

Mots clés : Géophysique, Hydrogéologie, Sondages RMP, Essai de pompage, Modélisation, Teneur en eau, Perméabilité, Transmissivité, Continental Terminal, Niger.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

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 IRD & Rapport BRGM/RP-54746-FR, 106 p., 28 fig., 3 tabl., 4 ann.

Photographie de couverture :

Sondage RMP en cours sur le site de Wankama; au centre, piézomètre de contrôle du niveau statique. Encart : Ecran de contrôle au cours du sondage.

Synthèse

Au sud-ouest semi-aride du Niger, la nappe phréatique représente l'unique ressource permanente renouvelable en eau douce. Dans cette région rurale à forte densité de population, 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. Ce paradoxe est expliqué par une augmentation de l'infiltration au travers de mares temporaires. 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 l'accord-cadre de coopération scientifique et technique entre la République du Niger et l'IRD, et, de la convention cadre BRGM, IRD, IRIS-Instruments, 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.

Une première campagne de mesures géophysiques a été réalisée en décembre 2005, avec pour objectifs de : (1) vérifier la faisabilité de sondage RMP dans cette région ; (2) calibrer les mesures RMP avec des données hydrogéologiques ; (3) s'assurer que les contrastes rencontrés dans la région sont suffisants pour être clairement identifiés par la méthode ; (4) préparer la prochaine campagne de mesures.

Dix-sept sites documentés en données hydrodynamiques, ont été reconnus par sondage RMP. Les conditions de bruit EM très favorable ont permis de réaliser des mesures RMP de bonne qualité. Une étude quantitative a évalué les niveaux statiques, les teneurs en eau et les transmissivités des sites étudiés ainsi que l'incertitude sur ces paramètres. Des contrastes significatifs ont pu être mis en évidence par la méthode RMP sur l'ensemble de la zone étudiée. En revanche, la mise en œuvre d'une méthode électrique s'est avérée difficile à cause des conditions de terrain.

En conséquence, l'expérimentation sera poursuivie. Une nouvelle campagne de terrain est prévue en novembre 2006 et l'utilisation d'une méthode électromagnétique (TDEM) est envisagée pour améliorer l'interprétation des sondages RMP. Lors de cette prochaine campagne, une étude à une échelle plus locale sera effectuée afin de (1) mieux appréhender l'effet d'échelle sur la signification des mesures RMP (2) mieux comprendre les processus de recharge de la nappe libre du Continental Terminal. Dans ce cadre, des essais de pompage avec piézomètre d'observation seront réalisés pour avoir des valeurs de coefficient d'emmagasinement d'après essai de pompage à comparer avec les mesures RMP, ces deux méthodes ayant à peu près la même échelle d'investigation.

Sommaire

1.	Introduction	11
2.	Hydrogéologie.....	13
2.1.	Contexte.....	13
2.2.	Données.....	14
3.	Méthode et moyens	15
3.1.	La résonance magnétique protonique (RMP)	15
3.1.1.	Principe de la méthode	15
3.1.2.	L'équipement « NUMIS »	16
3.1.3.	Le sondage RMP	17
3.1.4.	Interprétation des données	20
3.1.5.	Présentation des résultats d'un sondage après inversion	23
3.2.	Moyens mis en œuvre	25
3.2.1.	Calendrier et personnel.....	25
3.2.2.	Equipement.....	26
4.	Travaux réalisés.....	27
4.1.	Géophysique.....	27
4.2.	Hydrogéologie.....	31
5.	Traitement des données.....	33
5.1.	Ré-interprétation des essais de pompage	33
5.2.	Inversion des sondages RMP	36
5.2.1.	Levée de l'équivalence	36
5.2.2.	Incertitude de mesure	38
5.2.3.	Effet de la température	39
5.2.4.	Estimation de la teneur en eau et du niveau statique	40

5.2.5.	Calibration de la transmissivité.....	43
6.	Résultats et discussion	45
6.1.	Niveaux statiques	45
6.2.	Teneurs en eau	49
6.3.	Transmissivités.....	50
7.	Conclusion et perspectives.....	53

Listes des figures

Figure 1 – Coupe hydrogéologique schématique de la zone d'étude (Massuel, 2005).....	13
Figure 2 – Principe de mesure RMP	15
Figure 3 – Schéma fonctionnel du dispositif instrumental	16
Figure 4 – Equipement de Résonance Magnétique Protonique NUMIS ^{PLUS} sur le site de Winditen (15 décembre 2005)	17
Figure 5 – Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.....	18
Figure 6 – Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1	19
Figure 7 – Résultats d'inversion des données théorique	21
Figure 8 – Exemple de résultats RMP sur deux forages du Niger	22
Figure 9 - Exemple de résultats d'inversion automatique	24
Figure 10 – Localisation des sites	28
Figure 11 – Variations journalières du champ géomagnétique. En haut: intensité du champ mesurés à un pas de temps de 15 minutes sur les différents sites et convertis en fréquence. Au milieu : variation de la fréquence liée au champ géomagnétique. En bas: horaires d'acquisition des sondages RMP.	29
Figure 12 - Effet de capacité, exemple de Wankama, puits de pompage. A : courbe diagnostique – comparaison avec la courbe de Theis. B : modélisation de la descente C : modélisation de la remontée.	34
Figure 13 - Ecoulement retardée en nappe libre, exemple de Banizoumbou, piézomètres d'observation P2 et P3.....	35
Figure 14 – Exemple d'équivalence sur le site de Gassan Kournie. A gauche: modèle de teneur en eau; au milieu: amplitude du signal RMP correspondant; à droite: phase du signal RMP.	36
Figure 15 – Estimation de la teneur en eau en fixant partiellement la géométrie de l'aquifère. En haut, l'épaisseur est fixée (l'équivalence porte alors sur la teneur en eau et le niveau statique); en bas, le niveau statique est fixé (l'équivalence porte alors la teneur en eau et l'épaisseur)	37
Figure 16 – Incertitude sur la mesure du signal RMP liée au bruit électromagnétique.....	38

Figure 17 – Incertitude sur la mesure du signal RMP liée à l'extrapolation avant le temps mort	38
Figure 18 – Effet de la température sur le signal RMP	40
Figure 19 – Principe d'inversion contrainte d'après l'exemple du site de Gassan Kournie	42
Figure 20 – Comparaison du niveau statique dans le CT3 estimé par sondage RMP et par les informations piézométriques	45
Figure 21 – Effet d'un niveau conducteur superficiel sur le signal RMP. A gauche : paramètres initiaux : résistivité et teneur en eau. A droite : réponse RMP	46
Figure 22 – Effet d'un niveau conducteur profond sur la réponse RMP. A gauche : paramètres initiaux : teneur en eau et résistivité. A droite : résultat RMP après inversion sans prendre en compte la conductivité des argiles	47
Figure 23 – Estimation du niveau statique et de la teneur en eau en inversant les données avec l'épaisseur fixée et sans prendre en compte la conductivité des argiles	47
Figure 24 – Effet d'un aquifère profond sur la réponse RMP dans un terrain à 200 Ω .m. A gauche : paramètres du modèle. A droite : résultat RMP après inversion mono-couche	48
Figure 25 – Estimation du niveau statique et de la teneur en eau en inversant les données avec l'épaisseur fixée sans prendre en compte l'aquifère captif	48
Figure 26 - Effet sur le signal RMP d'un niveau aquifère profond dans un environnement conducteur. A gauche : paramètres initiaux: résistivité et teneur en eau. A droite : réponse RMP	49
Figure 27 – Comparaison de la teneur en eau RMP avec le coefficient d'emmagasinement estimé par modélisation (en bleu) et par essai de pompage (en rouge)	50
Figure 28 – Comparaison de la transmissivité mesuré par RMP et estimé par modélisation et/ou essai de pompage	51

Listes des tableaux

Tableau 1 – Paramètres du modèle	21
Tableau 2 – Personnes présentes sur les différents sites	25
Tableau 3 – Caractéristiques des sondages RMP	30

Listes des annexes

Annexe 1 - Résultats des sondages RMP	57
Annexe 2 - Résultat du sondage électrique	79
Annexe 3 - Logs géologiques	83
Annexe 4 - Récapitulatif des mesures	103

1. Introduction

Au sud-ouest semi-aride du Niger, comme ailleurs au Sahel, la nappe phréatique représente l'unique ressource permanente durable en eau douce. Dans cette région rurale à forte densité de population (près de 30 habitants/km² d'après le recensement 2001) le niveau statique de la nappe libre du Continental Terminal (CT3) s'est élevé 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 l'accord-cadre de coopération scientifique et technique entre la République du Niger et l'IRD, et, de la convention cadre BRGM, IRD, IRIS-Instruments, 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.

Une première campagne de mesures géophysiques a été réalisée en décembre 2005 pour mettre en œuvre la méthode de résonance magnétique protonique (RMP) au sud-ouest du Niger. Les objectifs de cette première campagne ont été de vérifier la faisabilité de sondage RMP dans cette région, de calibrer les mesures RMP avec des données hydrogéologiques, de s'assurer que les contrastes rencontrés dans la région sont suffisants pour être clairement identifiés par la méthode et enfin de préparer la prochaine campagne de mesures. Dans ce cadre, dix-sept sites, documentés en données hydrodynamiques, ont été reconnus par sondage RMP.

Ce rapport présente la méthodologie d'interprétation des sondages RMP, les résultats des mesures effectuées sur les différents sites et leur comparaison avec les paramètres hydrogéologiques mesurés par essais de pompage et/ou évalués par modélisation hydrogéologique. Il envisage la poursuite des investigations dans la région lors d'une prochaine campagne de mesures.

2. Hydrogéologie

2.1. CONTEXTE

La région étudiée se situe au sud-ouest du Niger, en bordure du large bassin sédimentaire des lullemeden, entre le fleuve Niger à l'ouest et la large vallée fossile du Dallol Bosso à l'est. Dans cette région, les grès sablo-silteux à argileux, peu consolidés, du Continental Terminal (formation tertiaire, d'âge éocène à pliocène ; Lang et al., 1990) constituent la matrice de l'aquifère libre ; l'épaisseur saturée de l'aquifère libre augmente, d'ouest en est, d'une dizaine à plusieurs dizaines de mètres. La nappe phréatique du Continental Terminal s'étend sur une superficie de près de 150 000 km², essentiellement au Niger mais également, sur ses bordures, au Nigéria et au Mali. En profondeur, des aquifères rendus captifs par d'épaisses séries argileuses (Figure 1) sont localement captés par forages. Vers l'Est, les paléo-vallées des Dallol Bosso et Maouri sont les témoins d'importantes rivières qui se sont asséchées avec l'aridification climatique de l'Holocène ; ces larges vallées présentent en surface des épaisseurs plurimétriques de sables quaternaires de granulométrie plus grossière (Favreau, 2000 ; Guéro, 2003).

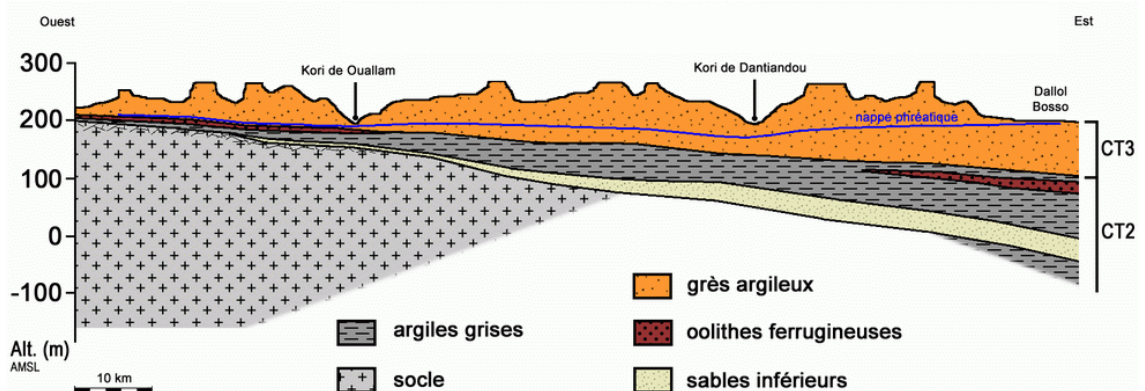


Figure 1 – Coupe hydrogéologique schématisée de la zone d'étude (Massuel, 2005)

Le climat est semi-aride, avec une température moyenne annuelle de l'ordre de 29°C, une évapotranspiration potentielle de 2500 mm/an et une pluviométrie de l'ordre de 570 mm/an (Niamey, 1908-2003). La saison des pluies, dépendante de la mousson ouest-africaine, cumule 90% de la pluviométrie de juin à septembre. Elle est constituée d'événements intenses d'origine convective, d'une durée typiquement de quelques heures. Le ruissellement produit sur les versants topographiques, de type Hortonien, s'accumule alors rapidement dans une multitude de mares temporaires, exutoires naturels de bassins versants de quelques km². Dans cet environnement, toutes les données hydrodynamiques montrent une recharge de type indirect, par infiltration rapide de l'eau accumulée dans les mares.

La végétation naturelle est une savane arborée et arbustive à graminée, mais sous la pression du déboisement, l'essentiel du paysage est désormais constitué d'une mosaïque de champs de mil et de jachères courtes.

La piézométrie de la nappe montre des gradients hydrauliques faibles, <1‰, avec des dômes piézométriques d'ampleur pluri-hectométriques à l'aplomb des mares en période de recharge de l'aquifère. En fonction du relief, la profondeur de la nappe sous le sol varie de quelques mètres sous les vallées sèches à plus de 70 m sous les plateaux latéritiques relictuels. En raison de l'augmentation du ruissellement vers les mares depuis plusieurs décennies, la piézométrie de la nappe phréatique montre une hausse continue, estimée à près de 4 m depuis les années 1960. L'augmentation induite de la recharge a été estimée, par interprétation croisée de données hydrodynamiques et géochimiques, de plusieurs dizaines de mm/an (Favreau, 2000). La nappe présente une minéralisation généralement faible, avec des conductivités électriques de l'eau de l'ordre de la centaine de $\mu\text{S}/\text{cm}$, et une température de la nappe de l'ordre de 30°C. La résistivité des terrains (zone non saturée) est généralement forte, dans une gamme de 50 à plusieurs milliers de ohm.m (Massuel et al., 2006).

2.2. DONNEES

L'aquifère du Continental Terminal au Niger est intensément étudié depuis plus d'une dizaine d'années (Favreau, 2000 ; Guéro, 2003 ; Massuel, 2005). De nombreuses informations hydrogéologiques sont donc disponibles, avec notamment plus d'une centaine de chroniques piézométriques de la nappe libre (initiées à la fin des années 1980 ou au début des années 1990), plusieurs dizaines d'analyses chimiques (ions majeurs) et un nombre équivalent d'analyses isotopiques ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$, ^3H , $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$, ^{15}N). Les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère sont contraints par plusieurs dizaines de nivellements de précision (niveau optique, GPS différentiel) et plus d'une dizaine d'essais de pompages de longue durée, effectués en vue d'estimer la transmissivité et/ou la porosité efficace de l'aquifère (Favreau, 2000 ; Guéro, 2003). Ces données complètent de rares informations plus anciennes obtenues par essais de pompage lors de programmes d'hydraulique villageoise, dont les rapports techniques contiennent surtout une abondante description de la lithologie de l'aquifère (e.g, Pallas / FAO, 1970 ; Dehays / BRGM / BURGEAP, 1990).

L'ensemble des données hydrodynamiques a été synthétisé en annexe de thèses de doctorat récentes (Favreau, 2000 ; Guéro, 2003). Ces données, intégrées dans des modèles numériques des flux hydriques en régime transitoire (Guéro, 2003 ; Massuel, 2005) ont permis d'obtenir, en retour, une estimation de la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (recharge, porosité efficace, transmissivité).

Dans l'objectif de déterminer l'efficacité de la méthode RMP à caractériser le milieu, les sites de sondage RMP ont été choisis afin d'investiguer une gamme de paramètres hydrodynamiques aussi complète que possible. L'estimation de la porosité étant d'une importance cruciale pour mieux contraindre le bilan des flux hydriques à la hausse (Favreau et al., 2002), les sites disposant d'estimations de la porosité par essai de pompage ont été privilégiés pour une meilleure calibration des résultats RMP.

3. Méthode et moyens

3.1. LA RESONANCE MAGNETIQUE PROTONIQUE (RMP)

Les méthodes géophysiques traditionnelles d'exploration se fondent sur l'analyse d'anomalies de structures ou de paramètres physiques qui ne sont pas nécessairement liés de façon unique à la présence ou à l'absence d'eau dans le milieu étudié. Ainsi, par exemple, la conductivité électrique (inverse de la résistivité) des roches est proportionnelle à la conductivité électrique du fluide contenu et à une certaine puissance de la porosité (Archie, 1942), mais elle dépend également largement de la composition minéralogique et en particulier de la teneur en argile. Contrairement à ces méthodes géophysiques, l'information déduite par résonance magnétique protonique (RMP) est directement liée à l'eau contenue dans le sous-sol.

3.1.1. Principe de la méthode

Schématiquement le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique H_0 (tel que le champ magnétique terrestre), possèdent des moments magnétiques non nul qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal H_0 (Figure 2).

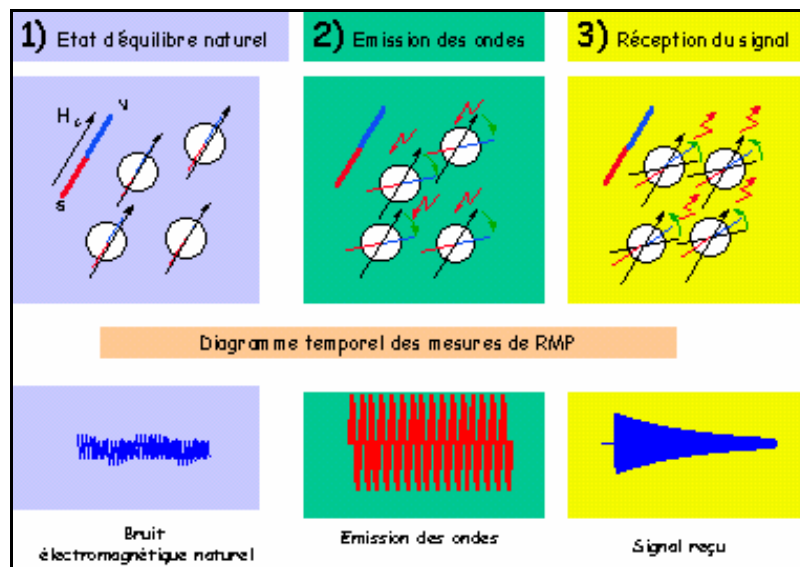


Figure 2 – Principe de mesure RMP

L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre et provoque une précession de des moments magnétiques autour de la direction du champ magnétique initial. Après

coupure du champ exciteur, au cours du retour à l'état d'équilibre, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons, constituant ainsi la réponse RMP. L'amplitude de ce champ est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, et donc que la teneur en eau est importante. La fréquence spécifique à laquelle les protons sont excités est caractéristique de l'atome d'hydrogène et assure ainsi que la méthode est sélective. La très grande majorité des noyaux d'hydrogène présents dans le proche sous-sol sont ceux des molécules d'eau. Ceci implique que la méthode RMP renseigne spécifiquement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

La constante de temps de relaxation longitudinale, T_1 caractérise la relation entre les protons et leur environnement (spin-lattice relaxation time). Sa valeur reflète comment l'énergie magnétique des protons est échangée avec son environnement. Des valeurs élevées de T_1 correspondent à un faible couplage et un retour lent à l'équilibre. Des valeurs faibles de T_1 indiquent un couplage fort et un rapide retour à l'équilibre.

La constante de temps de relaxation transversale, T_2 caractérise les échanges d'énergie entre les protons (spin-spin relaxation time) qui se manifestent dans un plan orthogonal à la direction du champ H_0 alors que T_1 correspond à la relaxation longitudinale, le long du champ H_0 .

Dans un champ magnétique non parfaitement homogène, les protons subissent un déphasage qui diminue le temps de relaxation transversale qui est alors défini par une constante T_2^* .

Ces phénomènes de relaxation sont liés à la taille moyenne des pores contenant les molécules d'eau. Dans différents environnements géologiques impliquant différentes conditions de susceptibilité magnétique et de champ magnétique rémanent, l'effet de l'inhomogénéité du champ magnétique est différent.

3.1.2. L'équipement « NUMIS »

L'équipement NUMIS se compose d'un générateur de courant alternatif, une unité réceptrice, un détecteur de signal RMP, une antenne et un microprocesseur (Figure 3).

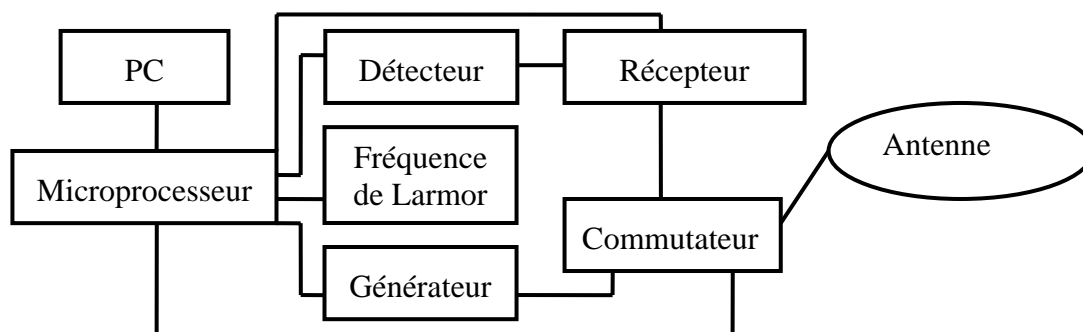


Figure 3 – Schéma fonctionnel du dispositif instrumental

Le microprocesseur pilote la commutation de l'antenne du mode émission au mode réception. Il contrôle également la génération de la fréquence de référence égale à la fréquence de Larmor. Une enveloppe du signal provenant du détecteur synchrone est enregistrée par le microprocesseur sous forme digitale sur une durée programmable de 2 secondes au maximum. Un PC portable est utilisé pour le stockage sur disque et le traitement des données. Le poids total de l'ensemble est d'environ 150 kg (Figure 4).



Figure 4 – Equipement de Résonance Magnétique Protonique NUMIS^{PLUS} sur le site de Winditen (15 décembre 2005)

3.1.3. Le sondage RMP

Pour réaliser un sondage RMP, une antenne est déployée sur le sol, généralement selon un cercle ou un carré ayant un diamètre compris entre 20 et 120 m, selon la profondeur des couches aquifères que l'on désire investiguer. Différentes géométries d'antennes sont prévues dans le logiciel d'acquisition de NUMIS, en particulier, l'antenne peut être déployée sous la forme d'un chiffre « huit » afin d'améliorer le rapport signal/bruit (Trushkin *et al.*, 1994). Une impulsion $i(t)$ d'un courant alternatif est émise dans la boucle

$$i(t) = I_o \cos(\omega_o t), \quad 0 < t \leq \tau \quad \text{Équation 1}$$

I_o et τ caractérisent respectivement l'amplitude et la durée de l'impulsion. La fréquence du courant émis ω_o doit être aussi proche que possible de la fréquence de Larmor, caractéristique des protons placés dans le champ géomagnétique $f_o = \gamma \cdot H_o / 2\pi$ avec H_o l'amplitude du champ géomagnétique et γ le facteur

gyromagnétique des protons (constante physique caractéristique). La valeur de cette fréquence est déduite de l'amplitude du champ géomagnétique mesuré avec un magnétomètre à proton.

Le champ magnétique oscillant généré par l'impulsion de courant entraîne une précession des protons autour du champ géomagnétique. Cette précession crée à son tour un champ magnétique alternatif qui est détecté après coupure de l'injection de courant. En pratique, l'enregistrement de la réponse RMP n'est possible qu'après un délai instrumental (dit « temps mort ») de 40 ms dans le cas de la version actuelle de NUMIS. Le processus d'acquisition d'une mesure est schématisé sur la Figure 5.

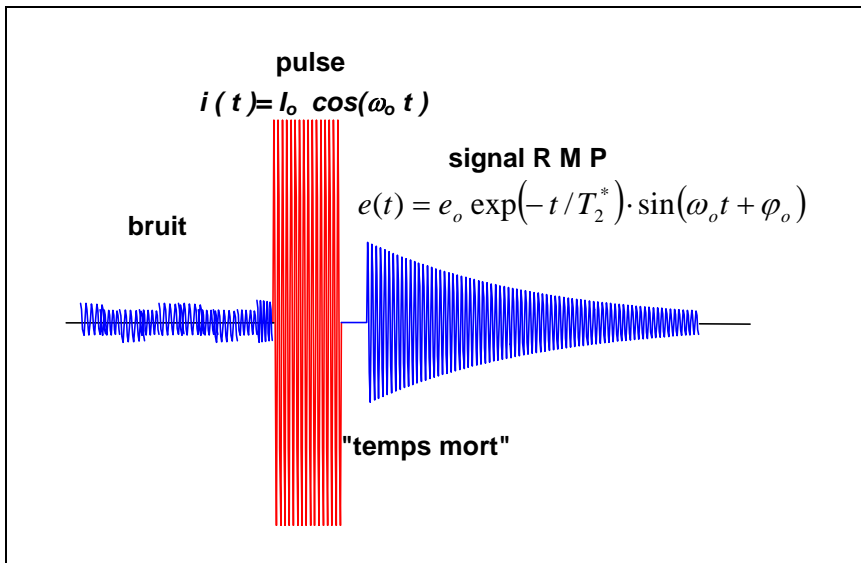


Figure 5 – Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception

En oscillant à la fréquence de Larmor, le signal RMP $e(t, q)$ décrit une enveloppe de forme exponentielle décroissante qui dépend du paramètre d'excitation (aussi appelé pulse) $q = I_0 \tau$

$$e(t, q) = e_0(q) \exp(-t/T_2^*) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{Équation 2}$$

avec $e_0(q)$ l'amplitude initiale RMP, T_2^* le temps de relaxation spin-spin, et φ_0 la phase du signal RMP.

L'augmentation du paramètre q permet d'augmenter le volume investigué et un ensemble de mesure $e(t, q)$ pour des q croissants constitue un sondage RMP en profondeur.

Pour la mesure de T_1 une adaptation technique d'« inversion recovery » (Farrar et al., 1971) a été développée. En injectant deux impulsions consécutives au lieu d'une seule

et en mesurant la réponse RMP après chaque impulsion, il est possible de déduire la constante de relaxation T_1 à partir de la différence de réponse entre FID1 et FID2 (Figure 6) tel que :

$$\frac{e_{o\text{FID}2}}{e_{o\text{FID}1}} = 1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{T_1}\right) \quad \text{Équation 3}$$

avec $e_{o\text{FID}1}$ et $e_{o\text{FID}2}$ l'amplitude à l'origine des signaux FID1 et FID2 et Δt le délai séparant les deux pulses.

Les paramètres $e(q)$, $T_2^*(q)$ et $\varphi_o(q)$ sont les paramètres significatifs qui renseignent sur l'eau contenue dans le sous-sol.

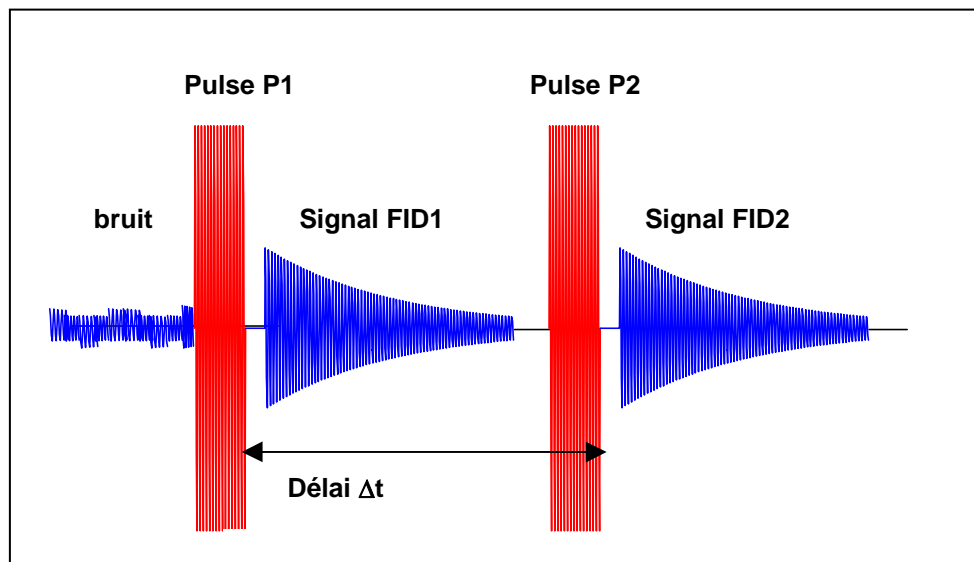


Figure 6 – Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1

Les valeurs d'amplitudes peuvent varier de quelques dizaines de nanovolts à quelques microvolts suivant la teneur en eau du milieu considéré. Le seuil de détectabilité de NUMIS se situe à environ 4 nV. Différents facteurs peuvent influencer l'amplitude des signaux RMP tels que par exemple, la magnitude et l'inclinaison du champ géomagnétique, la conductivité électrique des terrains, la taille et la géométrie de l'antenne utilisée (Legchenko *et al.*, 1997).

Le volume investigué lors d'un sondage est défini comme un cylindre vertical de diamètre égal à environ 1,5 fois le diamètre de la boucle, centré sur celle-ci et de hauteur égale à ce diamètre. La profondeur d'investigation maximale de l'appareil NUMIS^{PLUS}, en l'absence de terrains conducteurs, est de l'ordre de 120 m. La profondeur d'investigation est sensiblement diminuée lorsque la conductivité des

terrains augmente et de manière significative pour des résistivités inférieures à 10 ohm.m. La durée de réalisation d'un sondage RMP est d'environ 2 heures dans des conditions favorables de bruits électromagnétiques parasites d'origine naturelle ou anthropique.

3.1.4. Interprétation des données

Les algorithmes d'inversion des paramètres RMP sont décrits dans Legchenko *et al.* (1998). Ainsi un signal RMP non-nul est directement lié à la présence d'eau dans le sous-sol. De plus, des informations complémentaires peuvent être obtenues à partir des courbes brutes enregistrées :

- l'inversion des données $e_o(q)$ fournit la profondeur, l'épaisseur et la teneur en eau de chaque couche saturée en eau. La teneur en eau fournie par RMP peut être définie telle que ci-après. Pour un volume d'investigation V , soit V_w le volume rempli d'eau et V_R le volume de roche ($V = V_w + V_R$). Le volume V_w peut être divisé en deux parties : l'eau soumise à un champ magnétique homogène et appelée eau libre V_{free} et l'eau soumise à un champ magnétique inhomogène, appelée eau liée ; ainsi $V_w = V_{free} + V_{bound}$. Comme les très courts signaux correspondant à l'eau liée ne peuvent pas être mesurés par les équipements RMP disponibles aujourd'hui, la teneur en eau RMP, w_{RMP} est la part du volume investigué occupé par l'eau libre telle que $w_{RMP} = V_{free} / V$. Les deux cas limites sont $w_{RMP} = 0$ pour une roche sèche et $w_{RMP} = 100\%$ pour l'eau d'un lac ;
- les constantes de **temps de relaxation** $T_2^*(q)$ et $T_1(q)$ sont reliées à la distance moyenne entre une molécule d'eau et la phase solide (Shirov *et al.*, 1991 ; Chang, *et al.*, 1997 ; Kenyon, 1997). Dans la zone saturée, ces constantes dépendent donc de la taille moyenne des pores des formations aquifères. Dans la zone non saturée, elles sont liées à la saturation.
- la **phase** $\varphi_o(q)$ est liée à la distribution des conductivités électriques du sous-sol, les harmoniques du pulse, et le décalage en fréquence. Pour une estimation précise des profondeurs des différents aquifères, cette information doit être prise en compte lors de l'étape d'inversion des données RMP, quand les résistivités sont inférieures à 10 ohm-m.

Le problème inverse des sondages RMP est mal conditionné. Il n'a pas de solution unique. La capacité de résolution de la méthode est discutée par Legchenko et Shushakov (1998). Un exemple d'inversion des données théoriques est présenté sur la Figure 7.

