



Institut de recherche
pour le développement

DOCUMENT PUBLIC

*Caractérisation hydrodynamique
du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)
avec la méthode de Résonance Magnétique Protonique*

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche 2000-MET-D01 et 2001-PNR-H22

novembre 2001
BRGM/RP-51330-FR





Institut de recherche
pour le développement

DOCUMENT PUBLIC

*Caractérisation hydrodynamique
du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)
avec la méthode de Résonance Magnétique Protonique*

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche 2000 – MET-DO1 et 2001-PNR-H22

A. Legchenko

novembre 2001
BRGM/RP-51330-FR



Mots clés : Géophysique, Hydrogéologie, Résonance Magnétique Protonique.

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

Legchenko A. (2001) – Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne) avec la méthode de Résonance Magnétique Protonique. BRGM/RP-51330-FR, 53 p., 21 fig., 2 tabl., 1 ann.

© BRGM, 2001, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre des projets de recherche du BRGM (16436/00-MET-D01-RMP) et du PNRH (01-PNR-H22 : « Visualisation et caractérisation du contenu en eau du proche sous-sol par application conjointe de quatre méthodes géophysiques non destructives ») une étude géophysique a été réalisée par le BRGM et l'IRD dans le bassin versant de Kerbernez (la région de Quimper, Bretagne). L'objectif de cette étude était de caractériser les aquifères et d'établir la superficie du bassin versant.

Les aquifères recherchés sont composés de granite fracturé recouvert par une zone d'altération d'épaisseur variable. La perméabilité hydraulique de cette zone est aussi variable.

Ce rapport présente les résultats obtenus par la méthode de Résonance Magnétique Protonique (RMP). Au total 11 sondages RMP ont été réalisés qui couvrent une zone de 500 × 700 m environ. Les principaux résultats fournis par la RMP sont :

- trois sections RMP traversent le bassin versant de Kerbernez et visualisent la distribution verticale de la teneur en eau et de la perméabilité hydraulique estimées par RMP. Cette information renseigne sur la géométrie des aquifères ;
- la profondeur du toit de nappe estimée par la RMP a permis d'établir une carte d'élévation du toit de nappe dans le secteur étudié. Sur cette base, la surface du bassin versant a été établie ;
- les cartes d'épaisseur de la nappe et du volume d'eau libre calculés à partir des données RMP ont mis en évidence des zones principales de stockage d'eau dans le bassin ;
- les mesures RMP ont permis également d'établir une carte de distribution de transmissivité.

Les résultats obtenus ont mis en évidence des variations importantes d'épaisseur et de perméabilité de l'aquifère dans la zone d'étude. Des zones du stockage principal de l'eau et de transmissivité plus élevée ont été localisées.

L'interprétation préliminaire des données géophysiques présentée dans ce rapport tient compte uniquement de l'information fournie par la méthode RMP. Il est également prévu que l'interprétation finale sera effectuée avec une prise en considération des autres résultats géophysiques obtenus au cours du projet.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Méthodes et moyens	11
2.1. La résonance magnétique protonique (RMP)	11
2.1.1. Principe de la méthode.....	11
2.1.2. L'équipement « NUMIS ».....	12
2.1.3. Le sondage RMP.....	14
2.1.4. Interprétation des données	15
2.1.5. Présentation des résultats d'un sondage fournis par le système « NUMIS ».....	19
2.2. Moyens mis en œuvre	20
2.2.1. Personnel.....	20
2.2.2. Équipement	20
3. Travaux réalisés	21
4. Résultats et discussion	25
5. Conclusions	37
6. Bibliographie	39
ANNEXE	
Ann. 1 - Résultats RMP	41

Liste des figures

Fig. 1 – Principe de mesure RMP	12
Fig. 2 – Schéma fonctionnel du dispositif instrumental	13
Fig. 3 – Équipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS ^{PLUS} » sur site	13
Fig. 4 – Schéma en fonction du temps d’une séquence émission/réception	14
Fig. 5 – Résultats d’inversion des données théoriques	16
Fig. 6 – Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie	18
Fig. 7 – Exemple de résultats fournis par l’appareillage « NUMIS »	19
Fig. 8 – Plan de position de la zone d’étude	21
Fig. 9 – Plan de position des sondages RMP dans le bassin versant de Kerbernez	22
Fig. 10 – Plan de position des piézomètres dans le bassin versant de Kerbernez	23
Fig. 11 – Carte d’altitude des sondages et de la localisation des sections RMP	25
Fig. 12 – Correspondance entre les valeurs de $T1^*$ et de $T2^*$	27
Fig. 13 – Carte d’altitudes du toit de la nappe estimée par la RMP	28
Fig. 14 – Carte d’altitudes du niveau piézométrique	29
Fig. 15 – Carte de transmissivité d’aquifère estimée par la RMP	30
Fig. 16 – Carte de volume de l’eau libre par mètre carré estimé par la RMP	31
Fig. 17 – Carte d’épaisseur de la nappe estimée par la RMP	32
Fig. 18 – Carte de teneur en eau moyenne estimée par la RMP	33
Fig. 19 – Résultats RMP : profil 1	34
Fig. 20 – Résultats RMP : profil 2	35
Fig. 21 – Résultats RMP : profil 3	36

Liste des tableaux

Tabl. 1 – Paramètres du modèle.....	17
Tabl. 2 – Principaux résultats RMP.....	26

1. Introduction

Dans le cadre des projets de recherche du BRGM (16436/00-MET-D01-RMP) et du PNRH (01PNR H22 : « Visualisation et caractérisation du contenu en eau du proche sous-sol par application conjointe de quatre méthodes géophysiques non destructives ») une étude géophysique a été réalisée par le BRGM et l'IRD dans le bassin versant de Kerbernez (la région de Quimper, Bretagne).

L'objectif de ce travail est de déterminer la superficie du bassin versant de Kerbernez, la géométrie de la nappe aquifère et de mettre en évidence les variations de ses caractéristiques hydrodynamiques.

Les aquifères recherchés sont composés de granite fracturé recouvert par une zone d'altération d'épaisseur variable. La perméabilité hydraulique de cette nappe est aussi variable. Dans ce contexte, la géophysique pourrait apporter les éléments importants pour la meilleure compréhension de fonctionnement de ce système hydrogéologique.

Compte tenu que dans le contexte géologique donné le contraste de résistivité des roches n'est pas lié d'une façon simple et unique avec de l'eau souterraine, les méthodes géophysiques comme les méthodes électromagnétiques ou électriques appliquées aux études hydrogéologiques demandent impérativement de l'information supplémentaire pour l'interprétation des données.

Les résultats fournis par la méthode de Résonance Magnétique Protonique (RMP) sont directement liés à l'eau, et donc l'interprétation hydrogéologique des données ne nécessite pas d'information supplémentaire sur des aquifères (bien sûr, quand disponible, cette information peut encore améliorer la précision des résultats). Mais, les résultats RMP sont moyennés par la surface de la boucle (70 × 150 m environ) et seule l'interprétation 1D des données est actuellement disponible. Pour cette raison, appliquée aux études des systèmes 2D/3D la RMP n'a pas toujours la résolution latérale suffisante pour bien résoudre la géométrie des aquifères.

Pour bien utiliser des avantages des méthodes géophysiques différentes et donc d'améliorer les résultats de l'étude, l'application conjointe des méthodes de RMP et de panneau électrique qui a une bonne résolution dans le milieu de 2D a été proposée.

L'étude a été conduite près du lycée de l'horticulture et du paysage de Kerbernez, situé à environ 5 km au sud de Quimper en rive droite de la rivière Odet. Le site présente un ensemble de bassins versants expérimentaux, contigus ou emboîtés, suivis par l'INRA.

Avec l'équipement RMP NUMIS^{PLUS} fabriqué par IRIS-Instruments, 11 sondages RMP ont été réalisés, répartis sur le site d'étude.

