



CARACTERISATION DES AQUIFERES SUR LES SITES AMMA CATCH AU BENIN

APPORT DE LA RESONANCE MAGNETIQUE DES PROTONS



Rapport de mission

23 novembre – 10 décembre 2006

Marc Descloitres (IRD-LTHE, Hydrogéophysique),
Luc Séguis (IRD-HSM)
Maxime Wubda (IRD Bénin)

Liste des acronymes

AMMA: Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
SO Amma- Catch : Service d'Observation Amma –Catch (anciennement « ORE »)
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 :

	<i>pages</i>
• <i>Figure 1 Localisation générale des sondages RMP (coordonnées UTM, WGS 84).....</i>	<i>4</i>
• <i>Figure 2. Localisation des sondages RMP sur Ara.</i>	<i>5</i>
• <i>Figure 3. Localisation des sondages RMP sur le versant de Nalohou</i>	<i>6</i>
• <i>Figure 4. Localisation des sondages sur Béléfoungou</i>	<i>7.</i>
• <i>Figure 5. Localisation des sondages sur Bira.</i>	<i>8</i>
• <i>Figure 6. Exemple de feuille de résultat de sondage RMP, avec interprétation.</i>	<i>11</i>
• <i>Figure 7 : Exemple d'amplitudes de sondages RMP au Bénin.</i>	<i>14</i>
• <i>Figure 8. Relation entre la teneur en eau calculée d'après les sondages RMP et le temps de décroissance T1.</i>	<i>17</i>
• <i>Figure 9. Résultat des sondages RMP sur de versant de Nalohou (bassin versant d'Ara)</i>	<i>20</i>
• <i>Figure 10. Résultat du sondage RMP sur le bas fond herbeux BF2 (bassin versant d'Ara)</i>	<i>21</i>
• <i>Figure 11. Résultat des sondages RMP sur les bas fond herbeux BF4 et son versant (bassin versant d'Ara)</i>	<i>22</i>
• <i>Figure 12. Résultat des sondages RMP sur la zone des quartzites (bassin versant d'Ara).</i>	<i>23</i>
• <i>Figure 13. Résultat des sondages RMP sur le versant de Béléfoungou (bassin versant de Béléfoungou).</i>	<i>25</i>
• <i>Figure 14. Résultat des sondages RMP sur le bas-fond herbeux et le versant de Bira (bassin versant de Bira).....</i>	<i>26</i>

Liste des tableaux :

• <i>Tableau 1. Sondages RMP au Bénin.</i>	<i>8</i>
• <i>Tableau 2. Résultats des inversions des sondages RMP.....</i>	<i>15</i>
• <i>Tableau 3. Résistivité électrique calculée ou mesurée par les différentes méthodes de résistivité</i>	<i>16</i>
• <i>Tableau 4. Différentes catégories d'aquifères classées d'après leurs paramètres RMP.....</i>	<i>18</i>

Annexes :

Annexe 1 Résultats des sondages RMP
Annexe 2 Résultats des sondages TDEM
Annexe 3 Description de la méthode RMP
Annexe 4 Description de cuttings de forage d'Ara et Béléfoungou
Annexe 5 Copie du résumé étendu présenté à la conférence EAGE, Istanbul, 2007

Citation de ce rapport

Desclotres, M., Séguis, L., Wubda, M., 2007. « Caractérisation des aquifères sur les sites AMMA-Catch au Bénin. Apport de la Résonance Magnétique des Protons. », Rapport de mission IRD, LTHE/HSM, 80 pages, 14 figures, 4 tableaux, 5 annexes.

Photo de couverture: Site de Nalohou, Bassin versant d'Ara, Bénin. Au premier plan, champ préparé pour la culture du manioc. Au second plan, champ de mil prêt à être récolté (fin novembre 2006). Ces conditions de terrain rendent la mise en place des câbles géophysiques assez difficile.

1. Introduction.

Dans le cadre des travaux hydrologiques entrepris par l'IRD et d'autres partenaires sur les sites du Service d'Observation (S.O.) Amma-Catch au nord du Bénin, nous avons conduit fin 2006 une mission géophysique de caractérisation des aquifères par la méthode de Résonance Magnétique des Protons (RMP). Cette méthode a été proposée suite aux conclusions tirées de travaux des prospections géophysiques réalisées en 2003 sur le site d'Ara au Bénin (Descloitres et al, 2003, et Wubda, 2003). Cette mission 2006 a été rendue possible grâce à la réalisation d'une mission hydrogéophysique au Niger (Vouillamoz et al, 2007 (soumis), Descloitres et al., 2007), ce qui a réduit les coûts pour le transport de l'appareillage RMP en Afrique. Les équipes d'HSM et du LTHE (HydroGéoPhysique) ont complété le financement nécessaire pour cette mission au Bénin, appuyées par un financement du programme international AMMA.

L'objet de ce rapport est de conclure sur la faisabilité de la méthode RMP dans le contexte du Bénin. On aborde un certain nombre de questions relatives à l'existence et la structuration des aquifères, et on évalue l'utilisation de ces résultats RMP dans une perspective de modélisation hydrologique locale et/ou régionale. Au total, 14 sondages de RMP ont été réalisés. Deux pannes de l'appareillage RMP ont compromis la réalisation de 2 sondages supplémentaires prévus sur le planning initial.

Les objectifs de cette mission de reconnaissance RMP en 2006 au Bénin étaient de :

> vérifier la possibilité d'utiliser la méthode dans contexte Bénin. En effet, chaque zone géographique se révèle différente lors de l'acquisition : le champ géomagnétique, le magnétisme des roches, les conditions de « bruit électromagnétique » peuvent favoriser ou limiter l'obtention de données.

> Caractériser la réponse RMP des unités de sols et des unités géologiques notables, y compris sur les 3 toposéquences étudiées,

> Evaluer les différences de porosité RMP des unités de la couverture

> Donner les premières estimations relatives de la perméabilité hydraulique des aquifères

> Evaluer s'il existe des différences notables d'un bassin à l'autre, à la vue des premiers sondages, en particulier sur les 3 toposéquences.

> Nourrir les hypothèses de fonctionnement de certaines unités de paysage (versant, bas-fond) avec des données quantitatives.

La mission s'est déroulée du 23 novembre au 10 décembre 2006. Les participants étaient :

- Marc Descloitres, du 23 novembre au 4 décembre, en provenance de Niamey (logistique commune à la mission géophysique Niger)

- Luc Séguis, du 23 novembre au 30 novembre, de l'IRD Cotonou
- Maxime Wubda, du 26 novembre au 10 décembre, responsable des acquisitions du 4 au 10 décembre.
- Armand Mariscal, du 30 novembre au 10 décembre, électronicien IRD de Cotonou
- Le Dr Niçaise Yallo, géophysicien de l'Université Abome-Calavi de Cotonou (visite de terrain de 2 jours, formation à la méthode RMP)
- L'étudiant Eric Zannou, thésard du professeur Yallo
- Théo Ouani, technicien hydrologue local de l'IRD à Cotonou.
- Cette mission a bénéficié de l'appui logistique du personnel de l'IRD à Cotonou et à Niamey.

2. Matériel et Méthodes

Pour cette mission de reconnaissance, nous avons adopté une stratégie de prospection qui tient compte des instruments et expérimentations déjà en place sur les sites d'Ara, Béléfougou et Bira (stations d'humidité, piézomètres, station de flux) afin de faciliter la comparaison des résultats RMP avec en particulier les niveaux statiques et les logs de forages décrits d'après les cuttings. Nous avons aussi privilégié les sites où une information géophysique existait sur les sites d'Ara et Béléfougou. Pour Ara nous avons une cartographie électromagnétique dense qui explore la tranche altérée de la couverture, des sondages et de coupes électriques 2D, et enfin quelques sondages TDEM (Time Domain Electromagnetism) réalisés en même temps que les sondages RMP sur certains sites. Pour Béléfougou, seules des coupes électriques 2D sont disponibles. La figure 1 présente la localisation générale des sondages RMP réalisés lors de cette mission.

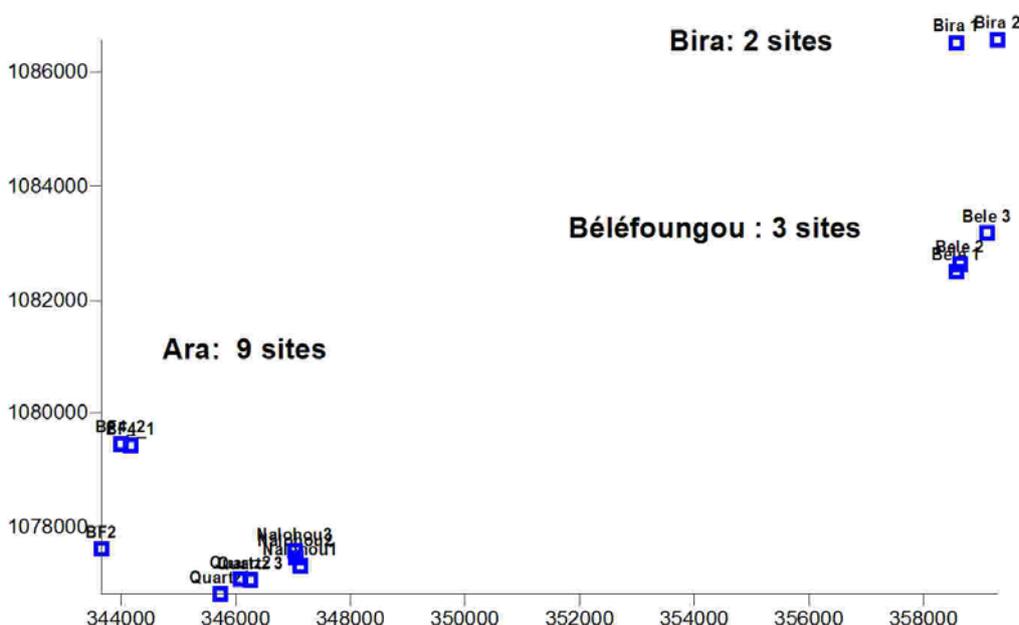


Figure 1 Localisation générale des sondages RMP (coordonnées UTM, WGS 84). Un zoom sur les 3 zones est proposé dans la suite de ce rapport.

- Sur le site d'Ara, le bassin versant cultivé, la carte électromagnétique et la prospection géologique (Descloîtres et AL, 2003 et Wubda, 2003) permettent de positionner la plupart des sondages RMP dans des unités remarquables de couverture ou de socle. Nous avons aussi étudié le profil du versant de Nalohou. Nous avons privilégié des zones de versant où la nappe est peu profonde (< 5m) de manière à caractériser des terrains de la zone non saturée en saison sèche, mais qui se saturent à cette époque de l'année (début décembre) lors de notre prospection. Nous avons ainsi une analyse possible de la capacité de stockage des altérites. Certains points RMP choisis correspondent aussi à des unités peu altérées comme la quartzite ou les schistes lustrés sub-affleurants. Dans ce cas aussi la RMP donne une estimation du volume d'eau retenue par ces formations qui peuvent être fracturées. Deux sites de bas-fonds herbeux, qui jouent un rôle important pour l'hydrologie des bassins de cette zone, ont été prospectés. Ils sont comparés avec le site de Bira (cf. ci-dessous). La figure 2 présente la localisation des sondages RMP sur le bassin de Ara, et la figure 3 présente la localisation détaillée sur le versant de Nalohou, le plus équipé en instrumentation diverses.