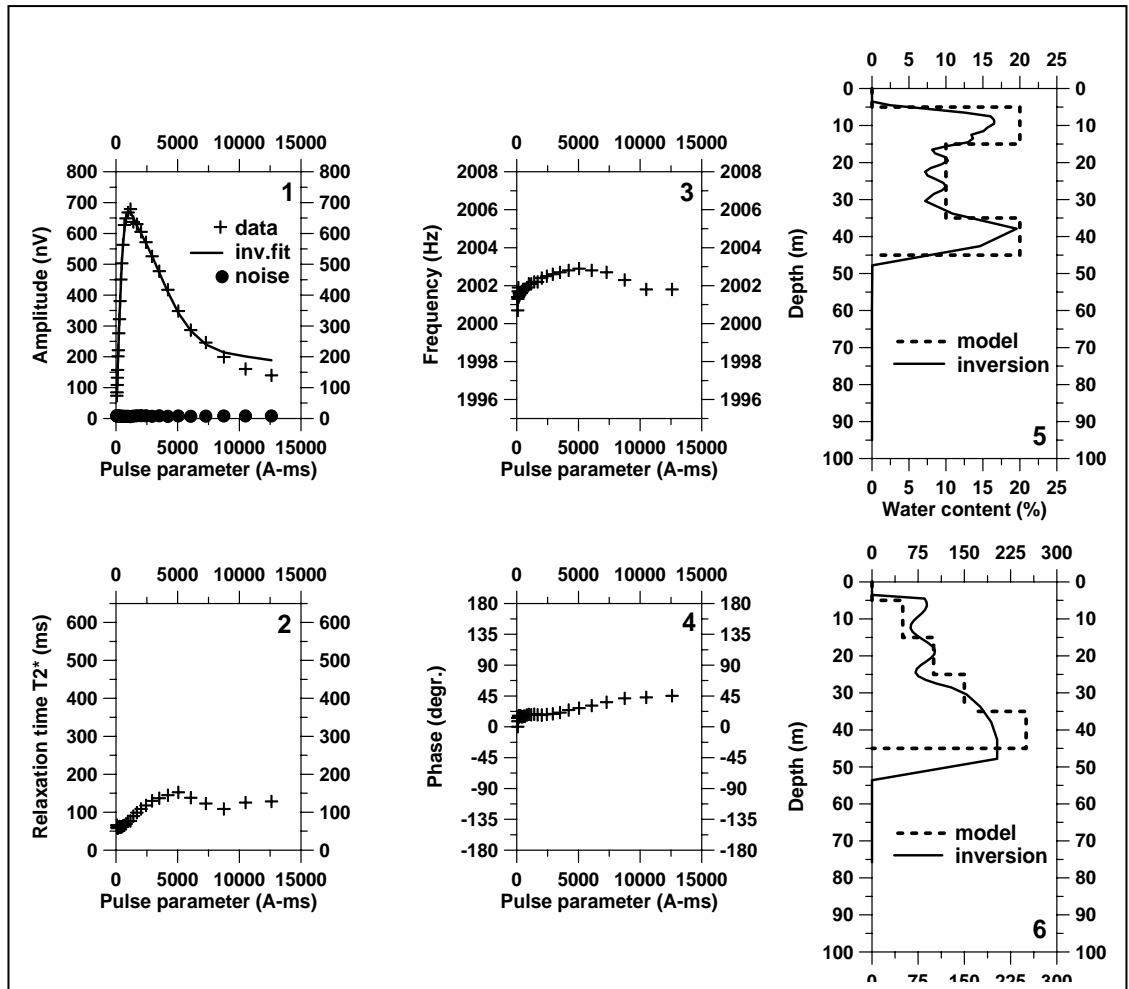


Figure 7 – Résultats d'inversion des données théorique

Le signal théorique a été calculé à partir du modèle (Tableau 1) :

Profondeur		Teneur en eau (%)	T_2^* (ms)	Fréquence de Larmor (Hz)
de (m)	à (m)			
5	15	20	50	2000
15	25	10	100	2001
25	35	10	150	2002
35	45	20	250	2003

Tableau 1 – Paramètres du modèle

La mesure des caractéristiques de relaxation du signal RMP ($T_2^*(q)$ et $T_1(q)$), rend possible l'estimation des paramètres hydrodynamiques des aquifères.

En référence à l'expérience acquise en diagraphies de Résonance Magnétique Nucléaire (Chang *et al.*, 1997; Kenyon *et al.*, 1997), la perméabilité peut être reliée aux paramètres RMP en utilisant la relation empirique :

$$K_{RMP} = C \cdot w_{RMP}^a \cdot T_1^b \quad \text{Équation 4}$$

où K_{RMP} est la perméabilité, w_{RMP} est la teneur en eau, T_1 est la constante de temps de décroissance, C et a , b sont des constantes définies empiriquement. En diagraphies RMN, différentes valeurs a , b sont utilisées. Sur la base de mesures réalisées avec l'équipement NUMIS au droit de forages de caractéristiques hydrogéologiques connues, les valeurs $a=1$, $b=2$ ont été retenues.

Pour des roches différentes, les constantes empiriques doivent être modifiées et des relations mieux adaptées peuvent être définies. La qualité de la relation empirique dépend alors de la qualité de la calibration. La définition des paramètres empiriques adaptés aux différents environnements est un travail de longue haleine. Sans calibration, NUMIS peut être utilisé efficacement pour définir les perméabilités des aquifères en valeurs relatives.

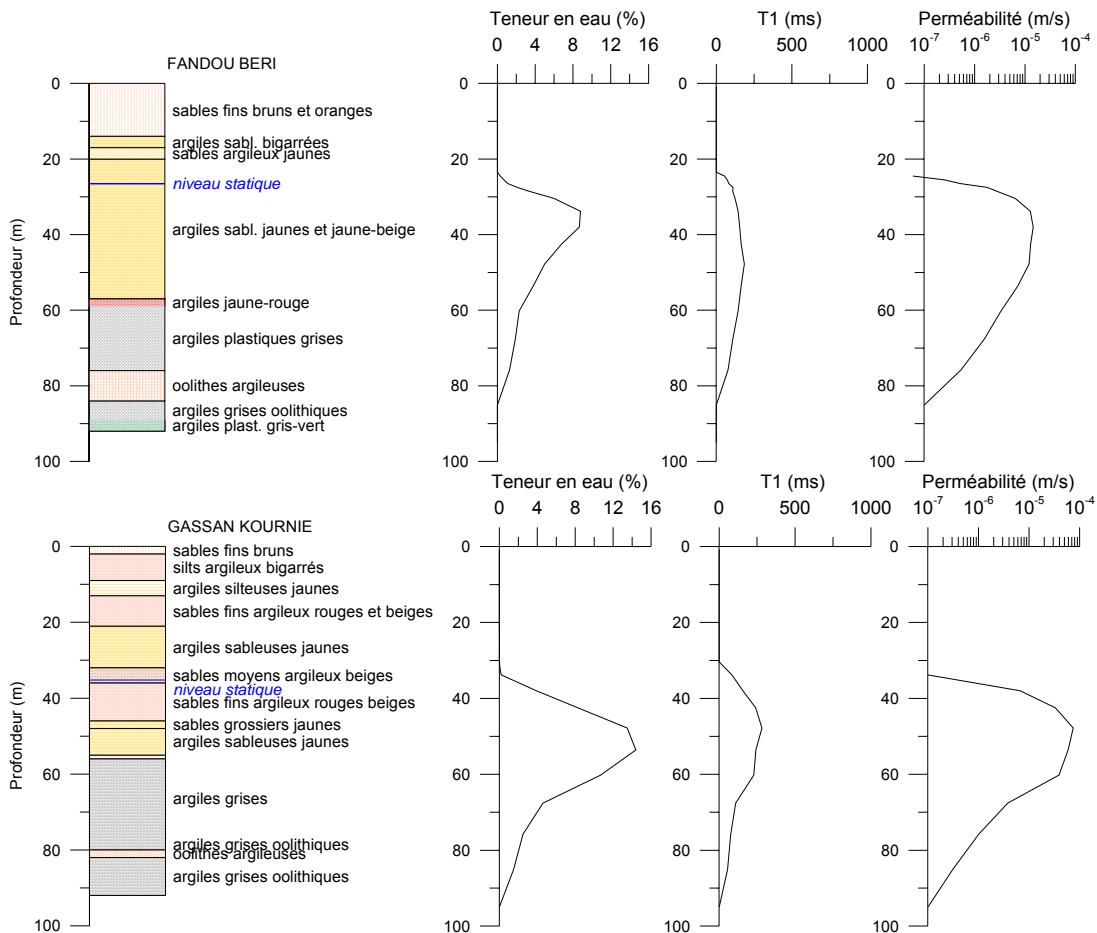


Figure 8 – Exemple de résultats RMP sur deux forages du Niger

Sous l'hypothèse d'une distribution tabulaire de l'eau dans le sous-sol, l'inversion des données RMP mesurées avec l'équipement NUMIS produit les résultats suivants :

- 1) distribution verticale de la teneur en eau,
- 2) distribution verticale du temps de décroissance T_2^* ,
- 3) distribution verticale du temps de décroissance T_1 ,
- 4) distribution verticale de la perméabilité K ,

Un exemple de la comparaison des résultats RMP avec des données de forage et d'essais de pompage est présenté sur la Figure 8.

3.1.5. Présentation des résultats d'un sondage après inversion

Il n'y a pas actuellement de forme fixe pour afficher les résultats RMP et le logiciel d'inversion permet de configurer le contenu des feuilles de résultats selon chaque opérateur. En annexe de ce rapport les résultats sont présentés comme sur la Figure 9. 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) les amplitudes moyennes du signal RMP (FID1 et FID2) et du bruit en fonction du paramètre d'excitation ;
- 4) le temps de relaxation $T_2^*(q)$ en fonction du paramètre d'excitation ;
- 5) le temps de relaxation $T_1(q)$ en fonction du paramètre d'excitation ;
- 6) la fréquence du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;
- 7) la phase du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;
- 8) distribution verticale de la teneur en eau w_{RMP} et du temps de relaxation T_1 ;
- 9) distribution verticale du temps de relaxation T_2^* .

Site: youloua

Loop: 4 - 75.0 Date: 23.12.2005 Time: 15:42

NUMIS data set:

C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Youloua\YOULOUA.inp

matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\youloua.mrm

loop: eight square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 33882.63 nT

filtering window = 199.5 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 8.20; EN/IN = 2.42

fitting error: FID1 = 4.93%; FID2 = 10.73 %

param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000

permeability constant Cp = 5.00e-09

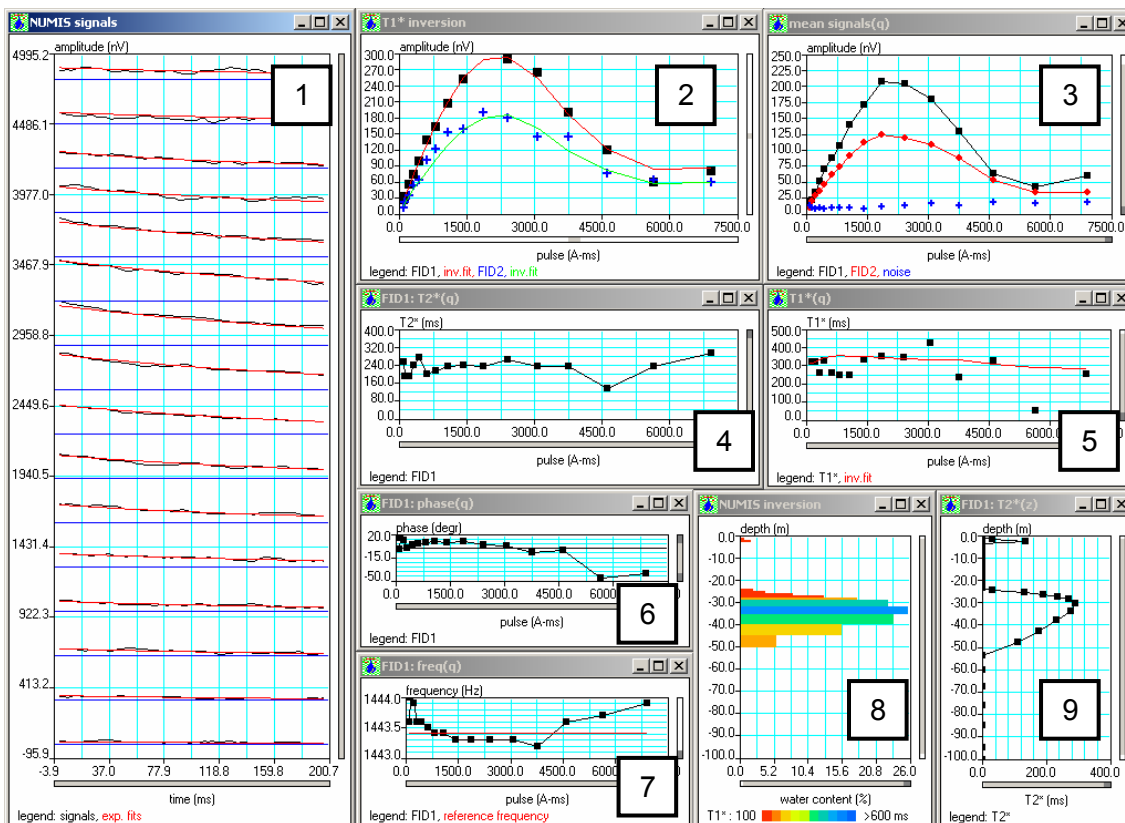


Figure 9 - Exemple de résultats d'inversion automatique

3.2. MOYENS MIS EN ŒUVRE

3.2.1. Calendrier et personnel

La mission s'est déroulée du 8 au 28 décembre 2005, avec des mesures de terrain du échelonnées 11 au 26 décembre.

Les personnes qui ont participé régulièrement aux sondages sont les suivantes :

- Marie Boucher (BRGM-ARN, thésarde)
- Jean-Michel Vouillamoz (IRD-LTHE, chargé de recherche)
- Guillaume Favreau (IRD-HSM, chargé de recherche)
- Sylvain Massuel (IRD-HSM, post-doctorant)
- Abdoulaye Koné (IRD-Niamey, technicien hydrologue)
- Souley Abdou (IRD-Niamey, manœuvre)

avec les participations de Yahaya Nazoumou (UAM, maître assistant) et de Mariam Sou (EIER, thésarde) respectivement pour les sondages des 13 et 26 décembre (Tableau 2).

Présents	MB	JMV	SM	GF	AK	SA	MS	YN
Sites								
Wankama P3	X	X		X	X	X		
Berkiawal	X	X	X		X	X	X	
Banizoumbou	X	X			X	X		
Gassan Kournie	X	X			X	X		
Winditen	X		X	X	X	X		
Banikane	X			X	X	X		
Fetokadie	X		X		X	X		
Hamdallaye	X		X		X	X		
Kafina	X			X	X	X		
Ninefouno	X			X	X	X		
Banikossey	X			X	X	X		
Fandou Beri	X				X	X		
Youloua	X			X	X	X		
Wankama P0	X			X				
Sourgourou	X				X	X		
Tigo Zeno	X				X	X		
Kizamou	X			X	X	X		X

Tableau 2 – Personnes présentes sur les différents sites

3.2.2. Equipement

- un système RMP NUMIS^{PLUS}
- 8 batteries de 12V, 80A-h
- un magnétomètre à proton
- 900 m de câble d'injection et de mesure
- un micro-ordinateur portable
- un capteur de bruit électromagnétique
- un resistivimètre Syscal R2E
- 700 m de câble Thomson
- une dizaine d'électrodes
- une sonde piézométrique OTT 100 m
- une sonde de température et de conductivité électrique
- 1 multimètre des paramètres physico-chimiques de l'eau « WTW »
- un GPS de poche « Etrex » Garmin
- 2 véhicules Toyota Hilux

4. Travaux réalisés

4.1. GEOPHYSIQUE

Les sites de mesures géophysiques ont été choisis afin de couvrir la plus vaste gamme de paramètres hydrologiques possible, l'objectif étant de savoir si les contrastes hydrogéologiques de la zone étudiée pouvaient être mis en évidence par la méthode RMP. Au total 17 sites ont été prospectés (Figure 10) et 19 sondages ont été réalisés.

Les boucles RMP utilisées ont été choisies afin d'avoir la plus grande profondeur d'investigation possible et afin d'optimiser le temps d'acquisition. Les boucles avaient une forme carrée de 75 m de côté. Après les deux premières mesures (à Wankama et Berkiawel), il s'est avéré que l'utilisation d'un dispositif en forme de huit permettait d'abaisser le niveau de bruit plus rapidement avec le dispositif en huit qu'avec le dispositif d'un carré simple. C'est donc le dispositif en huit qui a été utilisé par la suite.

Sur le site de Winditen dans le Dallol Bosso où le mur de l'aquifère est plus profond, un sondage avec une boucle carrée de 112,5 m de côté a été réalisé afin d'essayer d'augmenter davantage la profondeur d'investigation. Cependant, à cause de la trop grande résistance des câbles (câbles de petite section), la principale limite pour sonder en profondeur était l'intensité du courant émis (le pulse ne dépassait pas 8000 A.ms au maximum de puissance de l'appareil). Il est à noter que pour des investigations futures, l'utilisation de câbles de plus gros diamètre (> 6 mm) est recommandée pour profiter pleinement des capacités de l'appareil NUMIS^{PLUS}.

La durée du sondage a été un facteur important pour le choix des paramètres d'acquisition car de fortes variations journalières du champ géomagnétique (sans doute liées à l'activité solaire) ont été observées (Figure 11) tous les jours entre 7h et 10h environ et entre 14h et 17h. Ces variations du champ magnétique pouvant générer des décalages en fréquence de résonance de plus de 2 Hz perturbent fortement la mesure RMP. Les créneaux horaires pendant lequel le champ magnétique augmente ou diminue fortement ont donc été évités autant que possible pour l'acquisition des données RMP.

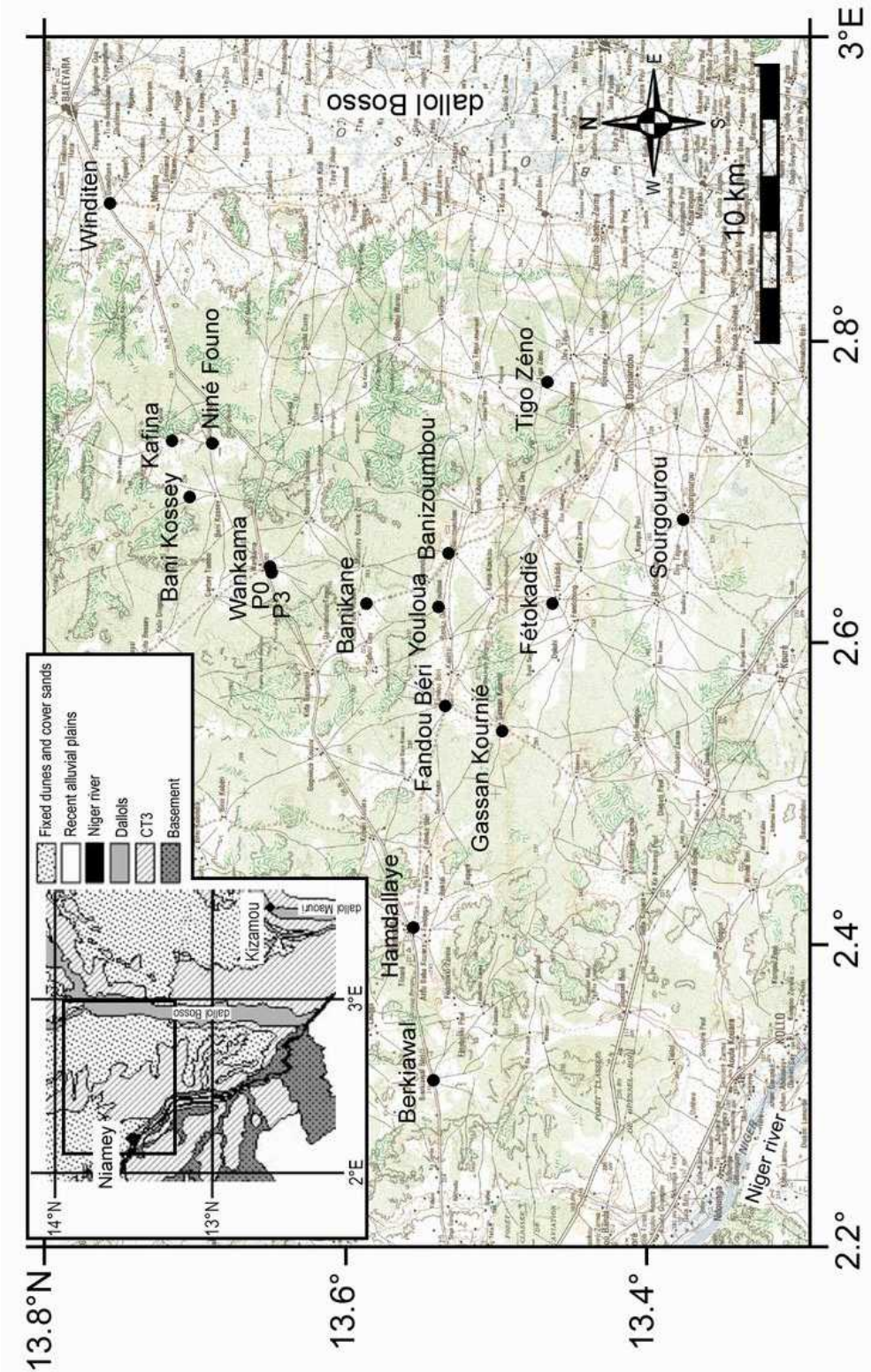


Figure 10 – Localisation des sites

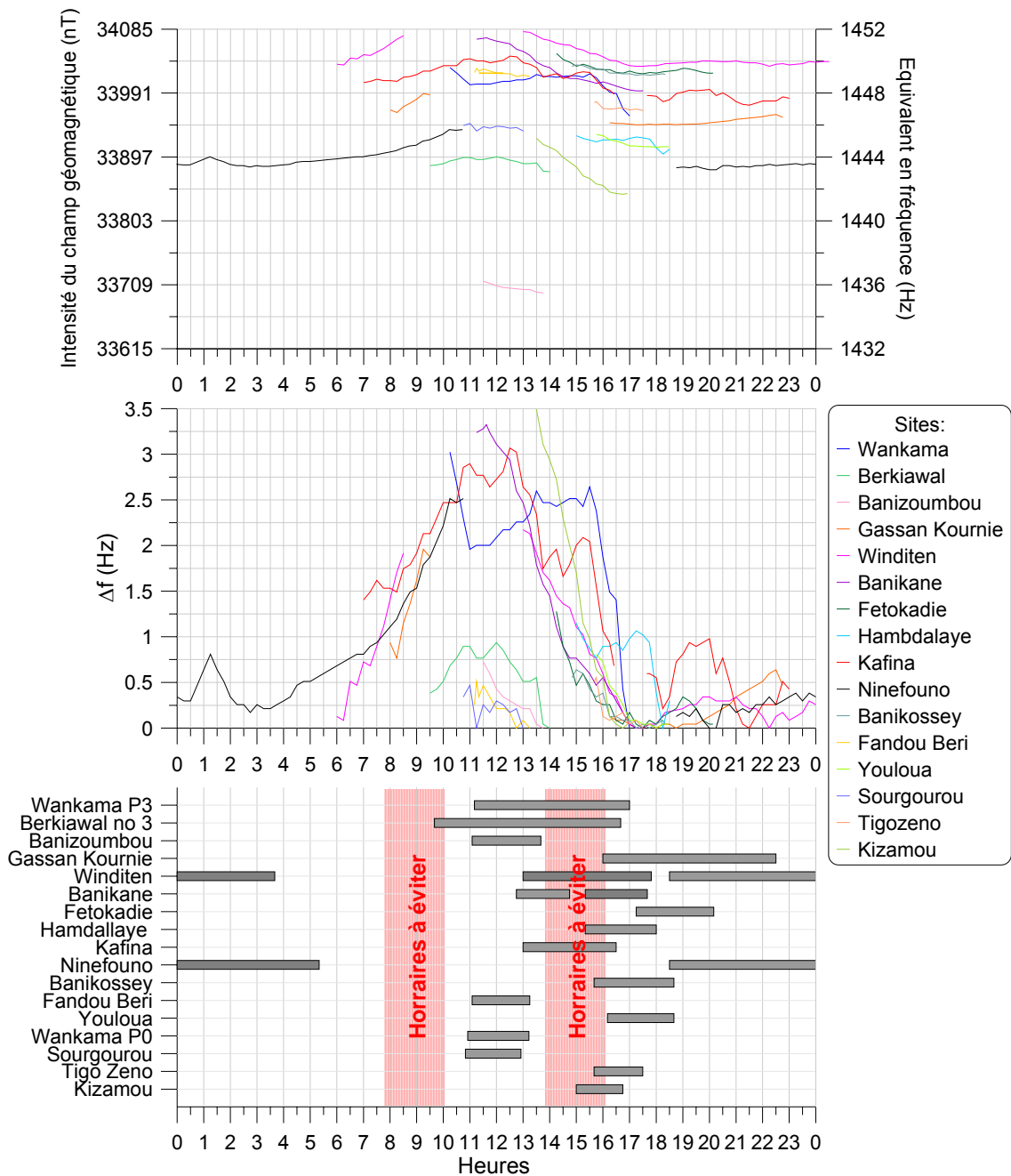


Figure 11 – Variations journalières du champ géomagnétique. En haut: intensité du champ mesurés à un pas de temps de 15 minutes sur les différents sites et convertis en fréquence. Au milieu : variation de la fréquence liée au champ géomagnétique. En bas: horaires d'acquisition des sondages RMP.

Les principales caractéristiques des sondages RMP sont présentées dans le Tableau 3. Les conditions de bruit électromagnétiques très favorable ont permis de faire des mesures de bonne qualité : le rapport signal/bruit est toujours supérieur à 2. Les résultats de l'inversion automatique sont présentés en annexe 1.

site	Coordonnées		Date de début	Heure de début et fin	Type de boucle	bruit ambiant avant stack (nV)	bruit moyen stacké (nV)	rapport signal/bruit	nombre de stacks
	N	E							
Wankama P3	13°38'58"	2°38'48"	11/12/2005	11:10 - 17:00	carré 75 m	300-400	13.1	4.49	200
Berkiawal no 3	13°32'31"	2°18'35"	13/12/2005	09:40 - 16:40	huit carré 75 m	100-200	7.19	3.67	102
Banizoumbou	13°31'53"	2°39'31"	14/12/2005	11:05 - 13:40	huit carré 75 m	100-200	9.16	5.92	108 puis 66
Gassan Kournie	13°29'48"	2°32'27"	14/12/2005	16:00 - 22:30	huit carré 75 m	100-200	6.57	6.71	234
Winditen	13°45'24"	2°53'27"	15/12/2005	18:30 - 3:40	huit carré 75 m	300-400	30.49	10.87	?
Banikane	13°35'12"	2°37'29"	16/12/2005	13:00 - 17:45	carré 112,5 m	700-1000	84.79	4.40	222
Fetokadie	13°27'47"	2°37'29"	18/12/2005	17:15 - 20:10	huit carré 75 m	170-250	7.96	3.52	100
Hamdallaye	13°33'18"	2°24'34"	19/12/2005	15:20 - 18:00	huit carré 75 m	200-280	11.69	3.95	100
Kafina	13°42'51"	2°43'59"	21/12/2005	13:00 - 16:30	huit carré 75 m	200-230	8.09	4.78	120
Ninefouno	13°41'18"	2°43'53"	21/12/2005	18:30 - 5:20	huit carré 75 m	200-650	16.02	2.53	250
Banikossey	13°42'11"	2°41'48"	22/12/2005	15:40 - 18:40	huit carré 75 m	200-250	11.51	6.67	106
Fandou Beri	13°32'04"	2°33'27"	23/12/2005	11:05 - 13:15	huit carré 75 m	200-250	10.45	3.19	80
Youloua	13°32'19"	2°37'23"	23/12/2005	16:10 - 18:40	huit carré 75 m	200-250	12.11	8.20	100
Wankama P0	13°38'59"	2°38'55"	24/12/2005	10:55 - 13:13	carré 75 m	~250	10.45	5.12	80
Sourgourou	13°22'34"	2°40'50"	25/12/2005	10:50 - 12:55	huit carré 75 m	180-300	10.47	4.75	80
Tigo Zeno	13°28'02"	2°46'20"	25/12/2005	15:40 - 17:30	huit carré 75 m	180-250	10.07	14.59	80
Kizamou	12°41'54"	3°42'34"	26/12/2005	15:00 - 16:45	huit carré 75 m	180-250	13.34	26.61	60 puis 50

Tableau 3 – Caractéristiques des sondages RMP

Par ailleurs, il était prévu de réaliser des sondages électriques pour améliorer l'interprétation des sondages RMP en considérant un modèle géo-électrique vérifié. Un sondage électrique a été effectué sur le site de Winditen. Cependant, malgré des efforts accrus pour diminuer la résistance de prise, les mesures sont de qualité médiocre. L'interprétation de ce sondage est présentée en annexe 2.

Devant les difficultés techniques pour réaliser des mesures de bonnes qualités, il a été choisi d'arrêter les sondages électriques pour se concentrer sur les sondages RMP, sachant que les résistivités de la zone d'intérêt sont généralement supérieures à 50 Ω .m et n'influencent donc pas les résultats d'inversion RMP. En conséquence, excepté pour le site de Winditen, le modèle géo-électrique considéré pour inverser les sondages RMP est un demi-espace homogène de 200 Ω .m.

Pour estimer la résistivité du sous-sol lors de futures investigations, il est recommandé d'utiliser une méthode électromagnétique, mieux adaptée que les méthodes électriques sur ce type de terrain (mise en œuvre facilitée et cible géophysique mieux adaptée).

4.2. HYDROGEOLOGIE

En plus des paramètres hydrologiques estimés par la modélisation (§ 2), des données d'essais de pompage étaient disponibles sur certains sites. Afin de quantifier la précision des résultats de ces essais de pompage, les données ont été réinterprétées dans le cadre de cette étude. En tout huit essais de pompages réalisés précédemment sur financement ORSTOM/IRD en 1997 et 1998 (Favreau, 2000) ont été réinterprétés. Parmi ces essais, deux (Banizoumbou et Banikane) avaient un piézomètre d'observation, permettant ainsi l'estimation du coefficient d'emménagement. Sur le site de Kizamou (FAO / Pallas, 1970), les données brutes de l'essai de pompage n'étant pas disponibles, les valeurs de transmissivité et de coefficient d'emménagement déjà interprétés ont directement été utilisés.

5. Traitement des données

5.1. RE-INTERPRETATION DES ESSAIS DE POMPAGE

L'interprétation des essais de pompages réalisés en 1997 et 1998 est conduite avec différentes méthodes afin de prendre en compte les conditions des essais :

- La méthode proposée par Papadopulos-Cooper est utilisée lorsque le grand diamètre des puits de pompage (1.4 m intérieur) induit un "effet de capacité" notable (Figure 12).
- La méthode de Neuman est utilisée lorsque l'effet "d'écoulement retardé" de nappe libre est significatif (Figure 13), ou lorsque le puits de pompage est incomplet.
- La méthode de Theis est utilisée lorsque son domaine de validité est atteint (pompage suffisamment long, rabattement petit devant l'épaisseur de l'aquifère).
- Lorsque le puits de pompage est incomplet, la correction des rabattements proposée par Weeks est utilisée pour mettre en œuvre la méthode de Theis.

Les interprétations sont conduites à la descente (période de pompage) et à la remontée (période qui suit l'arrêt du pompage), sur les données issues des ouvrages de pompage et des ouvrages d'observation lorsqu'ils existent. Les interprétations sont réalisées avec le logiciel AquiferTest 4.0.

Les différentes interprétations d'un même essai permettent de retenir un couple (S, T) et de calculer l'incertitude sur cette solution. Pour une population de 8 essais de pompage, l'incertitude moyenne sur la transmissivité T est $+90\% \leq T \leq -51\%$. Pour estimer la porosité de drainage des aquifères (nappe libre) avec une incertitude acceptable, il est nécessaire de mettre en œuvre les essais de pompage dans au moins 2 ouvrages (un ouvrage de pompage et un ouvrage d'observation). Dans le cadre de cette étude, seuls deux essais ont permis d'estimer la porosité de drainage.

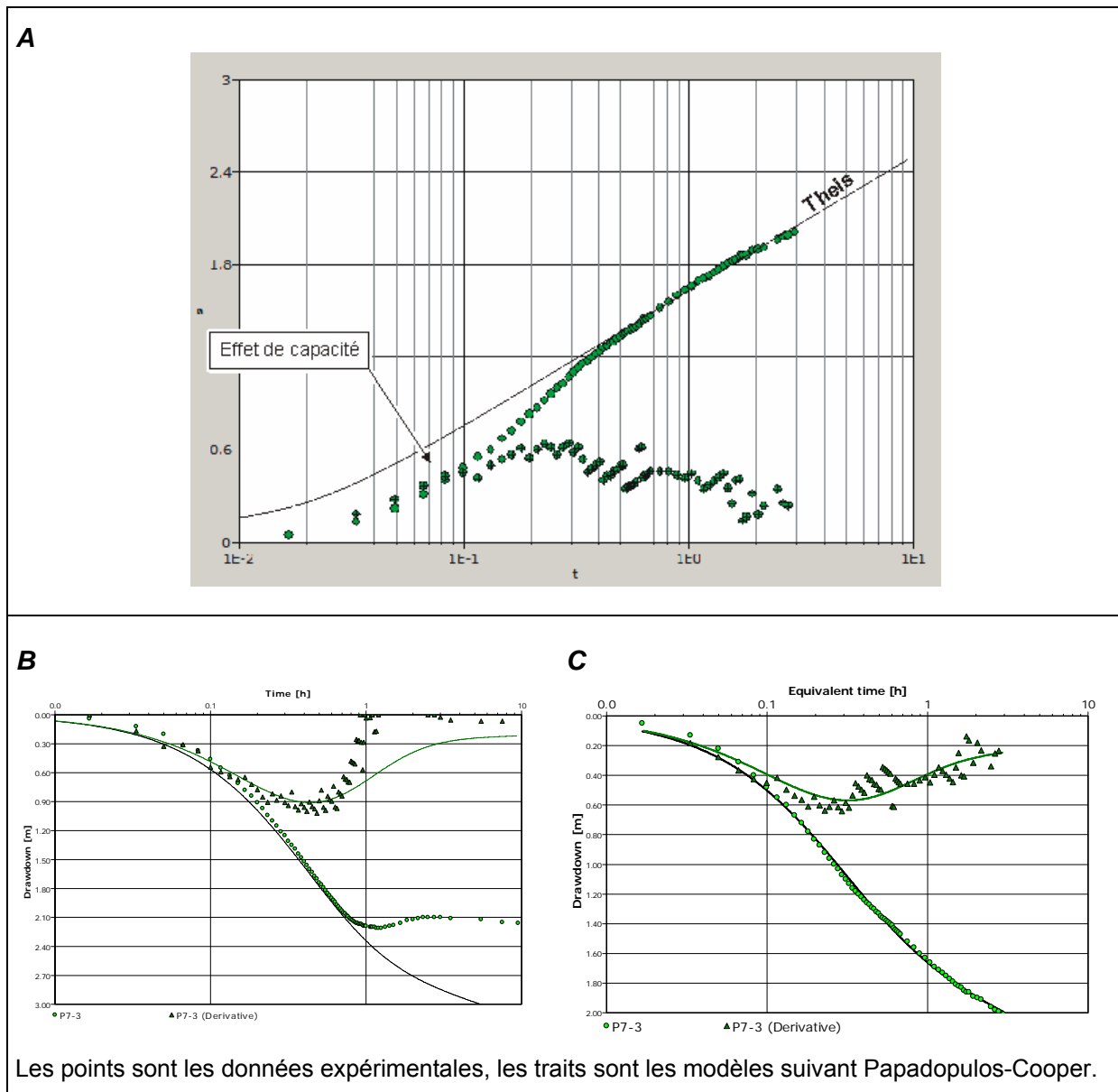


Figure 12 - Effet de capacité, exemple de Wankama, puits de pompage. **A**: courbe diagnostique – comparaison avec la courbe de Theis. **B**: modélisation de la descente **C**: modélisation de la remontée.