Les résultats des sondages RMP sont présentés dans l'annexe.

L'interprétation préliminaire des données géophysiques présentée dans ce rapport tient compte uniquement de l'information fournie par la méthode RMP. Il est également prévu que l'interprétation finale sera effectuée avec une prise en considération des autres résultats géophysiques obtenus dans le cadre du projet.

2. Méthodes et moyens

2.1. LA RÉSONANCE MAGNÉTIQUE PROTONIQUE (RMP)

Les méthodes géophysiques traditionnelles d'exploration se fondent sur l'analyse d'anomalies de structures ou de paramètres physiques qui sont liés à différents facteurs qui ne sont pas eux-mêmes 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 d'un sondage de Résonance Magnétique Protonique (RMP) est directement liée à l'eau contenue dans le sous-sol.

Dans le cadre d'un accord de collaboration entre ICKC (Russie) et le BRGM, un équipement, nommé « NUMIS », fondé sur ce principe a été développé par IRIS Instruments et commercialisé début 1997.

2.1.1. Principe de la méthode

Schématiquement le principe physique de la RMP repose sur le fait que les noyaux d'hydrogène placés dans un champ magnétique H_0 (tel que celui de la terre ou artificiel), possèdent des moments magnétiques qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal H_0 (fig. 1).

L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre naturel et provoque une précession de ces moments autour de la direction du champ magnétique naturel. Après coupure du champ excitateur, et en retour à l'état d'équilibre initial, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons et mesuré en surface, constituant ainsi la réponse RMP (Slichter, 1990). 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 assure que la méthode est sélective. La très grande majorité des noyaux d'hydrogène présents dans le proche sous-sol provenant des molécules d'eau implique ainsi que la méthode RMP renseigne directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié et aussi sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

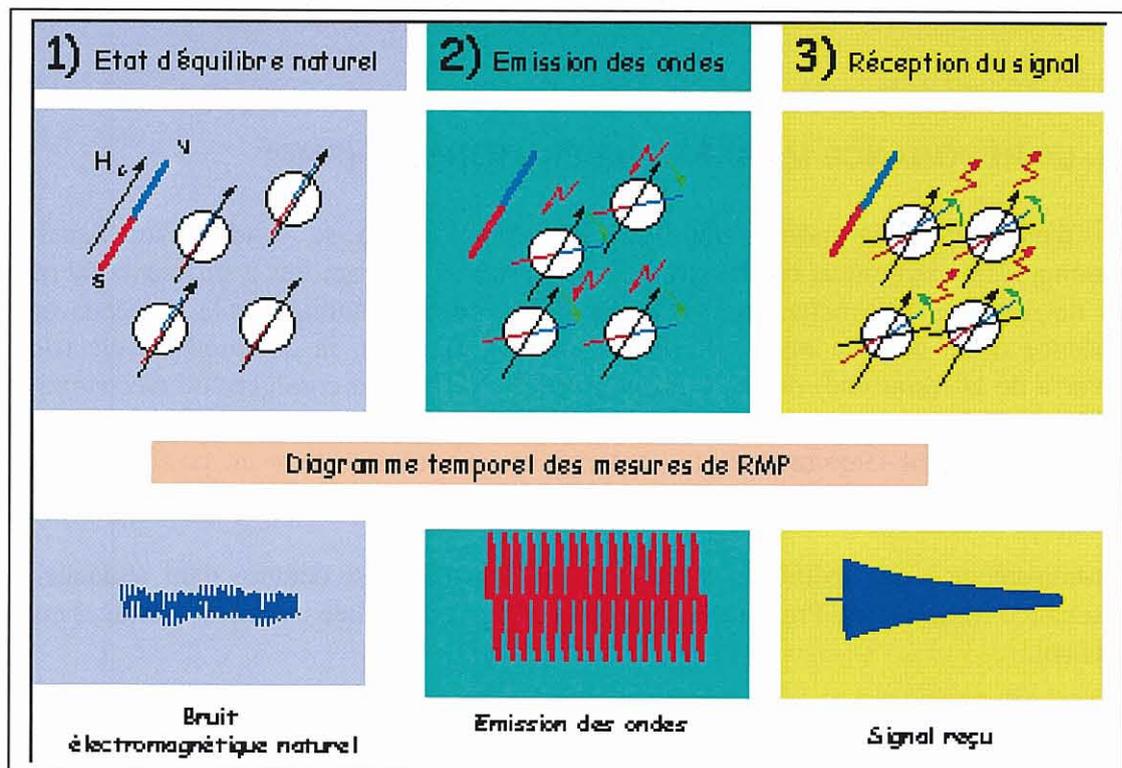


Fig. 1 – Principe de mesure RMP.

2.1.2. 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 (fig. 2).

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 s 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 100 kg (fig. 3).

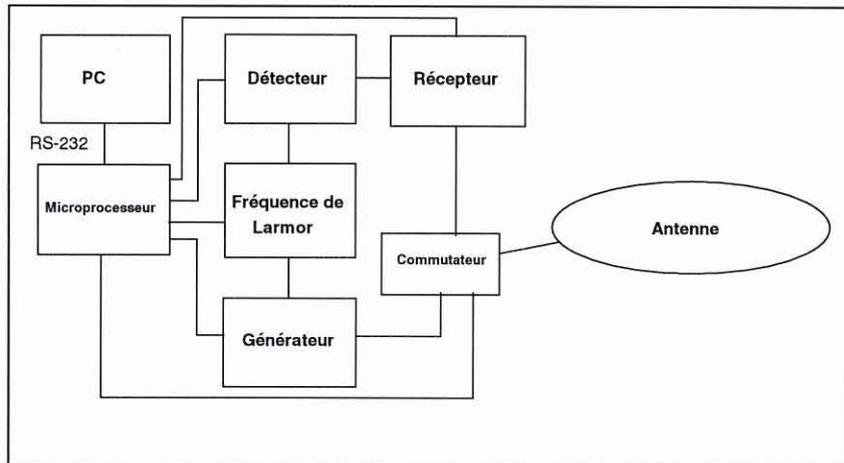


Fig. 2 – Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.

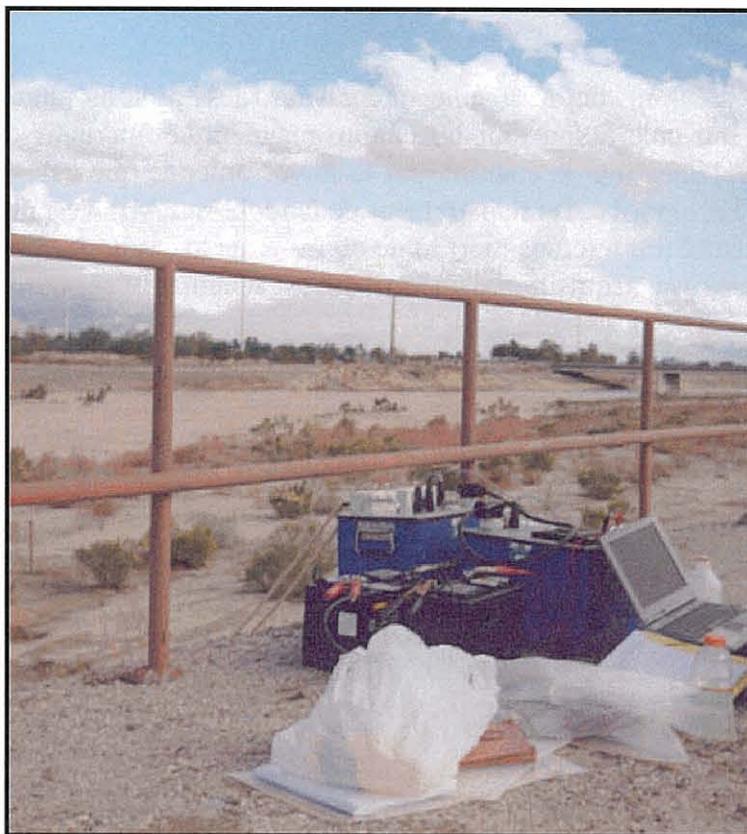


Fig. 3 - Équipement de Résonance Magnétique Protonique "NUMIS^{PLUS}" sur site.