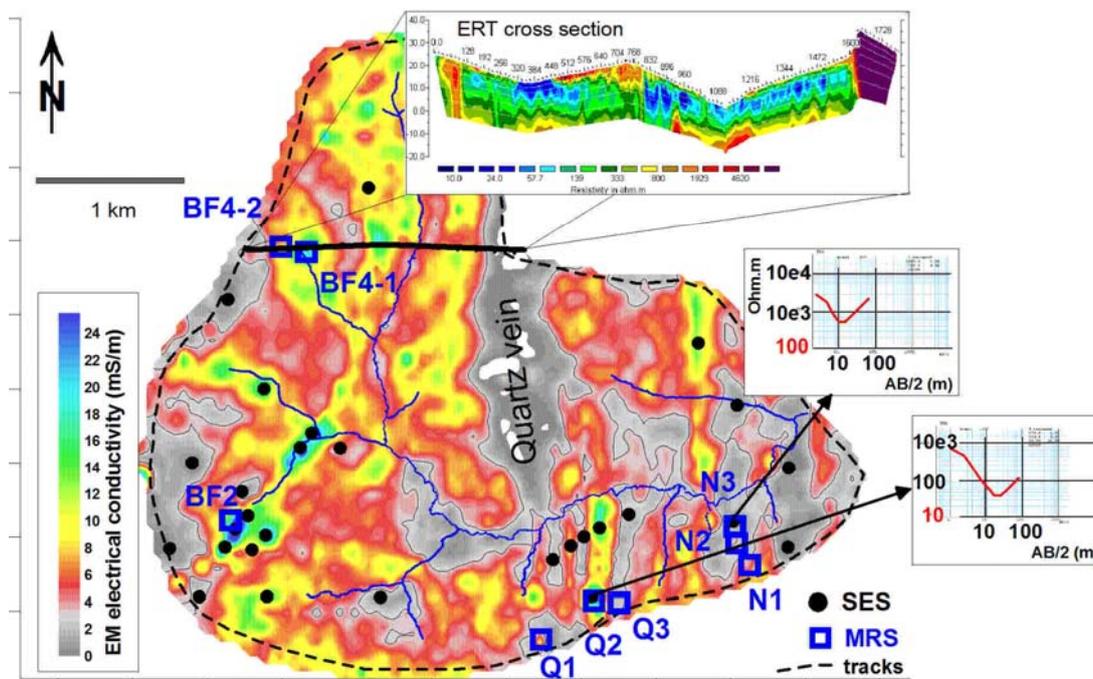


Figure 2. Localisation des sondages RMP (MRS en anglais) sur Ara. Des exemples de résultats de prospection électrique sont donnés. Le fond coloré représente la distribution spatiale des conductivités électriques de la couverture de sols réalisée par prospection électromagnétique EM34 (Wubda, 2003).

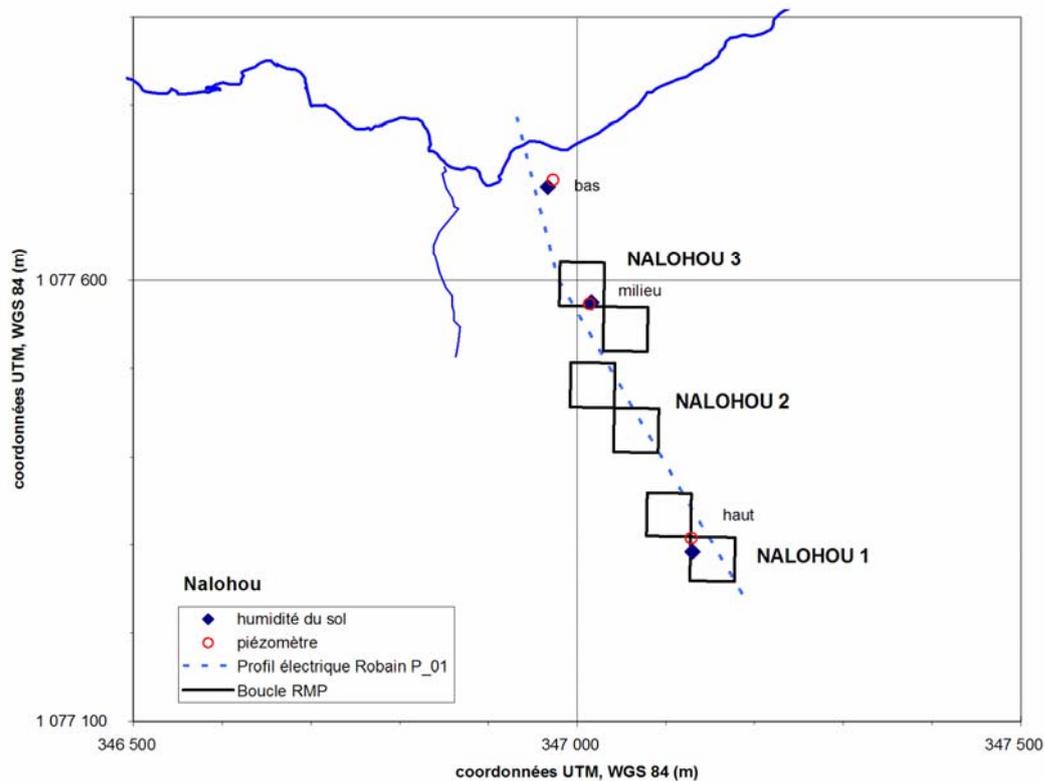


Figure 3. Localisation des sondages RMP sur le versant de Nalohou (points N1, N2 et N3 du bassin versant d'Ara, cf. figure 2).

- Sur le site de Béléfougou, qui correspond à une zone forestière, la nappe est plus profonde que sur le site d'Ara, particulièrement en haut de versant. Les mesures hydrologiques réalisées sur ce site sont en particulier destinées à comprendre le rôle de la forêt par comparaison avec les autres sites. Les mesures électriques réalisées en 2004 (Robain et Wubda, 2005) montrent une épaisseur d'altération très variable d'un profil à l'autre. 3 sondages RMP ont été positionnés le long du profil de piézomètres pour pouvoir être comparée aux mesures du niveau des nappes données par ces ouvrages. Dans cette zone, les mesures RMP nous renseignent surtout sur la partie inférieure de l'aquifère (partie basse de l'altération et/ou zone de socle). Sur un site cependant (Bélé 1), nous avons enregistré un signal que nous interprétons comme venant de la zone non saturée, ce qui est assez exceptionnel. Le site de Béléfougou procure un jeu de données RMP qui permet de le comparer au versant cultivé de Nalohou (Bassin d'Ara). De plus, nous évaluons les variations latérales des propriétés hydriques entre le haut et le bas du profil. La figure 4 présente la localisation des sondages RMP sur Béléfougou.

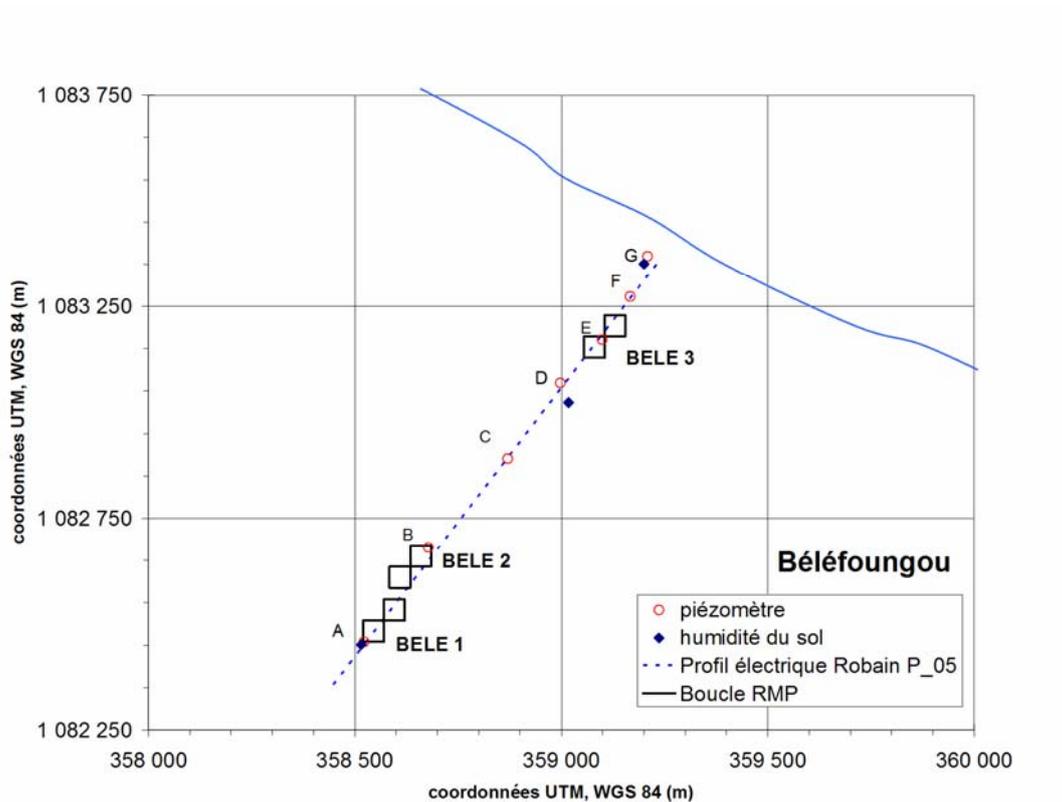


Figure 4. Localisation des sondages sur Béléfougou

- Sur le site de Bira, qui est caractéristique des bas-fonds herbeux, 2 sondages RMP ont été faits, l'un sur le bas fond lui-même, pour tenter de connaître les propriétés hydrodynamiques du sous-sol de ces zones, l'autre sur le versant, près de la station de flux. Sur ce site, les ouvrages de reconnaissance sont peu profonds et ne permettent pas une comparaison avec la RMP très poussées. Cependant, ce jeu de données permet aussi d'évaluer les paramètres hydrodynamiques des aquifères de ce site : sont-ils différents de ceux d'Ara et Béléfougou ? Pour le sondage sur le bas-fond lui-même : y a-t-il une « signature » particulière des premiers terrains. La figure 5 présente la localisation des sondages RMP sur le bassin de Bira.

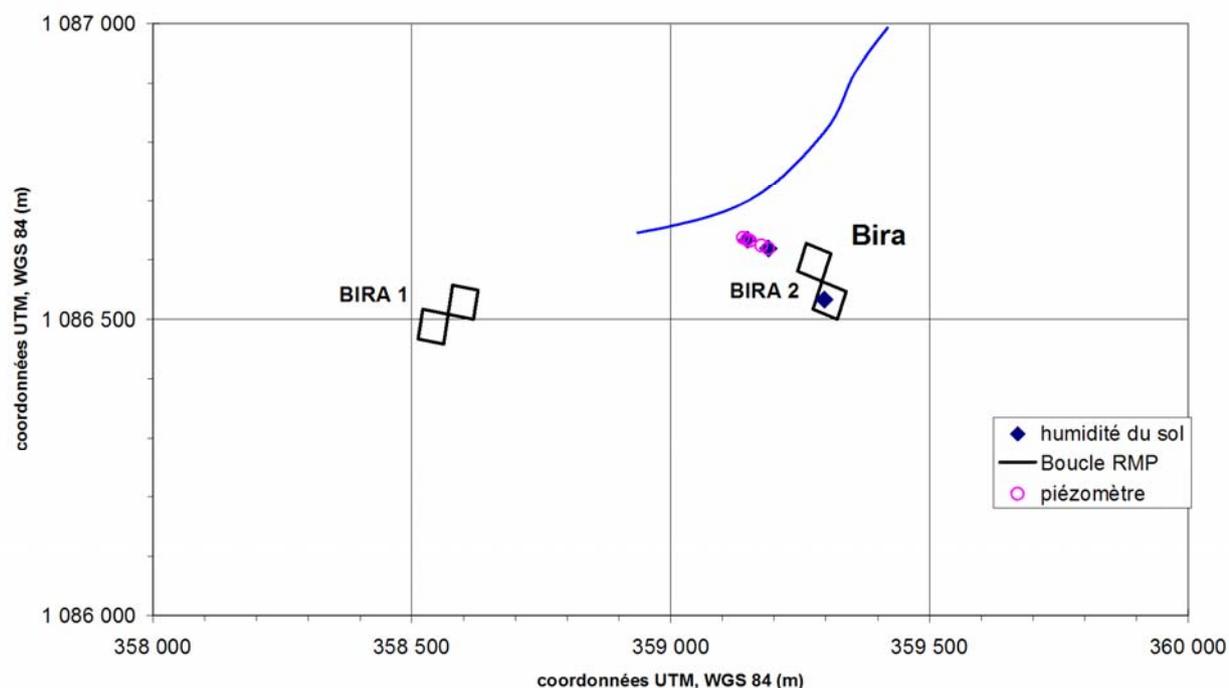


Figure 5. Localisation des sondages sur Bira. Un contrôle de positionnement de la boucle située à l'ouest (Bira 1) est en cours.