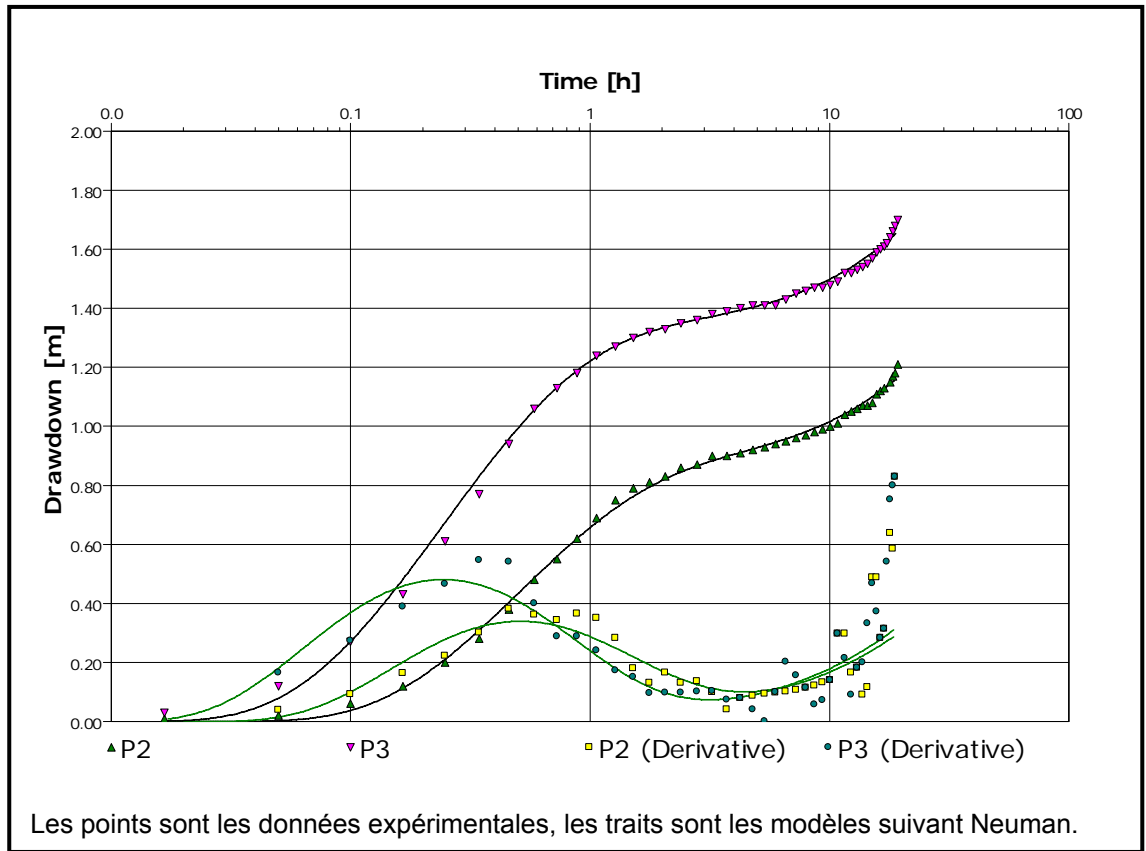


Figure 13 - Ecoulement retardée en nappe libre, exemple de Banizoumbou, piézomètres d'observation P2 et P3.

5.2. INVERSION DES SONDAGES RMP

5.2.1. Levée de l'équivalence

Comme toutes les méthodes géophysiques, la méthode RMP est soumise au problème d'équivalence, de sorte que différents modèles de teneur en eau peuvent avoir la même signature RMP. La Figure 14 illustre ce problème d'équivalence RMP sur un des sites étudiés (Gassan Kournie) et montre l'ambiguïté de l'inversion sans information complémentaire.

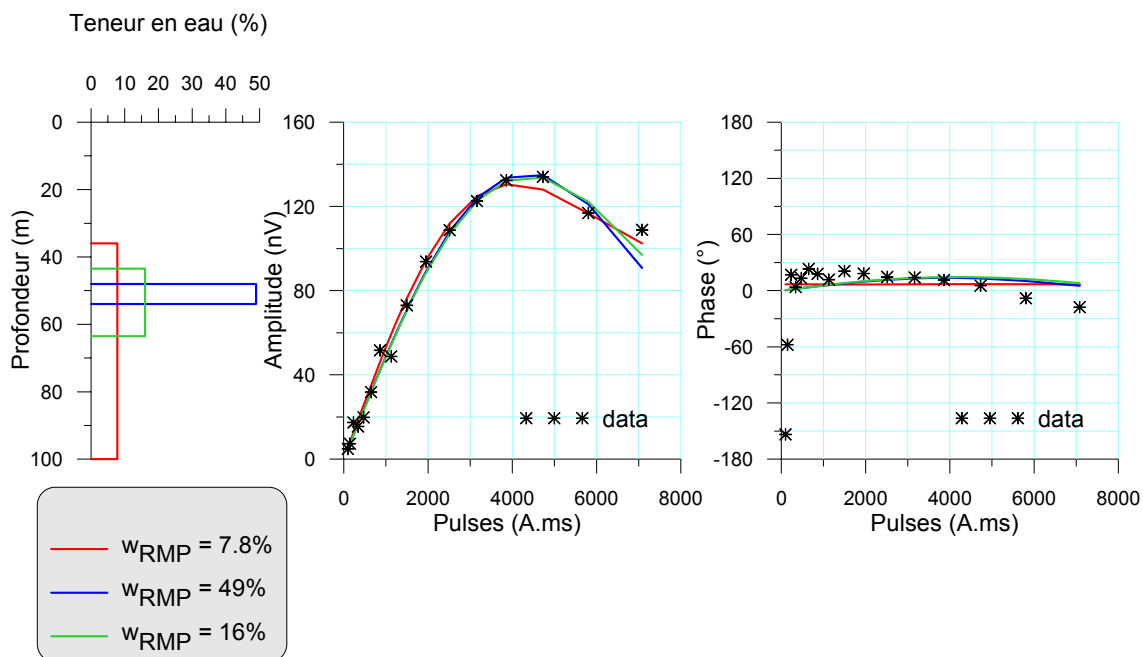


Figure 14 – Exemple d'équivalence sur le site de Gassan Kournie. A gauche: modèle de teneur en eau; au milieu: amplitude du signal RMP correspondant; à droite: phase du signal RMP.

Dans le cadre de cette étude, la géométrie de l'aquifère (profondeurs du niveau statique et du mur de l'aquifère) est bien connue par le réseau piézométrique de puits, les coupes de forages et par le modèle numérique de terrain (Favreau 2000, Massuel, 2005). Il est donc possible de contraindre l'inversion des résultats RMP en fixant la géométrie afin d'avoir une estimation de la teneur en eau.

Trois paramètres sont soumis au problème d'équivalence : la teneur en eau, la profondeur du niveau statique et l'épaisseur mouillée de l'aquifère. Il est connu que le problème d'équivalence porte essentiellement sur le produit teneur en eau (w) par épaisseur mouillée de l'aquifère (e). Le niveau statique (NS) est mieux déterminé et, comme le rappelle la Figure 15, fixer l'épaisseur saturée de l'aquifère contraint mieux l'inversion que fixer le niveau statique.

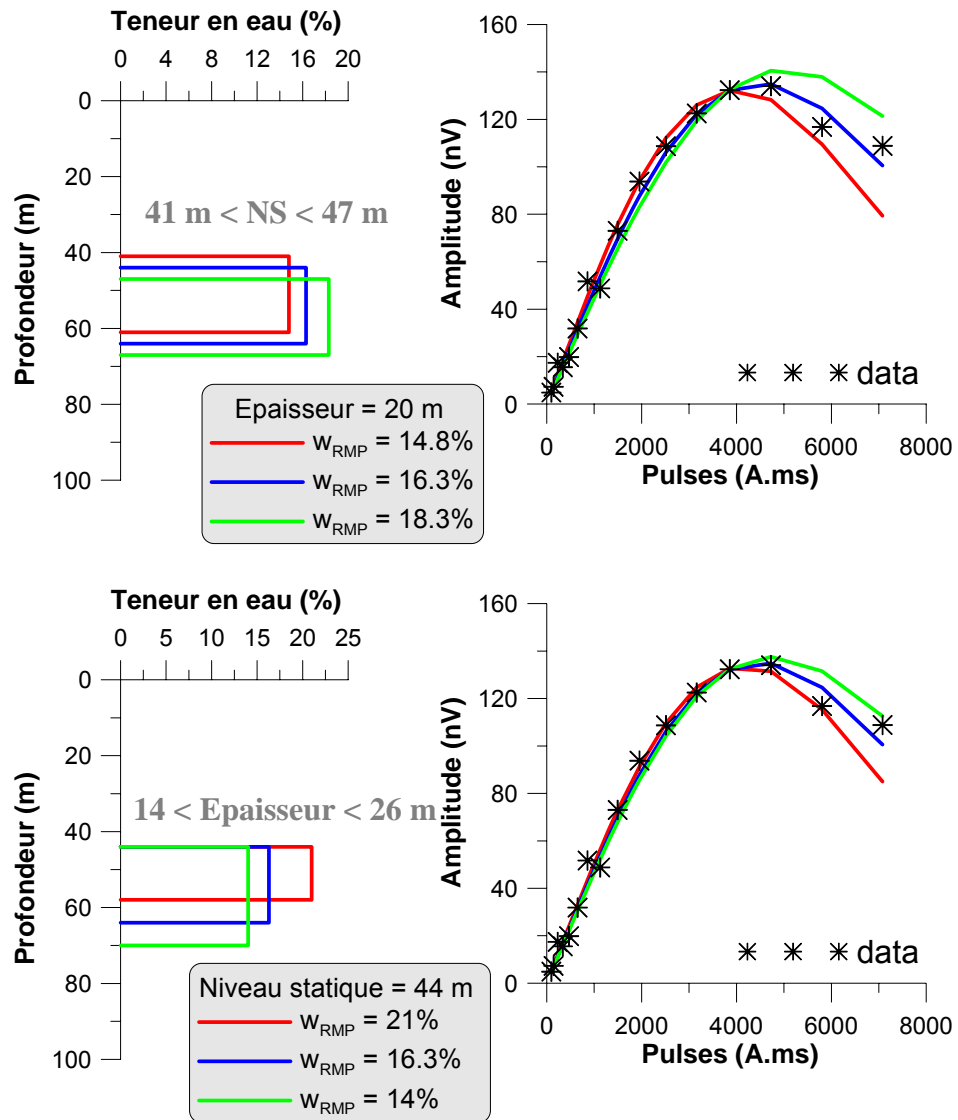


Figure 15 – Estimation de la teneur en eau en fixant partiellement la géométrie de l'aquifère. En haut, l'épaisseur est fixée (l'équivalence porte alors sur la teneur en eau et le niveau statique); en bas, le niveau statique est fixé (l'équivalence porte alors la teneur en eau et l'épaisseur)

Sur chaque site, les sondages RMP seront inversés en fixant la géométrie de l'aquifère (d'abord l'épaisseur mouillée, puis le niveau statique) afin de mieux contraindre l'interprétation en terme de teneur en eau. Les niveaux statiques ont été estimés à partir de mesures piézométriques dans des puits et/ou forages et en prenant en compte la différence d'altitude entre le puits et/ou forage et la boucle RMP. Une incertitude relativement importante sur le niveau statique est liée à l'évaluation de cette différence altimétrique. L'épaisseur de l'aquifère mouillée est estimée en considérant le niveau d'eau dans les puits et forages ainsi que le mur de l'aquifère, connu grâce au logs géologiques (annexe 3) et au modèle numérique de terrain. L'épaisseur mouillée variant peu latéralement, la précision est de l'ordre de ± 1 m ou ± 2 m suivant les sites.

5.2.2. Incertitude de mesure

Deux principales sources d'incertitude sur le signal RMP sont à considérer. La première est liée au bruit électromagnétique ambiant (Figure 16) et concerne l'amplitude du signal mesuré au début de l'enregistrement.

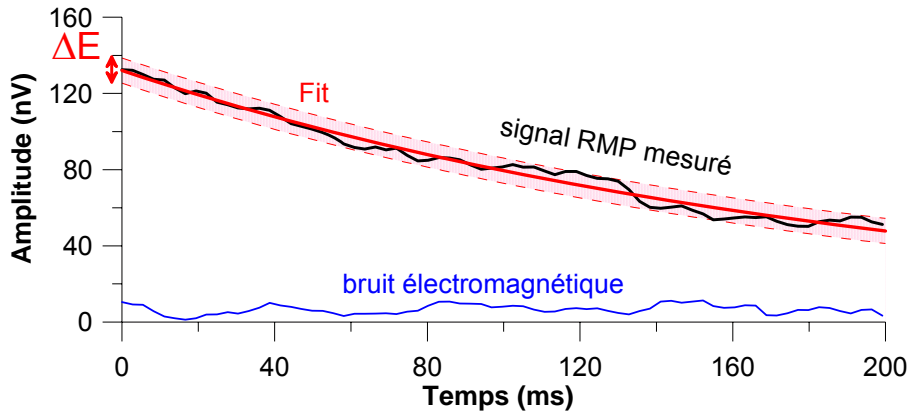


Figure 16 – Incertitude sur la mesure du signal RMP liée au bruit electomagnétique

La seconde source d'incertitude est causée par le temps mort instrumental entre la fin de l'injection et le début de l'enregistrement. Pour inverser les mesures RMP en terme de teneur en eau, il faut connaître l'amplitude initiale (E_0) du signal, c'est à dire juste à la fin de l'injection. Le signal RMP est donc extrapolé (Figure 17) en utilisant le temps de relaxation $T2^*$. Ainsi l'incertitude sur l'estimation de la constante de temps $T2^*$ génère une incertitude sur l'amplitude initiale du signal RMP.

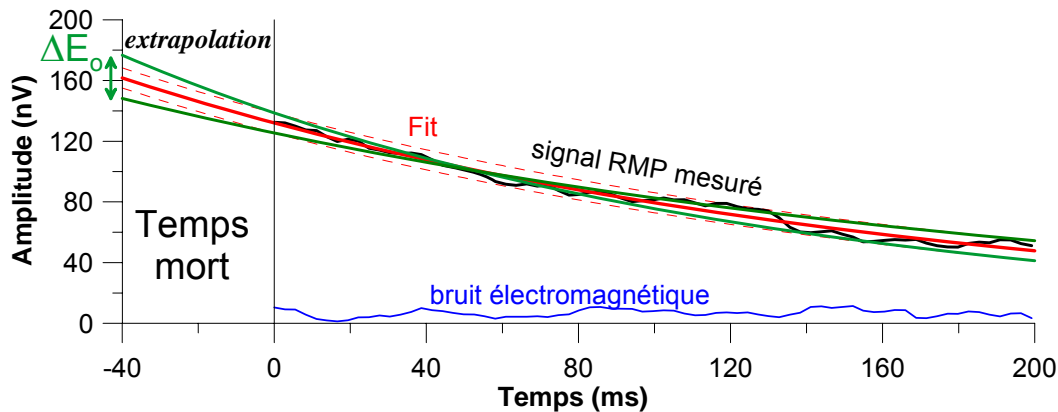


Figure 17 – Incertitude sur la mesure du signal RMP liée à l'extrapolation avant le temps mort

Ces deux sources d'incertitudes sur le signal RMP ont été prises en compte pour estimer la précision de mesure sur la teneur en eau RMP et a fortiori sur la précision de la transmissivité.

5.2.3. Effet de la température

La température de l'eau dans l'aquifère étudié est d'environ 30°C (valeurs comprises entre 28 et 33°C, cf. annexe 4) en accord avec le climat local (29,1°C d'après Favreau 2000). Les logiciels de modélisation des sondages RMP ont été prévus pour des aquifères d'environ 10°C. L'erreur faite en interprétant des données acquises pour une eau à 30°C a été calculée.

Deux effets ont été considérés : (1) la diminution de la masse volumique de l'eau avec la température et (2) l'effet de la température sur la magnétisation des protons M_0 .

La magnétisation des protons M_0 est décrite par l'équation de Curie (Legchenko et Valla, 2002) :

$$M_0 = N \cdot B_0 \frac{\gamma^2 \cdot \hbar^2}{4kT} \quad \text{Équation 5}$$

avec :

- N le nombre de proton d'hydrogène par unité de volume
- B_0 l'intensité du champ statique
- γ le rapport gyromagnétique
- \hbar la constante de Planck
- k la constante de Boltzmann
- T la température (en Kelvin)

L'effet de la variation de la masse volumique de l'eau avec la température est pris en compte dans N (le nombre de proton d'hydrogène par unité de volume). En effet N s'exprime de la façon suivante :

$$N = 2 \cdot \frac{N_A \cdot n_{H_2O}}{V} = 2 \cdot N_A \frac{n_{H_2O}}{m_{H_2O}} \cdot \frac{m_{H_2O}}{V} = 2 \frac{N_A \cdot \rho}{M_{H_2O}} \quad \text{Équation 6}$$

avec :

- N_A le nombre d'Avogadro
- n_{H_2O} la quantité d'eau (en mole)
- V le volume considéré
- m_{H_2O} la masse d'eau
- M_{H_2O} la masse molaire de l'eau (=18 g/mol)
- ρ la masse volumique de l'eau.

Pour une masse volumique de 1000 kg/m³ (comme s'est le cas pour de l'eau pure à 5°C), N vaut 6.692. 10²⁸ m⁻³. L'eau à 30°C a une masse volumique de 995.7 kg/m³

(de Marsily, 1981). L'erreur induite par la non prise en compte de ce phénomène est donc d'environ 0,4% sur le signal RMP.

D'après l'équation 5, l'erreur faite sur l'estimation du signal RMP en considérant de l'eau à 10°C, alors qu'elle est en réalité à 30°C sera de 7% ($283\text{K}/303\text{K} = 0.93$). D'une manière plus complète l'effet de la température de l'eau sur le signal RMP a été calculé de 0°C à 100°C (Figure 18). Cette erreur étant systématique, elle sera prise en compte dans les calculs en multipliant les valeurs de teneurs en eau par un coefficient correctif ($\text{Coeff}_{\text{correction de température}} = 1.075$)

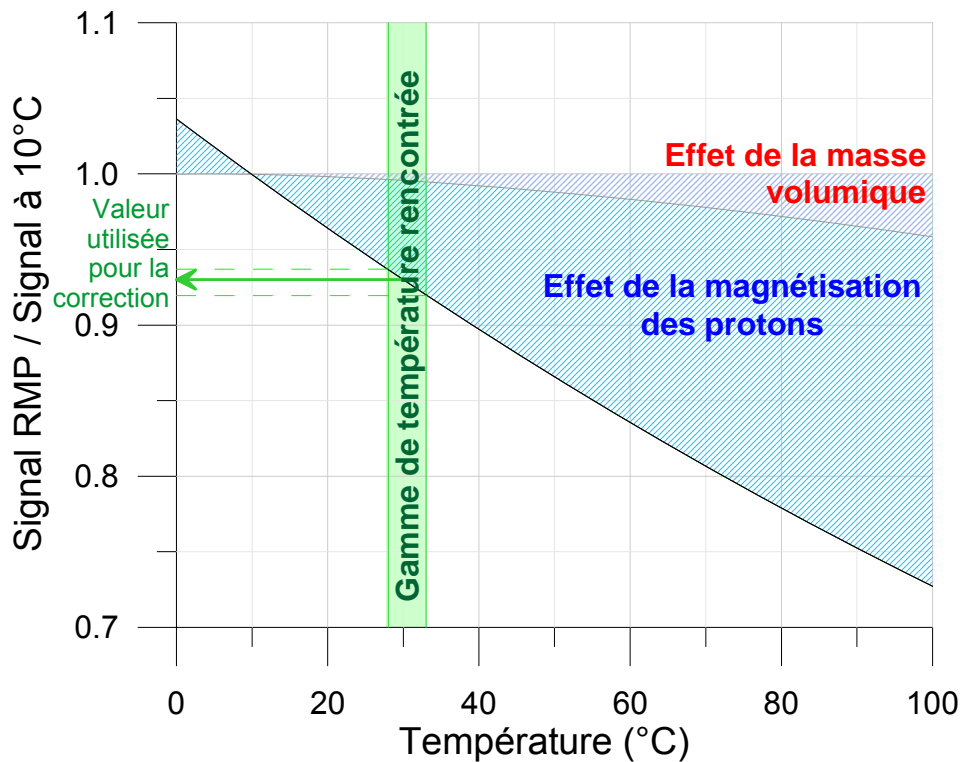


Figure 18 – Effet de la température sur le signal RMP

5.2.4. Estimation de la teneur en eau et du niveau statique

Les données RMP ont été inversées en considérant un aquifère saturé homogène, c'est-à-dire avec une seule couche à teneur en eau non nulle. Le protocole d'inversion est décrit dans la Figure 19.

La première étape a été d'estimer la précision du signal RMP. Le bruit électromagnétique moyen a été le critère pour évaluer cette précision. Tout modèle qui ajustera les données avec l'erreur quadratique RMS (Root Mean Square) inférieur au bruit électromagnétique moyen sera considéré comme valable pour expliquer les mesures.

La gamme de temps de relaxations T_2^* correspondant à l'aquifère a été estimée d'après l'inversion automatique des données (annexe 1) avec le logiciel Samovar de l'appareil NUMIS^{PLUS}.

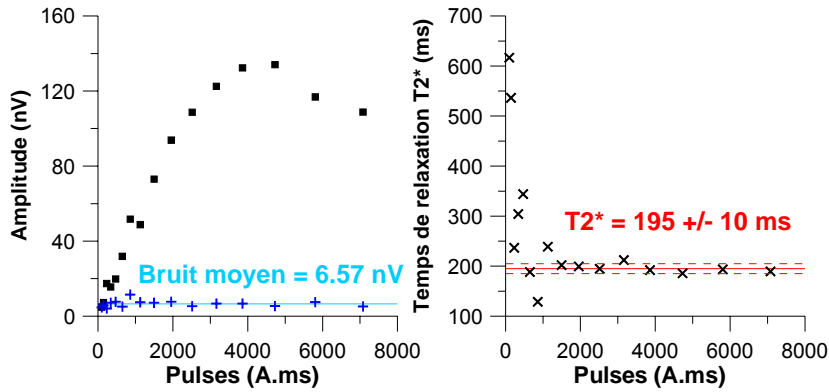
Ensuite, plusieurs modèles de teneur en eau et niveau statique ont été calculés avec le logiciel Samogon en imposant : 1/ l'épaisseur de la couche dans la gamme des épaisseurs d'aquifère mouillé évaluées d'après les connaissances géologiques (logs géologique en annexe 3) ; 2/ le temps de relaxation T_2^* qui permet de remonter à l'amplitude (E_0) à la fin de l'injection. Un ensemble de solutions a ainsi pu être déterminée sous la forme de couple teneur en eau – profondeur du niveau statique.

Enfin, parmi l'ensemble de ces solutions, toutes celles dont le niveau statique était incompatible avec les données topographiques ont été éliminées afin d'améliorer la précision sur l'estimation de la teneur en eau. Il est à noter que la principale source d'incertitude sur le niveau statique « topographique » est liée à l'incertitude sur la différence d'altitude entre la boucle RMP et l'ouvrage de référence (puits ou piézomètre et/ou forage selon les sites).

Sur 3 sites (Berkiawel, Fandou Beri et Wankama P0) un niveau aquifère profond (CT2 captif ou socle altéré pour Berkiawel) a été observé sur les sondages RMP. Dans ce cas, la géométrie de l'aquifère profond a été estimée d'après les logs géologiques et la teneur en eau d'après le signal RMP. Il n'y a pas d'étude de sensibilité sur cet aquifère profond.

Sur les sites de Winditen et Kizamou, un aquifère quaternaire recouvre l'aquifère étudié (CT3). Cet aquifère superficiel montre des teneurs en eau RMP plus élevées que le CT3, ce qui rend l'analyse du CT3 plus difficile. A Winditen, à cause de l'absence de log géologique la profondeur du contact entre les deux aquifères n'est pas estimable. En conséquence, l'inversion contrainte est impossible. Sur le site de Kizamou, les données ont été inversées en fixant, d'après le log géologique, la profondeur du contact entre l'aquifère quaternaire et l'aquifère du CT3. La teneur en eau de chacun des aquifères a ainsi pu être évaluée.

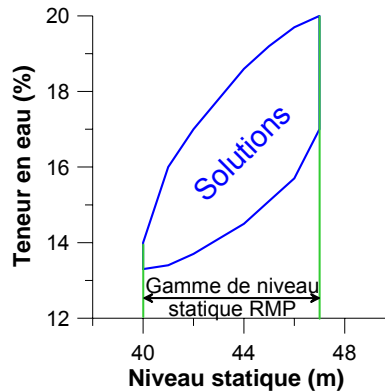
Etape 1 : Estimation du bruit EM moyen et du temps de relaxation T2*



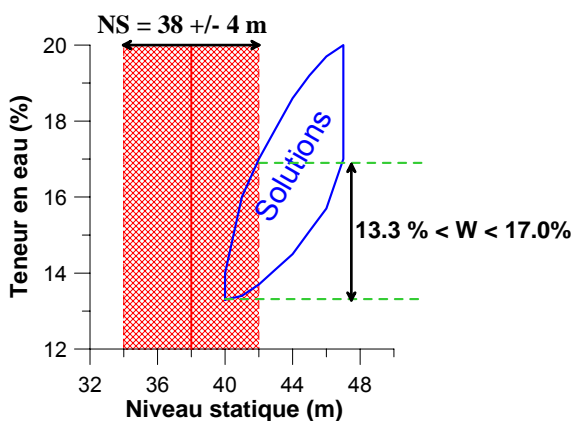
Etape 2 : Recherche de modèle compatible

Paramètres fixés :

- Epaisseur d'eau
- Précision de la mesure RMP (= +/- bruit EM moyen)
- Temps de relaxation T2*



Etape 3 : restriction de l'espace solution en fixant le niveau statique



En rouge : domaine de possibilité d'après les connaissances piézométriques

En bleu : domaine de possibilité d'après la RMP

Intersection → gamme de teneur en eau possible

Figure 19 – Principe d'inversion contrainte d'après l'exemple du site de Gassan Kournie

5.2.5. Calibration de la transmissivité

Les transmissivités RMP ont été calibrées d'après les transmissivités des essais de pompages. La formule empirique utilisée est la formule courante :

$$T_{RMP} = C \cdot w_{RMP} \cdot (T_1)^2 \cdot z \quad \text{Équation 7}$$

avec T_{RMP} la transmissivité RMP (en m/s) ;
 C le coefficient empirique de calibration ;
 w_{RMP} la teneur en eau RMP (en %) ;
 T_1 le temps de relaxation (en ms) ;
 z l'épaisseur de la couche (en m).

Le coefficient C a été calculé de la façon suivante :

$$C = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{T_{E.P.i}}{w_{RMPi} \cdot (T_{1i})^2 \cdot z_i} \quad \text{Équation 8}$$

avec $T_{E.P.i}$ est la transmissivité estimée par l'essai de pompage i ;
 n le nombre d'essai de pompage.

Ce coefficient a été estimé à partir des essais de pompage disponibles à $1,70 \cdot 10^{-10}$ pour de l'eau à 30°C. Compte tenu de l'influence de la température sur le coefficient de perméabilité (Vouillamoz et al. 2005) ce coefficient équivaut à un coefficient de $1,04 \cdot 10^{-10}$ pour de l'eau à 10°C. Cette valeur correspond aux valeurs rencontrées dans d'autres aquifères sableux ($C = 7 \cdot 10^{-11}$ d'après Baltassat *et al.*, 2003 ; $C = 4,9 \cdot 10^{-9}$ d'après Vouillamoz, 2003).

L'incertitude sur l'estimation de la transmissivité par RMP a été prise en compte en considérant l'incertitude sur la teneur en eau et sur le temps de relaxation T_1 .

6. Résultats et discussion

L'ensemble des résultats est récapitulé dans le tableau de l'annexe 4.

6.1. NIVEAUX STATIQUES

Les niveaux statiques estimés par RMP sont comparés sur la Figure 20 aux niveaux statiques calculés d'après les mesures dans les puits, et d'après l'estimation de la différence altimétrique de la boucle RMP par rapport à l'ouvrage de mesure.

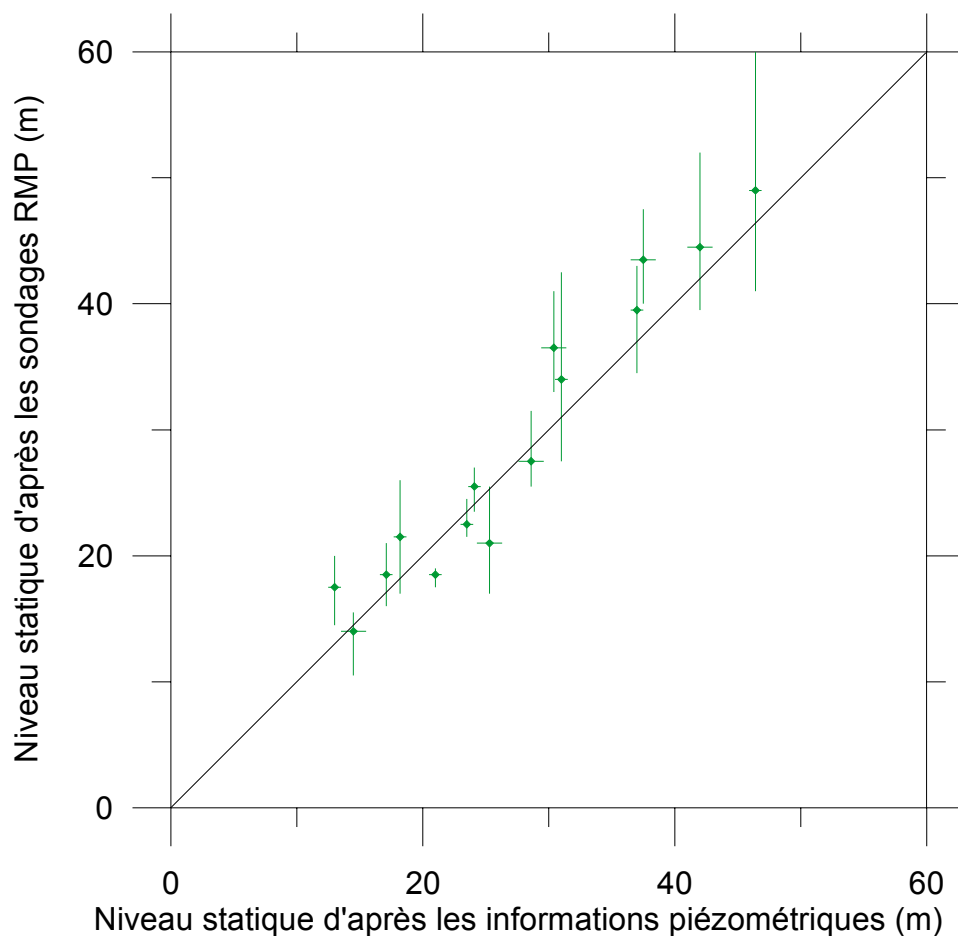


Figure 20 – Comparaison du niveau statique dans le CT3 estimé par sondage RMP et par les informations piézométriques

Les résultats montrent une assez bonne corrélation entre les niveaux statiques RMP et les niveaux piézométriques. Cependant l'incertitude sur les niveaux statiques RMP est trop importante pour que ces données améliorent la connaissance de l'aquifère.