2.1.3. Le sondage RMP

Pour réaliser un sondage RMP, une antenne conductrice est déployée sur le sol, généralement selon un cercle 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.

$$i(t) = I_0 \cos(\omega_0 t), \quad 0 < t \leq \tau \quad (1)$$

I_0 et τ caractérisent respectivement l'amplitude et la durée de l'impulsion. La pulsation du courant émis ω_0 correspond à la fréquence de Larmor des protons placés dans le champ géomagnétique $f_0 = \gamma H_0 / 2\pi$, avec H_0 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 du lieu considéré.

L'impulsion de courant entraîne une précession des protons autour du champ géomagnétique, qui crée à son tour un champ magnétique alternatif qui est détecté, après coupure de l'injection de courant, par la même antenne que celle qui est utilisée pour l'émission. 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 4.

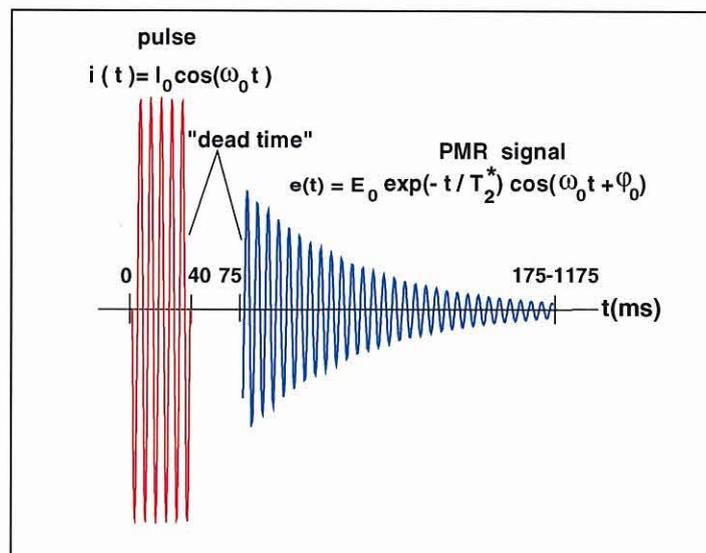


Fig. 4 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.

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

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

avec $E_0(q)$ l'amplitude initiale RMP, T_2^* le temps de relaxation transversale (Farrar *et al.*, 1971), et φ_0 la phase du signal RMP.

En injectant deux pulsations consécutives au lieu d'une seule et en mesurant la réponse RMP après chaque pulsation (FID1 et FID2) il est possible de calculer la constante de relaxation longitudinale T_1^* qui est une estimation de la constante de relaxation T_1 (Farrar *et al.*, 1971).

$E(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$ et $\varphi_0(q)$ sont les paramètres mesurés par l'antenne de réception en faisant varier le paramètre d'excitation q , ce dernier paramètre agissant sur la profondeur d'investigation du sondage. Ces quatre paramètres sont ceux qui sont ensuite interprétés et qui renseignent sur l'eau contenue dans le sous-sol.

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 situant 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).

Un signal RMP provenant de l'eau contenue dans des argiles a un temps de relaxation inférieur au délai instrumental et n'est ainsi pas détectable.

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 actuelle, 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 h dans des conditions favorables de bruits électromagnétiques parasites d'origine naturelle ou anthropique.

2.1.4. 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 $E_0(q)$ 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_W soit 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 V_{bound} ; 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 est la part du volume investigué occupé par l'eau libre telle que $w = (V_{free}/V) \cdot 100$ %. Les deux cas limites sont $w = 0$ pour une roche sèche et $w = 100$ pour l'eau d'un lac ;
- les constantes de temps de relaxation $T_2^*(q)$ et $T_1^*(q)$ sont liées à la taille moyenne des pores des formations aquifères (Shirov *et al.*, 1991 ; Chang *et al.*, 1997 ; Kenyon, 1997) ;
- la phase $\phi_0(q)$ renseigne sur la distribution des conductivités électriques du sous-sol. 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 5.

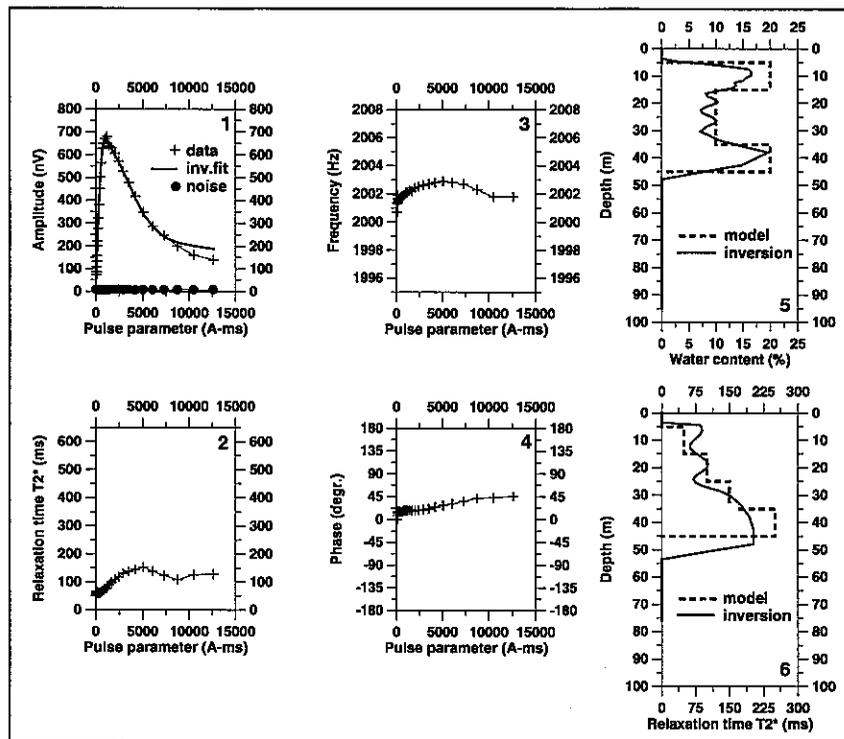


Fig. 5 – Résultats d'inversion des données théoriques.

Le signal théorique a été calculé à partir du modèle :

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

Tabl. 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 pourrait être liée aux paramètres RMP en utilisant la relation empirique :

$$k_{rmp} = C_k w^a (T_1^*)^b \quad (3)$$

où K_{rmp} est une estimation de la perméabilité par la RMP, w est la teneur en eau, T_1^* est la constante du temps de relaxation, C_k 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.

Il est évident que la précision de la relation empirique dépend de la qualité de la calibration. Pour des roches différentes, les constantes empiriques doivent être modifiées et des relations mieux adaptées peuvent être définies. La définition des paramètres empiriques adaptés aux différents environnements est un travail de longue haleine mais déjà dans cette phase initiale de développement, NUMIS peut être utilisé efficacement pour définir les perméabilités des aquifères au moins en valeurs relatives.

L'inversion des données RMP mesurées avec l'équipement NUMIS produit les résultats suivants :

- distribution verticale de la teneur en eau $w(z)$;
- distribution verticale du temps de relaxation $T_2^*(z)$;
- distribution verticale du temps de relaxation $T_1^*(z)$;
- distribution verticale de la perméabilité $K_{rmp}(z)$.

Un exemple de la comparaison des résultats RMP avec des résultats d'essais de pompage et les coups lithologiques des forages sont présentés sur la figure 6.