Le tableau 1 résume les acquisitions faites et donne la localisation des centres des boucles RMP.

Site	sondage	X_UTM m	Y_UTM m	boucle	azimut (°)	données	
						électriques	niveau statique (au 30-11-06, m)
Ara	Nalohou1	347128	1077309	8-50m	136	TDEM Nalohou 1a et 1b	-3.7
Ara	Nalohou2	347042	1077456	8-50m	136	TDEM Nalohou 2a et 2b	-3.8
Ara	Nalohou3	347030	1077570	8-50m	136	SE 23	-3.8
Ara	Quartz1	345734	1076813	8-50m	136	SE18 décalé	pas de piézo
Ara	Quartz2	346088	1077071	8-50m	136	SE21 décalé	pas de piézo
Ara	Quartz 3	346255	1077058	8-50m	136	SE22 décalé	pas de piézo
Ara	BF2	343656	1077611	8-50m	175	SE 10 , SE 11	0.45
Ara	BF4_1	344165	1079421	8-50m	0	coupe élect. MD et al., 2003, X= 350m	<1.33
Ara	BF4_2	343994	1079456	8-50m	45	coupe élect. MD et al., 2003, X= 250m	<1.33
Belefungou	Bele 1	358570	1082508	8-50m	45	TDEM Bele1	-19.8
Belefungou	Bele 2	358634	1082635	8-50m	45	coupe HR/MW, 2004	-16.9
Belefungou	Bele 3	359105	1083179	8-50m	45	coupe HR/MW, 2004	-6.5
Bira	Bira 1	358570 (contrôle en cours)	1086508 (contrôle en cours)	8-50m	55	TDEM Bira1	0.5 à 1 m
Bira	Bira 2	359292	1086564	8-50m	155	pas de mesure	?

Tableau 1. Sondages RMP au Bénin. La colonne « données électriques » mentionne les données utilisées pour le calcul des matrices RMP.

Ce rapport est volontairement limité à la description des résultats de la méthode RMP. On trouvera cependant les résultats des sondages électromagnétiques TDEM (Descloitres, 1998) réalisés sur certains sites RMP en annexe 2 du présent rapport. Les méthodes et les résultats de la cartographie par prospection électromagnétique EM 34 ainsi que les méthodes de sondages électriques utilisées en complément dans cette étude ont été préalablement exposés dans les rapports de Descloitres et al, 2003, et Wubda, 2003.

La méthode RMP est une méthode géophysique de sondage basée sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire dans le champ magnétique terrestre. C'est une méthode sélective qui est directement sensible à la présence d'eau souterraine. C'est un avantage comparé à d'autres méthodes géophysiques, ce qui fait de cette méthode un outil supplémentaire important pour des prospections hydrogéologiques. Une description plus complète de la méthode RMP est donnée en annexe.

Les paramètres d'acquisition RMP au Bénin sont :

- *Boucle d'émission/réception* : boucle en « 8 » de 50 x50 mètres de côté. Cette géométrie est conservée pour tous les sondages, de manière à rendre les sondages similaires en regard du volume d'investigation.
- *Fenêtre de mesure* : 08h00 - 18h00: le bruit de fond électromagnétique ambiant est, statistiquement, le plus faible entre 08h00 et 14h00 (valeur de 120 à 350 nV avec ce dispositif). Après 14h00, il augmente presque chaque jour à plus de 700 et 1200 nV.
- *Réglage de la fréquence de Larmor* : la variation diurne de l'amplitude du vecteur champ magnétique total F à proximité de l'équateur magnétique (nous sommes ici à 2° de latitude magnétique sud) peut atteindre plus de 100 nT. Ces variations, en générales bien mesurées lors des acquisitions, ont été prises en compte lors de l'interprétation.
- Les principaux paramètres d'acquisition sont : Notch filter : OFF ; stack optimisation : ON; nombre de stacks ajusté pour obtenir un niveau de bruit stacké suffisamment bas (< à 7 nV en général).

Dans ce rapport, nous présentons les résultats des sondages RMP après inversion. Pour cette inversion, le calcul des matrices prend en compte un modèle 1D, le décalage en fréquence éventuel, et le modèle de résistivité déduite des informations des prospections électriques. De plus, le calcul de la réponse complexe RMP (Legchenko, 2004) est utilisé systématiquement. Les résultats sont présentés comme sur la figure 6. On trouvera l'ensemble des résultats en annexe 1 de ce rapport. En

tête de la feuille, on trouve des informations utiles sur le sondage (site, date, paramètres d'inversion etc.). Les résultats graphiques sont :

- 1) les signaux RMP $e(t, q)$ enregistrés pour chaque valeur du paramètre d'excitation (« pulse parameter » en anglais) en fonction du temps ;
- 2) l'amplitude initiale du signal RMP FID1 et FID2 en fonction du paramètre d'excitation ;
- 3) la phase du signal RMP FID1 en fonction du paramètre d'excitation ;
- 4) les amplitudes moyennes du signal RMP (FID1 et FID2) et du bruit en fonction du paramètre d'excitation ;
- 5) la fréquence du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;
- 6) le temps de relaxation $T_2^*(q)$ en fonction du paramètre d'excitation ;
- 7) Le modèle construit pour interpréter le sondage RMP. Le calcul de ce modèle apparaît comme une courbe en trait continu noir et rouge (FID 1 et FID 2 respectivement) sur les fenêtres 2 et 3.
- 8) distribution verticale de la teneur en eau w_{RMP} ;
- 9) distribution verticale de la perméabilité hydraulique calculée ;
- 10) distribution verticale de la transmissivité calculée ;
- 11) distribution verticale du temps de relaxation T_1 du modèle ;

Site: bf2

Loop: 4 - 50.0 Date: 02.12.2006 Time: 10:22

NUMIS data set: C:\BENIN_2006\RMP\Interpretation\BF2\BF2.inp

matrix: C:\BENIN_2006\RMP\Matrices\Bf2.mrm

loop: eight square, side = 50.0 m

geomagnetic field:

inclination= 2 degr , magnitude= 32988.26 nT

filtering window = 199.2 ms

bandpass = 10.00 Hz

average S/N = 5.01; EN/IN = 1.52

param. of regular.: modeling

permeability constant $C_p = 7.00e-09$

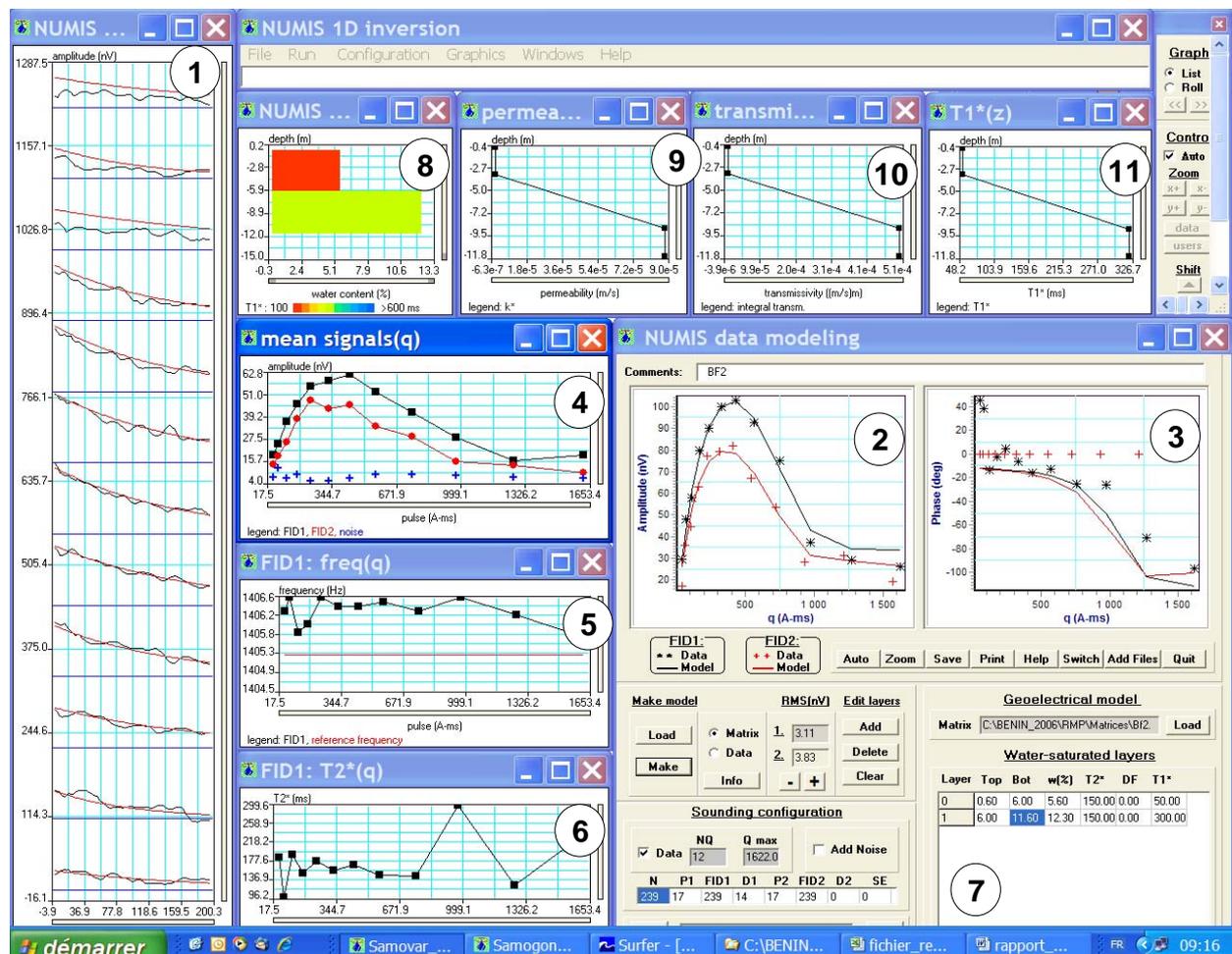


Figure 6 – exemple de feuille de résultat de sondage RMP, avec interprétation.

