « vu » par le sondage ou non). Cette procédure, arbitraire mais identique pour tous les sondages, permet a) de comparer les incertitudes d'un sondage à l'autre avec la même procédure, b) d'inclure à la fois les incertitudes d'équivalence et celle due à l'inversion elle-même, c) de tenir compte de la qualité des données en fin de courbe, données qui sont parfois dispersées malgré une barre d'erreur restant inférieure à 10%.

Les résultats sont présentés sur le tableau 2

Sites	prof. min. calc. (m)	prof. opt. calc. (m)	prof. max (m)	prof. géol. Log. <sup>a</sup> (m)	prof. géol. modèle <sup>a</sup>	prof. socle Log. <sup>a</sup> (m)	prof. socle modèle (± 5 m)	rés. min (Ohm.m)	rés. opt. (Ohm.m)	rés. max (Ohm.m)	épais. min (m)	épais. opt.	épais. max (m)	épais. géol Log <sup>a</sup> (m)	épais. géol modèle (± 5 m)
Banikane	49.0	49.5	53.0	-	47 ± 3.2	-	136	4.55	5.05	5.25	58.0	67.0	72.0	-	67
Banikossey	76.5	77.0	78.5	-	83 ± 3.2	-	169	5.65	5.80	5.90	78.9	82.0	82.0	-	76
Banizoumbou	43.5	45.5	45.5	55	46 ± 2.2	128	138	5.52	5.65	6.20	65.0	67.5	76.0	65	65
Berkiawel	36.5	40.0	41.5	37 < 45	42 ± 3.7	76 < 77	77	3.33	4.80	6.35	12.0	17.5	24.0	21 < 29	21
Fandou Beri	49.0	49.0	49.5	48 < 50	49 ± 2.7	p. > 82	123	4.80	4.90	4.90	58.0	59.5	60.0	e > 33	49
FetoKadie	74.0	74.5	75.0	70 < 71	69 ± 2.7	p. > 103	148	4.40	4.60	5.00	50.0	51.5	60.5	e > 33	57
Garbey Tombo	51.0	51.0	52.0	-	55 ± 3.2	-	139	6.40	6.54	6.55	68.5	73.0	74.0	-	67
Gassan Kour.	51.0	53.5	57.0	57	57 ± 2.7	p. > 93	122	4.70	6.25	6.80	31.0	33.0	44.0	e > 36	44
Guileyni	43.0	44.5	45.0	38 < 44	43 ± 2.2	p. > 133	125	3.80	4.00	4.15	66.0	68.5	71.0	63 < 78	71
Hamdallaye	32.5	33.0	36.0	40	37 ± 3.7	90	91	2.40	4.14	4.90	9.50	19.0	23.5	25 < 30	30
Kolo Bossey	59.0	59.5	61.0	57 < 74	58 ± 2.2	p. > 131	130	5.00	5.60	5.70	53.0	62.0	64.5	42 < 59	59
Maourey K. Z.	43.0	43.5	47.0	-	44 ± 3.2	-	137	5.10	5.80	6.10	51.0	64.0	66.5	-	70
Sourgourou	70.0	71.0	72.0	p. > 60	66 ± 3.7	p. > 60	137	3.15	3.75	3.80	47.0	60.0	62.5	-	57
Tigo Zeno	68.0	69.0	73.1	-	71 ± 4.0	p. > 160	> 147	2.30	3.15	3.80	30.0	47.0	62.0	e > 40	70
Wankama P3	50.0	52.0	53.1	60	55 ± 3.2	p. > 144	147	5.70	6.14	6.20	63.5	73.5	73.5	70	70
Wankama F1	65.0	66.0	66.0	-	71 ± 3.2	p. > 160	163	5.70	5.85	5.90	75.0	77.0	79.0	-	69
Wankama F2	68.0	68.0	68.0	-	71 ± 3.2	p. > 160	163	6.50	6.80	7.70	85.0	105.0	114.0	-	69
Youloua	43.5	44.0	49.0	p. > 46	49 ± 2.2	p. > 46	136	5.10	6.00	6.35	55.5	63.0	65.5	-	66
Louga				44 < 47	48 ± 4.5	p. > 64	87							e > 20	25
Kafina	95.0	95.5	96	-	101 ± 4.0	-	181	5.80	6.00	6.05	-	87.5	-	-	81
Boggol	16.1	16.5	16.7	-	19/23±4.2	-	50	8.9	10.2	11.3	16.5	17.5	18.4	-	31
Ko Gorou				-	p.>24±5.0	-	50							-	20
Winditenne	72.0	73.0	73.5	-	91 ± 4.7	-	> 147	-	5.8	-	>150	-	-	-	91
Nine Founo	72.0	72.0	72.0	76	82 ± 3.2	p. > 155	165	5.20	5.50	6.15	109	115	120	e > 79	80