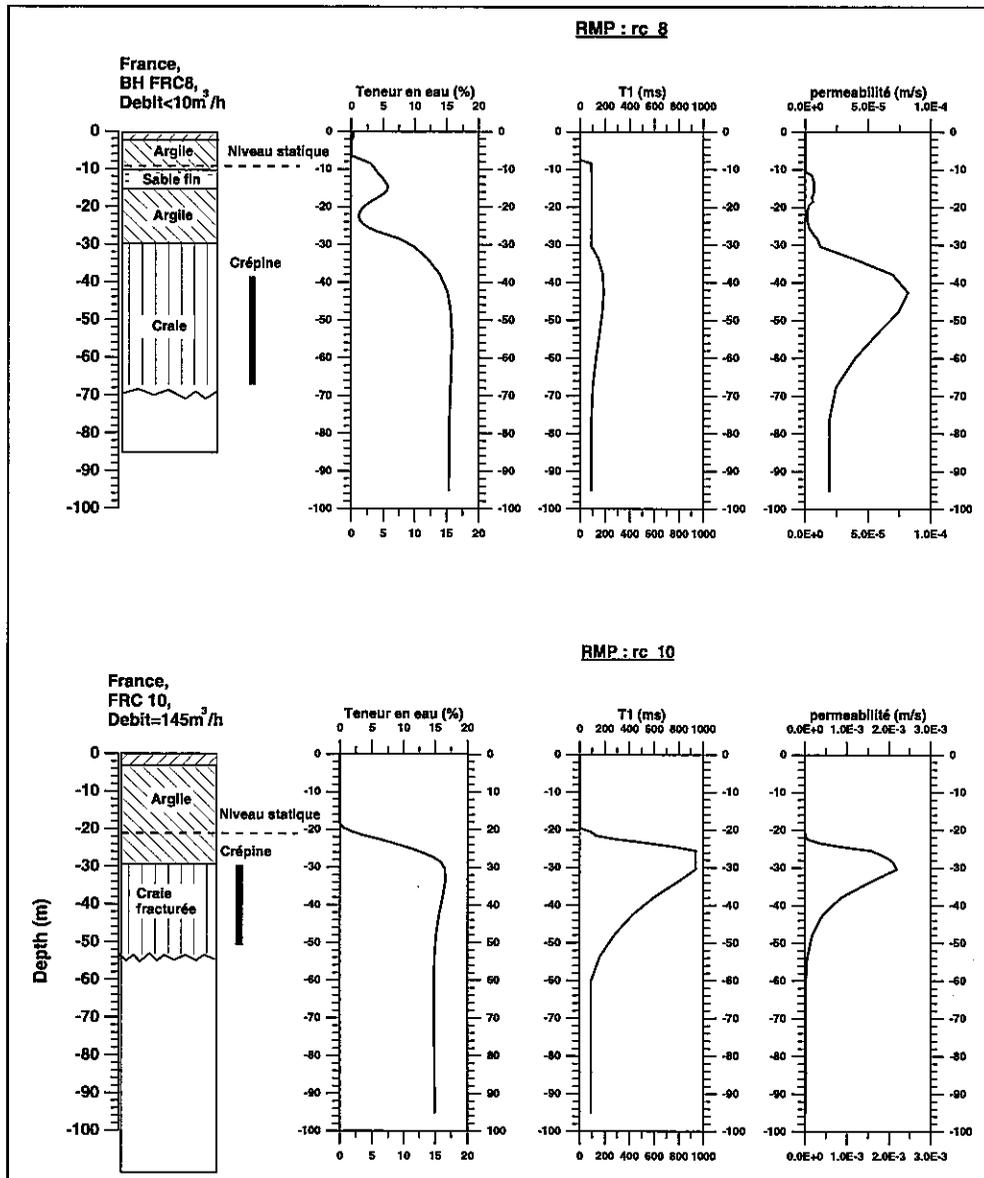


Fig. 6 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie.

2.1.5. Présentation des résultats d'un sondage fournis par le système « NUMIS »

Il n'y a pas actuellement de forme fixe pour afficher les résultats RMP et le system « NUMIS » permet de configurer le contenu des feuilles de résultats selon chaque opérateur.

Dans ce rapport les résultats sont présents comme il est démontré sur la figure 7.

Site: Kerbernez, site 12
 Date: 18.07.2001; Time: 12:58

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbenez-2001\INTER1\KERB12.inp
 matrix: C:\moi\REPORTS\kerbenez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 2.56
 fitting error = 5.347 %
 parameter of regularization = 1.0
 permeability constant Cpx = 7.00e-09

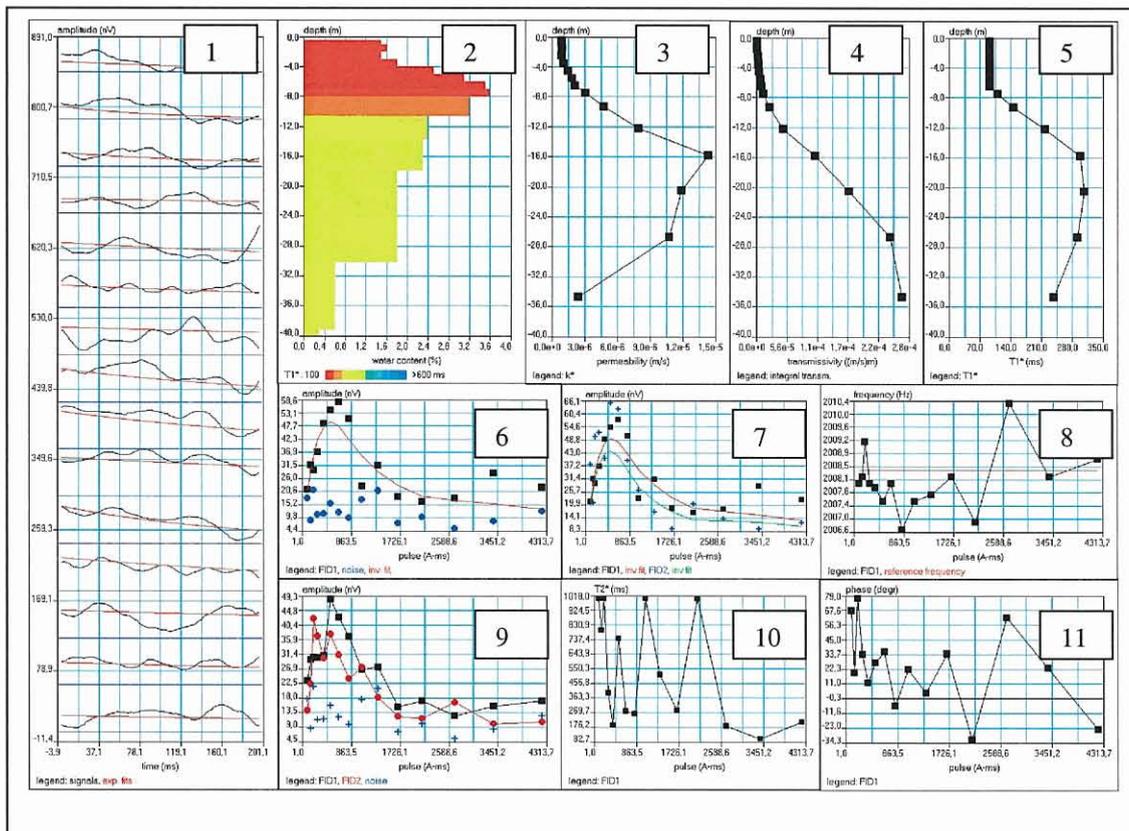


Fig. 7 - Exemple de résultats fournis par l'appareillage NUMIS.