3. Résultats

3.1 Hypothèses d'interprétation.

L'interprétation des sondages RMP a été conduite en suivant les hypothèses d'interprétation suivantes:

- Nous faisons l'hypothèse que les différents horizons de la couverture de sols sont assez contrastés et que l'on passe assez rapidement (en quelques décimètres) d'un horizon à l'autre. En conséquence, nous avons choisi d'interpréter les sondages avec 1 ou 2 terrains seulement, et non une inversion proposant une multitude de terrain peu épais (« smooth model »)
- Nous avons interprété l'ensemble des sondages par une procédure manuelle en calculant la réponse complexe (au sens mathématique) du signal RMP (Legchenko, 2004) qui permet la discrimination d'aquifère profond éventuels et une meilleure résolution des paramètres RMP.
- Les données RMP correspondants aux pulses élevés (harmoniques 2 et ultérieurs du signal RMP) ne sont pas utilisés dans cette étude pour optimiser l'ajustement de l'harmonique principal. Ils sont néanmoins pris en compte dans une première analyse complexe des données, pour confirmer l'absence d'aquifère profond décelable.
- Le choix de proposer un seul terrain ajustant le sondage, ou 2 terrains superposés, dépend de chaque site, des données géophysiques ou géologiques disponibles et des courbes RMP : 3 cas se présentent :
 - Nous savons qu'il existe 2 terrains avec des caractéristiques hydrodynamiques différentes (argiles et terrains sableux par exemple) marqués sur les sondages de résistivité par un conducteur ($< 20 \text{ Ohm.m}$) surmontant un terrain plus résistant ($> 100 \text{ Ohm.m}$). Dans ce cas, nous proposons 2 terrains RMP, dont l'interface correspond arbitrairement à la profondeur calculée par les sondages de résistivité (profondeur calculée elle-même soumise à des incertitudes qui peuvent être importantes). Nous ajustons la courbe de sondage RMP en cherchant à minimiser le RMS *tout en respectant l'allure du signal moyen* (fenêtre n° 4 de la figure 6). Une inversion du signal complexe est aussi tentée dans certains cas pour améliorer l'ajustement du modèle aux données (Legchenko, inversion complexe, en cours de développement).

- Nous distinguons 2 terrains par les sondages de résistivité, mais ceux-ci sont tous assez résistants (> 100 Ohm.m). Dans ce cas, un modèle 2 terrains a aussi été considéré. S'il améliore sensiblement le RMS, nous avons conservé 2 terrains.
- Aucun argument n'est avancé pour discriminer 2 terrains (pas d'informations extérieures). Dans ce cas, un seul terrain est retenu pour l'interprétation.

Ces différents cas de figure, relativement simples, ne doivent pas faire oublier que le pouvoir de résolution de la méthode RMP dépend de multiples facteurs (dont la taille de boucle, les paramètres du moment d'impulsion (pulse moment), la profondeur et la géométrie des aquifères, etc..). En conséquence, des modèles d'aquifère multicouches peuvent apparaître exagérément simplifiés par une interprétation présentant 1 ou 2 terrains. D'autres méthodes que la RMP, ou d'autres façons de mettre en œuvre la RMP, sont alors nécessaires pour résoudre ces aquifères. C'est particulièrement le cas lorsque des géométries plus complexes (2 ou 3D) existent : elles ne sont pas toujours mis en évidence à partir de données issues d'un seul sondage RMP.

- L'interprétation des sondages RMP prennent en compte l'analyse du temps de décroissance longitudinal T1, et la perméabilité hydraulique RMP K_{RMP} est calculée selon l'équation 4 donnée en annexe et reprise ci-dessous :

$$K_{RMP} = C \cdot w_{RMP} \cdot T_1^2$$

Cette équation montre que la perméabilité hydraulique RMP, K_{RMP} , dépend de la teneur en eau RMP, w_{RMP} , et du temps T1. La constante C est empirique et choisie arbitrairement comme $C = 7.00e-09$, valeur communément utilisée lorsqu'on ne dispose pas de résultats d'essai hydraulique en forage.

En conséquence,

- a) les valeurs de conductivité hydraulique présentées en annexe doivent être considérées comme préliminaires. Les sondages RMP peuvent néanmoins être comparés entre eux.
- b) Nous présentons les résultats ci-dessous en considérant uniquement le temps T1 et non la conductivité hydraulique, car T1 est le paramètre mesuré par la méthode, sans transformation. On retiendra que la conductivité hydraulique est proportionnelle au carré de T1.

3.2 Interprétations

Les données RMP enregistrées au Bénin présentent des amplitudes nettement différentes d'un site à l'autre (à dispositif géométrique égal). Cela témoigne d'une grande variabilité de la teneur en eau. La figure 7 présente un exemple d'amplitudes enregistrées au Bénin. L'amplitude

maximum (sondage MRS Q1) a été enregistrée au dessus de la quartzite fracturée, en situation de haut de versant. L'amplitude minimum (sondage MRS N3) a été enregistrée au dessus d'une zone où le socle est sub-affleurant, à mi-versant.

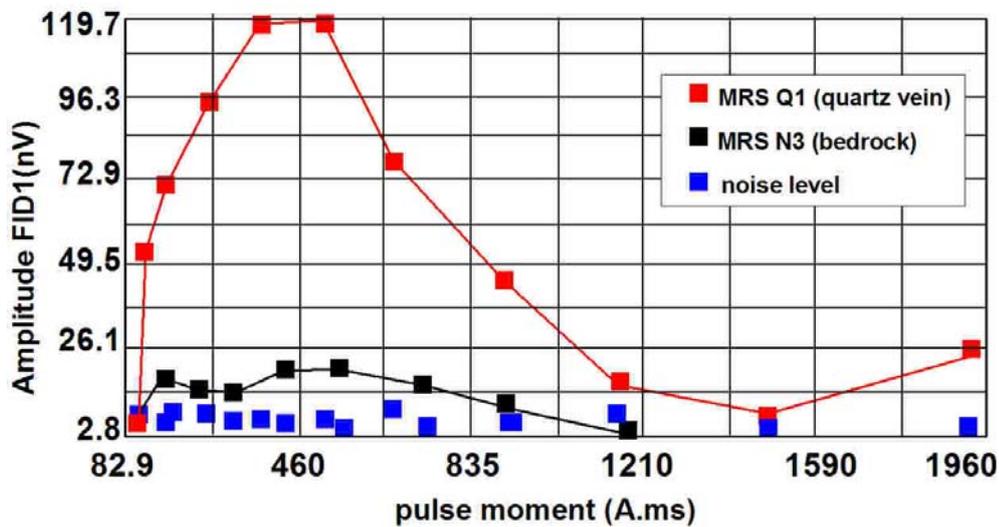


Figure 7 : Exemple d'amplitudes de sondages RMP au Bénin. Le niveau de bruit (en bleu) est celui du sondage Q1. L'abscisse du graphe représente le moment d'impulsion (pulse moment), qui règle la profondeur d'investigation : plus le moment d'impulsion est élevé, plus la profondeur d'investigation est grande.

Les variations possibles des paramètres RMP (toit de l'aquifère, teneur en eau RMP, temps de décroissance T1) ont été analysées par des essais multiples en modélisation directe. Tous les paramètres sont d'abord déterminés par ajustement de la courbe de sondage RMP en cherchant à minimiser le RMS tout en respectant l'allure du signal moyen. Ces paramètres sont ensuite considérés comme fixes sauf l'un d'entre eux, que l'on fait varier manuellement de telle façon que la courbe synthétique du modèle reste proche des points expérimentaux. Le tableau 2 reprend l'ensemble des interprétations obtenues.

SITES		toit_min	toit_opt	toit_max	mur_min	mur_opt	mur_max	T2	T1_min	T1_opt	T1_max	W_min	W_opt	W_max	WZ_opt	rms_fid1	rms_fid2
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(ms)	(ms)	(ms)	(ms)	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)
N1		0.65	0.85	1.15	22.25	23.5	25.75	200	220	270	300	3	3.2	3.4	72.48	4.66	5.9
N2		3.5	4	4.25	10.8	11.5	11.8	210	***	260	***	3.7	3.9	4.1	29.25	3.55	8.34
N3		3.1	4.1	4.35	16	17	17.5	250	***	310	***	1.5	1.6	1.7	20.64	2.79	3.79
Q1		2.7	3.2	3.45	10.9	11.2	11.7	175	190	200	270	11.9	12.4	12.6	99.2	7.5	9.37
Q2	terrain1	1.2	2.2	3.2	***	13.2	***	150	***	50	***	2.9	3.1	3.3	34.1	3.3	6.3
	terrain2	***	13.2	***	18.45	19	20.7	150	***	330	***	3.4	4.1	5.1	23.78	3.3	6.3
Q3		2.1	2.6	2.85	20	20.8	22.8	150	180	250	270	6.2	6.6	6.9	120.12	4.75	8.03
BF2	terrain1	0.1	0.6	0.85	***	6	***	150	***	50	***	5.2	5.6	6.1	30.24	3.11	3.83
	terrain2	*****	6	***	11.35	11.6	11.85	150	270	300	340	12	12.3	12.6	68.88	3.11	3.83
BF4-1	terrain1	0.85	1.35	1.85	***	10	***	220	***	50	***	***	3.8	***	32.87	3.86	9.48
	terrain2	***	10	***	18	18.75	20.25	170	360	480	600	4.7	5	5.4	43.75	3.86	9.48
BF4-2	terrain1	0.15	0.85	1.4	***	9	***	150	***	130	***	***	3.3	***	26.895	4.69	5.45
	terrain2	***	9	***	14.3	15.3	16	160	250	360	380	4.2	4.5	5.5	28.35	4.69	5.45
Bélé1		6	6.5	7.5	14	14.5	16.5	140	***	240	***	2.5	2.7	3	21.6	3.7	2.86
Bélé2		19.5	20	21.3	25.75	26	27.5	120	220	320	420	11.6	12.5	13.2	75	3.05	3.56
Bélé3		3.75	4.25	4.5	10.75	11.25	12.25	90	100	120	140	4.4	4.5	4.9	31.5	3.51	2.58
Bira1		2	2.25	2.75	10.75	11	12	140	210	270	310	7.1	7.5	7.7	65.625	10.3	5.9
Bira2	terrain1	0.1	0.4	0.85	***	5	***	130	***	50	***	***	2.3	***	10.58	3.23	4.39
	terrain2	***	5	***	14.5	15.5	16.5	130	150	190	210	6.8	7.1	7.4	74.55	3.23	4.39

Tableau 2. Résultats des inversions des sondages RMP. « Toit » = toit de l'aquifère. « Mur » = mur de l'aquifère, « min. » = valeur minimum, « max. » = valeur maximum, « opt. » = valeur optimale (RMS minimum ou forte ressemblance avec forme du signal RMP moyen). « *** » = valeurs non calculées (valeur "opt." fixée, ou qualité de données insuffisante pour estimer l'incertitude associée). WZ est le produit de la teneur en eau par l'épaisseur saturée calculée par le sondage RMP. WZ est le paramètre considéré comme stable pour le modèle : il y a équivalence entre les modèles pour un WZ constant.