Tableau 2. Incertitudes sur les valeurs de profondeur du toit, de la résistivité et de l'épaisseur des argiles grises calculées pour les sondages TDEM interprétés avec 4 terrains et profondeurs d'après le modèle géologique.

a : les profondeurs s'entendent au niveau de la boucle TDEM (corrigé du dénivelé avec le forage). Les incertitudes proviennent de l'imprécision sur les descriptions lithologique (e.g., profondeurs différentes des argiles grises selon des logs géologiques décrits sur un même village) à laquelle s'ajoute l'incertitude altimétrique.

D'après cette première étude de l'incertitude, on constate que la profondeur du toit des argiles est bien déterminée (de l'ordre de 3 à 5% de déviation par rapport à la valeur optimum). De même, la résistivité est en général bien contrainte (incertitudes inférieures à 15 % en général). Certains sondages présentent cependant des variations importantes (35%) de la valeur de la résistivité, pouvant être dues à la proximité du socle (Berkiawel par exemple). L'épaisseur est en général assez bien contrainte (15%) mais l'incertitude associée peut atteindre des incertitudes élevées de 25 à 35 % du fait d'une qualité des données plus faible ou d'une dispersion des points en fin de courbe (Tigo Zeno par exemple). Les figures 8 et 9 présentent une comparaison entre les interprétations TDEM et les données déduites de l'analyse des logs de forage concernant a) la profondeur du mur de l'aquifère (toit des argiles) (Fig. 8) et b) l'épaisseur des argiles (Fig. 9).