En tête de la feuille, on trouve l'information utile sur le sondage (site, temps, 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) distribution verticale de la teneur en eau $w(z)$;
- (3) distribution verticale de la perméabilité $k_{rmp}(z)$;
- (4) distribution verticale de la transmissivité accumulée ;
- (5) distribution verticale du temps de relaxation $T_1^*(z)$;
- (6) l'amplitude initiale du signal RMP (FID1) et l'amplitude moyenne du bruit ambiant en fonction du paramètre d'excitation ;
- (7) les amplitudes initiales des signaux RMP (FID1 et FID2) et l'amplitude moyenne du bruit ambiant en fonction du paramètre d'excitation ;
- (8) la fréquence du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;
- (9) les amplitudes moyennes des signaux RMP (FID1 et FID2) et du bruit en fonction du paramètre d'excitation ;
- (10) le temps de relaxation $T_2^*(q)$ en fonction du paramètre d'excitation ;
- (11) la phase du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation.

2.2. MOYENS MIS EN ŒUVRE

2.2.1. Personnel

- un géophysicien.

2.2.2. Equipement

- un système RMP IRIS-BRGM Numis^{PLUS} ;
- 6 batteries de 12V, 75A-h ;
- un magnétomètre à proton ;
- 600 m de câble d'injection et de mesure ;
- un micro-ordinateur portable ;
- un véhicule.

3. Travaux réalisés

Onze sondages de RMP ont été réalisés avec l'équipement de RMP « NUMIS^{PLUS} » entre le 9 et 20 juillet 2001. Les résultats d'inversion des données RMP sont présentés dans l'annexe I. Le plan de situation du secteur de Quimper avec la position de la zone d'étude est présenté sur la figure 8. Le plan de position des sondages RMP dans le bassin versant de Kerbernez est présenté sur la figure 9. La localisation des piézomètres dans la zone d'étude est présentée sur la figure 10.

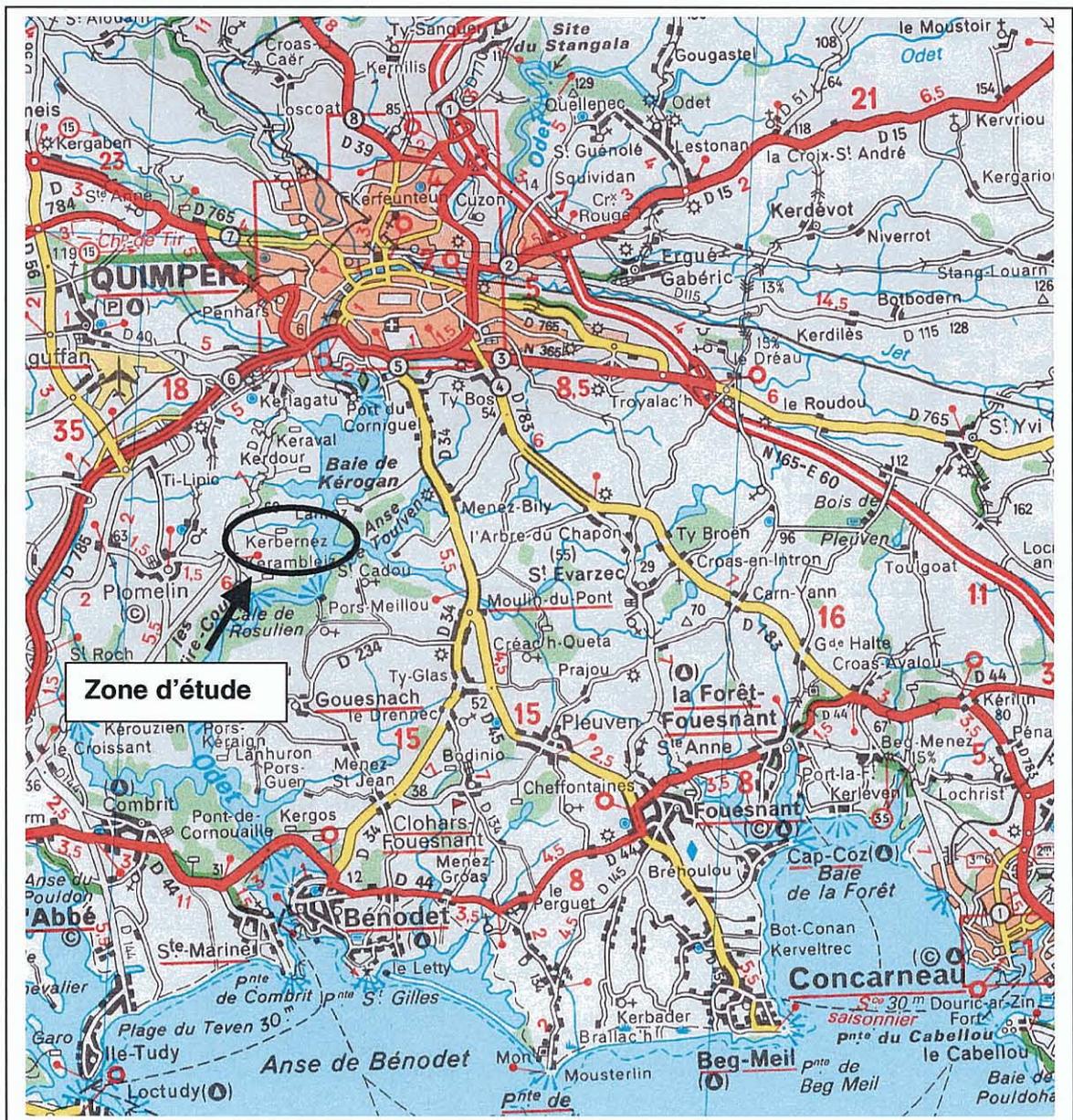


Fig. 8 - Plan de position de la zone d'étude.

Dans le secteur un bruit électromagnétique fort a été observé. Cela nous a obligé à utiliser l'antenne huit-carrée de 37,5 m de côté. La profondeur d'investigation est ainsi de 40 m environ.