SITES		Gamme de résistivité (Ohm.m)	Origine données	Remarques	Conductivité apparente mesurée par électromagnétisme EM34 (mS/m)
N1		150-400	Panneau 2D	Abscisse 70 profil P01	3 - 6 (330 – 160)
N1		50	2 sondages TDEM	Nalohou 1 A et B	
N2		150-200	Panneau 2D	Abscisse 230 profil P01	2 – 3 (500 – 330)
N2		70	2 sondages TDEM	Nalohou 2 A et B	
N3		1500-3000	Panneau 2D	Abscisse 400 profil P01	1 – 2 (1000 – 500)
N3		-	2 sondages TDEM	Non interprétables	
N3		>2000	Sondage électrique	Sondage SE 23 -2003	
Q1		150	Sondage électrique	Sondage SE 18 -2003	2 – 5 (500 – 200)
Q1		70	2 sondages TDEM	Quartz 1 A et B	
Q2	terrain1	10	Sondage électrique	Sondage SE 21 -2003	14 – 20 (70 – 50)
	terrain2	>2000	Sondage électrique	Sondage SE 21 -2003	
Q3		150 sur 4 m puis > 2000	Sondage électrique	Sondage SE 22-2003	2 – 3 (500 – 330)
BF2	terrain1	10	Sondage électrique	Sondage SE 11-2003	15 – 23 (66 – 45)
	terrain2	> 4000	Sondage électrique	Sondage SE11- 2003	
BF4-1	terrain1	20	Panneau 2D	Abscisse 350 profil P1 -2003	15 – 20 (66 – 50)
	terrain2	80-200	Panneau 2D	Abscisse 350 profil P1-2003	
BF4-2	terrain1	80	Panneau 2D	Abscisse 256 profil P1-2003	8 – 11 (125 – 90)
	terrain2	> 200	Panneau 2D	Abscisse 256 profil P1-2003	
Bélé1		150-300	panneau 2D	Abscisse 570 profil P05	
Bélé1		80	2 sondages TDEM	TDEM Bélé1 A et B	
Bélé2		150-250	Panneau 2D	Abscisse 700 profil P05	
Bélé2		80	2 sondages TDEM	TDEM Bélé1 B	
Bélé3		10-25	Panneau 2D	Abscisse 1410 profil P05	
Bira1		15-30	2 sondages TDEM	TDEM Bira1 A et B	
Bira2	terrain1	-	Pas de données de résistivité		
	terrain2	-	Pas de données de résistivité		

Tableau 3. Résistivité électrique calculée ou mesurée par les différentes méthodes de résistivité : sondages électriques, panneau de résistivité 2D, sondages électromagnétiques TDEM. Les valeurs de résistivités correspondent à la tranche de terrain reconnue par RMP. La conductivité électrique (inverse de la résistivité) mesurée par électromagnétisme ne concerne que les points situés sur le bassin d'Ara (entre parenthèses, valeur correspondante de la résistivité, en Ohm.m).

Les résultats des tableaux 2 et 3 sont synthétisés en partie sur la figure 8.

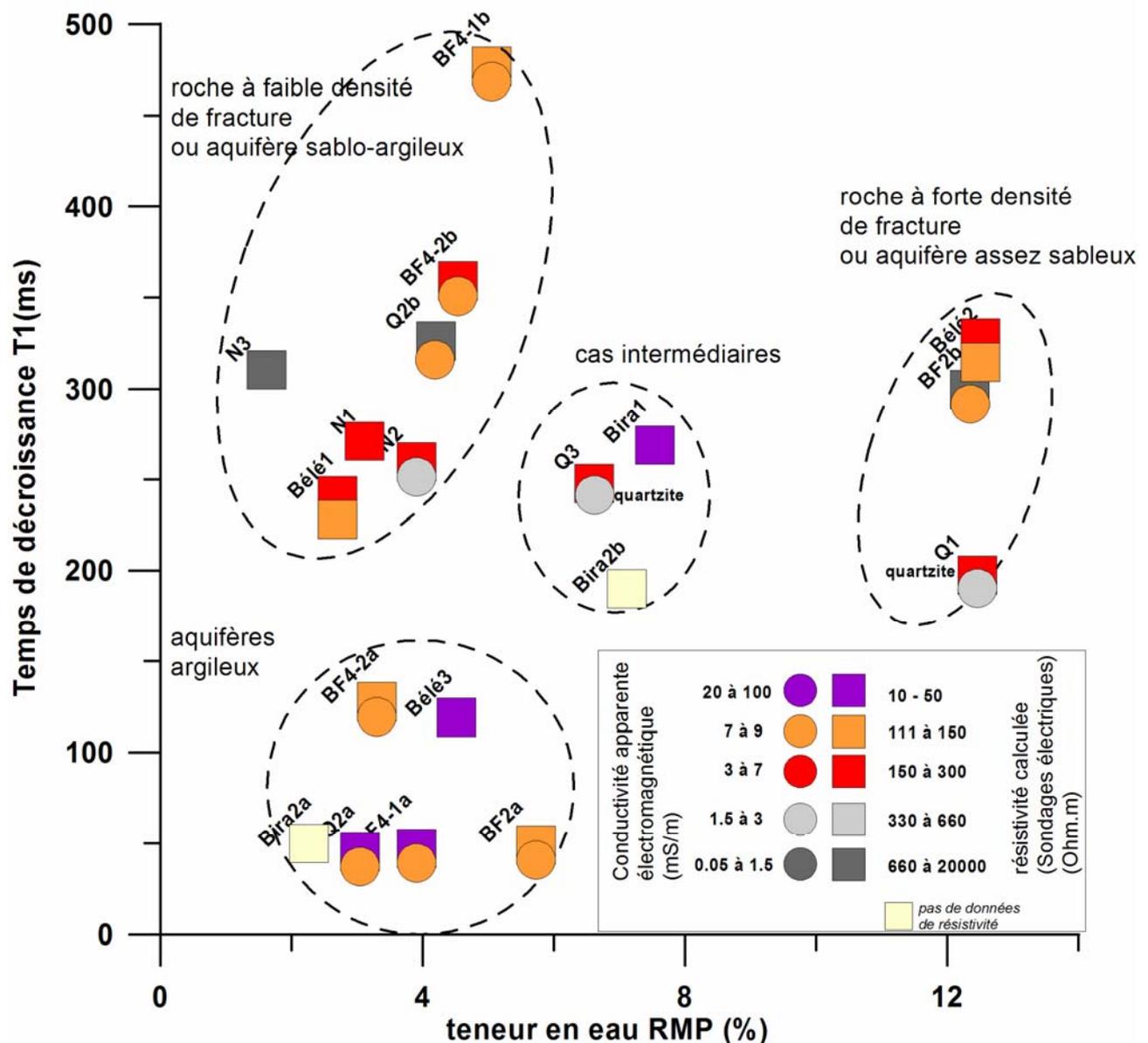


Figure 8. Relation entre la teneur en eau calculée d'après les sondages RMP et le temps de décroissance T1. Les indices a et b correspondent aux différents terrains (cf tableau 3, a : 1er terrain, b : 2^{ème} terrain) Les valeurs de résistivités sont représentées en 5 classes différentes. Les symboles carrés correspondent aux valeurs apparentes calculées et les ronds aux valeurs apparentes mesurées par prospection EM (bassin d'Ara seulement). Les dispersions calculées pour les différents paramètres RMP (et indiqués sur le tableau 3) ne sont pas indiquées pour plus de clarté.

Une première analyse fait apparaître les traits majeurs suivants :

- Il n'y a pas de tendance de répartition spécifique par site.
- La majeure partie des terrains aquifères rencontrés présente des teneurs en eau RMP calculés de moins de 5%. Cette valeur est en accord avec les autres études RMP en zone de socle (Burkina Faso, Inde par exemple).

- Un groupe de sondage présente des teneurs en eau importante pour des aquifères situés en contexte de socle cristallin : plus de 12%. Cela témoigne d'une capacité de stockage importante dans certains terrains de couverture ou dans le socle fracturé.
- Les valeurs du temps T1 sont très étalées, de 50 à plus de 450 ms. Elles témoignent d'une variation importante du type d'aquifère.
- Les valeurs de résistivité associée aux terrains aquifères ne permettent pas d'envisager une discrimination du type d'aquifère sur la base de la valeur de la résistivité, sauf pour les valeurs basses de résistivité : la majeure partie des sites de type aquifère argileux (teneur en eau RMP faible et temps T1 court) présentent logiquement des valeurs de résistivité basse (entre 10 et 50 Ohm.m) ou intermédiaire (110 à 150 Ohm.m).
- Nous proposons une première classification des terrains aquifères RMP. Ces terrains peuvent être regroupés en 4 catégories, sur la base des valeurs W_{rmp} et T1. Le tableau 4 résume ces catégories.

Type d'aquifère	Gamme de teneur en eau (%)	Gamme de temps T1 (ms)	Conductivité hydraulique* (m/s)
Roche à faible densité de fracture ou aquifère sablo-argileux	2 à 5	200 - 450	1 à $8.3 \cdot 10^{-5}$
Roche à densité de fracture moyenne et cas intermédiaire	6 à 8	200 - 280	1.6 à $3.8 \cdot 10^{-5}$
Roche à forte densité de fracture ou aquifère sableux	> 12	200 - 350	3.5 à $8.95 \cdot 10^{-5}$
Aquifères argileux	2 à 6	50 - 120	1.5 à $3.5 \cdot 10^{-6}$

* avec constante arbitraire $C = 7 \cdot 10^{-9}$, calcul selon équation 4, donnée en annexe sur la méthode RMP.

Tableau 4. Différentes catégories d'aquifères classées d'après leurs paramètres RMP.

La classification proposée n'est pas immuable, d'autant que les sondages RMP n'ont pas encore été comparés avec les résultats des essais de pompages.

Lorsqu'on calcule la conductivité hydraulique et utilisant la constante C arbitraire, on constate que la conductivité se répartie sur 2 décades, de $1.5 \cdot 10^{-6}$ (valeur classique pour des aquifères

argileux) à plus de $8 \cdot 10^{-5}$ m/s (valeur classique pour des aquifères de régolith sableux en zone de socle).

4. Discussion des résultats site par site

Nous proposons une analyse site par site pour dégager leurs spécificités. Les résultats des sondages RMP sont présentés en superposition avec les coupes des forages lorsqu'elles étaient disponibles. La largeur des logs RMP représentés sur chaque figure correspond à la longueur du 8 de la boucle d'émission (140 m), qui correspond grossièrement à la largeur d'exploration de la méthode. Les terrains situés entre la surface et le premier terrain aquifère détectable par la RMP n'apparaissent pas sur les figures, bien qu'ils aient été explorés par la méthode. Il s'agit de terrain non saturée, ou contenant très peu d'eau (moins de 0.5%), ou dont l'eau est très liée au terrain (argiles par exemple). En dessous des terrains aquifères, les terrains en présence sont reconnus par la méthode (jusqu'à environ 75 m de profondeur) mais leur contenu en eau reste trop faible (i.e. < 0.5%) pour être détectable. Cette situation est très classique en zone de socle où il est communément admis que la densité de fracture diminue avec la profondeur, rendant les capacités de stockage très réduite.

4.1 Bassin versant d'Ara

4.1.1 Versant de Nalohou

La figure 9 présente les résultats des sondages RMP sur le versant de Nalohou.

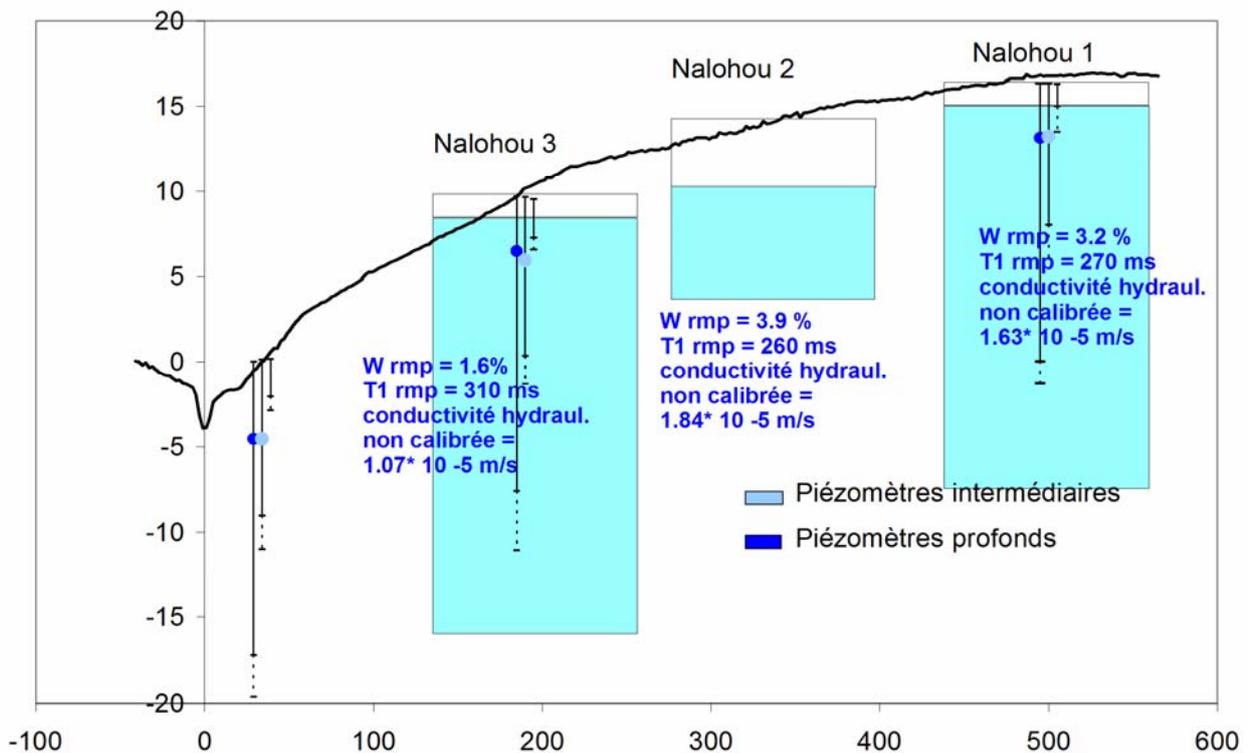


Figure 9. Résultat des sondages RMP sur de versant de Nalohou (bassin versant d'Ara)

Les terrains explorés ici sont électriquement assez résistants, correspondent par conséquent à des terrains plutôt sableux ou fracturés.