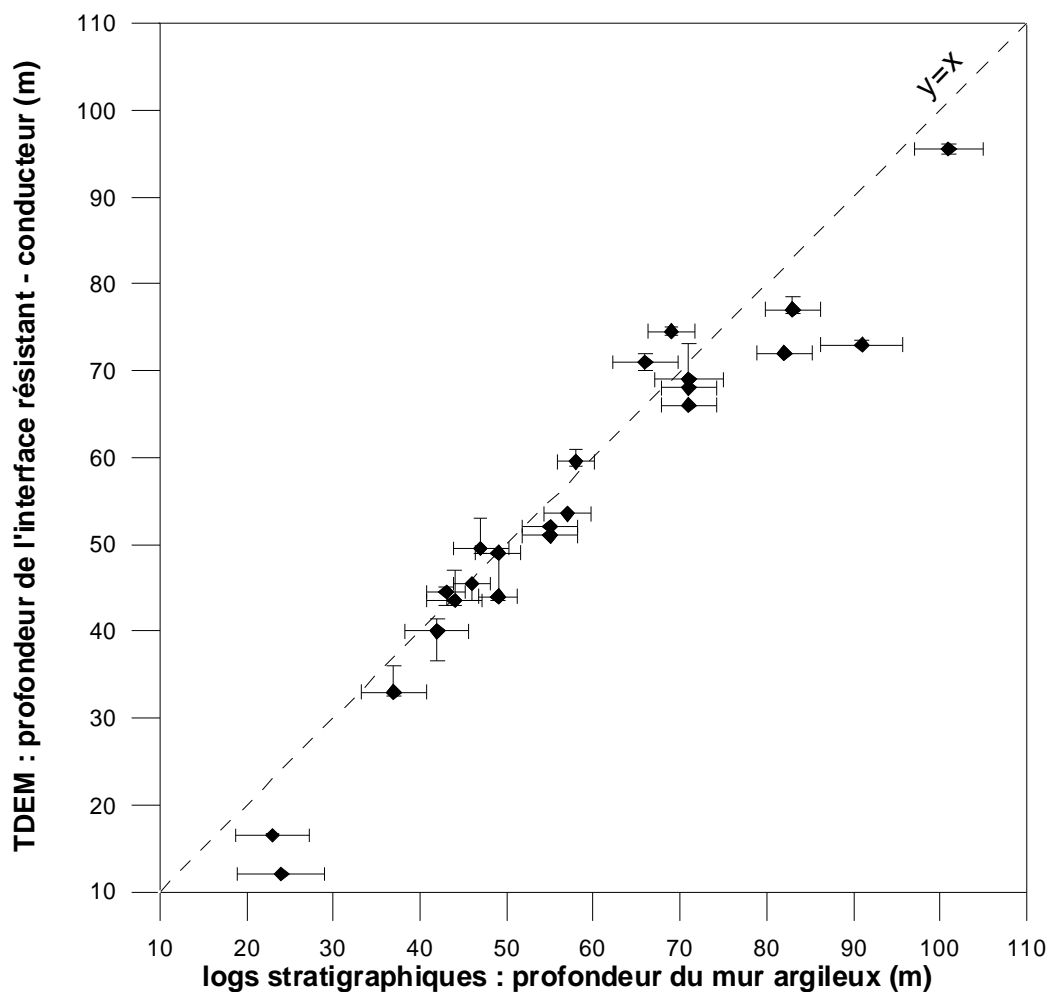


Figure 8 : Corrélation entre la profondeur du mur de l'aquifère du CT3 déduite des forages, et calculées par l'interprétation TDEM.