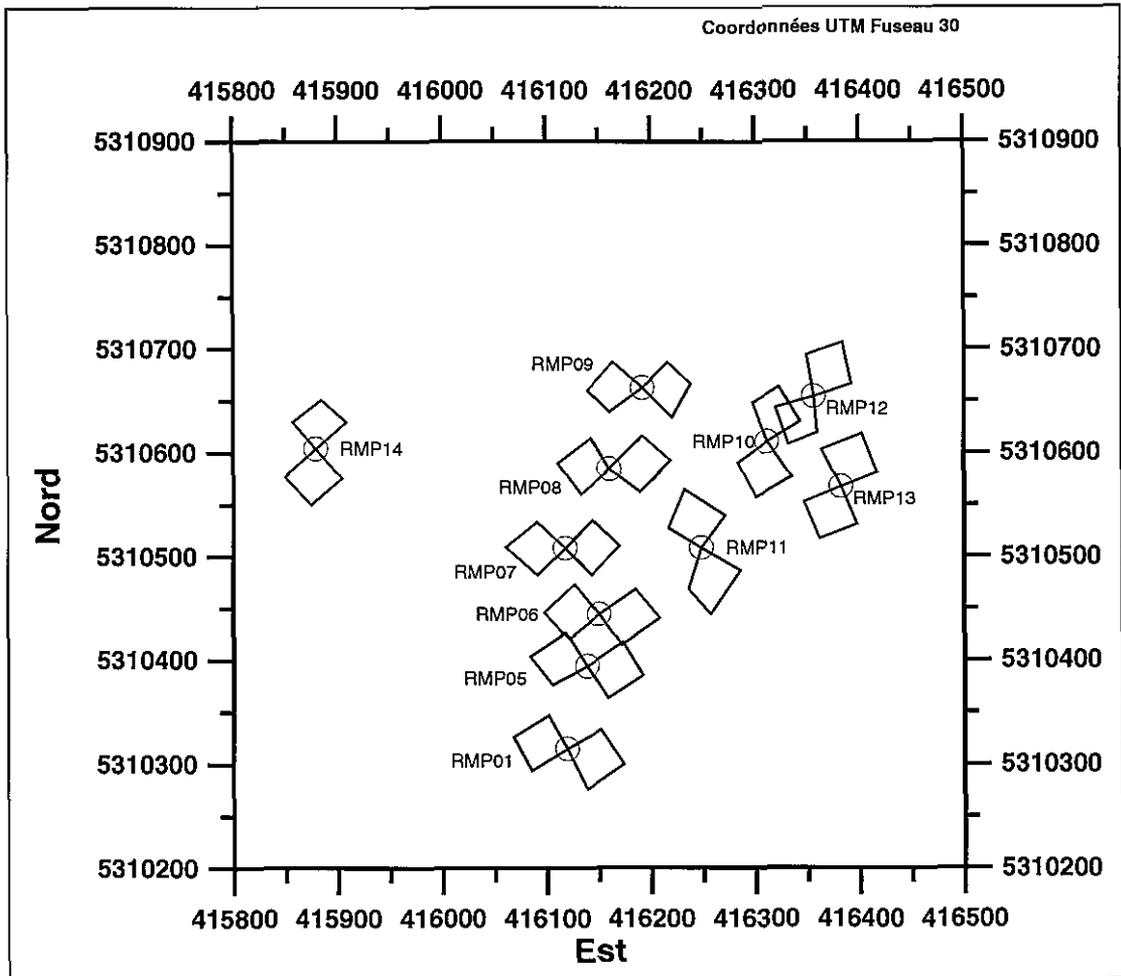


Fig. 9 - Plan de position des sondages RMP dans le bassin versant de Kerbernez.

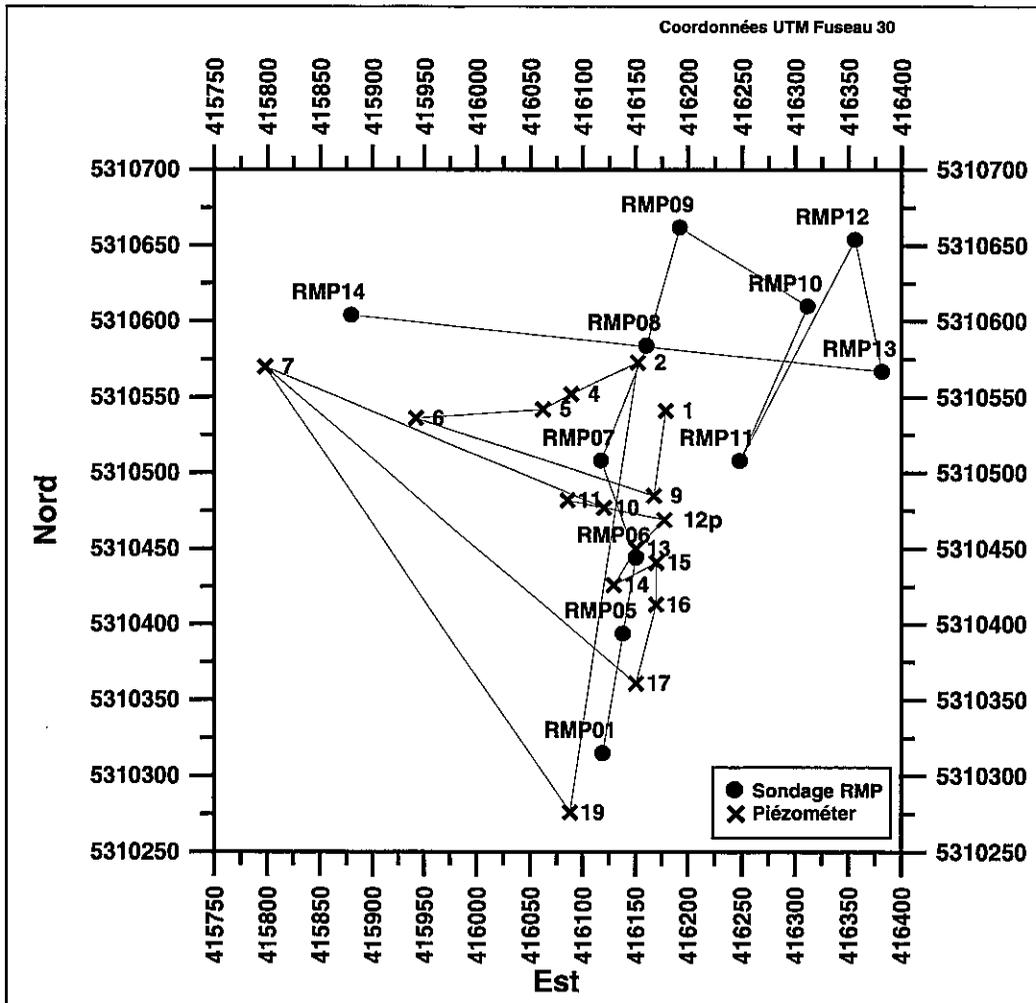


Fig. 10 - Plan de position des piézomètres dans le bassin versant de Kerbernez.

4. Résultats et discussion

La carte d'altitude des sondages RMP au niveau du sol caractérise le relief du secteur. L'ensemble des sondages constitue des profils qui traversent la zone d'étude (fig. 11).

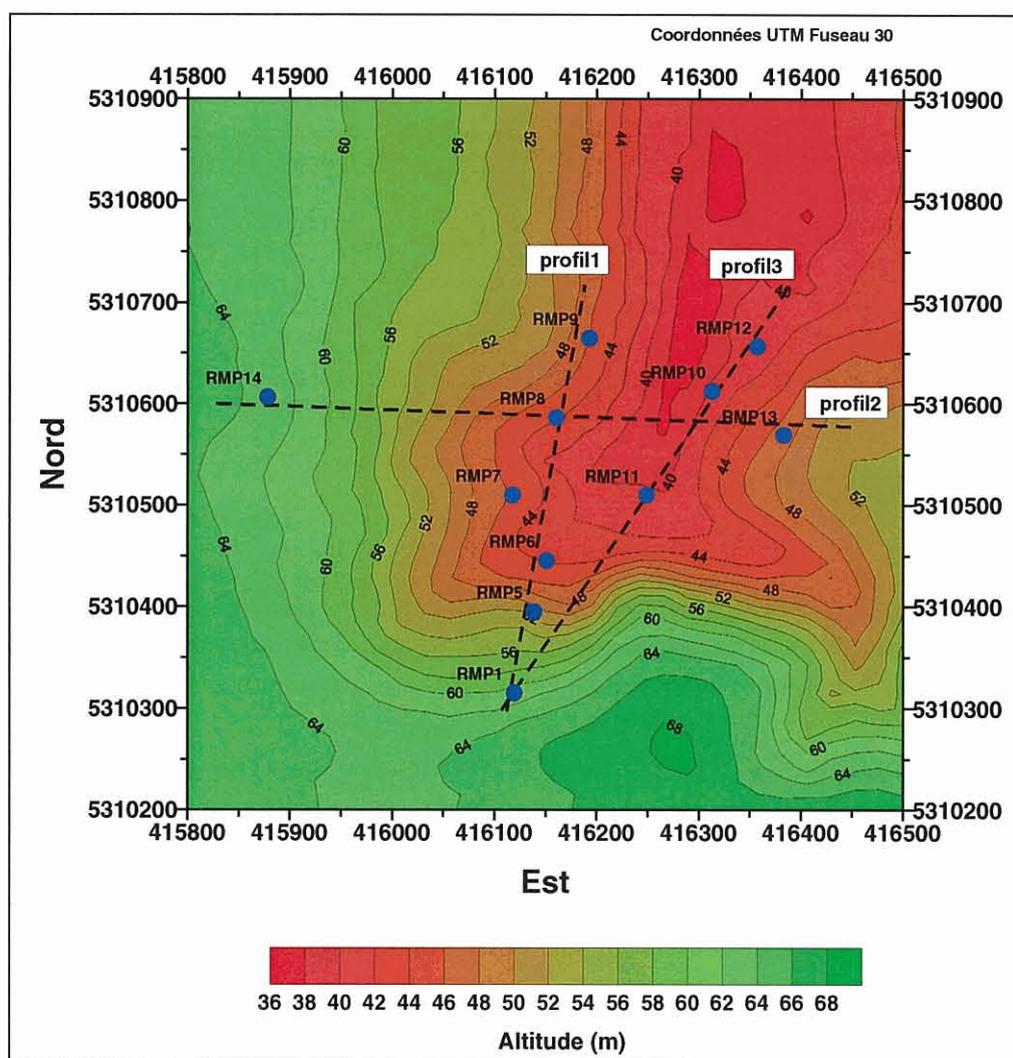


Fig. 11 - Carte d'altitude des sondages et la localisation des sections RMP.