- Le sondage Nalohou 3 est réalisé sur un site où le socle est très proche de la surface (moins de 3 m) et très résistant ($> 1500 \text{ Ohm.m}$). Les valeurs obtenues montrent que ce socle peut être un milieu où l'eau peut se stocker en faible quantité (de l'ordre de 1.5%). L'épaisseur de l'aquifère atteint ici 20 mètres. Au-delà, en profondeur, il est probable que des fractures existent et puissent contenir aussi de l'eau, mais le volume total d'eau libre n'excède pas 0.5% et n'est pas visible par la méthode. Il est aussi possible que le socle soit très sain et non fracturé, constituant dans ce cas un véritable plancher imperméable.
- Les sondages de Nalohou 1 et 2 sont similaires à Nalohou 3 mais présentent tout de même une teneur en eau RMP plus élevée, ce qui témoigne d'un milieu plus sableux (les résistivités sont aussi plus basses ici ($50\text{-}400 \text{ Ohm.m}$). Ce qui est notable, c'est la différence d'épaisseur de l'aquifère, qui passe de 20 m à moins de 5 m d'épaisseur en 200 mètres de distance. Cela témoigne d'une variation latérale importante de la capacité de stockage de la couverture d'altération. Comparée aux images électriques 2D obtenues par Robain et Wubda (2005), on note que l'épaisseur la plus importante de l'aquifère est notée dans des terrains légèrement plus résistants en haut de versant.

Mais globalement, la gamme de résistivité reste la même pour les deux sondages (100 à 600 Ohm.m) dans le volume exploré par la RMP.

En conclusion sur cette zone, on conclut à la présence d'un aquifère relativement important (3.5 % d'eau en volume) situé dans la partie sableuse de la couverture mais aussi dans la partie fracturée de la roche. Son épaisseur varie considérablement d'un site à l'autre. Dans le socle, le volume d'eau libre chute à 1.5 %, mais peut concerner aussi des épaisseurs d'environ 20 mètres. Les sondages RMP ayant été réalisés à une époque où la nappe était en position haute dans le versant, les valeurs RMP obtenues ici intègrent donc aussi une partie de la zone non saturée qui se sature au long de la saison des pluies.

4.1.2 Bas fond herbeux BF2

La figure 10 présente les résultats du sondage RMP sur le bas fond herbeux BF2. Les couches superficielles argileuses ne sont pas détectées par la méthode, car l'eau contenue dans ces terrains est très liée. Le sondage RMP repère néanmoins un premier terrain relativement argileux (temps T1 très court, 50 ms) et pouvant faire 5 mètres d'épaisseur. Ce terrain freine probablement l'infiltration. En dessous, on note un terrain aquifère contenant beaucoup d'eau (12.5%). La porosité des altérites et des roches est ici importante, mais la capacité de stockage reste limitée en profondeur puisque que la méthode ne détecte rien en dessous de 10 mètres, ou se trouve le socle sain d'après les sondages électriques réalisés dans cette zone.

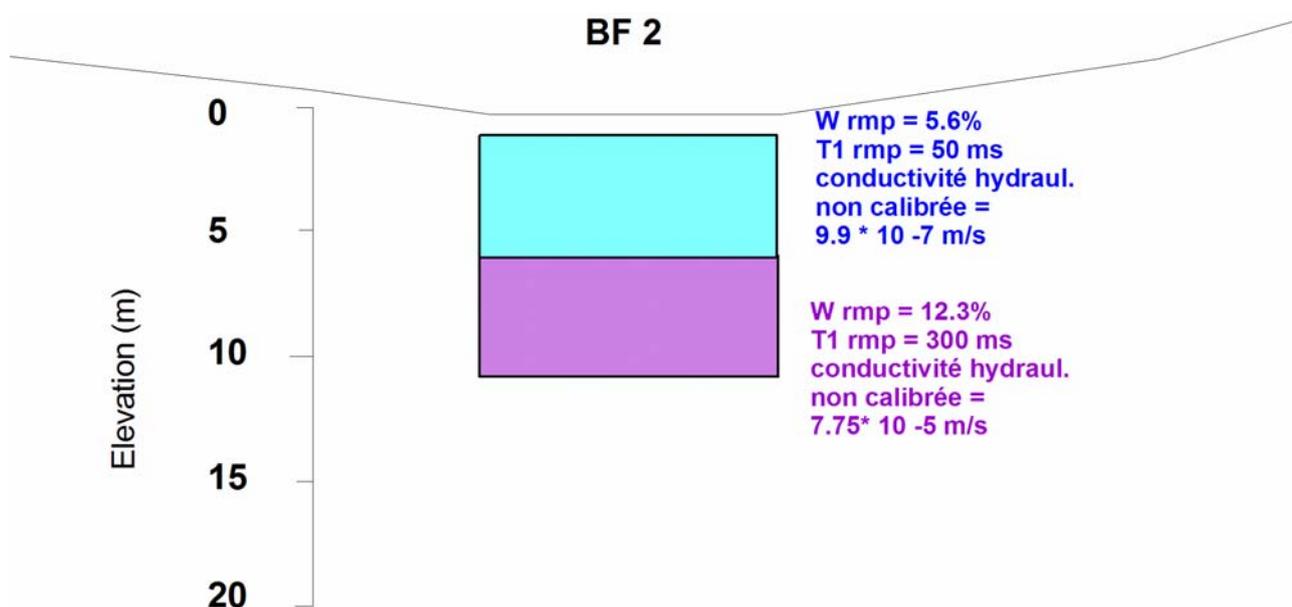


Figure 10. Résultat du sondage RMP sur le bas fond herbeux BF2 (bassin versant d'Ara)

4.1.3 Bas fond herbeux BF4 et versant

La figure 11 présente les résultats du sondage RMP sur le bas fond herbeux BF4 et le versant attenant. Comme pour le sondage BF2, les couches superficielles argileuses ne sont pas détectées par la méthode. Les 2 sondages RMP repèrent chacun un premier terrain probablement plus argileux voire argilo-sableux (temps T1 courts, 50 à 130 ms) et pouvant faire 5 à 10 mètres d'épaisseur. Ce terrain freine probablement l'infiltration. Pour le sondage BF4-1, ce premier terrain apparaît comme conducteur sur la coupe électrique et sa nature argileuse est donc certaine. En dessous, on note un terrain aquifère contenant légèrement plus d'eau (5%). La porosité des sols et des roches est ici moins importante que sous le bas fond herbeux BF2, mais la capacité de stockage reste équivalente car l'épaisseur totale des terrains aquifères est plus importante (15 m au lieu de 10m pour BF2). Ici aussi le socle sain est situé à plus de 20 m d'après les coupes électriques.

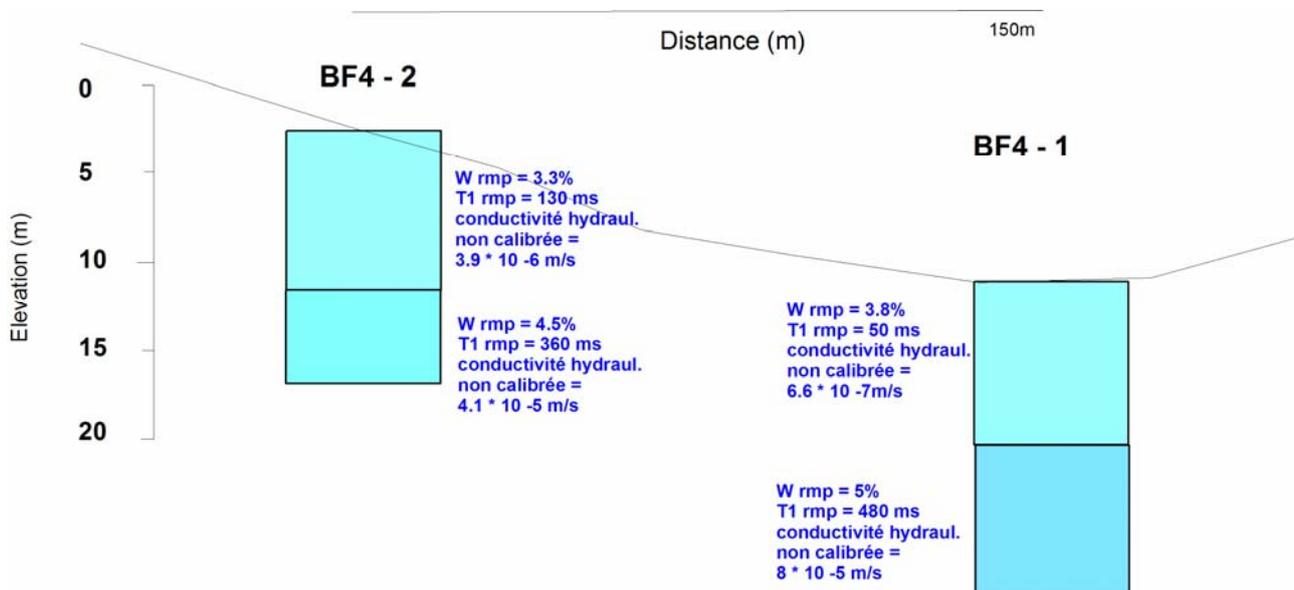


Figure 11. Résultat des sondages RMP sur les bas fond herbeux BF4 et son versant (bassin versant d'Ara)

4.1.4 Zone de la quartzite

Les résultats sont présentés sur la figure 12. Ces sondages ont été réalisés pour reconnaître les bancs de quartzites orientés NS et les formations conductrices s'intercalant entre ces bancs, pouvant constitué des barrières hydrauliques aux écoulements de sub-surface. Les résultats RMP montrent de forts contrastes entre ces sites :

- Quartz 1, situé en zone de crête, est le sondage qui montre la plus grande porosité (avec le second terrain du bas fond BF2). Situé à l'aplomb de la veine de quartzite majeure, cela confirme que cette formation est fracturée en grand. En revanche, on ne détecte pas d'aquifère en profondeur au-delà de 12 mètres, ce qui a) limite les capacités de stockage de cette formation, et b) indique que les fractures (nettement

visibles sur les affleurements au nord du bassin) sont remplies en profondeur par des matériaux de type oxyde de fer (visibles eux aussi sur les affleurements au nord (rapport Descloîtres et al., 2003). Ce site serait un site idéal pour y implanter un puit, car cette formation est probablement drainante localement.