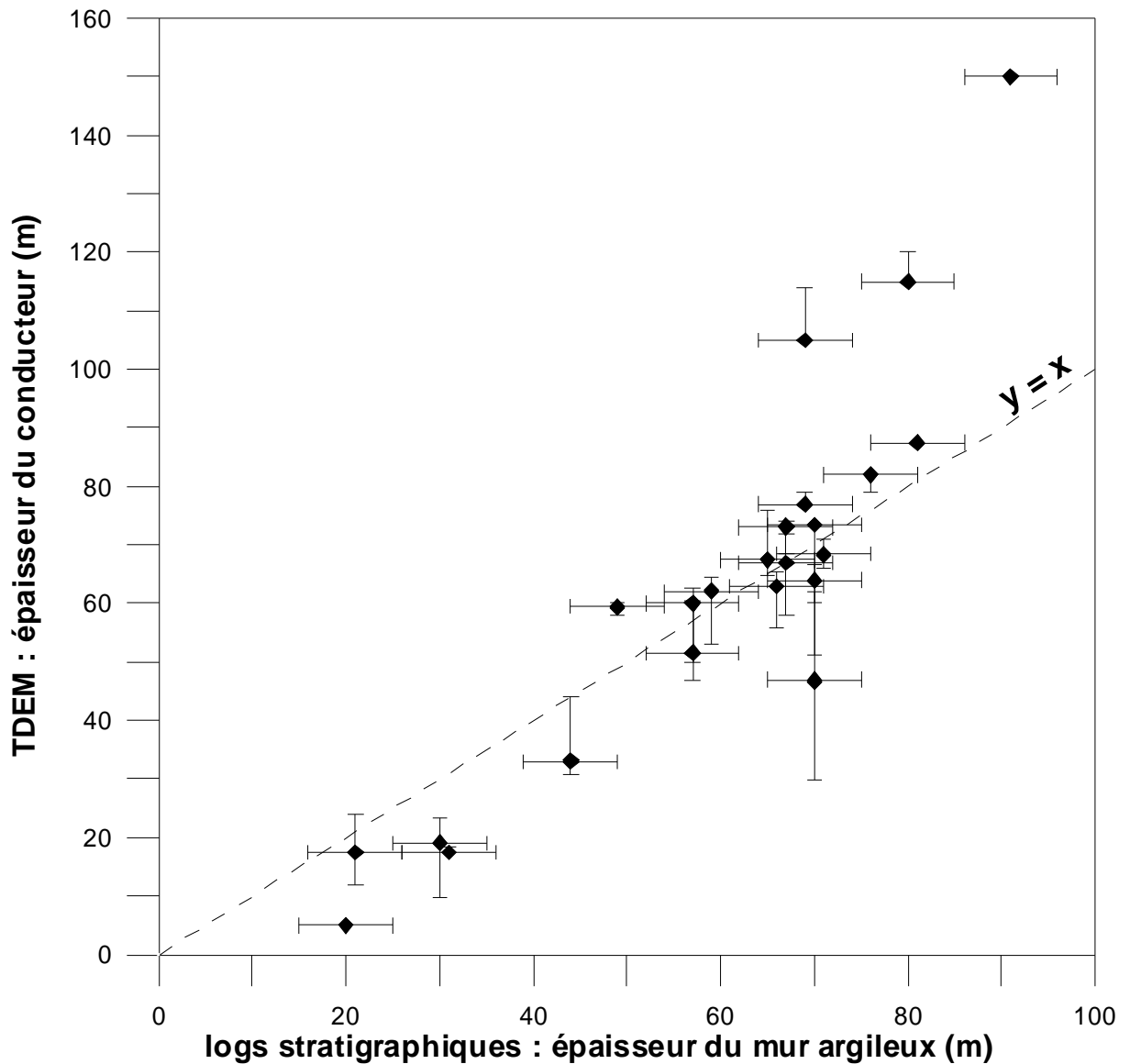


Figure 9 : Corrélation entre l'épaisseur du mur de l'aquifère du CT3 déduite des forages, et calculées par l'interprétation TDEM. Le groupe de 3 points sortant nettement de la tendance générale, Winditenne, Nine Founo et Wankama F2, ont leur épaisseur calculée par TDEM très supérieures à celle déduite des forages. Il est possible que le terrain sous-jacent aux argiles soit dans ces zones plus conducteurs (changement de nature, ou de conductivité des eaux, ce qui baisserait la résistivité et augmentera leur épaisseur).

En résumé, les argiles grises la cible de la prospection TDEM, sont relativement bien contraintes (profondeur du toit, résistivité et dans une moindre mesure, leur épaisseur si les sondages TDEM rencontrent un terrain sous-jacent à ces argiles qui soit plus résistant). On retrouve de façon expérimentale le fait que le TDEM est une méthode très adaptée à la détection des conducteurs.

### 4.3 Effet du magnétisme

Le sondage de Bogol est un bon exemple de l'effet magnétique et de l'erreur possible en 100×100 coïncident si on ne tient pas compte du magnétisme : Le magnétisme produit une chute de la résistivité apparente en fin de courbe (figure 10) du dispositif coïncident qui pourrait être considéré comme un terrain conducteur. Dans le cas de ce sondage si on introduit un terrain magnétique de susceptibilité  $0.8 \cdot 10^{-3}$  SI (unité de susceptibilité magnétique exprimée en « Système International, SI ») de 0.5 mètre d'épaisseur situé en

surface, l'interprétation des courbes des sondages coïncidents est améliorée. Le dispositif central quant à lui n'est pas affecté par le magnétisme. Dans cette zone du Niger, il convient donc de réaliser des dispositifs centraux pour éviter des interprétations fausses des terrains conducteurs profonds.