Par ailleurs, le niveau statique estimé par RMP a tendance à être plus profond que le niveau statique estimé par les mesures piézométriques et la topographie. Plusieurs hypothèses peuvent être faites pour expliquer ce phénomène. L'influence de différents paramètres sur le résultat RMP a été testée par modélisation :

- 1- effet d'un niveau conducteur (entre 50 et 20 $\Omega.m$) situé entre 3 et 10 m de profondeur et mis en évidence par un panneau électrique (Massuel *et al.*, 2006)
- 2- effet des argiles grises sous-jacentes à l'aquifère du CT3
- 3- effet d'un aquifère captif profond (ex : aquifères des oolithes ferrugineuses)
- 4- effet combiné des argiles grises sous-jacentes à l'aquifère du CT3 et d'un aquifère captif profond

Les résultats des modélisations montrent que :

- 1- Le niveau conducteur entre 3 et 10 m de profondeur et dont la résistivité est supérieure à 20 $\Omega.m$ a une influence négligeable sur l'amplitude du signal RMP (Figure 21). La phase du signal RMP est affectée par ce conducteur, mais comme la phase est interprétée uniquement de manière qualitative, l'interprétation globale du sondage RMP ne sera pas changée en considérant ou non le niveau conducteur entre 3 et 10 m de profondeur.

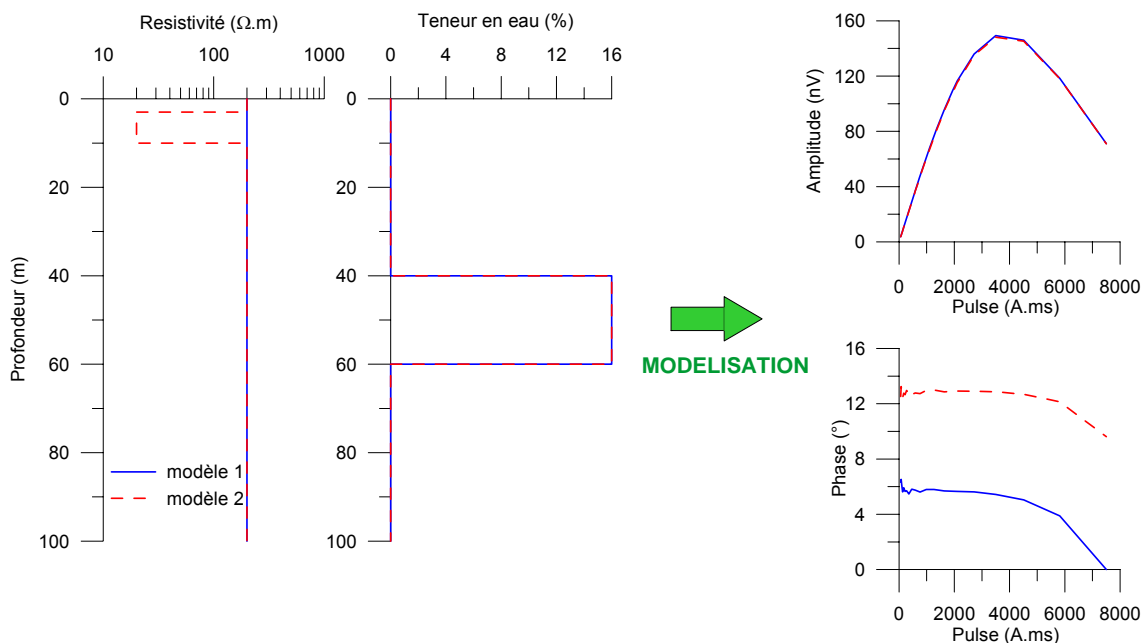


Figure 21 – Effet d'un niveau conducteur superficiel sur le signal RMP. A gauche : paramètres initiaux : résistivité et teneur en eau. A droite : réponse RMP

- 2- Les argiles grises situées entre l'aquifère libre du CT3 et l'aquifère captif du CT2 qui peuvent être représentées par une couche conductrice ont vraisemblablement une influence sur le signal RMP (Figure 22 et Figure 23). La gamme de résistivité électrique pour des argiles varie en général de quelques ohms-mètres à quelques

dizaines d'ohms-mètres. Des tests pour une couche conductrice variant entre 2 et 20 $\Omega.m$ montrent que plus les argiles sont conductrices, plus leur effet est important. Dans la gamme de résistivité des argiles la plus probable (5-20 $\Omega.m$), l'erreur sur l'estimation du niveau statique lorsqu'on ne prend pas en compte cette couche conductrice varie entre 1 et 3 mètres (Figure 23). L'estimation de la teneur en eau est en revanche peu affectée par la présence ou non d'une couche conductrice (erreur $\leq 0,2\%$ pour des résistivités $\geq 5 \Omega.m$).

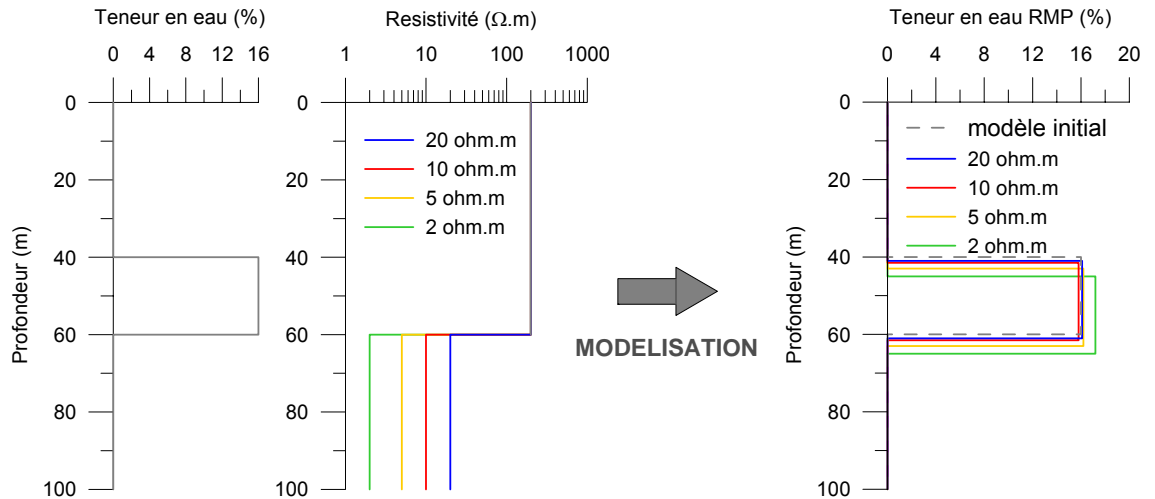


Figure 22 – Effet d'un niveau conducteur profond sur la réponse RMP. A gauche : paramètres initiaux : teneur en eau et résistivité. A droite : résultat RMP après inversion sans prendre en compte la conductivité des argiles

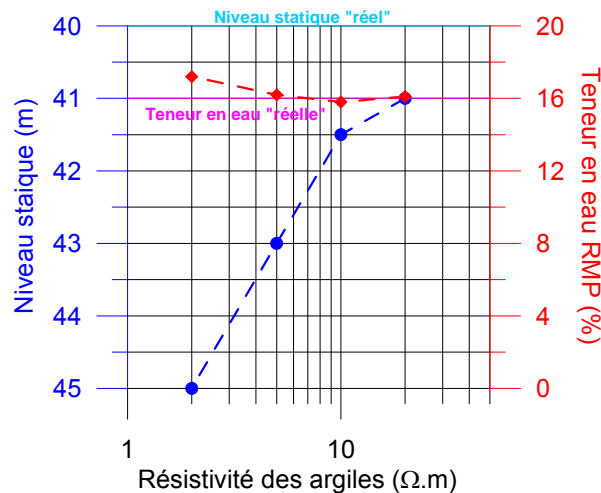


Figure 23 – Estimation du niveau statique et de la teneur en eau en inversant les données avec l'épaisseur fixée et sans prendre en compte la conductivité des argiles

3- La réponse RMP d'un aquifère profond peut être confondue avec celle un aquifère plus superficiel. Dans ce cas une interprétation mono-couche de teneur en eau permet d'ajuster correctement le signal RMP. Mais les valeurs de teneur en eau et

niveau statique de l'aquifère superficiel sont alors faussées (Figure 24 et Figure 25) : le niveau statique interprété est plus profond qu'en réalité et la teneur en eau est surestimée. Plus le produit teneur en eau par épaisseur de l'aquifère captif sera important, plus l'erreur sur l'estimation du niveau statique et de la teneur en eau de l'aquifère superficiel sera grande en utilisant une interprétation mono-couche.

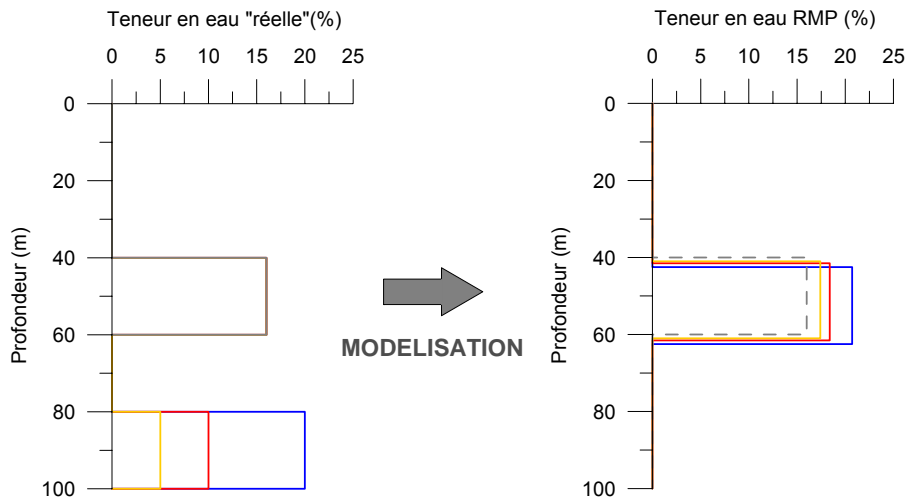


Figure 24 – Effet d'un aquifère profond sur la réponse RMP dans un terrain à 200 Ω .m. A gauche : paramètres du modèle. A droite : résultat RMP après inversion mono-couche

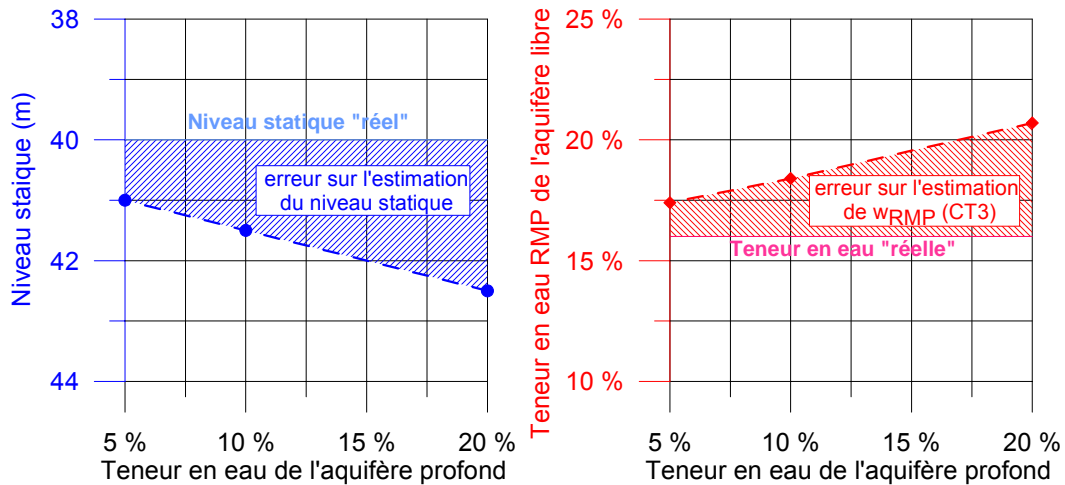


Figure 25 – Estimation du niveau statique et de la teneur en eau en inversant les données avec l'épaisseur fixée sans prendre en compte l'aquifère captif

- 4- Dans un environnement conducteur (5 Ω .m), un aquifère profond n'a pratiquement aucune influence sur l'amplitude du signal RMP (Figure 26). Ceci est lié au fait qu'un terrain conducteur limite la profondeur d'investigation de la méthode RMP.

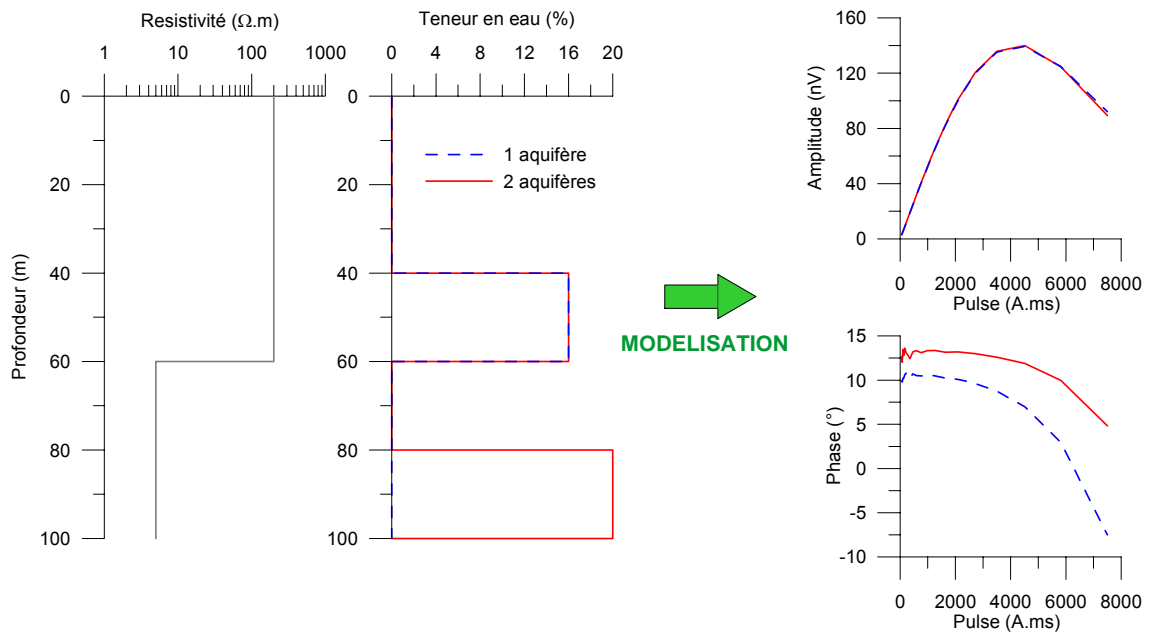


Figure 26 - Effet sur le signal RMP d'un niveau aquifère profond dans un environnement conducteur. A gauche : paramètres initiaux: résistivité et teneur en eau. A droite : réponse RMP

Il a noté que l'erreur faites en ne prenant pas en compte ces différents effets est du même ordre de grandeur que l'incertitude mesure.

Par ailleurs, l'interprétation de la phase peut permettre d'écarter certains scenarii. Cependant la précision de mesure de la phase et sa dépendance à plusieurs paramètres (décalage en fréquence, résistivités des terrains et nombre d'aquifères) laisse encore beaucoup d'ambiguïté.

6.2. TENEURS EN EAU

Les teneurs en eau RMP sont comparées avec les coefficients d'emmagasinement estimés par la modélisation et par essai de pompage sur la Figure 27. Des contrastes significatifs de teneur en eau (supérieurs à l'incertitude mesure) ont été observés sur l'ensemble des sites explorés.

Le faible nombre d'essai de pompage avec piézomètres d'observation (qui servent à l'estimation du coefficient d'emmagasinement) ne permet pas une comparaison quantitative avec les résultats de la RMP.

Dans la gamme de 0 à 15 %, les teneurs en eau RMP varie dans le même sens que les coefficients d'emmagasinement (S) estimés par modélisation en régime transitoire (code Modflow ; Massuel, 2005). Les teneurs en eau RMP dans le CT3 ne dépassent pas 20%, alors que la modélisation *modflow* utilise des valeurs de coefficient d'emmagasinement allant jusqu'à 40 %. Il est donc probable que les contrastes de coefficient d'emmagasinement dans la modélisation aient été trop accentués

notamment en bordure de bassin versant (par exemple près de Sourgourou où $S_{\text{modflow}} = 40\%$).

Les teneurs en eau RMP sont en général plus élevées que les coefficients d'emmagasinement obtenu par essais de pompage et par modélisation. Il est donc possible que la méthode RMP soit sensible à une partie de l'eau de rétention capillaire dans ce contexte géologique.

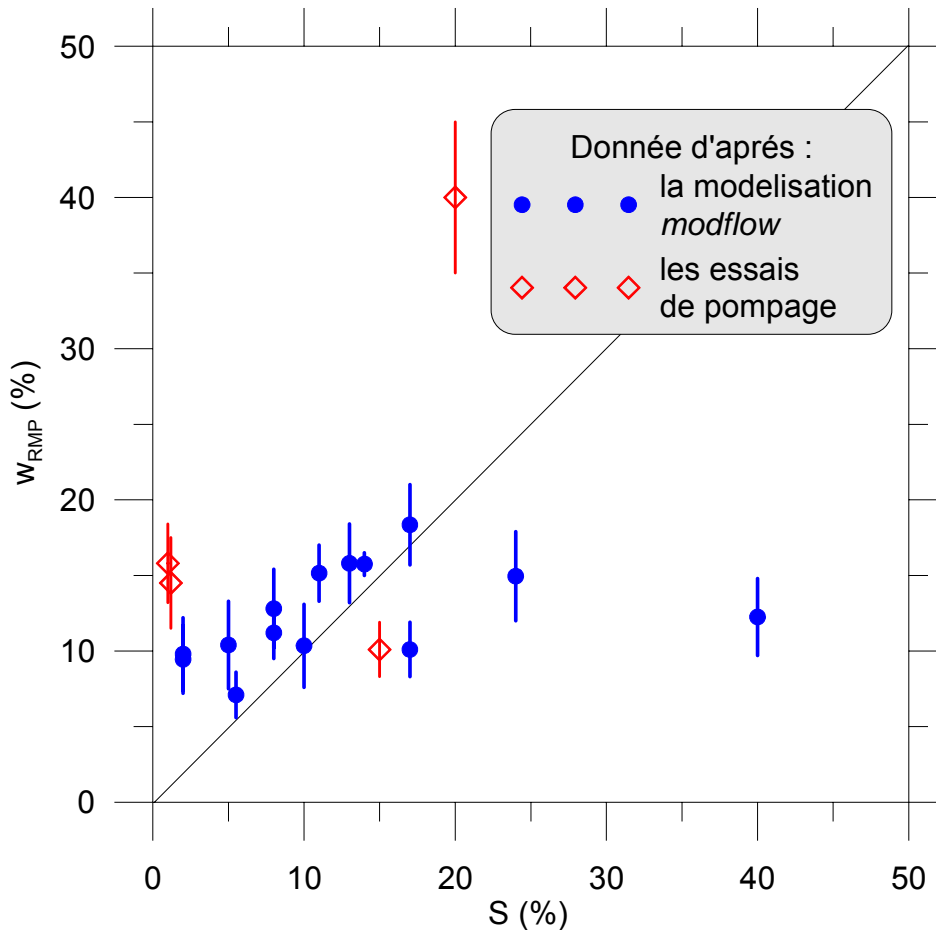


Figure 27 – Comparaison de la teneur en eau RMP avec le coefficient d'emmagasinement estimé par modélisation (en bleu) et par essai de pompage (en rouge)

6.3. TRANSMISSIVITES

Les transmissivités RMP présentent des contrastes significatifs. Elles sont comparées sur la Figure 28 avec les transmissivités estimées par la modélisation et par essai de pompage.

Les résultats montrent que, excepté sur un site, les transmissivités RMP sont bien corrélées avec les résultats des essais de pompage. En revanche, ces valeurs sont

assez éloignées des valeurs estimées par modélisation. Ceci peut s'expliquer par un problème d'échelle : les sondage RMP, tout comme les essais de pompage présentent des données ponctuelles alors que la modélisation se fait à une échelle de mailles unitaires plus large (km²).

Les gammes de transmissivité estimées par RMP et par essais de pompage sont un peu moins larges que celle utilisée par la modélisation. Une explication serait que la modélisation a accentué les contrastes afin de mieux caler les données piézométriques.

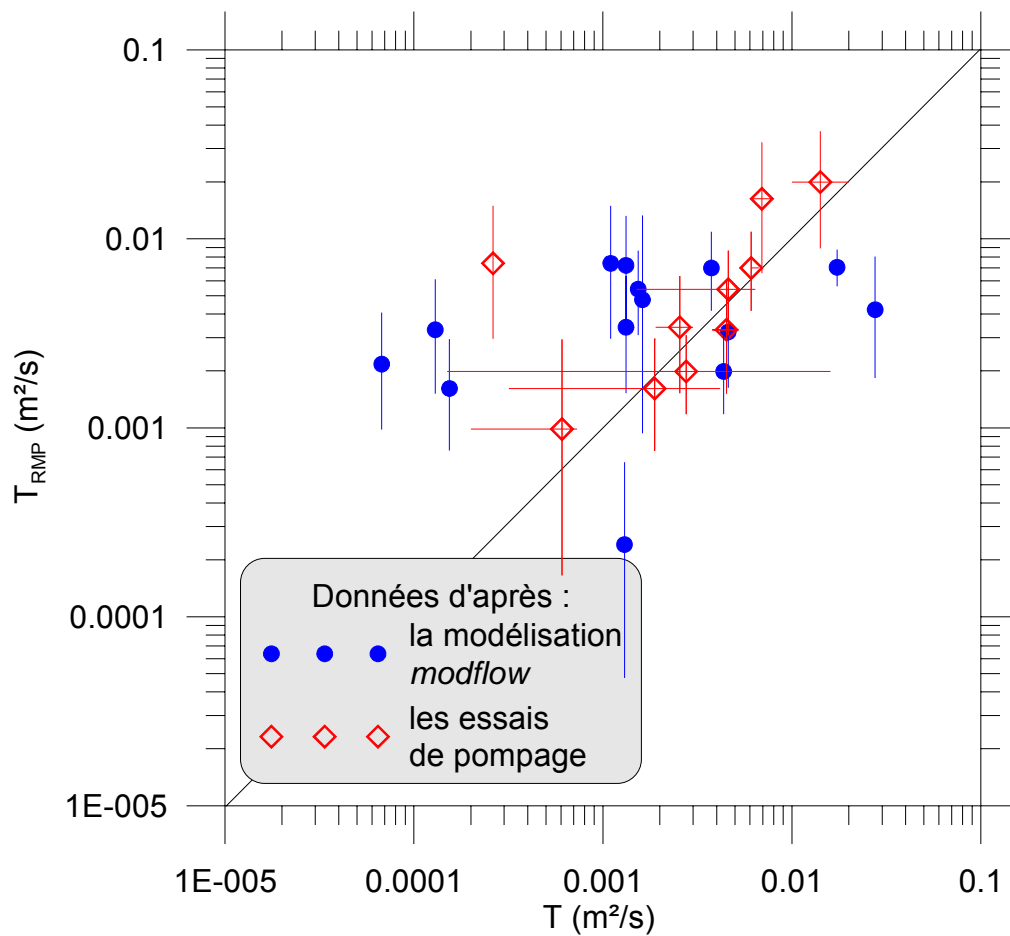


Figure 28 – Comparaison de la transmissivité mesuré par RMP et estimé par modélisation et/ou essai de pompage

7. Conclusion et perspectives

Les conditions de bruit EM très favorable ont permis de réaliser des mesures RMP de bonne qualité. Une étude quantitative a évalué les niveaux statiques, les teneurs en eau et les transmissivités des sites étudiés ainsi que l'incertitude sur ces paramètres. Des contrastes significatifs ont pu être mis en évidence par la méthode RMP sur l'ensemble de la zone étudiée. En conséquence, l'expérimentation sera poursuivie et une nouvelle campagne de terrain est prévue.

Lors de cette première étude les mesures RMP ont été calibrées et un protocole d'interprétation spécifique a été établi pour répondre au mieux à la problématique de déterminer le couple (S, T).

La mise en œuvre d'une méthode électrique s'est avérée difficile en raison de terrain très résistants en surface (sable sec). Mais une information sur la résistivité des terrains en profondeur permettrait d'améliorer l'interprétation des sondages RMP. L'utilisation d'une méthode électromagnétique (TDEM) est donc envisagée pour la prochaine campagne de mesures.

Lors de cette prochaine campagne, une étude à une échelle plus locale (par ex. sur les sites de Wankama et Banizoumbou) sera effectuée afin de (1) mieux appréhender l'effet d'échelle sur la signification des mesures RMP (2) mieux comprendre les processus de recharge de la nappe libre du Continental Terminal. Dans ce cadre, des essais de pompage avec piézomètre d'observation seront réalisés pour avoir des valeurs de coefficient d'emmagasinement d'après essai de pompage à comparer avec les mesures RMP, ces deux méthodes ayant une échelle d'investigation similaire.

Bibliographie

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.

Baltassat J.M., Legtchenko A. (2003) – Etalonnage des résultats des sondages de Résonance Magnétique protonique (RMP) avec des données hydrodynamiques, méthodologie mise au point à partir de divers sites de forages hydrogéologiques en Eure-et-Loir dans le Vaucluse et dans la Vienne. *BRGM/RP-52247-FR*, 38p., 14 fig., 4 tabl., 3 ann. (volume séparé)

Chang D., Vienegar H., Morriss C. (1997) - Effective porosity, producible fluid and permeability from NMR logging. *The log Analyst*, March-April, p. 60-72.

Dehays H. / BRGM / BURGEAP (1990) – Programme d'hydraulique villageoise du conseil de l'entente (phases II et II bis). Etude d'implantation et contrôle des travaux de points d'eau. *Rapport final, BRGM / BURGEAP, R31874 / EAU 4S 90, France*.

De Marsily, G. (1981) - Hydrogéologie quantitative. *Masson*. Paris. 215p

Farrar T.C., Becker E. D. (1971) - Pulse and Fourier transform NMR: Academic Press, New York.

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

Favreau G., Leduc C., Marlin C., Dray A., Taupin J.-D., Massault M., Le Gal La Salle C., Babic M. (2002) – Estimate of recharge of a rising water-table in semi-arid Niger from 3H and 14C modeling. *Ground Water*, 40, 2, 144-151.

Guéro A. (2003) – Etude des relations hydrauliques entre les différentes nappes du complexe sédimentaire de la bordure sud-ouest du bassin des lullemeden (Niger). Approches géochimiques et hydrodynamiques. *Thèse de doctorat, Université de Paris-XI, Orsay, France*.

Kenyon W. E. (1997) - Petrophysical principles of applications of NMR logging. *The Log Analyst*, March-April : p. 21-43.

Lang J., Kogbe C., Alidou S., Alzouma K.A., Bellion G., Dubois D., Durand A., Guiraud R., Houessou A., De Klasz I., Romann E., Salard-Cheboldaeff M., Trichet J. (1990) – The Continental Terminal in West Africa. *Journal of African Earth Sciences* 10, 79-99.

Legchenko A., Beauce A., Guillen A., Valla P., Bernard J. (1997) - Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 2 : p. 173-190.

Legchenko A., Shushakov O. (1998) - Inversion of surface NMR data. *Geophysics*. Vol. 63, n° 1 : p. 75-84.

Legchenko A., Valla P. (2002) – A review of basic principles for magnetic resonance sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics*. 50 : p. 3-19.

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 II, 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 (sous presse)*.

Pallas P. / FAO (1970) – Etude en vue de la mise en valeur du Dallol Maouri, Niger. Les eaux souterraines. *Rapport technique 1, AGS :SF/NER 8, 162 p. Rome, Italie*.

Schirov M., Legchenko A., Creer G. (1991) - New direct non-invasive ground water detection technology for Australia: *Expl. Geophys.*, 22, pp. 333-338.

Trushkin D. V., Shushakov O. A., and Legchenko A. V. (1994) - The potential of a noise-reducing antenna for surface NMR ground water surveys in the earth's magnetic field: *Geophys. Prosp.*, vol. 42, pp. 855-862.

Vouillamoz J.M. (2003) - La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par résonance magnétique protonique. *Thèse de doctorat, Université de Paris-XI, Orsay, France*.

Vouillamoz, J. M., Chatenoux B., Mathieu F., Baltassat J. M., Legchenko A. (2005) – Estimation des paramètres hydrodynamiques des aquifères non consolidés par sondages électriques et RMP. 5^{ème} colloque GEOFCAN, 20-21 septembre 2005, Orléans, France, pp. 99-102.