- Quartz 2 est un sondage typique de formation argilo-sableuses : porosité de 3 à 4 %, premier terrain avec temps T1 relativement court, passant ensuite à un deuxième terrain plus conducteur hydrauliquement parlant. On peut émettre l'hypothèse que le type d'altération est ici plus argileux, comme en témoigne la résistivité électrique, et la conductivité apparente électromagnétique assez forte (14-20 mS/m). Il n'est pas certain que ces terrains puissent constituer de barrières hydrauliques très efficaces.
- Quartz 3 présente un aquifère intermédiaire entre les deux sondages précédents.

En résumé, ce site est exemplaire pour montrer les variations latérales de porosité et de temps T1, ce qui témoigne de la grande variabilité latérale des terrains saturés en terme de porosité et de conductivité hydrauliques.

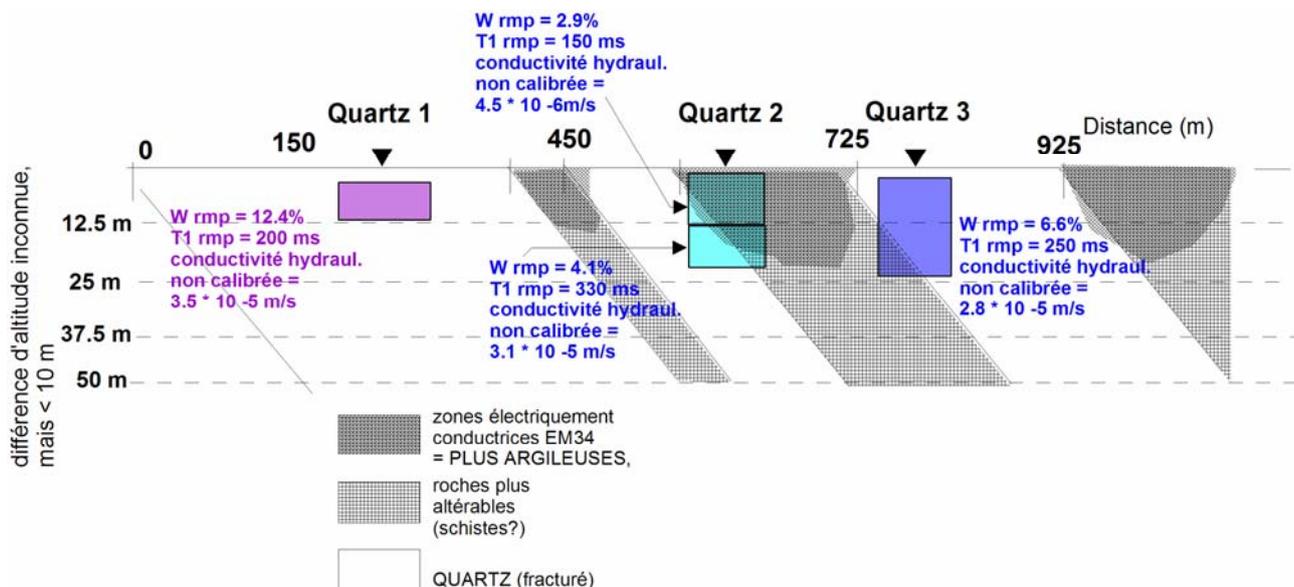


Figure 12. Résultat des sondages RMP sur la zone des quartzites (bassin versant d'Ara). Le pendage des quartzite est mesuré (20° est) et apparaît plus incliné sur cette figure en raison de la dilatation d'échelle verticale.

4.2 Bassin versant de Béléfoungou

Les résultats sont présentés sur la figure 13. Les résultats RMP montrent de forts contrastes entre ces sites :

- Bélé 2 est un site où on détecte l'aquifère à la profondeur donnée par le forage, et cet aquifère présente un porosité très importante (12.5%), sur une épaisseur assez réduite (7m). Il pourrait s'agir ici de la partie sableuse du régolith, voire de la roche qui serait

très fracturée ici, soit les deux. Une comparaison avec les cuttings de forage permettra de trancher entre ces 3 hypothèses. La description des cuttings est cependant difficile en raison de la technique de marteau fond de trou qui pulvérise souvent le terrain et rend difficile l'obtention d'une granulométrie par exemple. Les données électriques présentent à l'aplomb de ce point RMP des résistivités typiquement dans la gamme 150-450 Ohm, ce qui pourrait faire aussi être traduit comme une zone sableuse ou de roche très fracturée. La résistivité ne permet pas non plus de trancher avec certitude entre les 2 types de terrain (sables ou roche fracturée).

- Bélé 1, situé à environ 100 m de Bélé 2, est un site atypique : il est le seul à détecter de l'eau dans la zone non saturée, ce qui est pas usuel pour la méthode RMP dans sa configuration actuelle. Il s'agit d'un terrain aquifère contenant peu d'eau (2.5 %). Aucun terrain aquifère n'est repéré en profondeur alors que le forage montre bien le niveau statique à 19 mètres. Plusieurs explications peuvent être avancées à la présence de cet aquifère détecté par la RMP en zone a priori non -saturée:
 - Le sondage RMP repère un aquifère perché au dessus du niveau de nappe, d'extension latérale limitée, et contenu latéralement pas des terrains relativement imperméables. Le forage aurait raté cet aquifère. Cette hypothèse n'est pas vérifiable avec les données actuelles sur ce site.
 - Le sondage RMP verrait un artefact issu d'un aquifère plus profond situé latéralement : Nous écartons cette hypothèse car cet artefact *aurait les mêmes caractéristiques RMP que l'aquifère détecté pour le sondage Bélé 2 situé juste à coté, ce qui n'est pas le cas.*
 - Le sondage RMP repère réellement une zone qui contient plus d'eau, mais sans arriver à la saturation : cette situation peut se produire lorsque les caractéristiques magnétiques du terrain sont telles que la méthode RMP peut « voir » du signal de la zone non saturée. Une analyse des cuttings de forage serait la aussi nécessaire. Nous privilégions pour l'instant cette dernière hypothèse.

- Bélé 3 est un sondage proche des sondages RMP caractéristiques des aquifères assez argileux, ce qui confirme le peu de potentiel hydrogéologique de ce site, où la résistivité montre aussi des valeurs inférieures à 50 Ohm.m.

Si on valide l'hypothèse que la RMP voit l'eau de la zone non saturée de façon ponctuelle sous le site Bélé1, sans qu'on la retrouve à la même profondeur sur le sondage adjacent Bélé2 nous conduit à émettre l'hypothèse suivante: Sous Bélé 1, le socle situé en profondeur (au-delà de 20 mètres de profondeur) n'est pas poreux (i.e. porosité RMP < 0.5%), car s'il l'était, nous aurions

mesurer du signal RMP en profondeur. Si cela se confirme, l'eau à moins de possibilité d'être drainée vers le bas, et elle remplit mieux les pores de la zone non saturée, la rendant quasiment saturée. Des terrains argileux pourraient jouer le même rôle, mais ils auraient été détectés par le sondage de résistivité TDEM. Lorsque le socle devient franchement fracturé (ou que le régolithe devient très sableux), comme le sondage Bélé 2 le montre, l'eau de la zone non saturée peut y être stockée plus bas et en plus grande quantité, et de ce fait, la zone non saturée contiendrait moins de stock d'eau, qui devient indétectable en RMP. Bien évidemment, cette hypothèse d'interprétation demandera, pour être confirmée, de densifier les mesures géophysiques, mais aussi de conduire des mesures de teneur en eau sur toute l'épaisseur de la zone non saturée (sonde à neutron par exemple). Quoiqu'il en soit, les mesures RMP montrent ici que les stocks d'eau en zone non saturée pourraient être radicalement différents à moins de 100 mètres près, et que le degré de fracturation du socle (ou la présence d'un terrain du régolithe très poreux) peut être un facteur guidant le stockage et le drainage vers le bas de la zone non saturée dans cette zone forestière. Les arbres ne trouveraient donc pas les mêmes stocks d'eau, ni aux mêmes profondeurs.

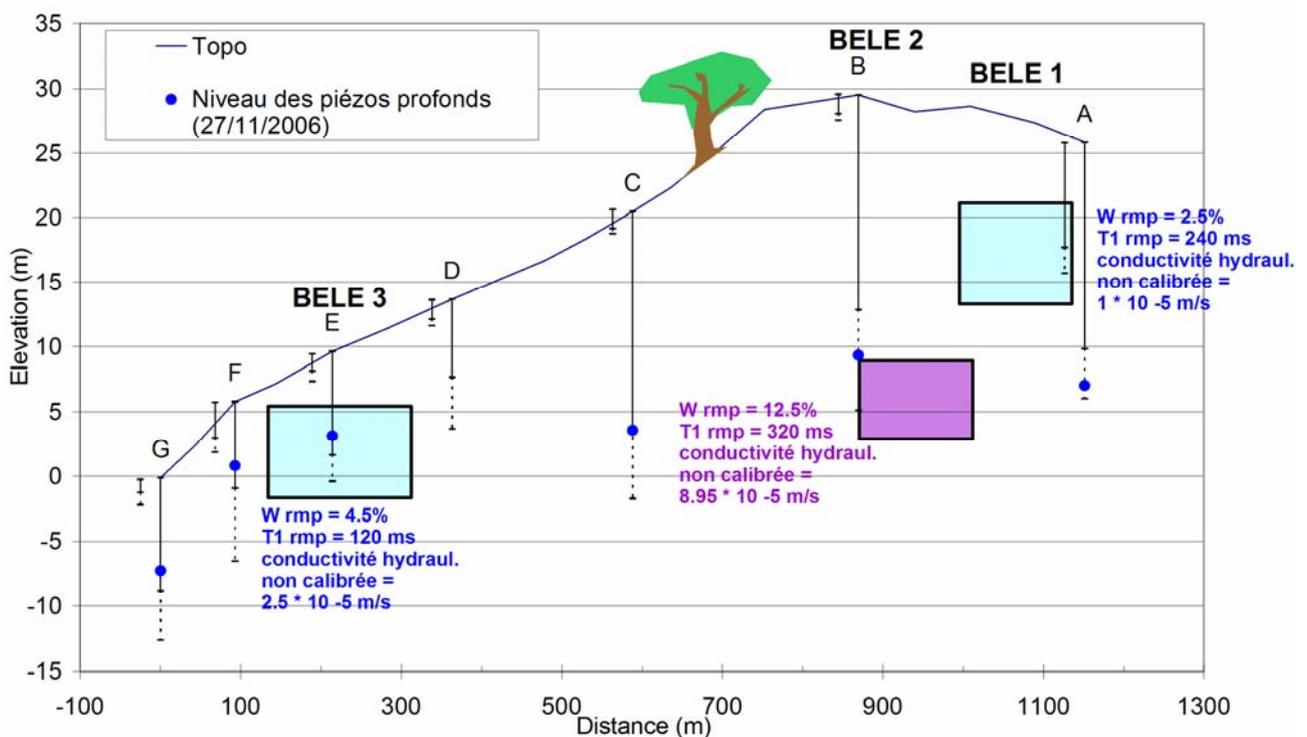


Figure 13. Résultat des sondages RMP sur le versant de Béléfougou (bassin versant de Béléfougou).

4.3 Bassin versant de Bira, bas-fond herbeux et versant

La figure 14 présente les résultats des sondages RMP sur le bas fond herbeux de Bira et le versant attenant. Comme pour les bas-fonds BF2 et BF4 du bassin d'Ara, les couches superficielles argileuses ne sont pas détectées par la méthode. Le sondage RMP Bira 2 sur le versant repère un

premier terrain probablement plus argileux (temps T1 court, 50 ms) de 5 mètres d'épaisseur. En dessous, la les terrains ont une porosité calculée assez homogène, mais les épaisseurs des aquifères varie latéralement. Comme partout dans cette zone géographique, cela témoigne d'une altération différentielle probablement initiée par les différences de lithologie et de structure des roches de la région (gneiss, micaschistes, quartzites, etc.).