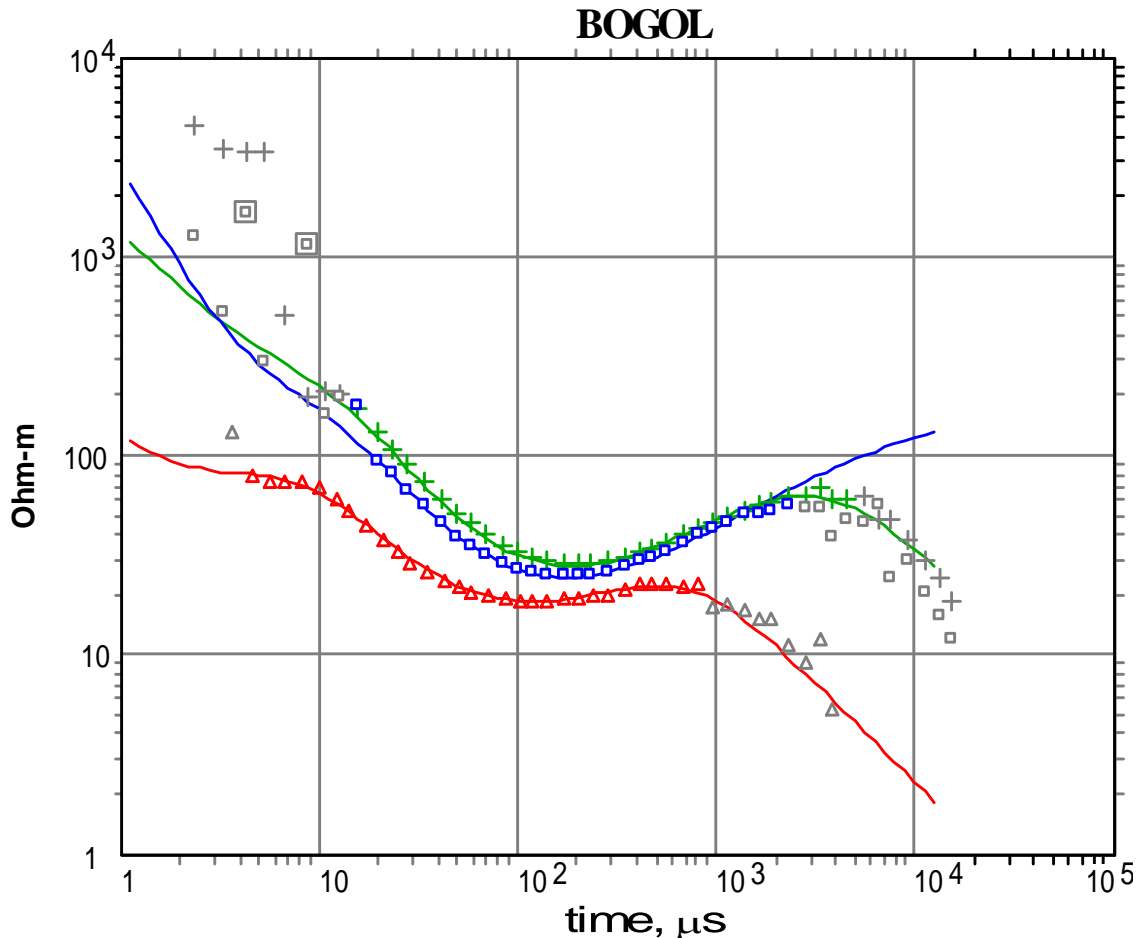


Figure 10. Site de Bogol. Exemple de l'effet d'un terrain magnétique de surface sur les courbes de sondage (25×25 m coïncident en rouge, 100×100 m coïncident en vert, 100×100 m, central en bleu)