Aucune calibration des données RMP avec des forages n'a été utilisée pour l'interprétation. Les principaux résultats RMP sont présentés dans le tableau 2.

Sondage RMP	Coord. Easting	Coord. Northing	Altitude (m)	Rapport S/B	Qualité	Profondeur du toit de nappe (m)	Altitude du toit de nappe (m)	Epaisseur de nappe (m)	Volume de l'eau (m ³ /m ²)	Transm. (m ² /s)
RMP1	416119,3	5310315	60,67	3,91	bonne	3	57,67	20	0,32	2,74E-04
RMP5	416138,5	5310394	51,21	3,26	bonne	3	48,21	9	0,28	2,34E-04
RMP6	416150,8	5310444	44,12	3,08	bonne	2	42,12	16	0,81	7,40E-04
RMP7	416117,7	5310508	45,45	2,99	bonne	5	40,45	17	0,57	5,44E-04
RMP8	416160,5	5310584	44,04	3,37	bonne	3	41,04	37	0,1	1,86E-03
RMP9	416192,5	5310662	45,94	1,72	moyenne	6	39,94	10	0,56	3,36E-04
RMP10	416311,9	5310610	40,27	4,63	bonne	5	35,27	20	0,55	2,58E-03
RMP11	416248,3	5310508	40,36	5,48	bonne	3	37,36	19	0,66	1,84E-03
RMP12	416356,2	5310654	41,19	2,56	bonne	5	36,19	25	0,62	2,44E-04
RMP13	416381,8	5310567	47,08	3,77	bonne	3	44,08	20	0,58	8,00E-04
RMP14	415879,5	5310604	62,92	0,96	moyenne	4	58,92	13	0,26	2,64E-05

Tabl. 2 - Principaux résultats RMP.

Le rapport signal sur bruit (S/B) est destiné à évaluer la qualité des mesures. Dans le cas général, on peut considérer la qualité des sondages avec (S/B) > 2 comme bonne, avec 1 < (S/B) < 2 comme moyenne, et avec (S/B) < 1 comme insatisfaisante.

Deux sondages (RMP1 et RMP5) ont été effectués avec une seule pulsation au lieu de deux. Cette technique ne permet pas de mesurer le temps de relaxation T_1^* et rend l'estimation de la perméabilité hydraulique difficile. Cependant, les mesures à la fois des temps de relaxation T_1^* et T_2^{**} ont été effectuées sur les autres sites dans le même secteur. Cela nous a permis d'établir une corrélation entre T_1^* et T_2^{**} présentée sur la figure 12.

Cette corrélation empirique a été utilisée pour calculer les valeurs de temps de relaxation T_1^* à partir de mesures de temps de relaxation T_2^{**} pour les sondages RMP1 et RMP5.

La transmissivité hydraulique de la nappe a été estimée comme une intégrale de la perméabilité sur l'épaisseur de la nappe ($\Delta z = bottom - top$)

$$T = \int_{top}^{bottom} k(z) dz, \quad (4)$$

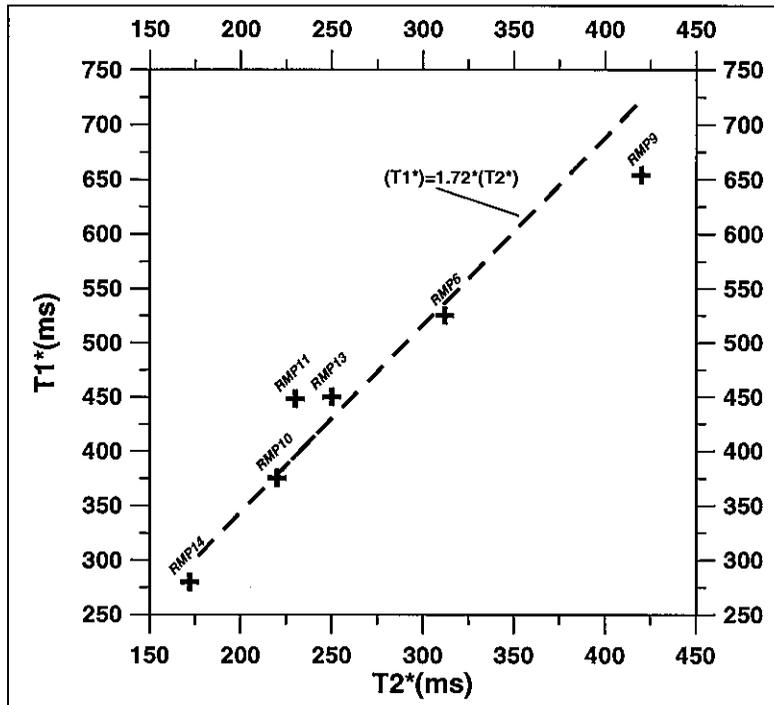


Fig. 12 - Correspondance entre les valeurs de $T1^*$ et de $T2^*$.

en utilisant la valeur de perméabilité donnée par l'équation 3

$$k_{rmp}(z) = C_k w(z)(T_1^*)^2. \quad (5)$$

L'inversion des données RMP est réalisée selon un modèle tabulaire de couches homogènes et la teneur en eau fournie par RMP considère un modèle latéralement homogène dans l'emprise de la boucle. Cela permet d'estimer le volume d'eau libre par mètre carré comme :

$$V_{rmp} = 0.01 \int_{top}^{bottom} w(z) dz, \quad (6)$$

où $w(z)$ en % est la teneur en eau fournie par l'inversion.

Ce paramètre peut servir comme une estimation du stockage d'eau dans la zone étudiée.

À partir des résultats RMP, les cartes des variations des paramètres géométriques et hydrodynamiques de la nappe dans la zone d'étude peuvent être dessinées.

L'altitude des sondages RMP et la profondeur de toit de nappe nous donnent une carte d'altitude du toit de la nappe (fig. 13).