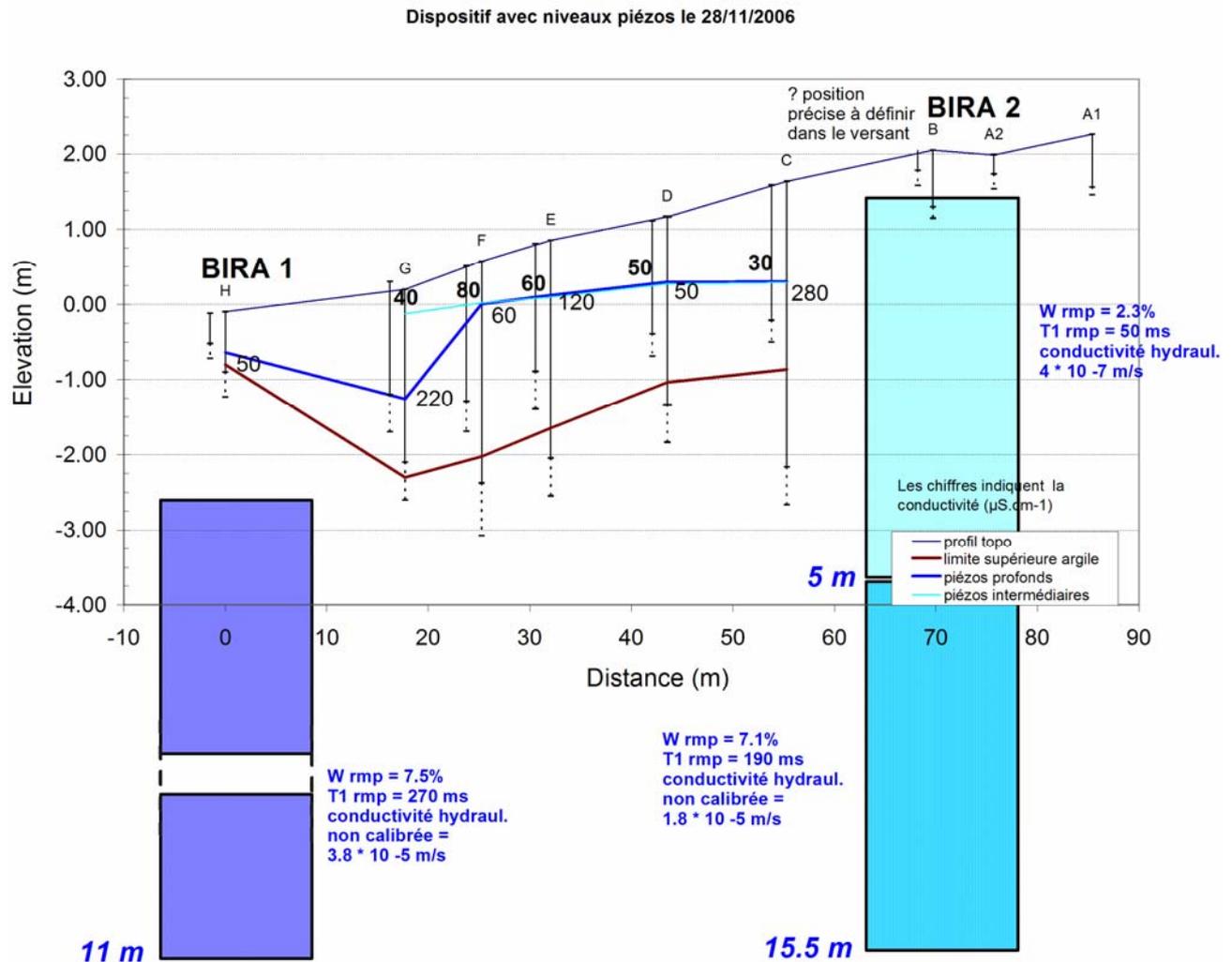


Figure 14. Résultat des sondages RMP sur le bas-fond herbeux et le versant de Bira (bassin versant de Bira).

5. Conclusions et perspectives

Les sondages RMP réalisés au Bénin sur les sites Amma Catch montrent que la méthode est applicable dans le contexte des aquifères de socles de cette région. En résumé, la méthode permet de reconnaître les 50 premiers mètres du sous-sol lorsqu'elle est employée avec des boucles en forme de 8 de 50 mètres de coté, cette configuration étant considérée comme optimum. Seuls les terrains très argileux ou les terrains comportant moins de 0.5% d'eau libre ne sont pas décelables par la méthode dans sa configuration matérielle actuelle. Les porosités calculées (de 2% à plus de 12%) et les temps de décroissance T1 (de 50 ms à plus de 450 ms) sont très variables d'un site à l'autre. En général, un ou deux terrains aquifères sont mis en évidence, soit directement par la méthode, soit en considérant l'adjonction d'une information extérieure donnée par les sondages de résistivité par exemple. Les épaisseurs calculées sont aussi souvent variables d'un site à l'autre, ce qui conduit à dire que la capacité de stockage des terrains aquifères est très variable latéralement et en profondeur, et d'une unité pédologique ou géologique à l'autre. Ce résultat n'est pas étonnant dans cette région de socle, et cela a été vu récemment dans d'autres régions de socle du monde (Vouillamoz et al., 2005, Descloitres et al., 2007).

Les conductivités hydrauliques sont données dans ce rapport en utilisant une constante de calibration empirique. Pour avoir une idée plus précise de la valeur absolue de la conductivité hydraulique, il faudra comparer les résultats RMP à des essais de pompages, ou inventer une procédure de calibration qui utilise des méthodes sur échantillons (RMP en laboratoire, infiltrométrie sur site, porosimétrie mercure, etc). Ces essais de caractérisation d'échantillons pourront être aussi utile à la phase d'interprétation du projet gravimétrique GHYRAF (Hinderer et al., ANR 2007, en cours d'évaluation en juin 2007). En toute logique, d'après les résultats présentés sur la figure 8, il serait logique de tenter d'obtenir des mesures in situ de conductivité hydraulique sur les groupes d'aquifères proposés dans le tableau 4.

Quelques mesures complémentaires pourraient être utiles dès à présent, comme la description des cuttings de forages, des mesures de susceptibilité magnétique sur les cuttings de Béle 1 (vérification de la possibilité d'avoir une réponse RMP en ZNS ou non).

A la suite de cette mission RMP de reconnaissance, il me paraît important d'amorcer une discussion sur le couplage entre les résultats géophysiques et leur intégration dans des modèles hydrologiques. Une question scientifique majeure posée dans la récente publication de Kamagaté et al (2007), celle de la vidange de la nappe en saison sèche, peut être d'ores et déjà abordée à la suite de nos études. Cette question peut aussi être confrontée aux résultats obtenus par Brabant (1998). Quoiqu'il en soit, les résultats RMP peuvent nourrir les hypothèses de calcul sur la capacité de

stockage en saison des pluies de la couverture d'altération sur le versant de Nalohou ou Béléfougou.

La question de la vidange de la nappe, et de la modélisation hydrologique des processus en général, pourrait aussi être abordée en s'appuyant sur une caractérisation du milieu (géométrie, épaisseur, valeur de conductivité hydraulique à saturation) issue de données géophysiques, elles-mêmes validées et enrichies par une caractérisation géomorphologique (et géologique) : Nous avons vu en effet que la résistivité électrique (ou son inverse la conductivité) ne permet pas de caractériser les variations des paramètres hydriques: il faut considérer sa spatialisation (carte EM) pour dégager des logiques d'organisation qui guident l'identification d' « unités hydrogéophysiques » qu'on pourraient considérées comme homogènes pour des modélisations hydrologiques. Ce travail pourrait être mené avec les données existantes, mais il manquera certainement des données de RMP sur certains sites clefs non reconnus jusqu'à présent, ce qui permettra de densifier l'information. Cet objectif (continuer la caractérisation des unités pédologiques et géologiques) pourrait être affiché en 2008, dans le cadre du programme Ghoraf par exemple, ou lors de la confirmation d'une fiche instrument Amma 2008. Dans le cadre du S.O « Amma-Catch », la continuité de l'utilisation, sur les sites du Bénin, des outils hydrogéophysiques (ceux employés pour la présente étude) dépendra aussi de la réponse à la question : les modélisations hydrologiques peuvent-elles tirer partie d'une paramétrisation renforcée par géophysique?

Références :

- Boucher M., Favreau G., Massuel S. & Vouillamoz J.M., 2006. Caractérisation hydrogéologique de l'aquifère libre du Continental Terminal 3 (CT3) au Niger par la méthode de Résonance Magnétique Protonique (RMP). Rapport final conjoint BRGM / IRD, BRGM/RP-54746-FR, Juillet 2006, 106 pp., Orléans, France.
- Brabant, P. 1998. Le sol des forêts claires du Cameroun: Exemple d'étude d'un site représentatif en vue de la cartographie des sols et de l'évaluation des terres. Tome I et II, 530 pages. Editeur : IRD, ISBN-13: 978-2709909990
- Descloitres, M., Le Troquer, Y., Wubda, M. 2003. Prospections géophysiques sur le bassin versant de Ara, Nord Bénin. Electricité 2D et électromagnétisme EM34. Compte Rendu de mission, UR Géovast, Ouagadougou.
- Descloitres, M. 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., Ruiz, L., Sekhar, M., Legchenko, A., Braun, J. J., Mohan Kumar, M.S., Subramanian, S., 2007. Characterization of seasonal local recharge using Electrical Resistivity Tomography and Magnetic Resonance Sounding. *Hydrological Processes*, in press.
- Descloitres, M., Favreau, G., Boucher, M., Vouillamoz, J.M., 2007. Rapport de mission de prospection TDEM au Niger. IRD-LTHE, BRGM, IRIS Instruments, Grenoble, février 2007.
- Kamagaté, B., Séguis, L., Favreau, G., Seidel, J. L., Descloitres, M., Affaton, P., 2007. Hydrological processes and water balance of a tropical crystalline bedrock catchment in Benin (Donga, upper Ouémé River), *Comptes-rendus Geosciences*, in press.
- Legchenko, A., 2004. Magnetic Resonance Sounding: Enhanced Modeling of a Phase Shift, *Applied Magnetic Resonance*, vol. 25, 621-636.
- Robain, H., Wubda, M., 2005. Rapport de mission au Bénin, du 12 octobre au 22 novembre 2004. UR Geovast, Bondy, 31 pages.
- Vouillamoz, M., Descloitres, M., Toe, G., Legchenko, A., 2005. Characterization of crystalline basement aquifers with MRS: comparison with boreholes and pumping tests data in Burkina Faso. *Near Surface Geophysics*, 3: 107-111.
- 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).
- Wubda, M., 2003. Reconnaissance Géophysique du Bassin d'Ara (Djougou, Nord Bénin), Rapport de fin d'étude, DESS de Géophysique Appliquée, Paris 6.

Valorisations en cours

➤ Projets d'article :

Descloitres, M., Séguis, L., Wubda, M., Legchenko, A., et autres. Discrimination of rocks with different hydrodynamic properties using MRS, EM and resistivity methods. *Journal of Hydrology / Hydrological Processes/ Journal of Applied Geophysics*, fin 2007.

➤ Conférences :

Descloitres, M., Séguis, L., Wubda, M., Legchenko, A., 2007. Discrimination of rocks with different hydrodynamic properties using MRS, EM and resistivity methods. Extended abstract submitted to EAGE international Conference "Near Surface 2007", Istanbul, Turkey, 2-3 septembre, 2007. (cf annexe 5)