#### 4.4 Effet de la polarisation provoquée (PP)

Les analyses faites lors des interprétations montrent que l'effet de polarisation implique des propriétés de polarisation soient présentes dans un terrain superficiel, ce qui ne compromet pas la définition des argiles. Pour confirmer ce résultat cependant, une comparaison avec les données de forage devra être faite. En revanche, pour la définition précise de la résistivité et de l'épaisseur des premiers terrains (dans les 10 premiers mètres) les effets de polarisation provoquent trop de distorsion. Des études fines (petites boucles) seraient nécessaires pour résoudre les paramètres résistivité/épaisseur de ces terrains.

### 5. Synthèse des résultats

Le toit, l'épaisseur et la résistivité des argiles mur de l'aquifère peuvent être déterminés par l'utilisation de sondages TDEM. Une bonne cohérence régionale est obtenue : approfondissement du toit des argiles vers le centre du bassin situé à l'est, en conformité avec les résultats des forages et du modèle géologique établi (Favreau, 2000). Ce résultat montre que le TDEM peut être un outil intéressant pour la prospection géologique des niveaux argileux du Continental terminal (150 000 km<sup>2</sup>, au sud-ouest du Niger) et au-delà, pour de

nombreux bassins sédimentaires ouest africains de lithologie proche. L'introduction des données d'altitude des forages permettra de tracer le toit et l'épaisseur des argiles.

Le TDEM est une méthode qui se révèle une alternative très intéressante aux sondages électriques pour la détection de formations géologiques conductrices et relativement profondes (20 à plus de 150 mètres).

Pour une investigation réduite en revanche (i.e. entre 0 et 20 m de profondeur), le TDEM se révèle limité si on l'emploie avec des boucles d'émission petites (inférieur à 50 m), car ces dispositifs sont plus sensibles au magnétisme du terrain situé juste sous la boucle (sources de distorsion possibles), comme c'est le cas sur certains sites au Niger. La mise en oeuvre de plusieurs dispositifs de mesures (carrés de 25×25 m de côté en émetteur / récepteur et des dispositifs 100×100 en émission et 25×25 m en réception) sur un même site a permis d'estimer l'effet magnétique et l'effet de polarisation.

Les terrains prospectés au Niger sont parfois polarisables (résistivité dite « complexe ») et le TDEM est partiellement affecté par ce phénomène. L'effet de polarisation se traduit par une distorsion (remontée anormale de la courbe de résistivité apparente) dans le premier tiers de la courbe de sondage. Cette distorsion a été modélisée par l'introduction de paramètres « Cole-Cole » adaptés à la modélisation de cet effet de polarisation. Cet effet n'est pas perturbateur dans cette étude car il s'agissait de reconnaître des formations argileuses relativement profondes dont les paramètres sont exprimés dans la deuxième, voire la troisième partie de la courbe de sondage. Les données acquises en routine au Niger lors de cette prospection ne permettent pas une étude poussée des paramètres « Cole-Cole ». En interprétation de routine, les paramètres « Cole-Cole » proposés lors des interprétations sont assez variés : chargeabilité de l'ordre de 0.01 à 0.9 (sans unité), constante de temps en général de l'ordre de 1 à 10 micro-seconde ( $\mu\text{s}$ ). La dépendance fréquentielle n'a pas été analysée dans cette étude (fixée à 1). D'un dispositif à l'autre (25×25) et (100×100), les paramètres « Cole-Cole » sont souvent différents. Cela dénote soit a) une variabilité spatiale importante, ou b) un effet d'échelle important. Ces aspects devront être analysés plus spécifiquement lors de mesures TDEM futures, voire des mesures de polarisation provoquée temporelle ou spectrale.