Annexe 1

Résultats des sondages RMP

Site: WAKAMA P3

Loop: 2 - 75.0 Date: 10.12.2005 Time: 10:06

NUMIS data set: C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\WP3\WP3_75.inp

matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\WP3.mrm

loop: square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 34000.00 nT

filtering window = 198.8 ms

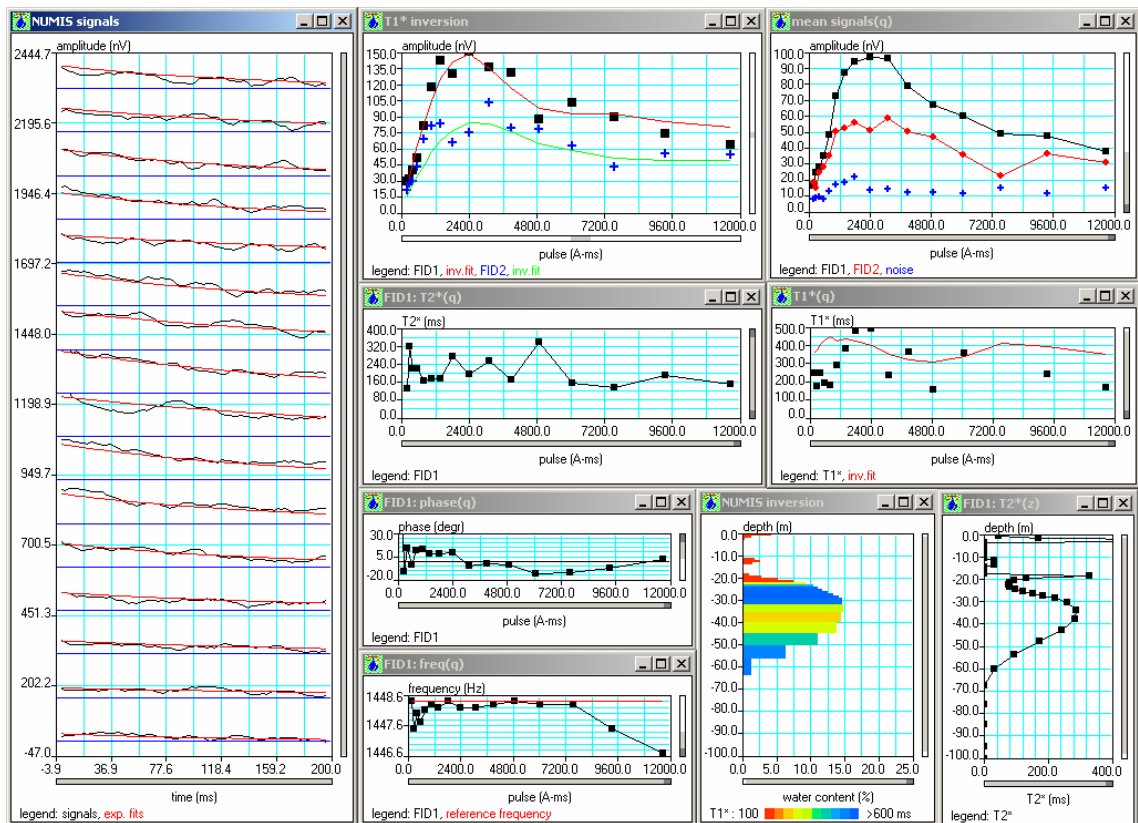
time constant = 15.00 ms

average S/N = 4.49; EN/IN = 2.62

fitting error: FID1 = 10.06%; FID2 = 19.62 %

param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000

permeability constant Cp = 5.00e-09



Site de Wankama P3

Site: Berkiavel

Loop: 4 - 75.0 Date: 12.12.2005 Time: 09:01

NUMIS data set:

C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Berk8_75\BERK8_75.inp

matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\berk.mrm

loop: eight square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 33882.63 nT

filtering window = 199.5 ms

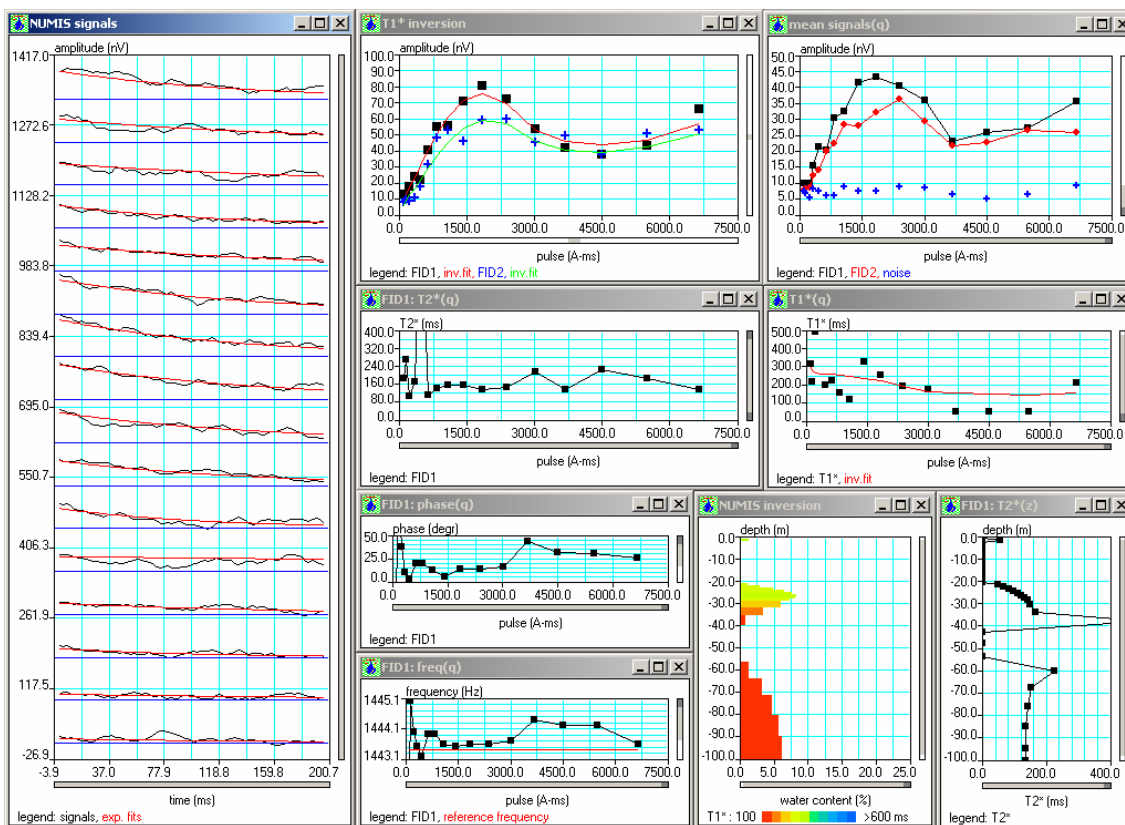
time constant = 15.00 ms

average S/N = 3.67; EN/IN = 1.44

fitting error: FID1 = 9.16%; FID2 = 13.44 %

param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000

permeability constant Cp = 5.00e-09



Site de Berkiavel

Site: Banizoumbou

Loop: 4 - 75.0 Date: 13.12.2005 Time: 10:38

NUMIS data set:

C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Bani8_75\BANI8_75.inp

matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\banizou.mrm

loop: eight square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 33687.79 nT

filtering window = 197.9 ms

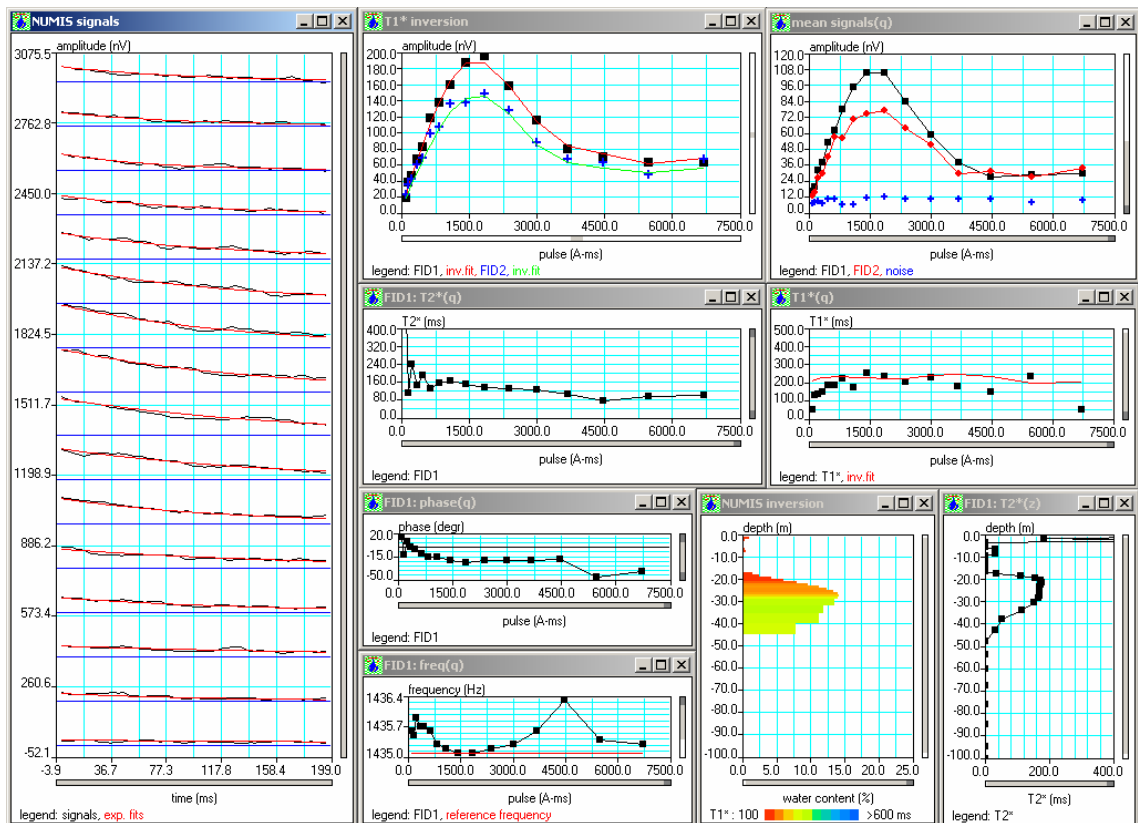
time constant = 15.00 ms

average S/N = 5.92; EN/IN = 1.83

fitting error: FID1 = 3.65%; FID2 = 7.47 %

param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000

permeability constant Cp = 5.00e-09



Site de Banizoumbou

Site: Gassankournie

Loop: 4 - 75.0 Date: 13.12.2005 Time: 15:53

NUMIS data set: C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Gas\GAS8_75.inp

matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\gasank.mrm

loop: eight square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 33941.31 nT

filtering window = 199.2 ms

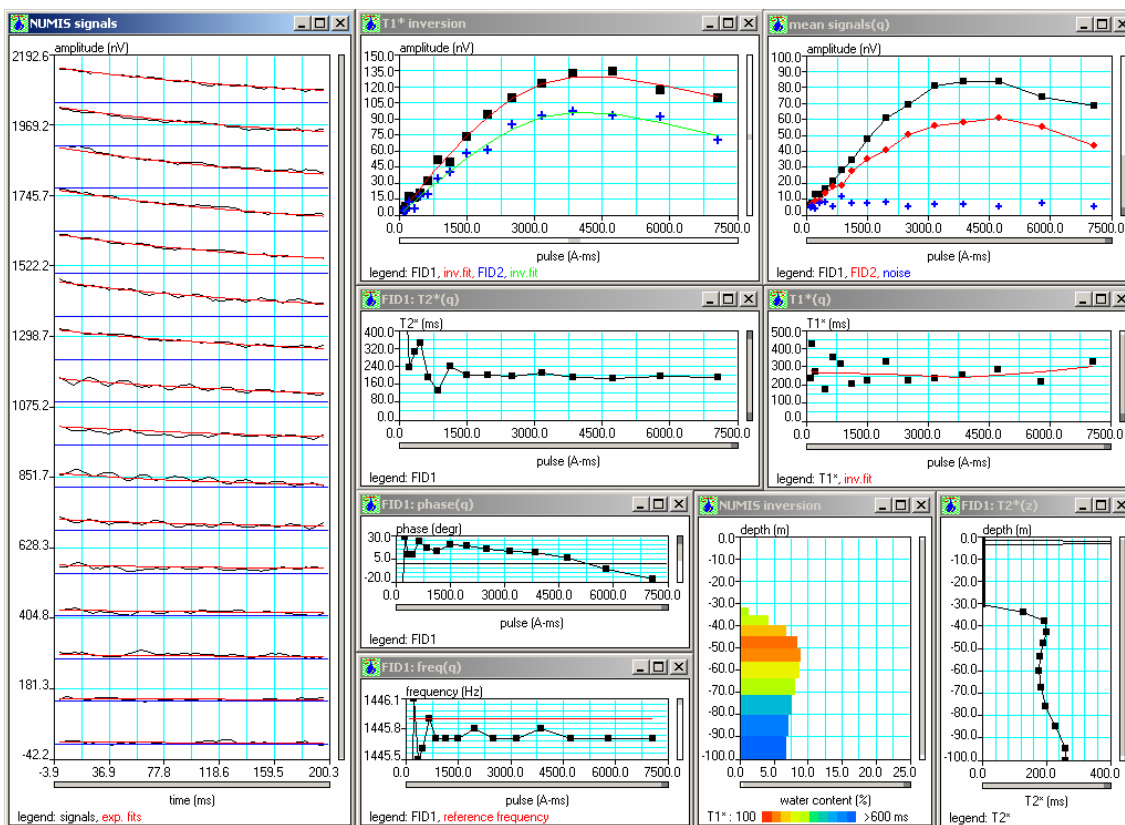
time constant = 15.00 ms

average S/N = 6.71; EN/IN = 1.31

fitting error: FID1 = 4.84%; FID2 = 6.26 %

param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000

permeability constant Cp = 5.00e-09



Site de Gassan Kournie

Site: Winditen

Loop: 4 - 75.0 Date: 14.12.2005 Time: 18:23

NUMIS data set: D:\Travail\data_Marie\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Win8-75\WIN8_75.inp

matrix: D:\Travail\data_Marie\Niger\Matrix\Nouvelles\wind8_75.mrm

loop: eight square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 34021.13 nT

filtering window = 198.7 ms

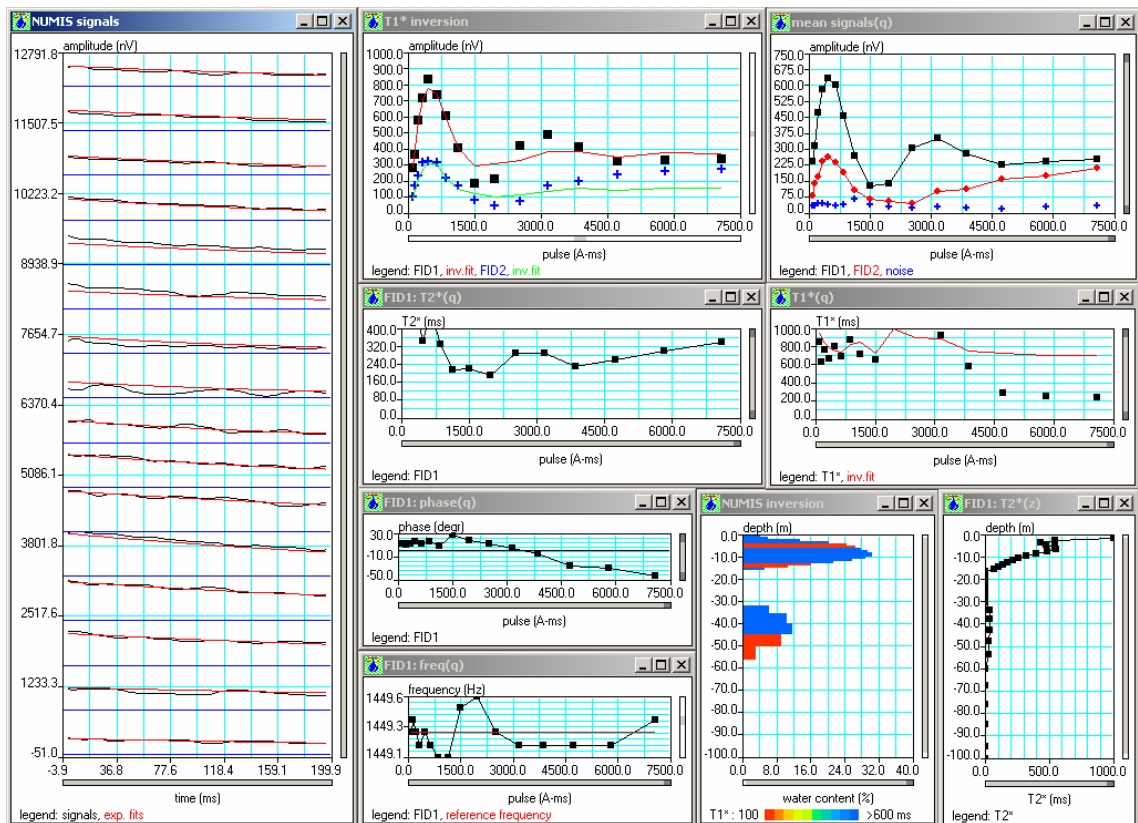
bandpass = 10.00 Hz

average S/N = 9.86; EN/IN = 6.95

fitting error: FID1 = 11.47%; FID2 = 24.57 %

param. of regular.: E, T2* = 1000.0; T1* = 0.715

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site de Winditen

Site: Winditen

Loop: 2 - 112.5 Date: 14.12.2005 Time: 12:39

NUMIS data set:

D:\Travail\data_Marie\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Win112\WIN_112.inp

matrix: D:\Travail\data_Marie\Niger\Matrix\Nouvelles\Win112.mrm

loop: square, side = 112.5 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 34061.03 nT

filtering window = 198.5 ms

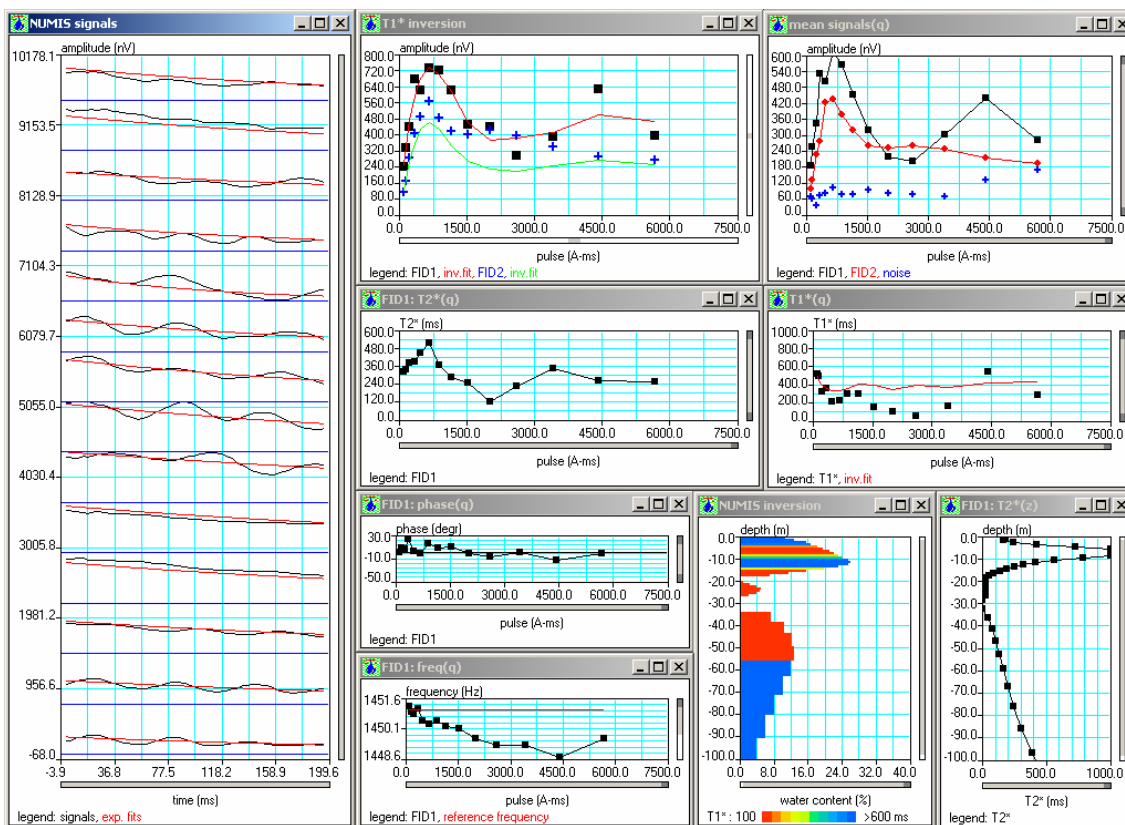
bandpass = 10.00 Hz

average S/N = 4.40; EN/IN = 16.95

fitting error: FID1 = 10.70%; FID2 = 24.43 %

param. of regular.: E, T2* = 1000.0; T1* = 5.007

permeability constant Cp = 7.00e-09

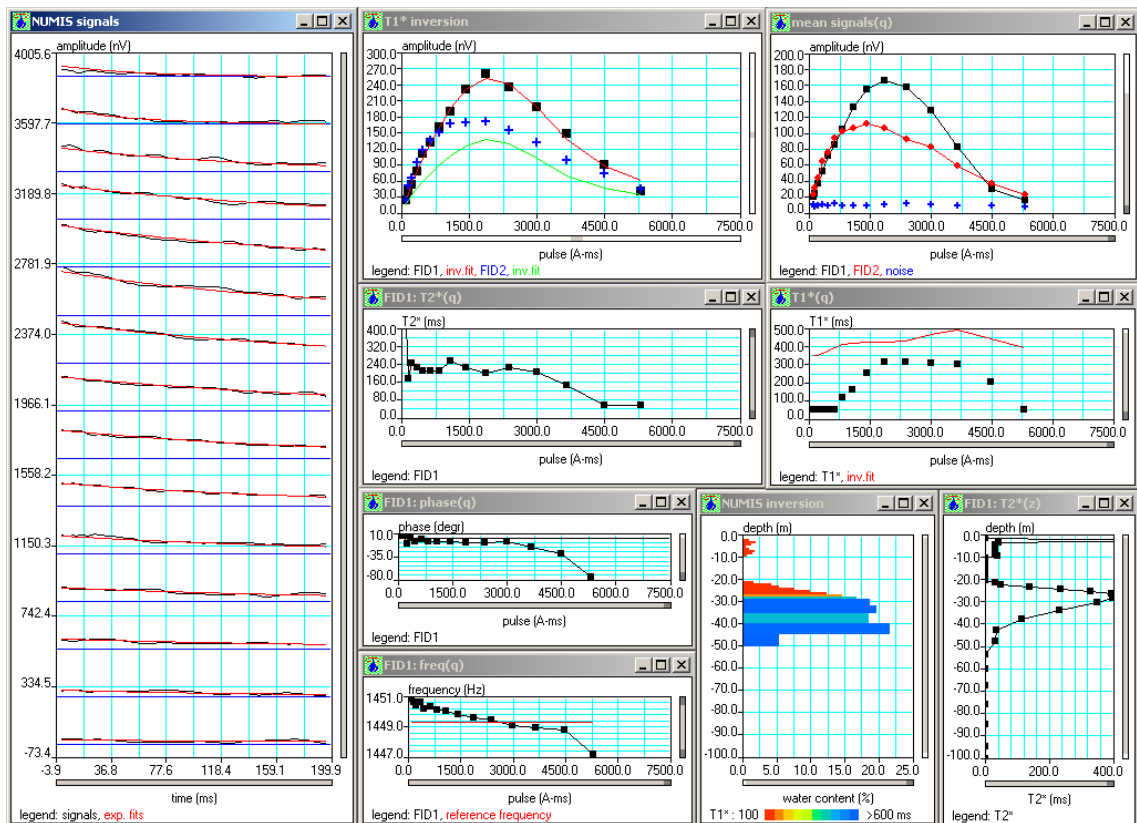


Site de Winditen

Site: Banikane 8 75 m
 Loop: 4 - 75.0 Date: 15.12.2005 Time: 10:57

NUMIS data set:
 D:\Travail\data_Marie\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Banika\BANIKA.inp
 matrix: D:\Travail\data_Marie\Niger\Matrix\Nouvelles\banika1.mrm
 loop: eight square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 5 degr, magnitude= 34021.13 nT

filtering window = 198.7 ms
 bandpass = 10.00 Hz
 average S/N = 8.78; EN/IN = 1.91
 fitting error: FID1 = 4.71%; FID2 = 33.57 %
 param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000
 permeability constant Cp = 7.00e-09

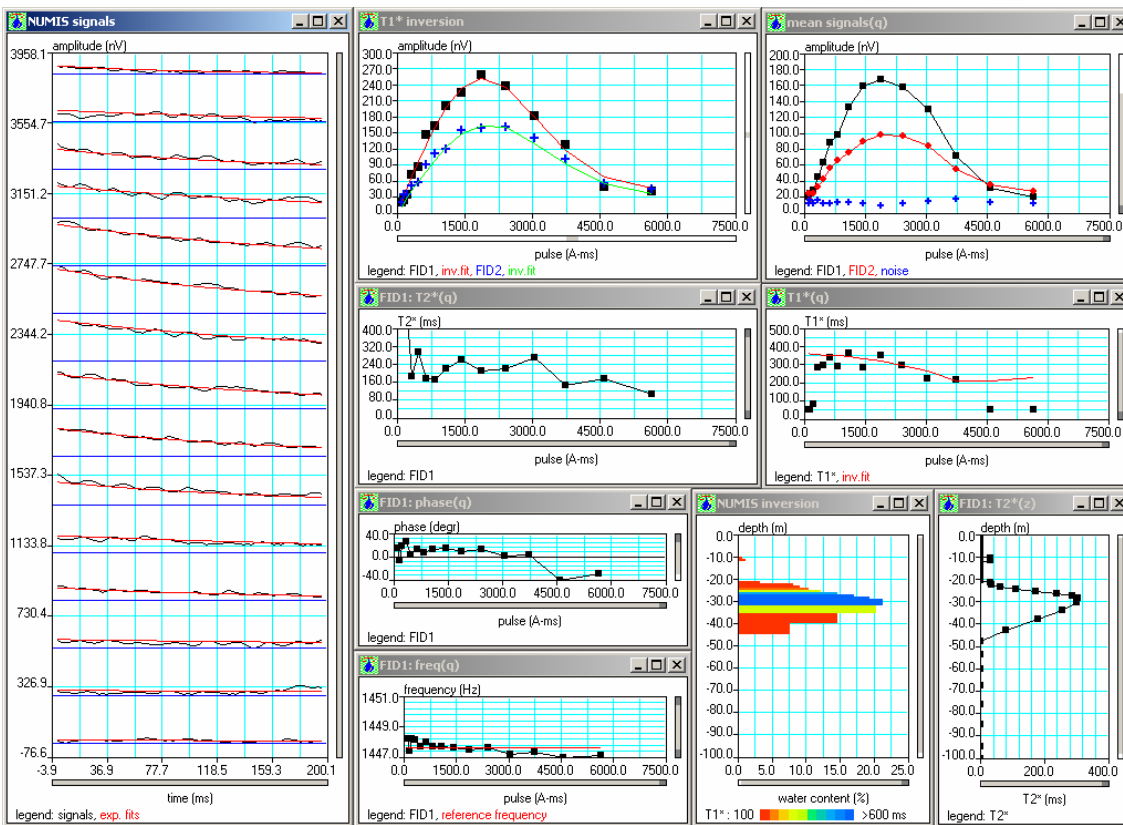


Site de Banikane

Site: Banikane 8 75 m soir
 Loop: 4 - 75.0 Date: 15.12.2005 Time: 14:56

NUMIS data set:
 C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Banika2\BANIKA2.inp
 matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\banika2.mrm
 loop: eight square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 5 degr, magnitude= 33981.22 nT

filtering window = 198.9 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 6.35; EN/IN = 2.60
 fitting error: FID1 = 6.33%; FID2 = 8.06 %
 param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000
 permeability constant Cp = 5.00e-09



Site de Banikane

Site: Fetokadie

Loop: 4 - 75.0 Date: 17.12.2005 Time: 16:56

NUMIS data set: C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Feto2\FETO2.inp

matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\fetoka.mrm

loop: eight square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 33981.22 nT

filtering window = 198.9 ms

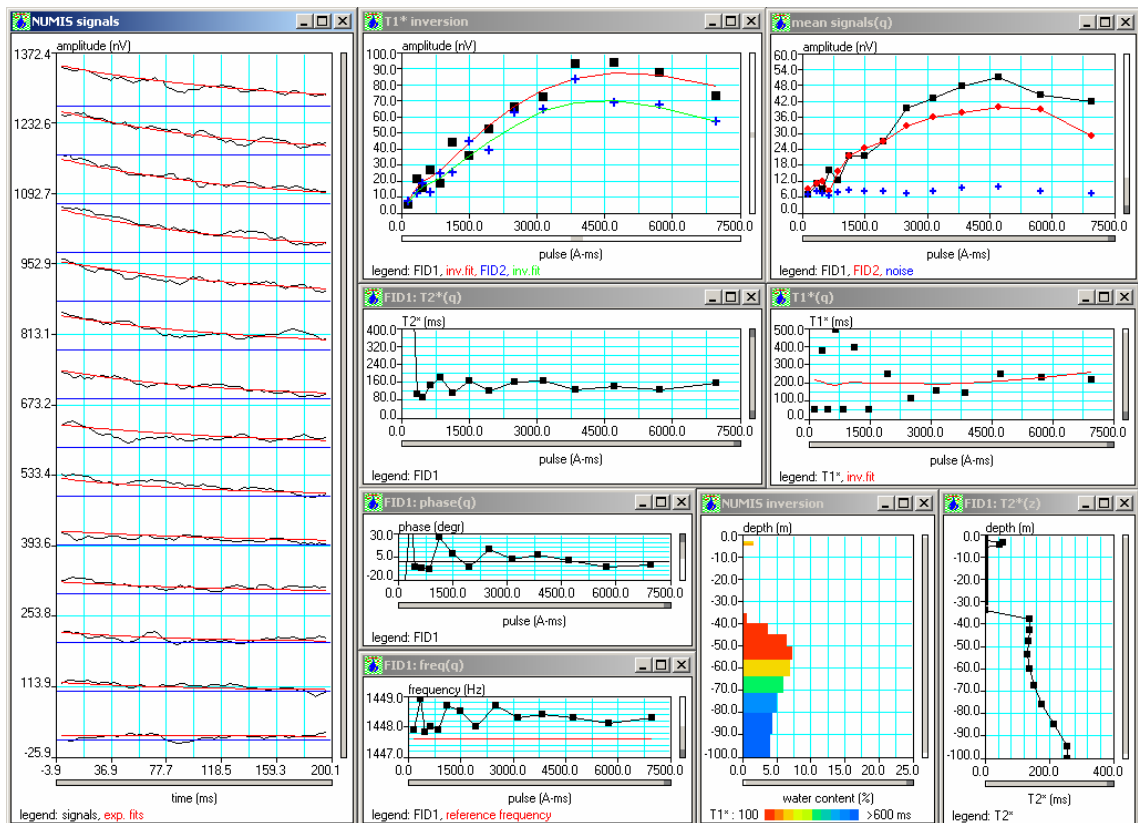
time constant = 15.00 ms

average S/N = 3.52; EN/IN = 1.59

fitting error: FID1 = 10.00%; FID2 = 11.79 %

param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000

permeability constant Cp = 5.00e-09

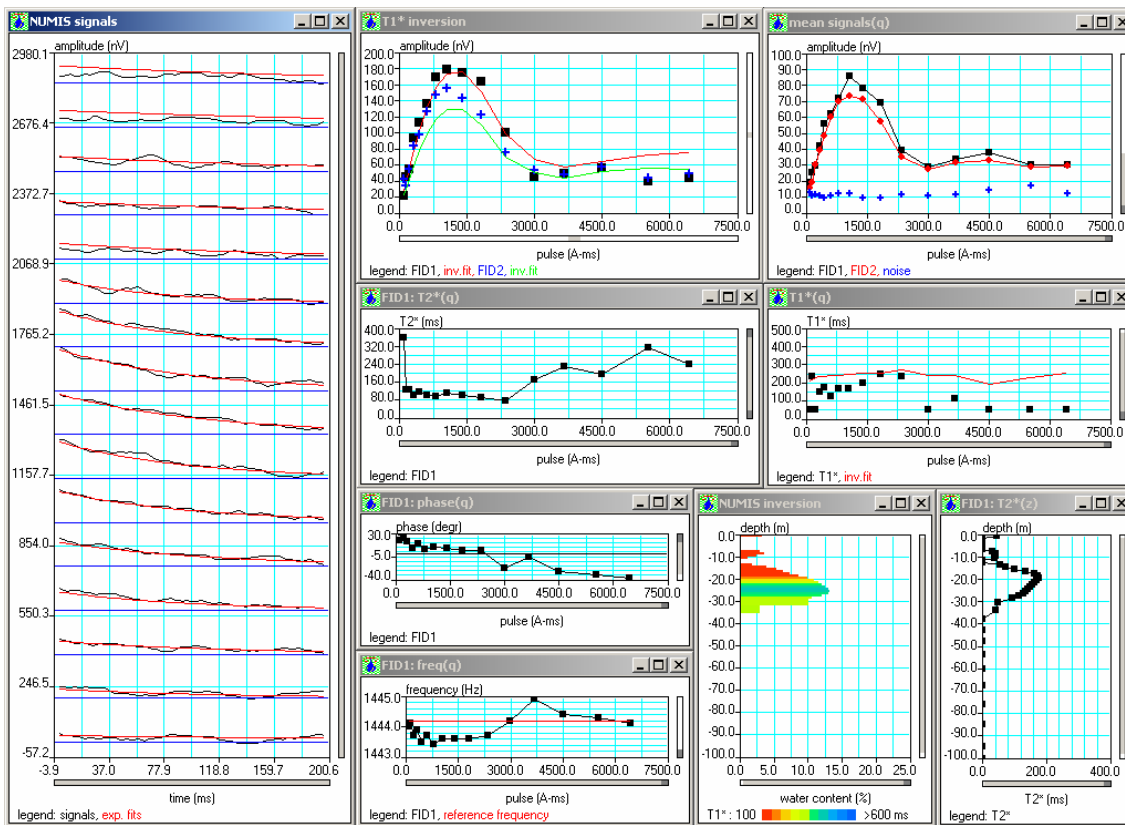


Site de Fetokadie

Site: Hambdalaye sud
 Loop: 4 - 75.0 Date: 18.12.2005 Time: 14:48

NUMIS data set:
 C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Hamb\HAMB8_75.inp
 matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\hambda.mrm
 loop: eight square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 5 degr, magnitude= 33901.41 nT

filtering window = 199.4 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 3.95; EN/IN = 2.34
 fitting error: FID1 = 13.85%; FID2 = 17.92 %
 param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000
 permeability constant Cp = 5.00e-09



Site de Hamdallaye

Site: kafina211205

Loop: 4 - 75.0 Date: 20.12.2005 Time: 12:46

NUMIS data set: C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Kafina\KAFINA2.inp

matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\kafina.mrm

loop: eight square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 34000.00 nT

filtering window = 198.8 ms

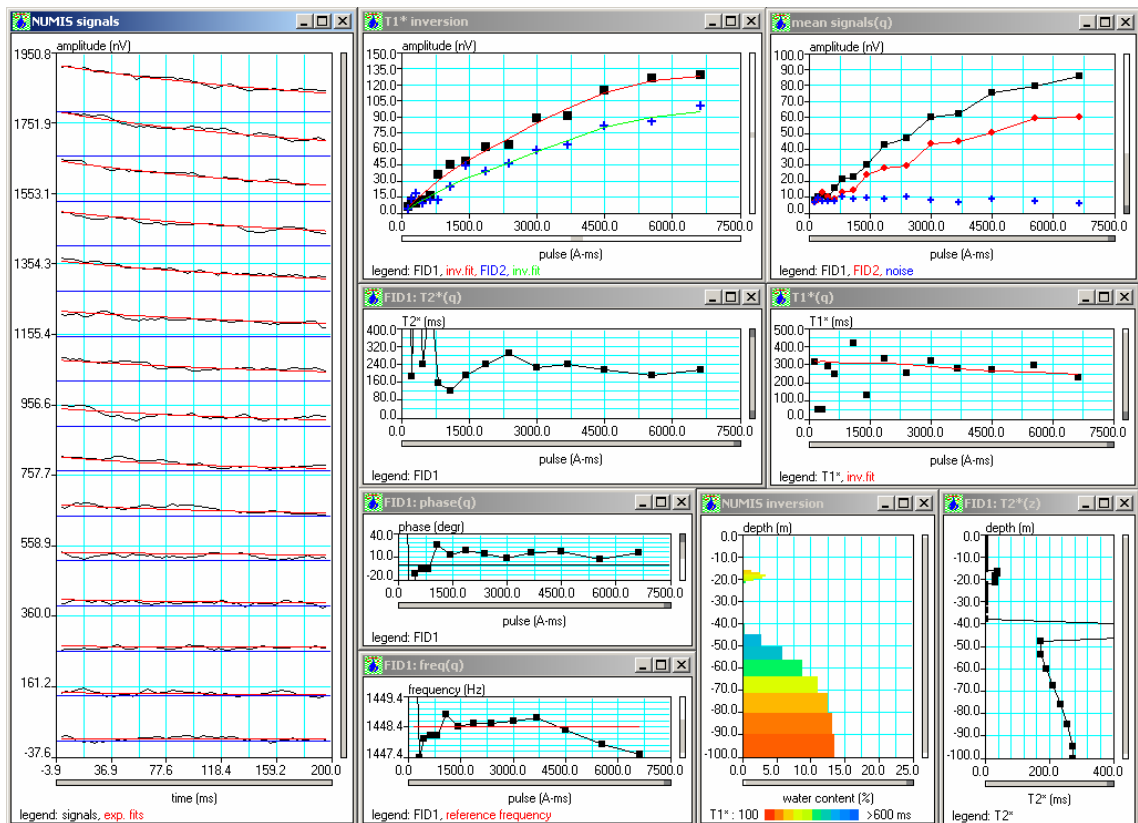
time constant = 15.00 ms

average S/N = 4.78; EN/IN = 1.62

fitting error: FID1 = 6.44%; FID2 = 10.89 %

param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000

permeability constant Cp = 5.00e-09



Site de Kafina

Site: Ninefouno

Loop: 4 - 75.0 Date: 20.12.2005 Time: 18:30

NUMIS data set:

C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Ninefouno\NINE8_75.inp

matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\ninefou.mrm

loop: eight square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 33805.16 nT

filtering window = 200.0 ms

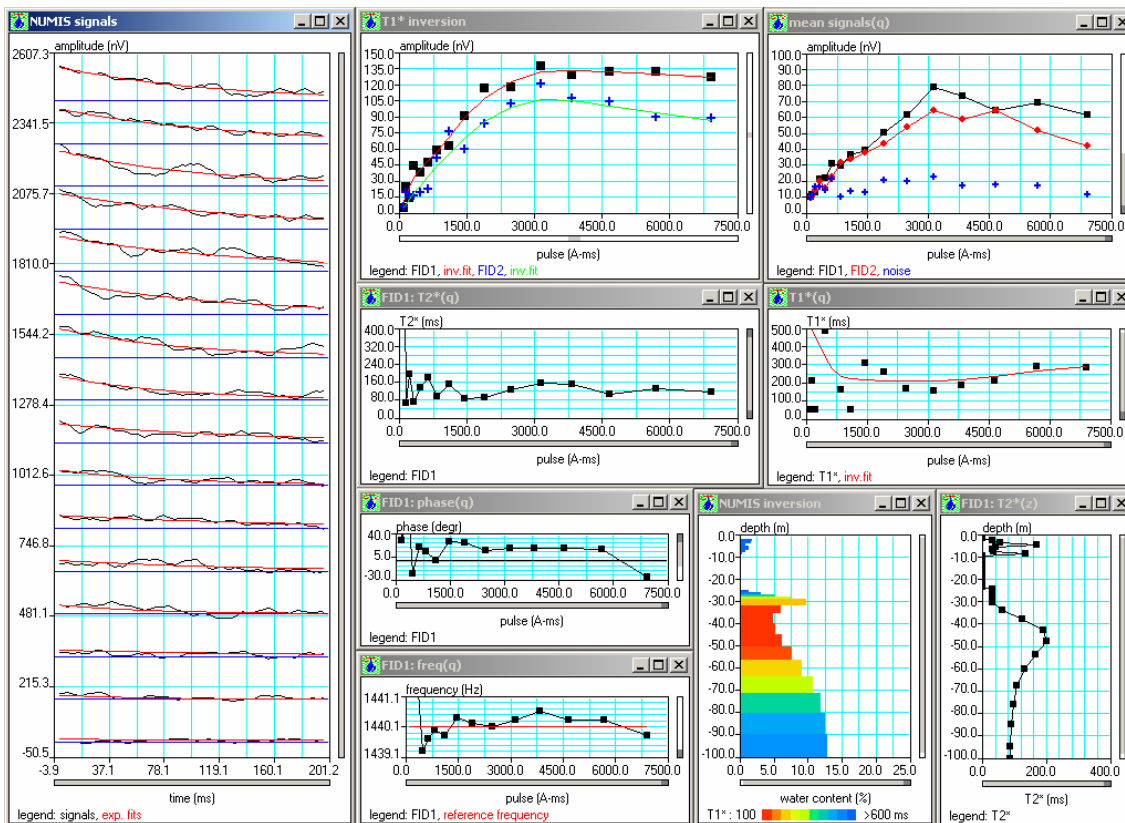
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.67; EN/IN = 3.15

fitting error: FID1 = 6.50%; FID2 = 11.98 %

param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000

permeability constant Cp = 5.00e-09

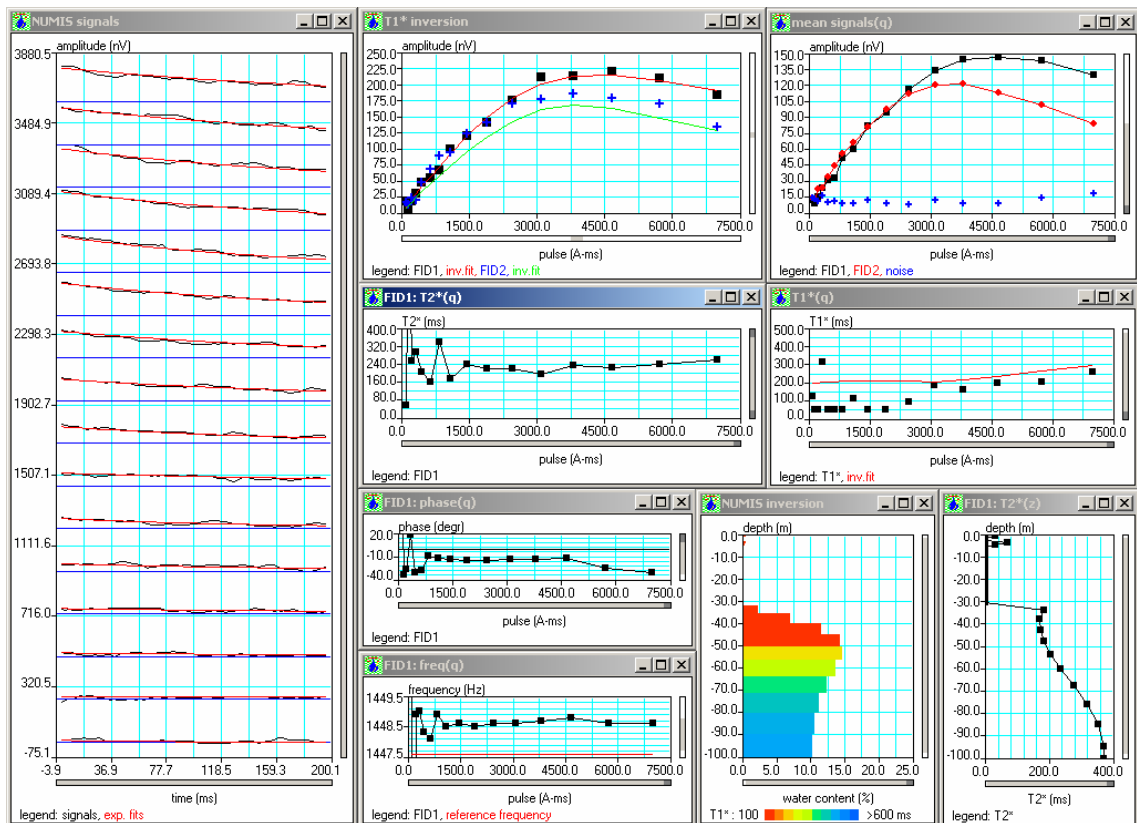


Site de Ninefouno

Site: banikosseypastoral221205
 Loop: 4 - 75.0 Date: 21.12.2005 Time: 15:11

NUMIS data set:
 C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Banikossey\BANKOSEY.inp
 matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\bankosey.mrm
 loop: eight square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 5 degr, magnitude= 33981.22 nT

filtering window = 198.9 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 6.67; EN/IN = 2.30
 fitting error: FID1 = 4.25%; FID2 = 15.37 %
 param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000
 permeability constant Cp = 5.00e-09

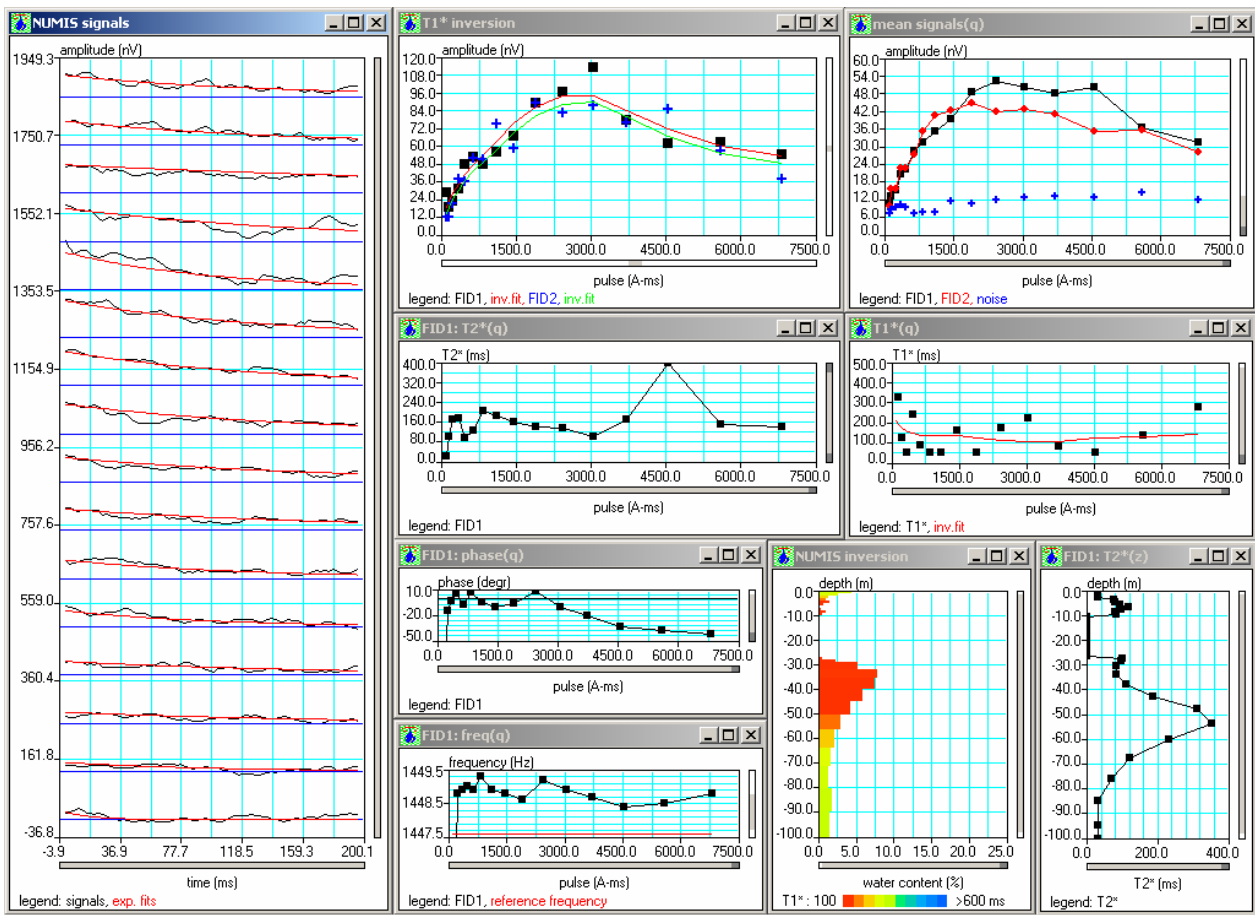


Site de Banikossey

Site: Fandou Beri
 Loop: 4 - 75.0 Date: 22.12.2005 Time: 10:36

NUMIS data set:
 C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Fandou\FANDOU.inp
 matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\fandou.mrm
 loop: eight square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 5 degr, magnitude= 33981.22 nT

filtering window = 198.9 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 3.19; EN/IN = 2.09
 fitting error: FID1 = 11.97%; FID2 = 14.44 %
 param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000
 permeability constant Cp = 5.00e-09

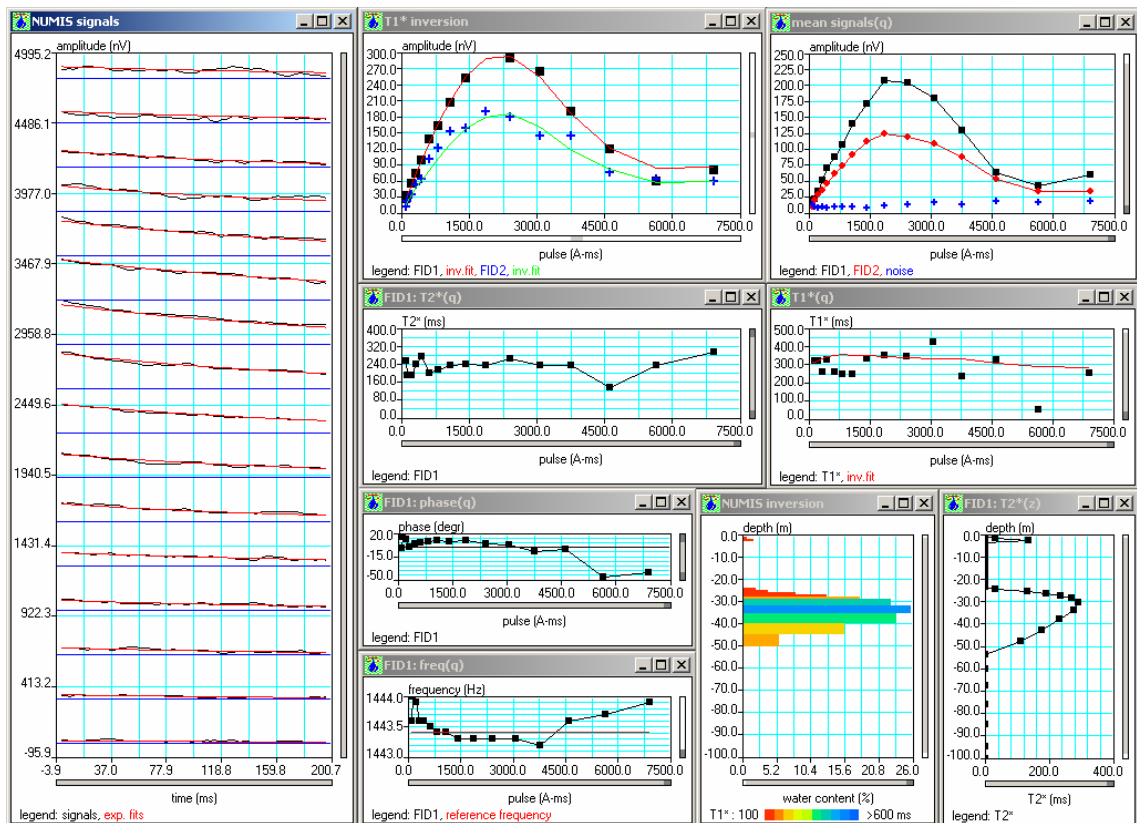


Site de Fandou Beri

Site: youloua231205
 Loop: 4 - 75.0 Date: 22.12.2005 Time: 15:42

NUMIS data set:
 C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Youloua\YOULOUA.inp
 matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\youloua.mrm
 loop: eight square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 5 degr, magnitude= 33882.63 nT

filtering window = 199.5 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 8.20; EN/IN = 2.42
 fitting error: FID1 = 4.93%; FID2 = 10.73 %
 param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000
 permeability constant Cp = 5.00e-09

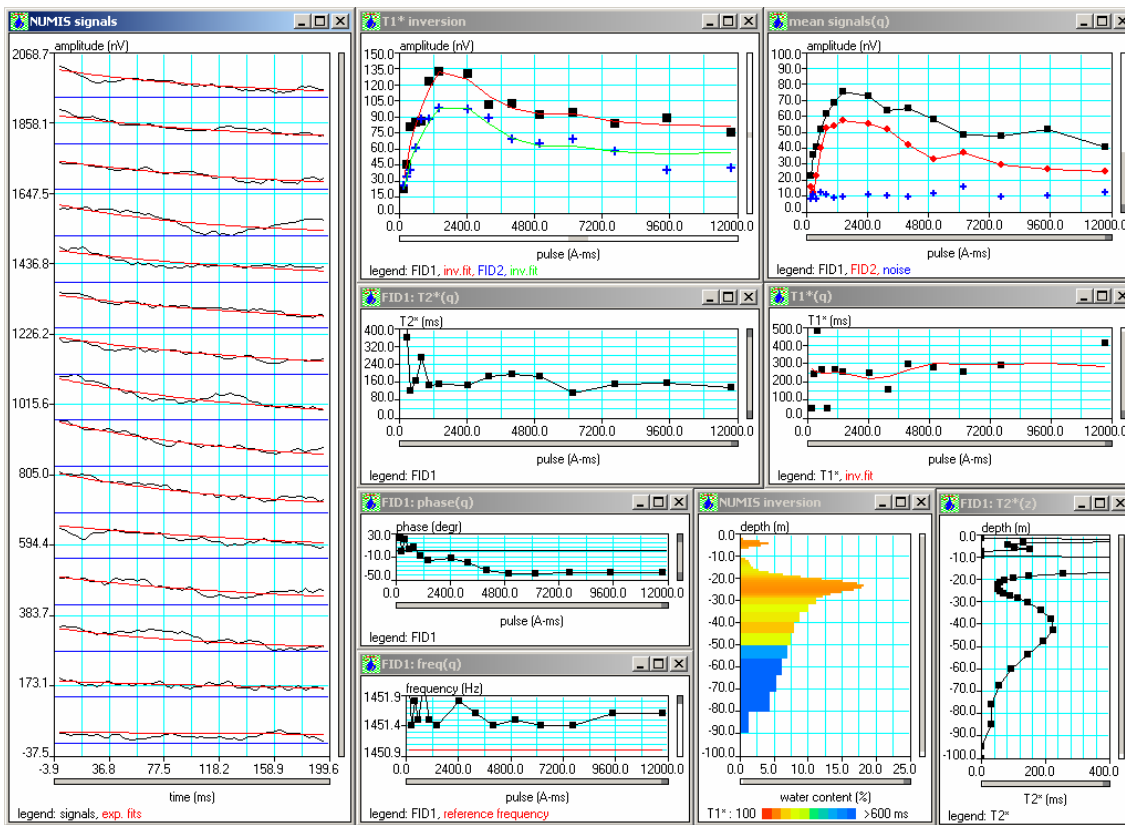


Site de Youloua

Site: Wankama P0 le 24-12-05
 Loop: 2 - 75.0 Date: 23.12.2005 Time: 10:38

NUMIS data set: C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\WP0\WP0.inp
 matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\WP0.mrm
 loop: square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 5 degr, magnitude= 34061.03 nT

filtering window = 198.5 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 5.12; EN/IN = 2.09
 fitting error: FID1 = 7.43%; FID2 = 10.93 %
 param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000
 permeability constant Cp = 5.00e-09

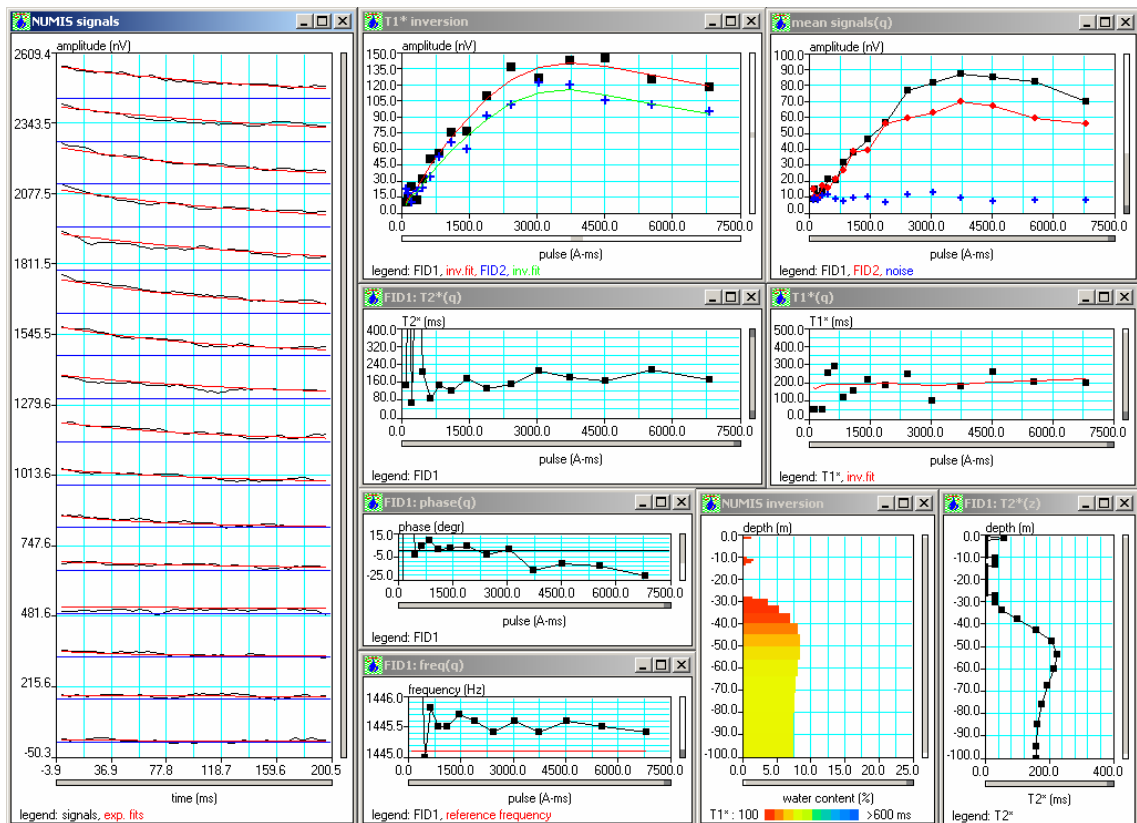


Site de Wankama P0

Site: SOURGOUROU (sondage de noel)
 Loop: 4 - 75.0 Date: 24.12.2005 Time: 10:36

NUMIS data set:
 C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Sourgou\SOURG.inp
 matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\sourgou.mrm
 loop: eight square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 5 degr, magnitude= 33922.54 nT

filtering window = 199.3 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 5.06; EN/IN = 1.84
 fitting error: FID1 = 7.20%; FID2 = 8.66 %
 param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000
 permeability constant Cp = 5.00e-09

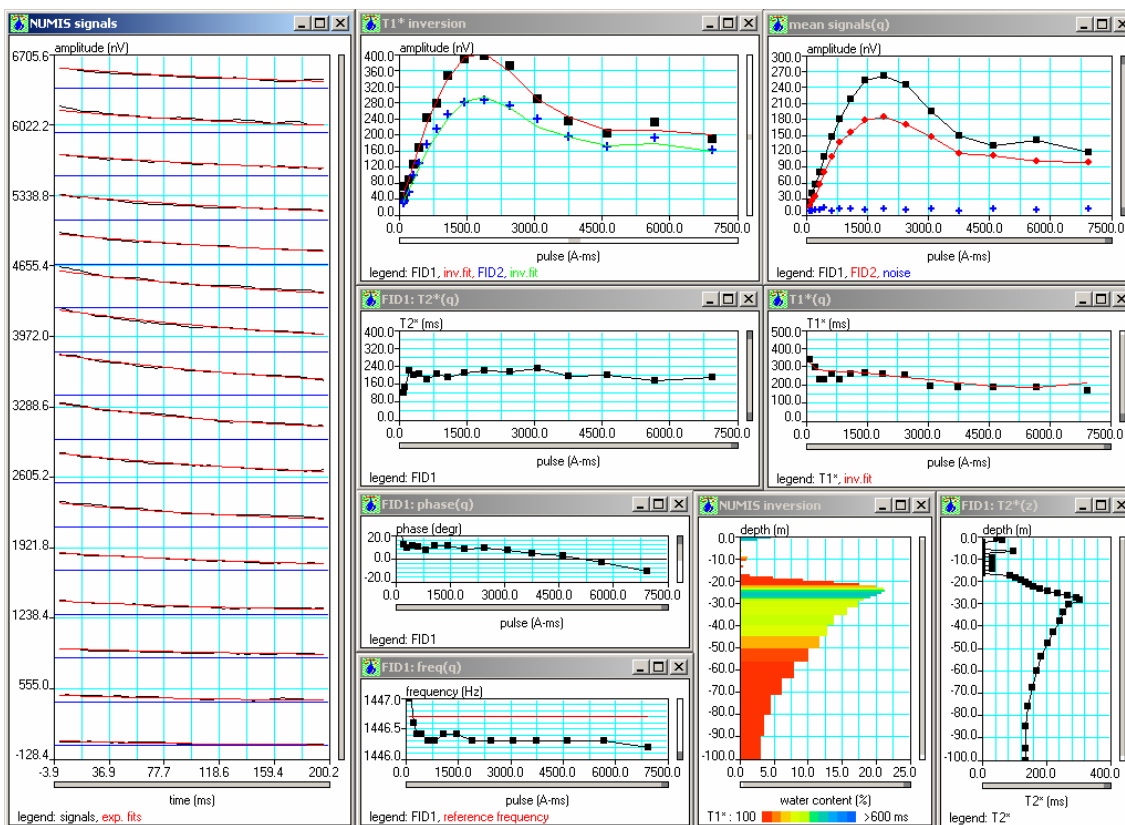


Site de Sourgourou

Site: Tigozeno (sondage de noel)
 Loop: 4 - 75.0 Date: 24.12.2005 Time: 15:31

NUMIS data set: C:\RMP\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Tigozeno\TIGO.inp
 matrix: C:\RMP\Niger\Matrix\Nouvelles\tigozeno.mrm
 loop: eight square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 5 degr, magnitude= 33960.09 nT

filtering window = 199.1 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 14.59; EN/IN = 2.01
 fitting error: FID1 = 3.61%; FID2 = 4.80 %
 param. of regular.: E, T2* = 100.0; T1* = 1.000
 permeability constant Cp = 5.00e-09



Site de Tigo Zeno

Site: Kizamou

Loop: 4 - 75.0 Date: 25.12.2005 Time: 14:49

NUMIS data set:

D:\Travail\data_Marie\Niger\Interprétation\inversion_auto40\Kizamou\KIZAMOU.inp

matrix: D:\Travail\data_Marie\Niger\Matrix\Nouvelles\kizamou.mrm

loop: eight square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 5 degr, magnitude= 33845.07 nT