Les terrains résistants (sables et sablo-limoneux de surface) possèdent une susceptibilité magnétique très variable, de  $0.02$  à  $0.4 \cdot 10^{-3}$  SI. Ces valeurs ont été mesurées en surface par un susceptibilitémètre. Il n'est pas nécessaire d'introduire systématiquement une couche de terrain magnétique peu épaisse située juste sous la boucle d'émission pour interpréter le TDEM. Lorsque cela est nécessaire, les interprétations TDEM montrent des valeurs de susceptibilité de l'ordre de  $0.4$  à  $5 \cdot 10^{-3}$  SI (une valeur de  $12 \cdot 10^{-3}$  est même calculée). La raison de l'écart de valeur entre la mesure de susceptibilité de surface et celle proposée lors du calcul (de l'ordre d'un facteur 10) n'a pas été étudiée pour l'instant. L'origine de la susceptibilité est aussi à étudier. On peut émettre l'hypothèse de la présence de grains magnétiques dans les sables, qui sont les produits de l'érosion des plateaux cuirassés environnants. La présence de ces terrains magnétiques peut aussi être envisagée en profondeur et dans ce cas, ils pourraient être perturbateurs pour la RMP. Quelques mesures de susceptibilité magnétique ont été réalisées sur cuttings de forage par M. Boucher (communication personnelle). Les valeurs de susceptibilité obtenues sont du même ordre de grandeur que celles mesurées en surface. Etant donné que les sondages RMP ont donné de bons résultats, nous concluons que la présence d'une susceptibilité magnétique relativement faible (de l'ordre de  $0.05$  à  $0.1 \cdot 10^{-3}$  SI) ne compromet pas la réalisation de sondages RMP

dans cette zone. Les effets perturbateurs des terrains magnétiques de surface ne compromettent pas non plus l'utilisation de la méthode TDEM, à condition d'employer un dispositif central, on coïncident de grande dimension (100x100 par exemple), pour éviter des fausses interprétations sur des terrains en profondeur.

Au final, la méthode TDEM et l'appareillage utilisé (Temfast 48) se révèlent adaptés à l'objectif principal fixé (i.e, la reconnaissance du mur de l'aquifère, les argiles grises conductrices). Lorsque des effets magnétiques ont été reconnus en dispositif 25x25 coïncident, il ne faut considérer que les interprétations données pour le dispositif 100x100 m central. Sinon, les interprétations obtenues en dispositif 100x100m coïncident peuvent être considérés en combinaison avec le dispositif central pour une meilleure définition des terrains argileux et du substratum résistant. L'étude détaillée des premiers terrains avec le TDEM est en revanche difficile (effet magnétiques et de polarisation), et on doit préférer d'autres méthodes pour cela (ou employer le TDEM avec des géométries complémentaires). En tout état de cause, le géophysicien prospectant au Niger avec la méthode TDEM doit préalablement s'assurer ou non de la présence d'effet de polarisation et de magnétisme sur ses sites et agir en conséquence par la mise en œuvre de géométries d'émission/réception adaptées.

Au sud ouest du Niger, la somme des études hydrogéologiques effectuées depuis les années 1990 a permis de tester la fiabilité de la méthode TDEM sur un des aquifères les plus connus d'Afrique sahélienne. L'efficacité du TDEM s'avère au moins aussi bonne qu'une reconstitution classique de la stratigraphie régionale, qui demande, pour obtenir une estimation aussi fiable de la morphologie des aquifères, une accumulation et une analyse poussée, très consommatrice de temps, des logs géologiques accessibles.

Pour les aquifères libres de grands bassins sédimentaires sub-sahariens où les informations géologiques sont rares ou difficiles à réunir, l'utilisation couplée TDEM - RMP présente l'immense avantage de pouvoir déterminer de manière rapide et non destructive l'épaisseur de l'aquifère saturé (le niveau de la nappe libre par RMP, la profondeur de l'aquifère saturé par TDEM).

## Remerciements :

L'équipe IRD/BRGM remercie vivement les partenaires institutionnels Nigériens, en particulier le *Département de Géologie de l'Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)* et la *Direction des Ressources en Eau du Ministère de l'Hydraulique, de l'Environnement et de la Lutte contre la Désertification* qui ont permis les accès aux sites de mesures, l'obtention des données de forages, et facilité la réalisation de la conférence de restitution des résultats (M. Boucher, 2006, séminaire réalisé en salle de documentation du *Ministère de l'Hydraulique, de l'Environnement et de la Lutte contre la Désertification*).

L'équipe remercie chaleureusement les personnes qui ont permis la réalisation de cette mission, le personnel de l'IRD à Niamey et notamment Abdoulaye Koné, Abdoulaye Oumarou, Bodo Seyni & Tahirou Bana Hachimou.

## Références bibliographiques

**Archie G. E.** (1942) - The electrical conductivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transaction of the Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*. 146 : p. 54-62.

**Boucher, M.** (2007) Estimation des propriétés hydrodynamiques des aquifères par résonance magnétique des protons dans différents contextes géologiques, de l'échantillon à l'échelle hydrogéologique. Thèse en cours à l'Université d'Orléans (BRGM / Iris Instrument / IRD, soutenance prévue à l'Université d'Orléans en juin 2007)

**Boucher M., Favreau G., Massuel S., Vouillamoz J.M.** (2006) caractérisation hydrogéologique de l'aquifère du Continental Terminal 3 (CT3) au Niger par la méthode de résonance magnétique protonique (RMP). Rapport final IRD – BRGM, BRGM/RP 54746-FR, 106 pp., Orléans, France. Disponible à : <http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-54746-FR>

**Descloitres, M.** (1998). Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) : Application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap Vert) et du Piton de la Fournaise (la Réunion). *Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6*, 238 p.

**Descloitres, M., Guérin, R., Albouy, A., Tabbagh, A., Ritz, M.** (2000). Improvement in TDEM sounding interpretation in presence of induced polarization. A case study in resistive rocks of Fogo volcano, Cape Verde Islands. *Journal of Applied Geophysics*, 45, pp 1-18.

**Favreau G.** (2000). Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique du kori de Dantiandou (sud-ouest du Niger). Thèse de doctorat, Université de Paris 11, France.

**Favreau G., Leduc C., Marlin C.** (2000). Représentativité de l'échantillonnage géochimique et hydrodynamique en nappe libre de milieu semi-aride. *Journal of African Earth Sciences* 31, 3/4, 669-678.

**Favreau, G., Boucher, M., Descloitres, M., Vouillamoz, J.M., Massuel, S., Nazoumou, Y., Legchenko, A.** (2007) Apport des sondages TDEM et RMP à une meilleure

estimation des paramètres de la modélisation d'un aquifère libre en milieu semi-aride (Niger). Résumé étendu soumis pour le *Colloque GEOFCAN*, Bondy, septembre 2007, France

**Legchenko, A., Ezersky M., Girard J. F., Baltassat J. M., Boucher, M. Camerlynck, C., Al-Zoubi A.**, (2007) Interpretation of MRS measurements in rocks with high electrical conductivity. *Journal of Applied Geophysics* (soumis).

**Massuel S.** (2005). Evolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du sud-ouest du Niger. Modélisation des eaux de surface et souterraines du bassin du kori de Dantiandou sur la période 1992-2003. Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, France.

**Massuel S., Favreau G., Descloitres M., Le Troquer Y., Albouy Y., Cappelaere B.**, (2006). Deep infiltration through a sandy alluvial fan in semiarid Niger inferred from electrical conductivity survey, vadose zone chemistry and hydrological modelling. *Catena* 67, 105-118.

**Vouillamoz J.M., Favreau G., Massuel S., Boucher M., Nazoumou Y., Legchenko A.** (2007) Contribution of MRS to a better estimate of aquifer recharge in semiarid Niger. *J. Applied Geophysics* (soumis).