filtering window = 199.8 ms

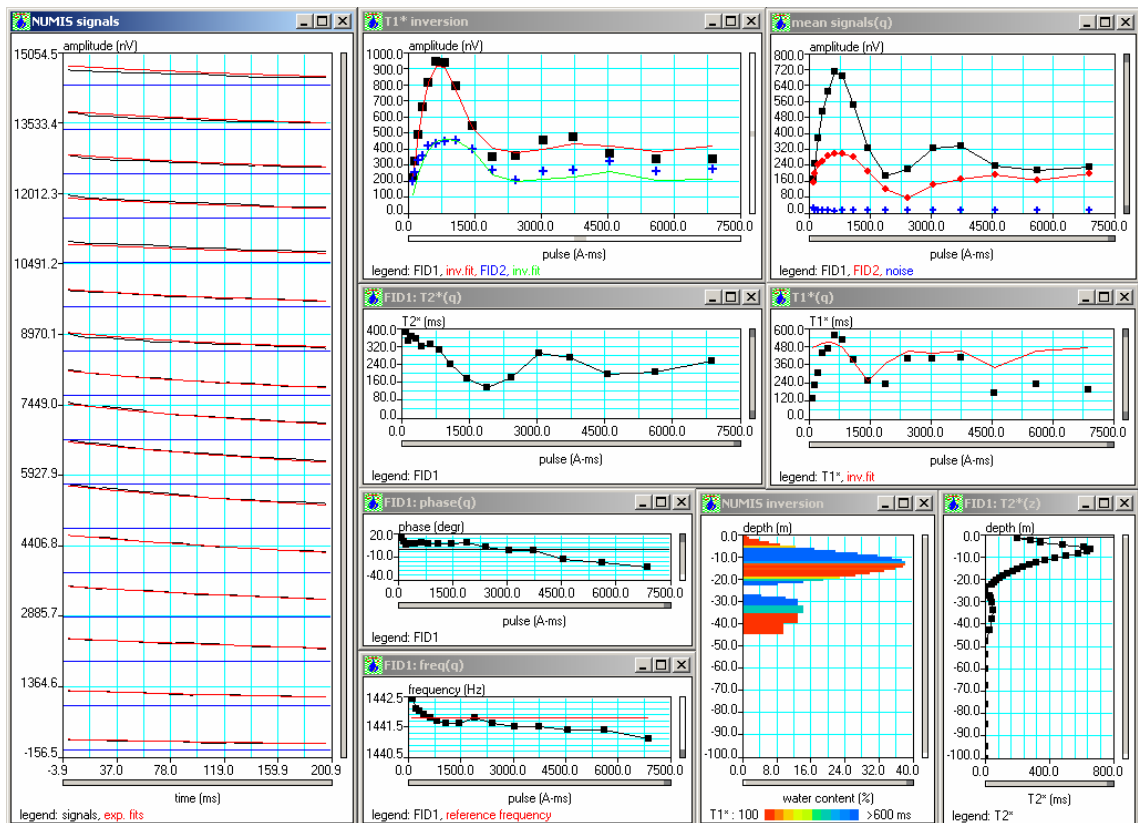
bandpass = 10.00 Hz

average S/N = 25.13; EN/IN = 2.94

fitting error: FID1 = 6.57%; FID2 = 14.79 %

param. of regular.: E, T2* = 1000.0; T1* = 2.623

permeability constant Cp = 7.00e-09



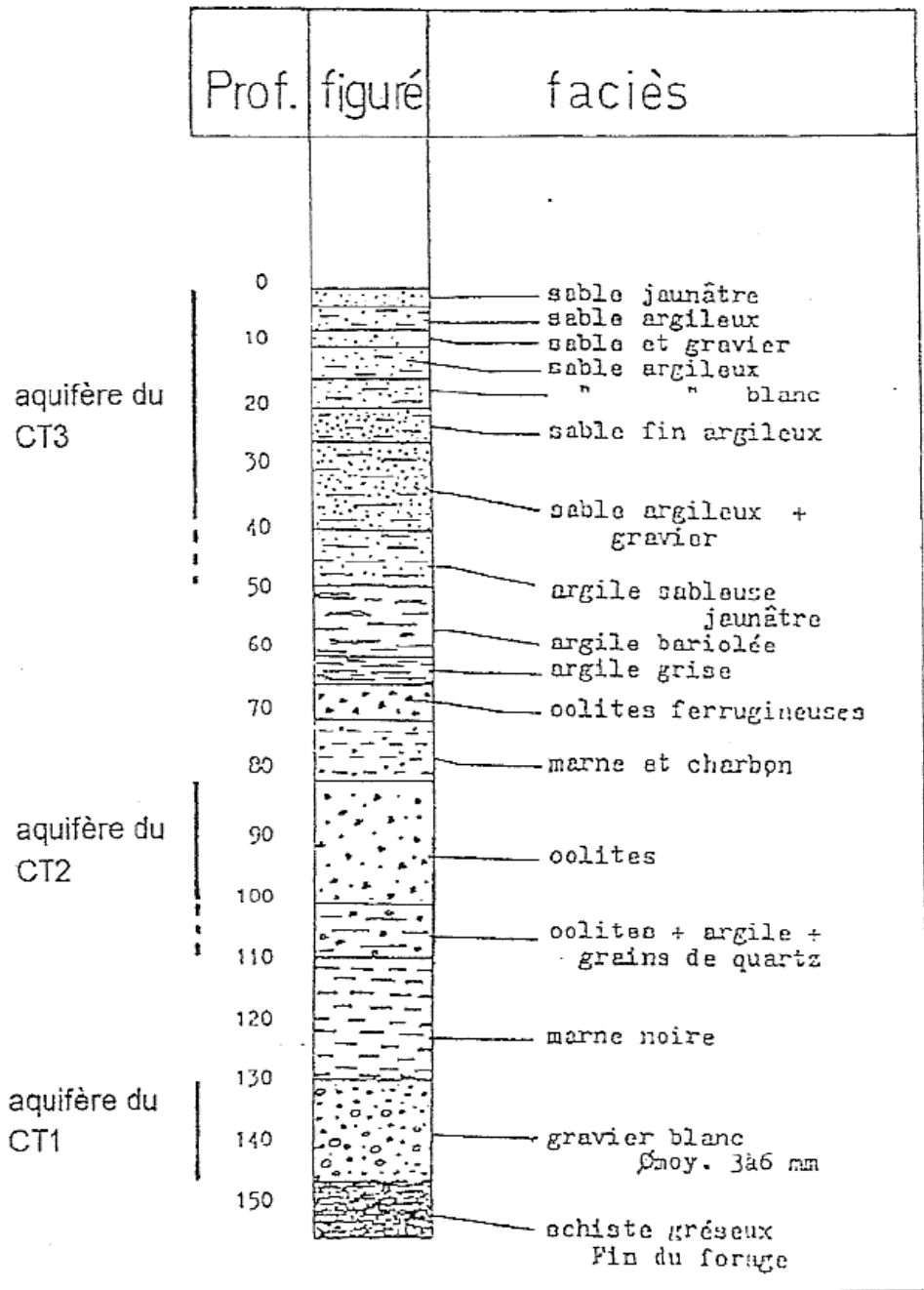
Site de Kizamou

Annexe 2

Résultat du sondage électrique

Annexe 3

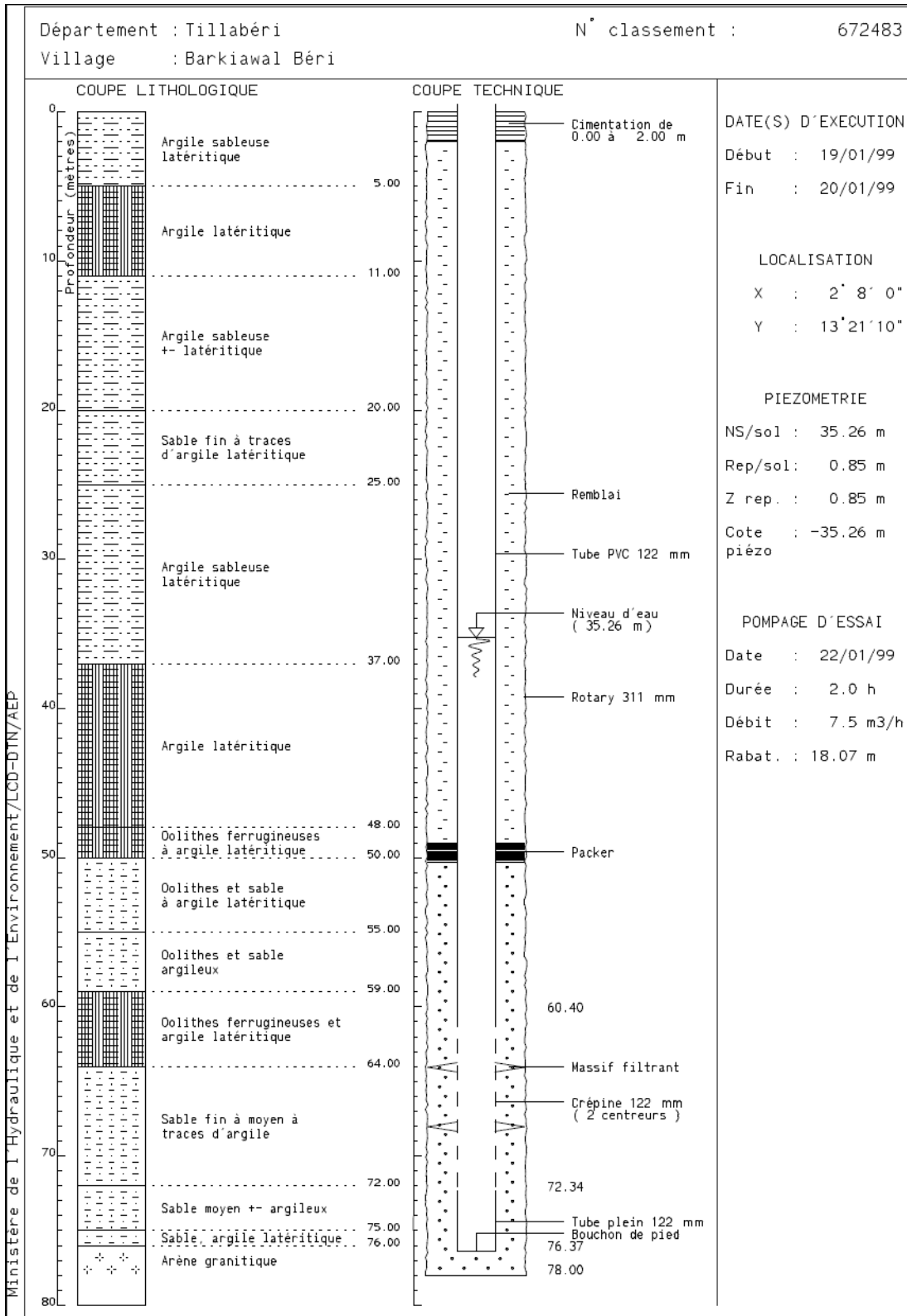
Logs géologiques

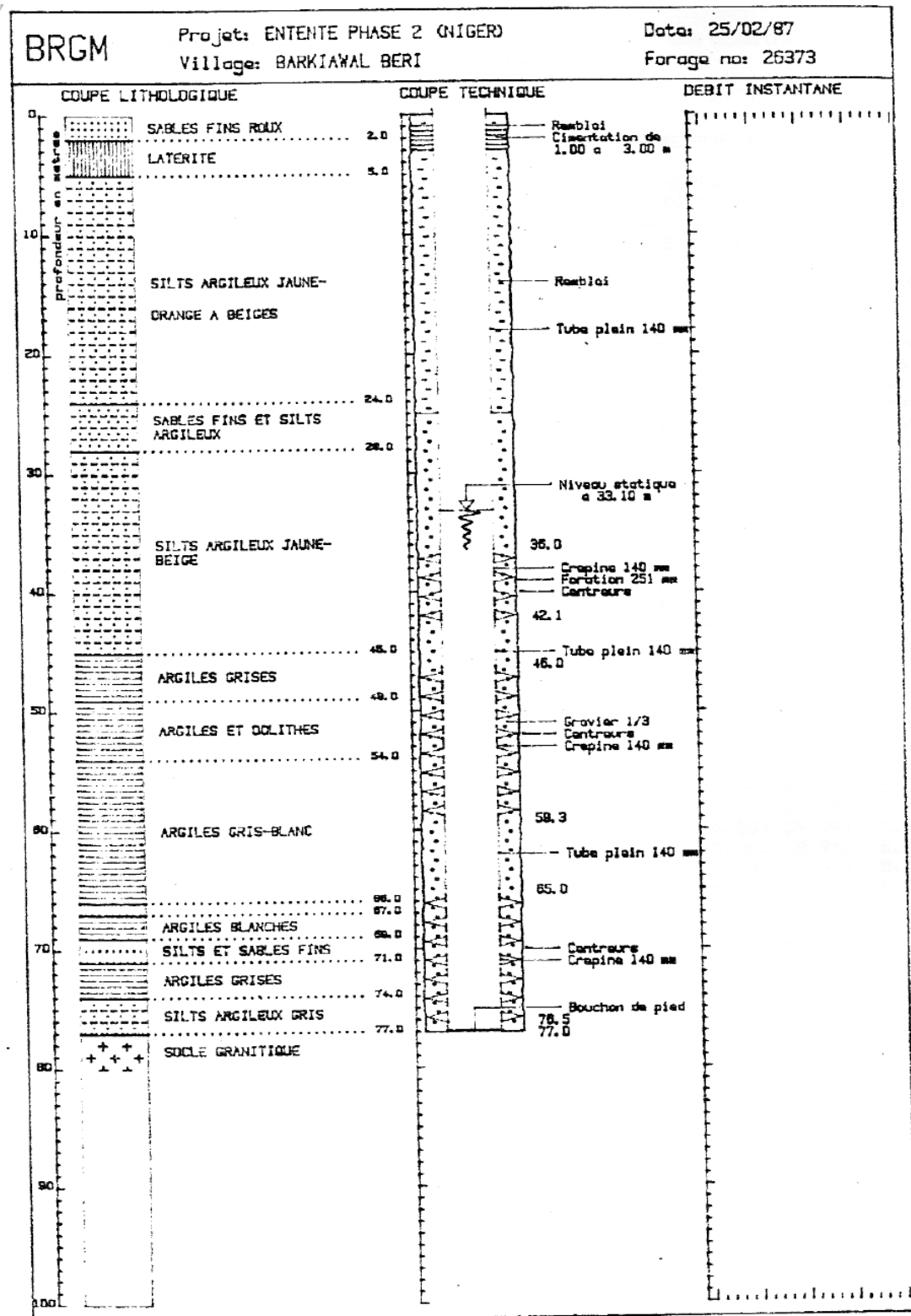


LOG STRATIGRAPHIQUE DU FORAGE DE WANKAMA

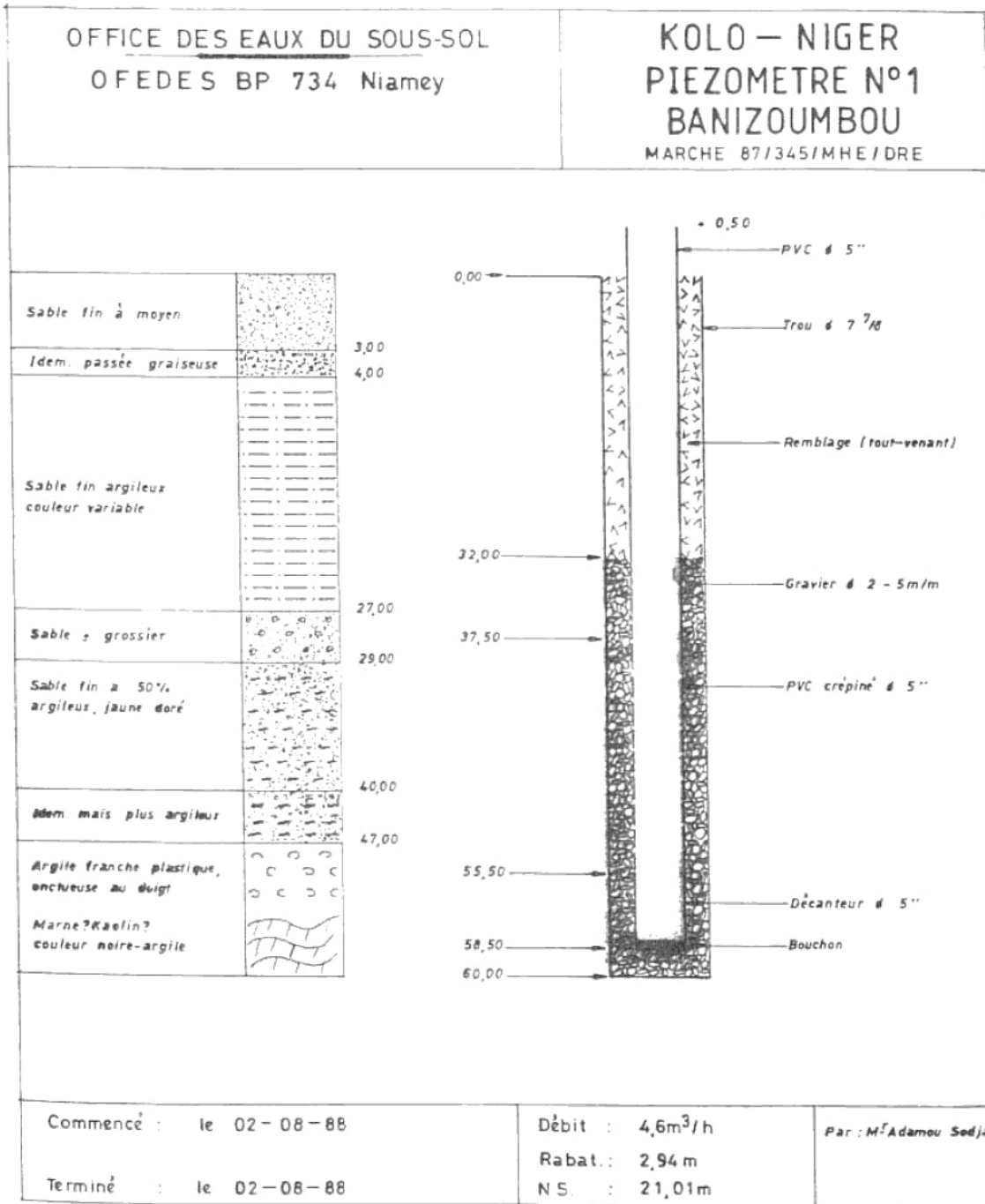
(in Le Gal La Salle, 1994)

Site de Wankama

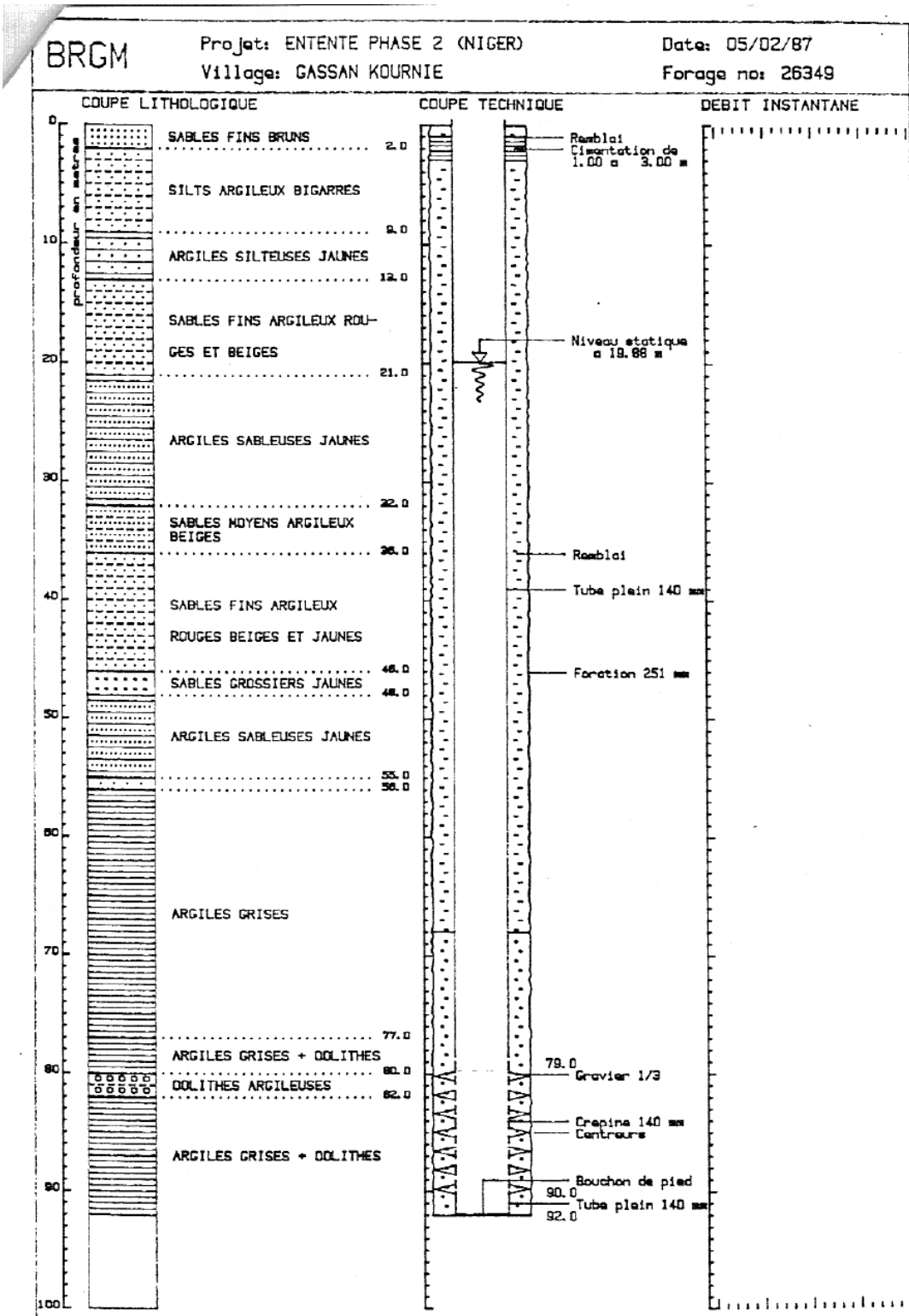




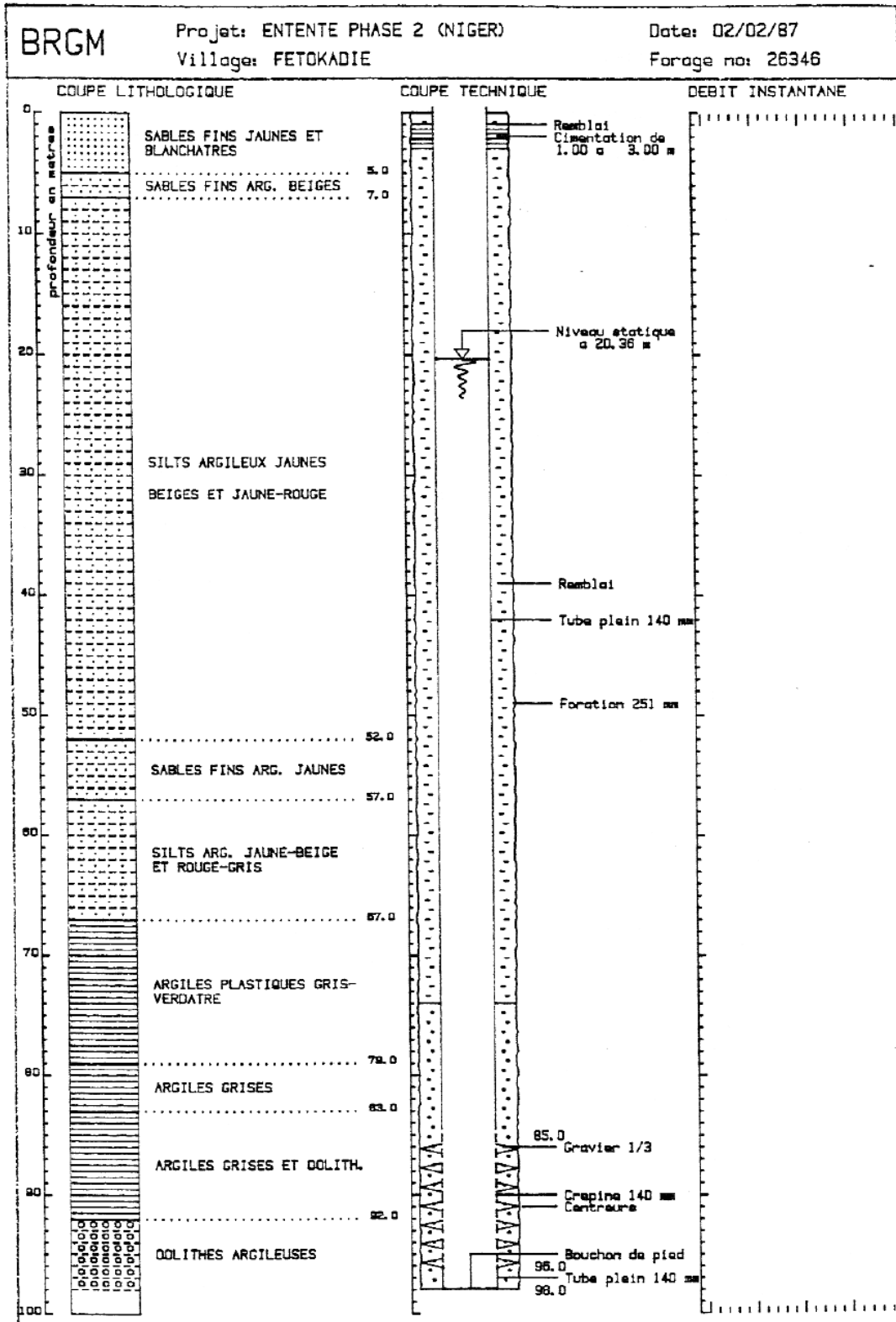
Site de Berkiawal

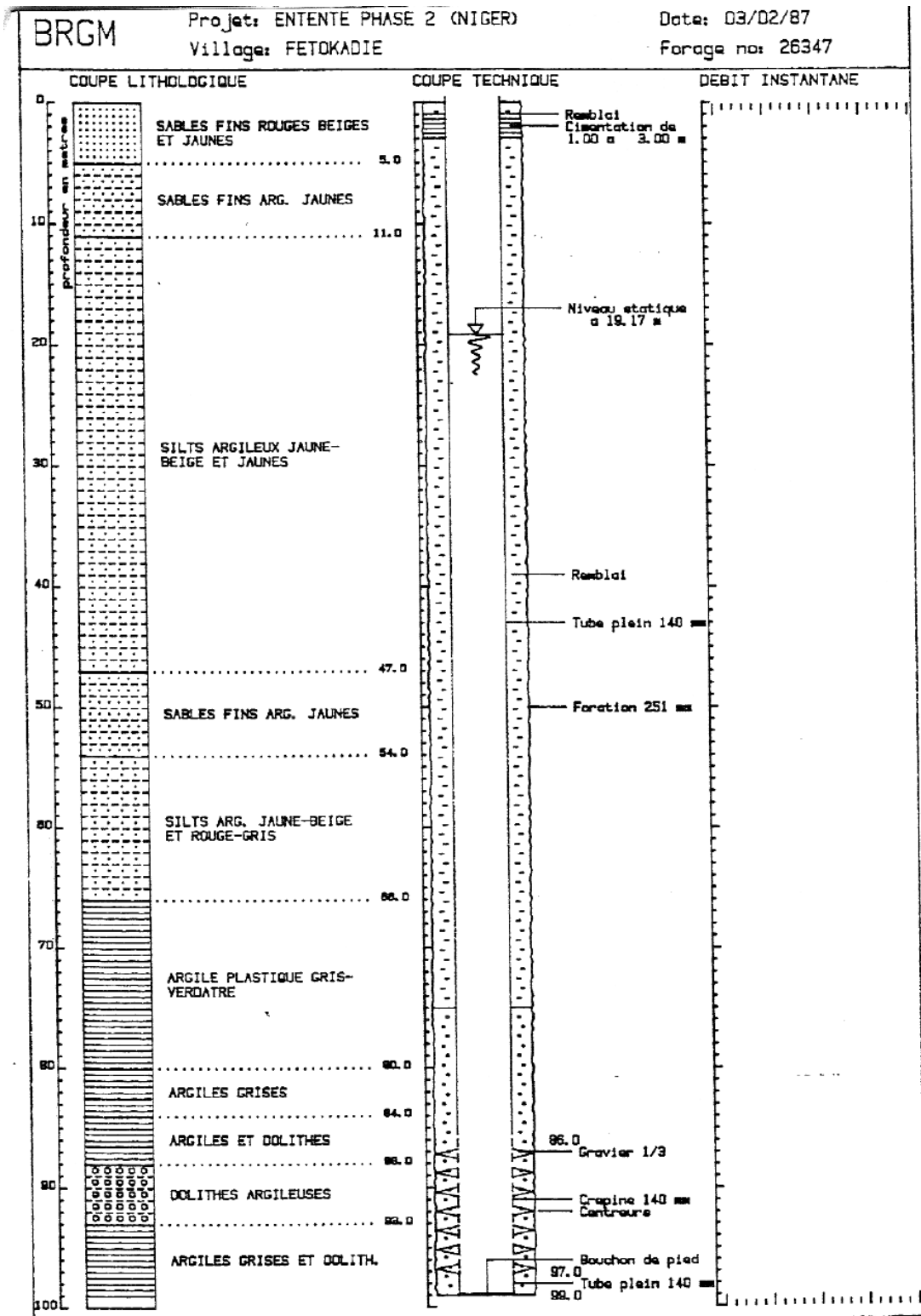


Site de Banizoumbou

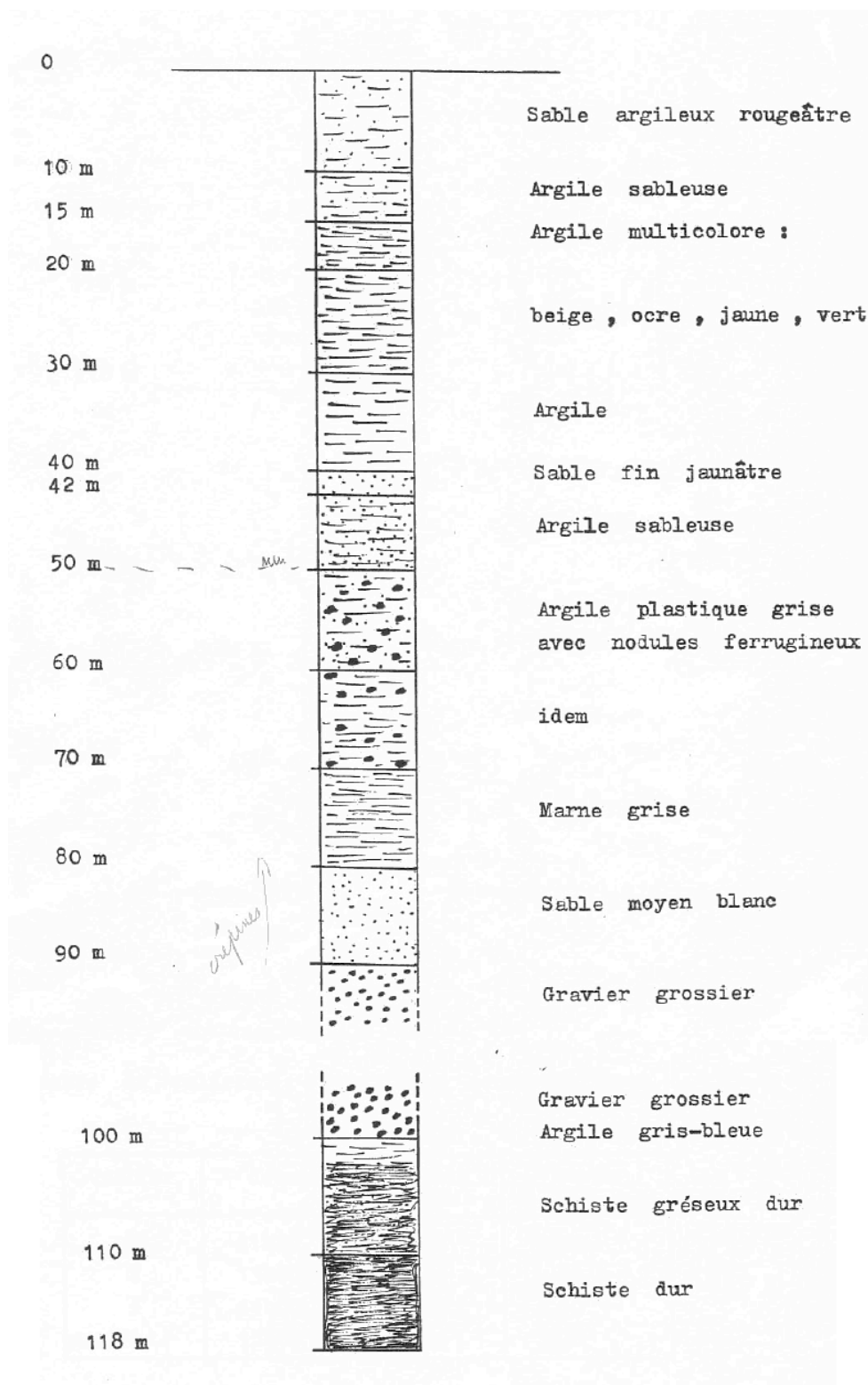


Site de Gassan Kournie

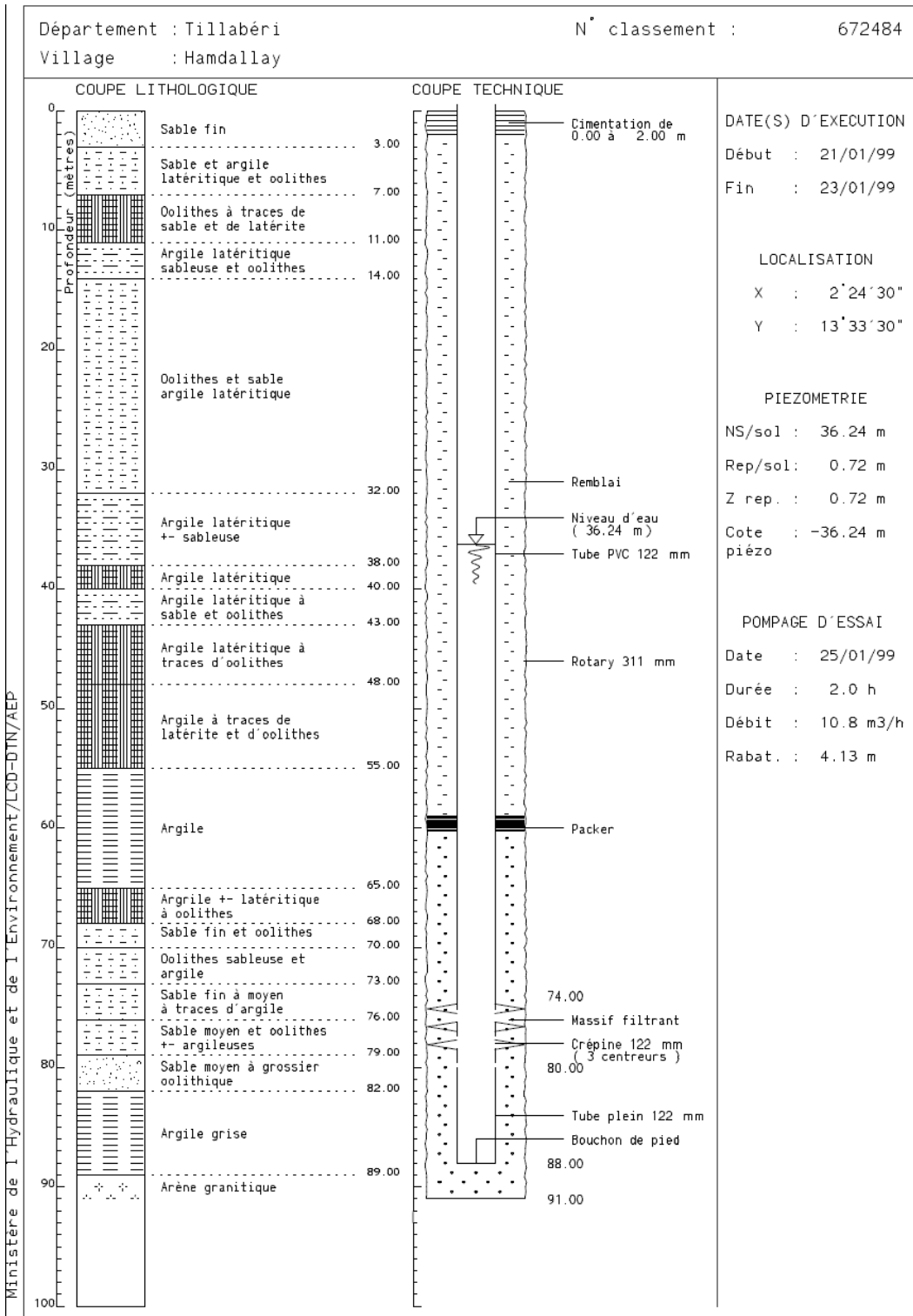




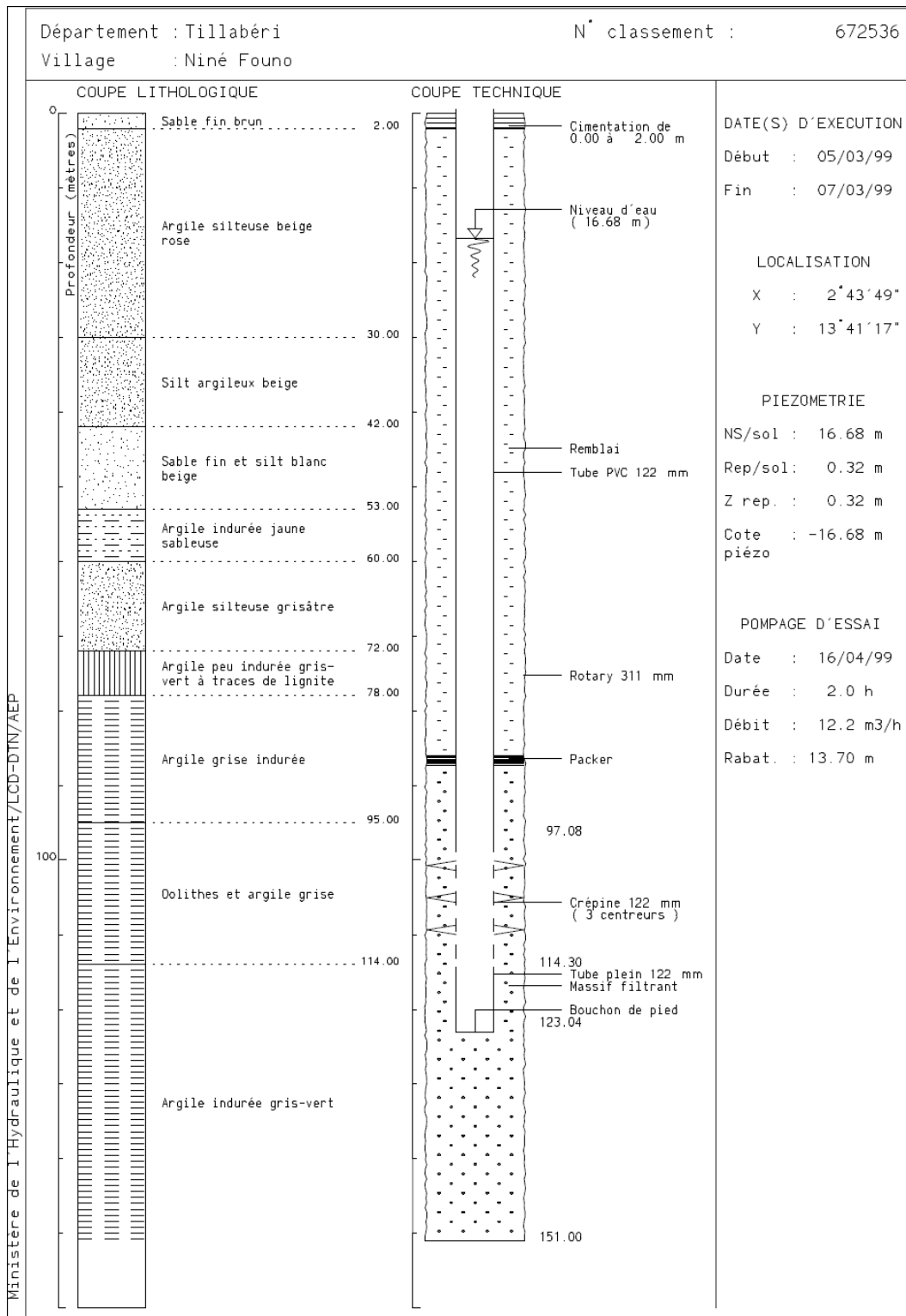
Site de Fetokadie



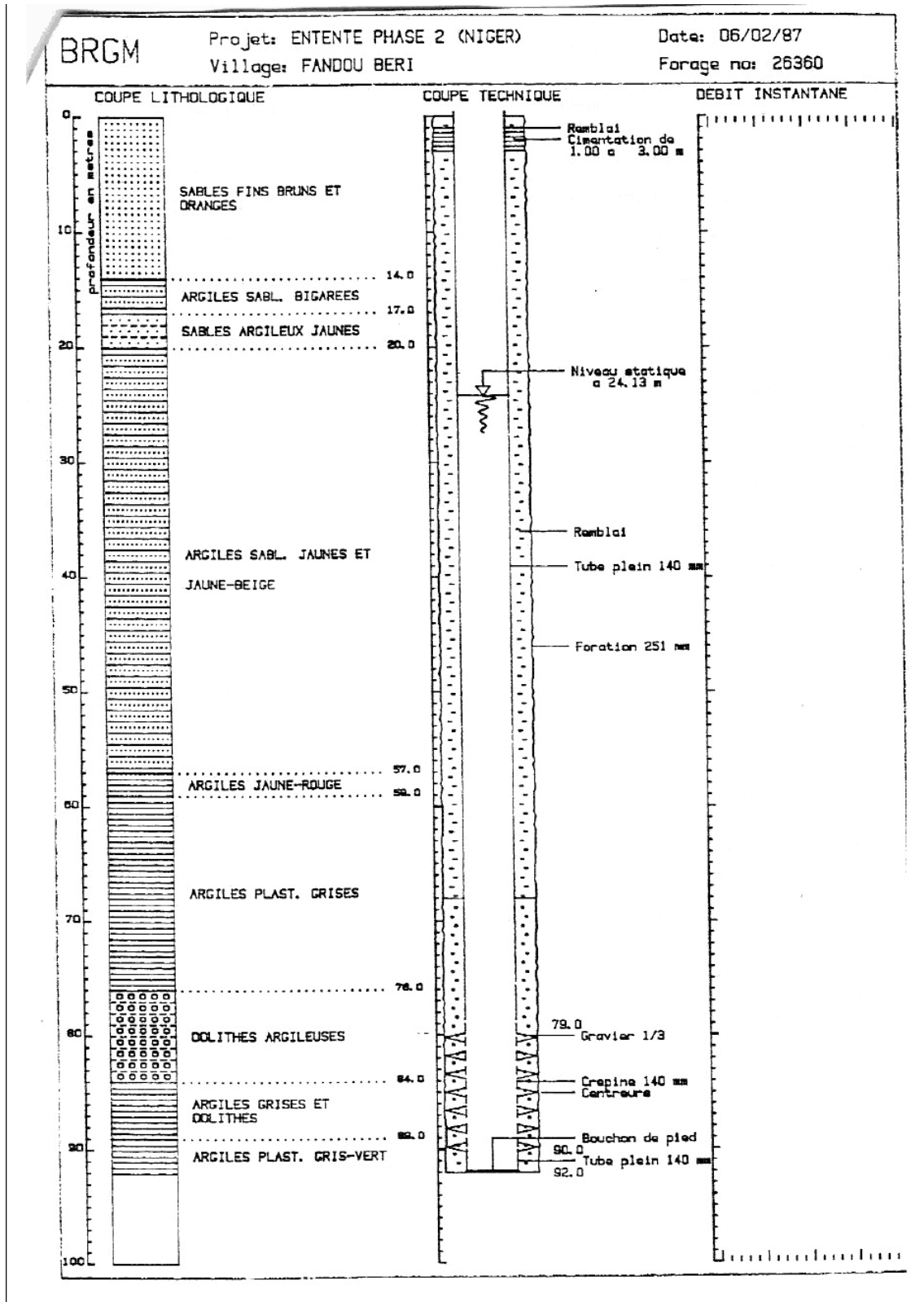
Caractérisation hydrogéologique de l'aquifère libre du CT3 au Niger par RMP



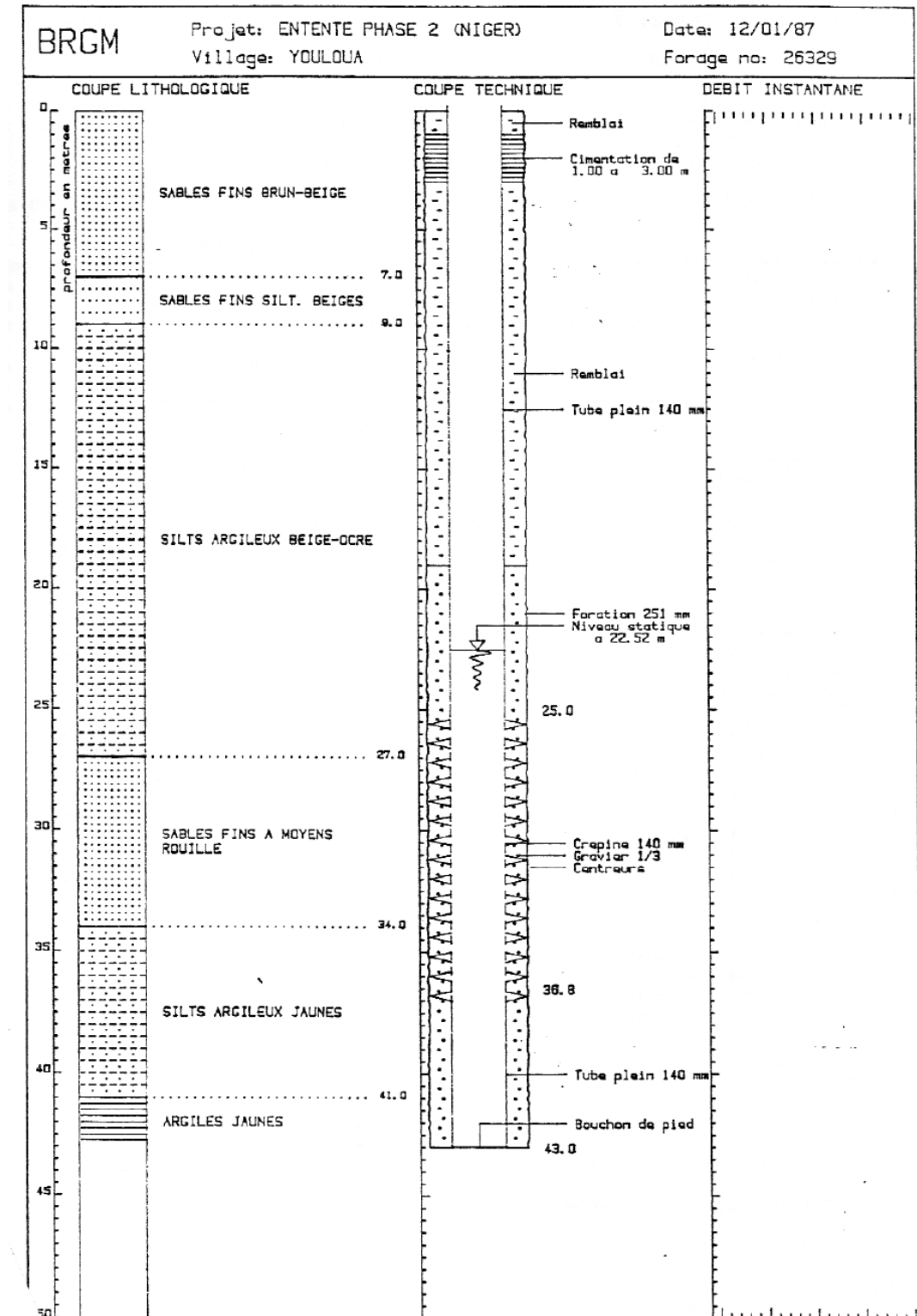
Site de Hamdallaye



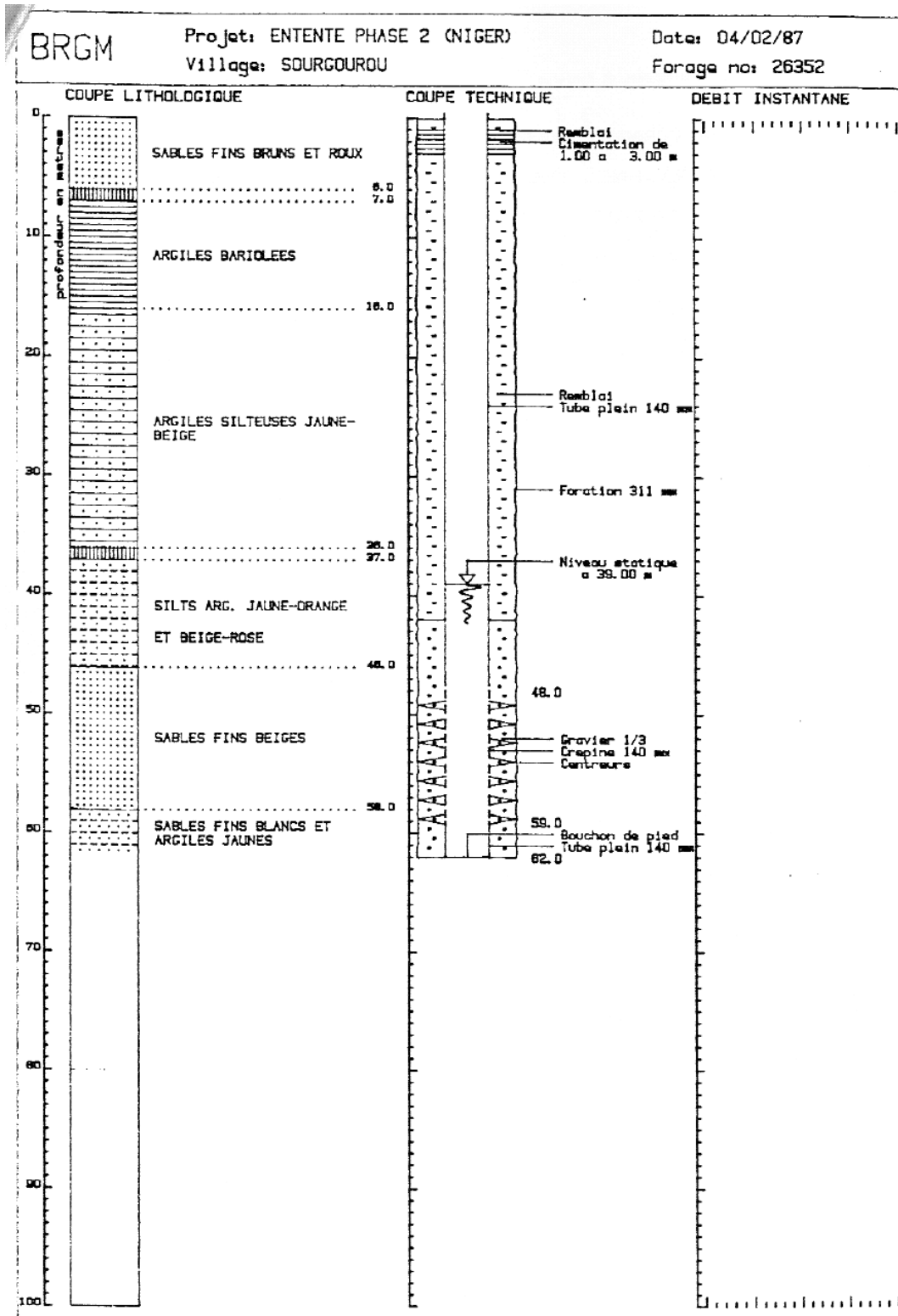
Site de Ninefouno

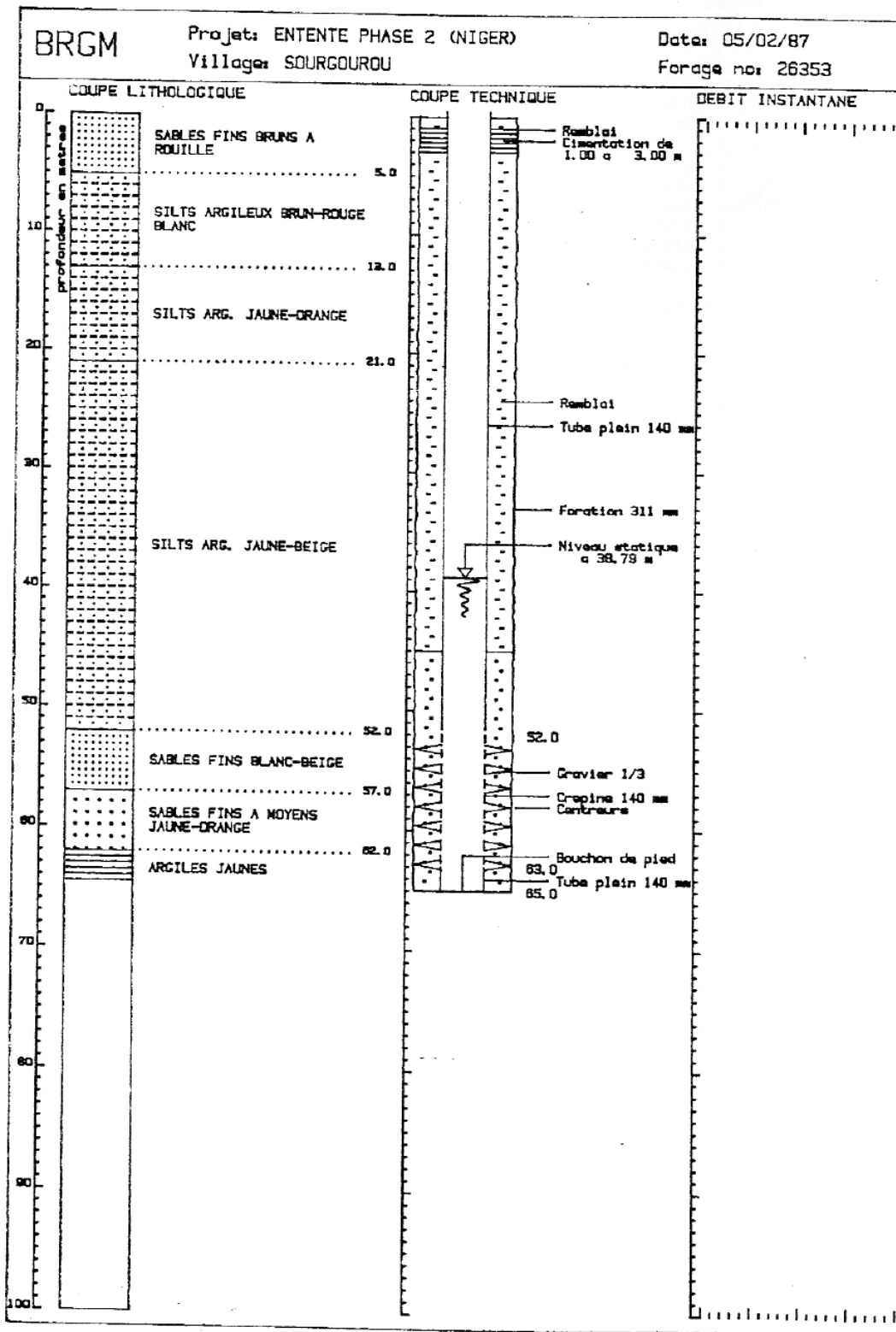


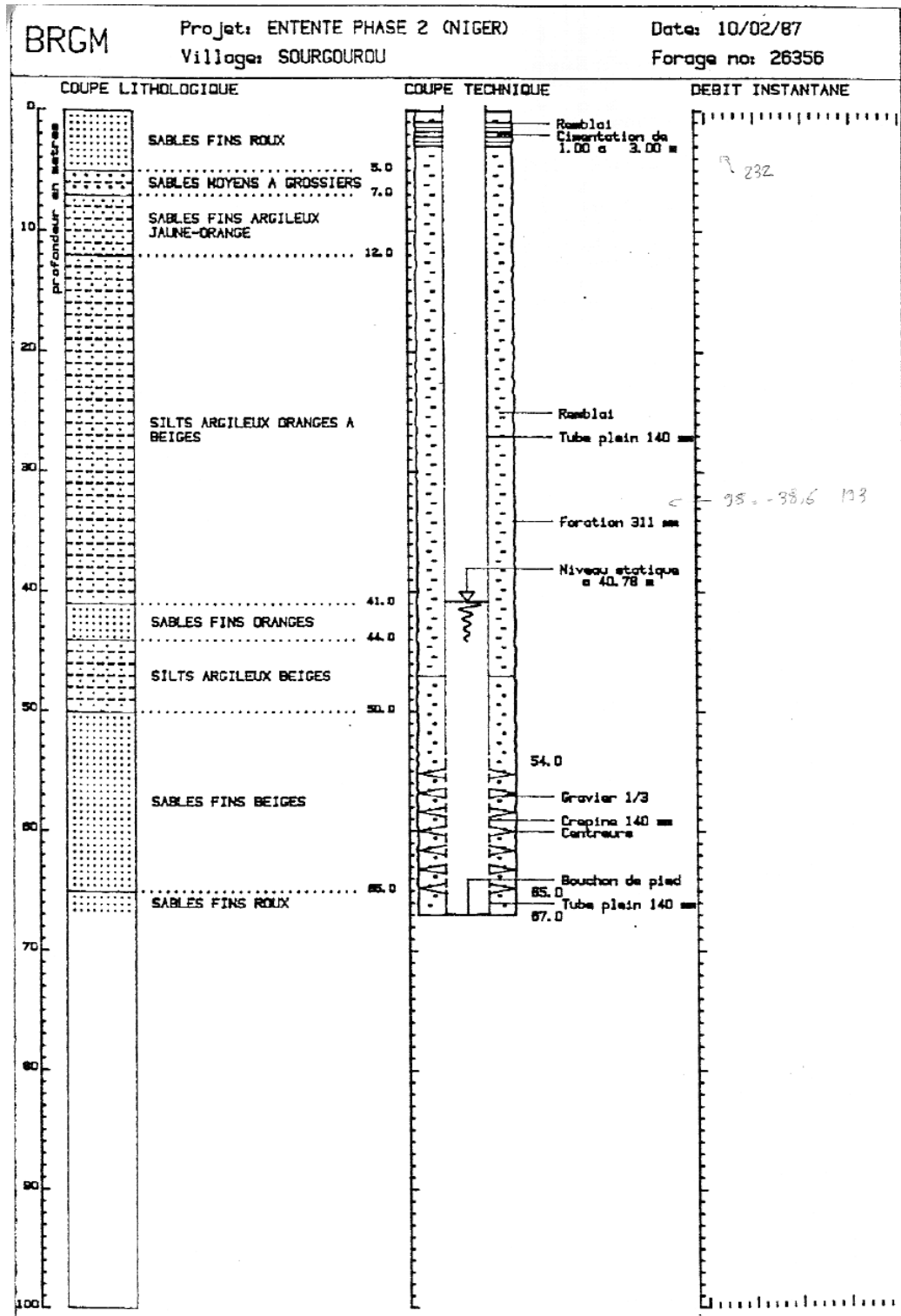
Site de Fandou Beri



Site de Youloua







Site de Sourgourou

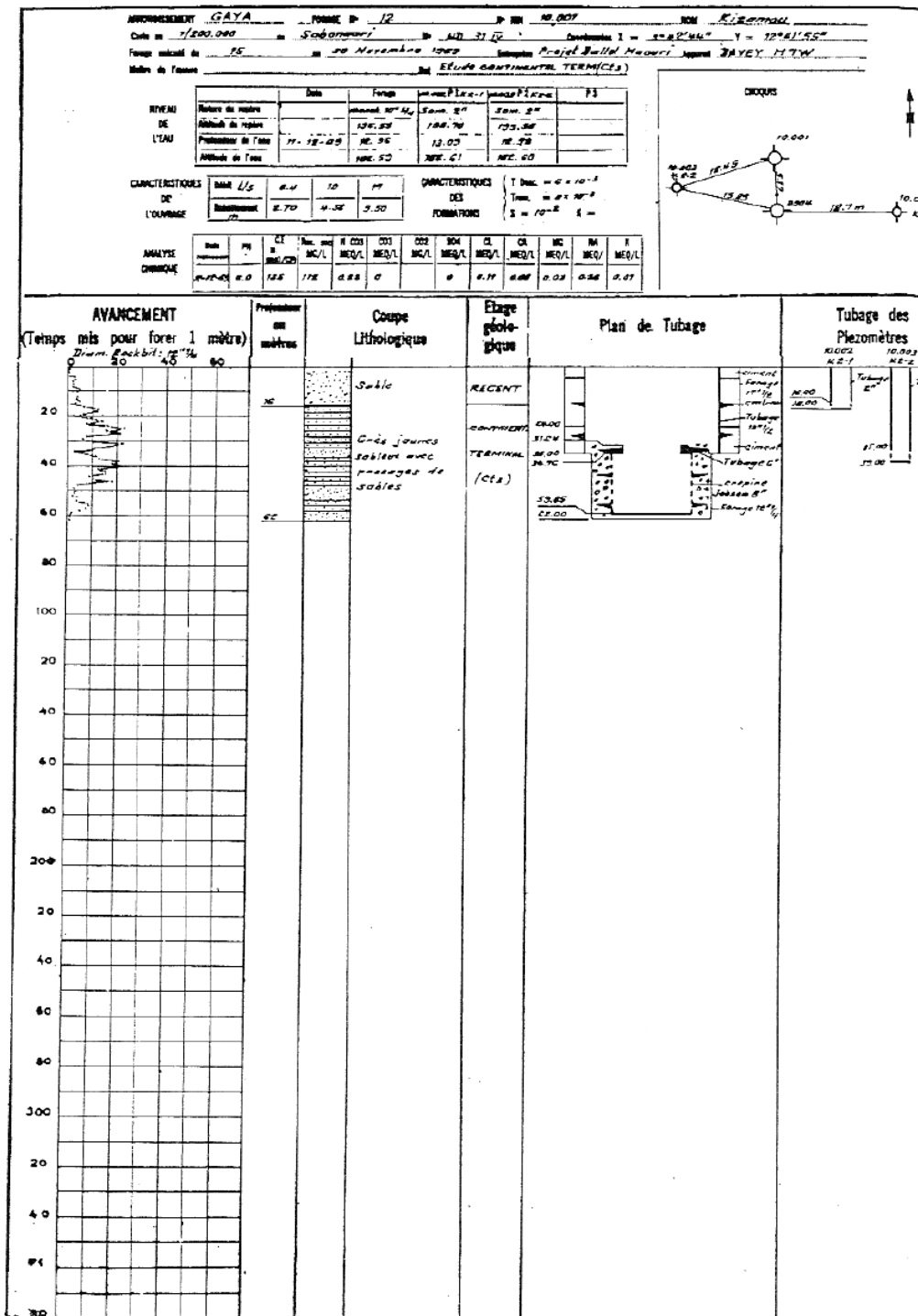
No. Tigo-Zeno Piezo N. confinée
 Date. Coupe géologique Page. INH. 27130

0 à 6m	Sable fin beige
6 à 12m	Sable fin à grossier rose
12 à 29m	Sable fin à nodules de latérite jaune
29 à 45m	Argile ^{sa base} blanchâtre
45 à 50m	Sable fin jaune
50 à 66m	Sables fins argileux rosâtres
66 à 109m	pas d'échantillon (le cutting ne remontait pas)
110 à 127m	Argile grise
127 à 132m	Argile franche noire charbonneuse
132 à 145m	Argile grise
145 à 150m	Argile franche noire charbonneuse
150 à 156m	Sable grossier beige
156 à 159m	Niveau ± argileux
159 à 169m	Gravier fin beige argileux

copie

copie

Site de Tigo Zeno



Annexe 4

Récapitulatif des mesures

site	Coordonnées		Caractéristiques de l'ouvrage			Caractéristiques RMP							
	N	E	Côte (m)	Hauteur margelle	Log géologique	Date de début	Heure de début et fin	Disatnce Centre de la boucle - Forage	Diff. altitude Boucle RMP - Ouvrage	Type de boucle	Bruit EM (nV)	Rapport signal/bruit	Suivi du champ mag.
Wankama P3	13°38'58"	2°38'48"	211,18 : P3	1.45 m	oui	11/12/2005	11:10 - 17:00	~ 60 m	0 m	carré 75 m	300-400	4.49	10:15 - 17:00
Berkiawal no 3	13°32'31"	2°18'35"	226,51 : Bark.no 3	0.3 m	oui	13/12/2005	09:40 - 16:40	?	3 m	huit carré 75 m	100-200	3.67	9:30 - 14:00
Banizoumbou	13°31'53"	2°39'31"	207,12 : P.DRE	0.5 m	oui	14/12/2005	11:05 - 13:40	?	0 m	huit carré 75 m	100-200	5.92	11:30 - 13:45
Gassan Kournie	13°29'48"	2°32'27"	227,79 : puits	0.25 m	oui	14/12/2005	16:00 - 22:30	100 - 150 m ?	4 m	huit carré 75 m	100-200	6.71	16:15 - 22:45 8:00 - 9:30
Winditen	13°45'24"	2°53'27"	205,97 : puits	0.48 m	non	15/12/2005	18:30 - 3:40 13:00 - 17:45	~ 90 m	0 m	huit carré 75 m carré 112,5 m	300-400 700-1000	10.87 4.40	13:00 - 00:30 6:00 - 8:30
Banikane	13°35'12"	2°37'29"	212,54 : P.dom. 210,82 : P.pasto.	0.50 m 0.20 m	non	16/12/2005	12:45 - 14:45 15:20 - 17:40	~ 10 et 75 m	1 m	huit carré 75 m	250-250 300-400	8.97 6.15	11:15 - 17:30
Fetokadie	13°27'47"	2°37'29"	233,74 : puits actuel	0.5 m	oui	18/12/2005	17:15 - 20:10	175 - 200 m	2 m	huit carré 75 m	170-250	3.52	14:15 - 20:08
Hamdallaye	13°33'18"	2°24'34"	inconnue	0.3 m	oui	19/12/2005	15:20 - 18:00	~ 1500 m	3 m	huit carré 75 m	200-280	3.95	15:00 - 18:30
Kafina	13°42'51"	2°43'59"	inconnue	0.5 m	non	21/12/2005	13:00 - 16:30	~ 10 m	-1 m	huit carré 75 m	200-230	4.78	17:39 - 23:00 7:00 - 16:25
Ninefouno	13°41'18"	2°43'53"	226,05 : puits actuel	0.5 m	oui	21/12/2005	18:30 - 5:20	< 50 m	0 m	huit carré 75 m	200-650	2.53	18:45 - 7:00
Banikossey	13°42'11"	2°41'48"	231,64 : puits	0.3 m	non	22/12/2005	15:40 - 18:40	~ ou < 20 m	-1 m	huit carré 75 m	200-250	6.67	14:50 - 18:20
Fandou Beri	13°32'04"	2°33'27"	219,47 : puits	0.7 m	oui	23/12/2005	11:05 - 13:15	< 100 m ?	3 m	huit carré 75 m	200-250	3.19	11:10 - 13:15
Youloua	13°32'19"	2°37'23"	212,53 : puits	0.24 m	oui	23/12/2005	16:10 - 18:40	100 - 125 m	0.5 m	huit carré 75 m	200-250	8.20	15:45 - 18:28
Wankama P0	13°38'59"	2°38'55"	207,21 : P0	2.7 m	oui	24/12/2005	10:55 - 13:13	~ 20 à 30 m	0.65 m	carré 75 m	~250	5.12	-
Sourgourou	13°22'34"	2°40'50"	225,20 : puits	0.3 m	oui	25/12/2005	10:50 - 12:55	?	?	huit carré 75 m	180-300	4.75	10:45 - 13:00
Tigo Zeno	13°28'02"	2°46'20"	inconnue	0.5 m	oui	25/12/2005	15:40 - 17:30	?	0.5 m	huit carré 75 m	180-250	14.59	15:40 - 17:30
Kizamou	12°41'54"	3°42'34"	195,6 : piézos	inconnue	oui	26/12/2005	15:00 - 16:45	~ 100 m	0 m	huit carré 75 m	180-250	26.61	13:30 - 16:55

Caractéristiques des sites de mesures

site	Données Hydrogéologiques										Résultats RMP									
	Géométrie de l'aquifère			Caractéristiques de l'eau		Paramètres de la modélisation		Interprétation des essais de pompages			Niveau statique (m)	NS min et max (m)	Teneur en eau (wrmp) (%)	Δ wrmp (%)	T2* (ms)	Δ T2* (ms)	T1 (ms)	Δ T1 (ms)	Transmissivité (m ² /s)	Trmp min et max (m ² /s)
	NS/boucle RMP	Epaisseur mouillée	Vitesse de hausse (cm/an)	Temp. (°C)	C.E. (μS/cm)	Transmissivité (m ² /s)	Coeff. d'emmaga-sinement	Transmissivité (T _{EP}) (m ² /s)	T _{EP} min et max (m ² /s)	Coeff. d'emmaga-sinement										
Wankama P3	18,2 ± 0,5 m	37 ± 2 m	+28	31.1	70	1.3E-03	8				21.5	17 26	13.8	2.8	190	20	300	70	7.2E-03	3.4E-03 1.3E-02
Berkiawal no 3	25,3 ± 1 m	17 ± 2 m	-	28 à 30	50 à 150			6.1E-04	2.0E-04 7.3E-04		21.0	17 25.5	5.4	1.8	150	10	260	130	9.8E-04	1.7E-04 2.9E-03
Banizoumbou	17,1 ± 0,5 m	29 ± 1 m	+21	31.5	200 à 500	4.4E-03	17	2.8E-03	1.5 E-04 1.6E-02	15	18.5	16 21	10.9	1.9	140	20	200	30	2.0E-03	1.2E-03 3.1E-03
Gassan Kournie	37,5 ± 1 m	20 ± 1 m	+12	30 à 32	30 à 100	4.6E-03	11				43.5	40 47.5	16.3	2.0	195	10	250	60	3.2E-03	1.6E-03 5.5E-03
Banikane	23,5 ± 0,5 m	24 ± 2 m	+21	30 à 32	75	1.5E-03	13	4.6E-03	1.5E-03 6.4E-03	0.99	22.5	21.5 24.5	17.0	2.8	220	40	290	50	5.4E-03	3.1E-03 8.7E-03
Fetokadie	42,0 ± 1 m	27 ± 1 m	+10	31 à 32	30 à 100	6.8E-05	2				44.5	39.5 52	10.5	2.6	140	20	220	50	2.2E-03	9.8E-04 4.1E-03
Hamdallaye	14,5 ± 1 m	23 ± 2 m	+16	28 à 30	300 à 500	1.5E-04	10	1.9E-03	3.2E-04 4.2E-03		14.0	10.5 15.5	11.1	3.0	100	10	200	40	1.6E-03	7.6E-04 2.9E-03
Kafina	46,4 ± 0,5 m	55 ± 2 m	+24	31 à 33	160	1.1E-03	2	2.6E-04			49.0	41	10.2	2.4	220	20	290	80	7.4E-03	3.0E-03 1.5E-02
Ninefouno	31,0 ± 0,5 m	51 ± 2 m	+22	30 à 32	300 à 500	1.6E-03	5				34.0	27.5 42.5	11.2	3.1	120	20	230	110	4.8E-03	9.3E-04 1.3E-02
Banikossey	37,0 ± 0,5 m	46 ± 2 m	+29	31 à 33	30 à 100	2.8E-02	24				39.5	34.5 43	16.1	3.2	230	20	190	50	4.2E-03	1.8E-03 8.0E-03
Fandou Beri	28,6 ± 1 m	20 ± 1 m	+15	30 à 32	50 à 200	1.3E-03	5.5				27.5	25.5 31.5	7.6	1.6	150	20	100	50	2.4E-04	4.7E-05 6.6E-04
Youloua	24,1 ± 0,5 m	25 ± 2 m	+17	29 à 32	50 à 100	3.8E-03	17	6.1E-03	6.1E-03 6.7E-03		25.5	23.5 27	19.7	2.8	235	5	300	50	7.0E-03	4.2E-03 1.1E-02
Wankama P0	13,0 ± 0,5 m	37 ± 2 m	+28	28.5	100	1.3E-03	8	2.6E-03	1.9E-03 3.0E-03		17.5	14.5 20	12.0	1.8	150	10	220	60	3.4E-03	1.5E-03 6.3E-03
Sourgourou	30,4 ± 1 m	36 ± 2 m	+14	30 à 32	50 à 100	1.3E-04	40	4.5E-03	3.8E-03 5.2 E-03		36.5	33 41	13.2	2.7	170	30	210	50	3.3E-03	1.5E-03 6.1E-03
Tigo Zeno	21,0 ± 0,5 m	50 ± 2 m	+10	29 à 32	50 à 200	1.7E-02	14				18.5	17.5 19	16.9	0.8	210	10	230	20	7.1E-03	5.6E-03 8.7E-03
Kizamou qnt	10,0 ± 2 m	60 ± 2 m		28 à 30	100 à 300			1.4E-02	1.0E-02 2.0E-02	20	7.0		43.0	5.4	300		700	200	2.0E-02	8.9E-03 3.7E-02
CT3								6.9E-03	6.0E-03 8.0E-03	1.2	13.0		15.6	3.2	240		350	100	1.6E-02	6.6E-03 3.2E-02

Récapitulatifs des résultats