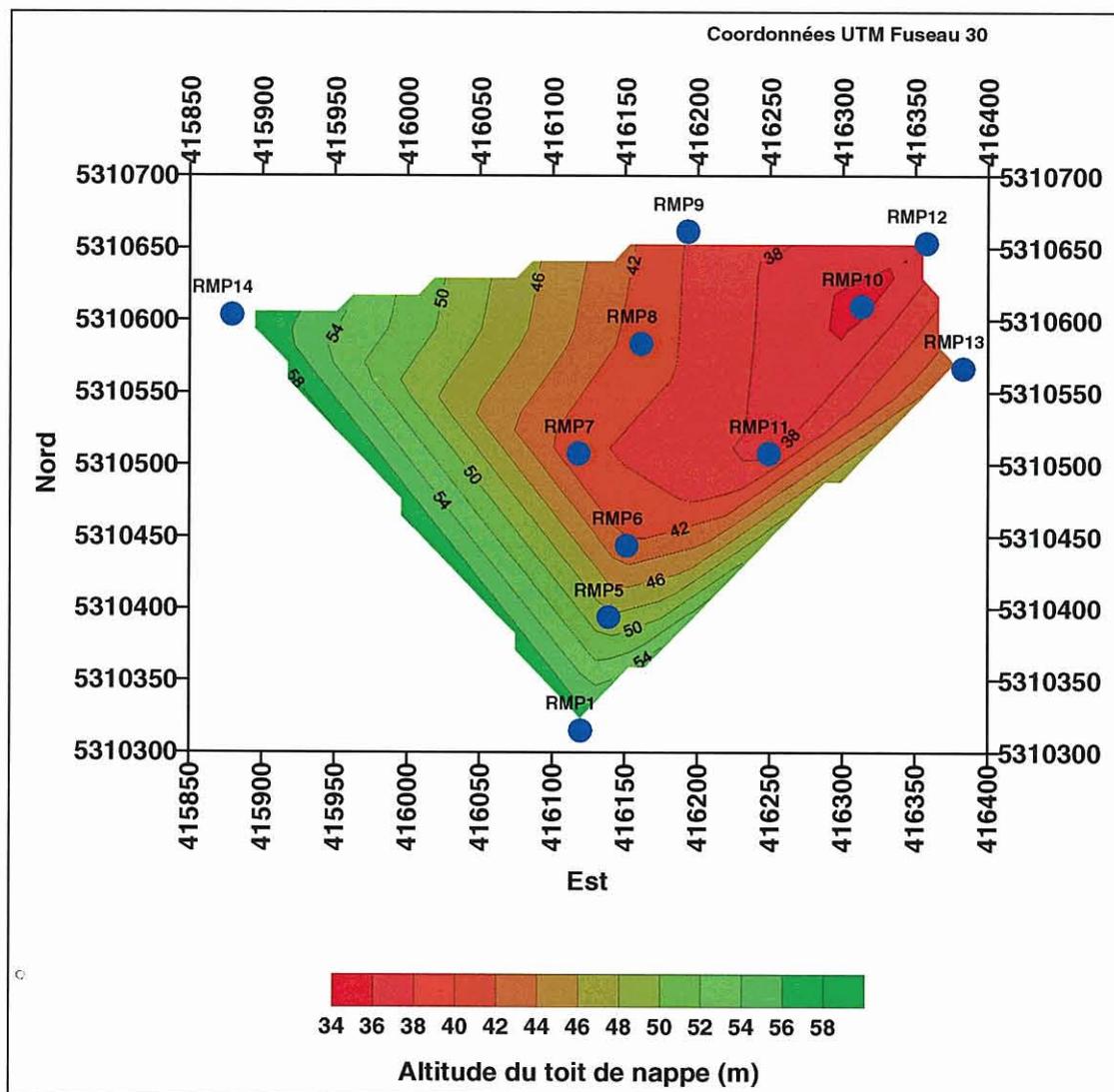


Fig. 13 - Carte d'altitudes du toit de la nappe estimée par la RMP.

Cette carte pourrait être comparée avec la carte du niveau piézométrique mesuré en forages (fig. 10 et 14).

Généralement la RMP est capable de mesurer le signal provenant de l'eau libre dans un aquifère et n'est pas sensible à l'eau liée dans les roches peu perméables comme l'argile. Pour cette raison la profondeur du toit de nappe fournie par la RMP pourrait être différente du niveau piézométrique. Par exemple, on a un aquifère entre 10 et 20 m de la

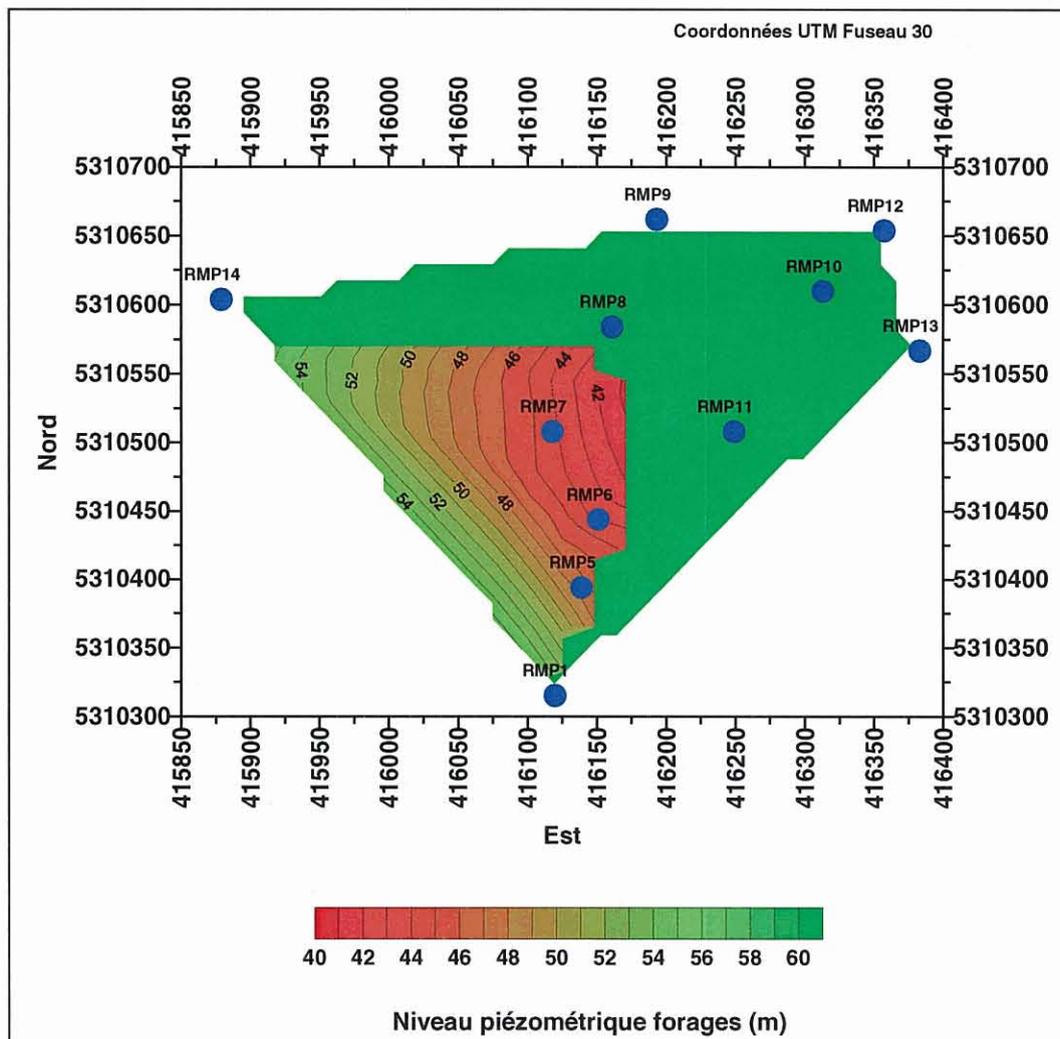


Fig. 14 - Carte d'altitudes du niveau piézométrique.

profondeur, et la zone entre 0 et 10 m est composée de l'argile peu perméable. Si le niveau piézométrique se trouve à 5 m la RMP va mesurer le toit de nappe à 10 m et l'épaisseur de la nappe de 10 m, mais si le niveau piézométrique est à 15 m, la RMP va mesurer le toit de nappe à 15 m également (et l'épaisseur de la nappe de 5 m naturellement).

Les mesures du niveau piézométrique ont été effectuées le 11 avril 2001 et les sondages RMP entre le 9 et le 20 juillet 2001. Il est donc possible que le niveau piézométrique ne soit pas le même entre ces dates.

Le relief dans la zone d'étude est bien développé et la géologie est assez complexe du fait du niveau piézométrique qui est assez variable latéralement, mais la RMP fournit les résultats moyens dans la zone qui dépend de la surface d'antenne (70 × 130 m

environ). Pour cette raison, les résultats RMP pourront être différents des résultats des mesures en forage.

Compte tenu des différences entre des mesures RMP et des mesures en forages on peut considérer que la corrélation observée entre les résultats fournis par la RMP et les mesures du niveau piézométrique en forages est satisfaisante.

Les cartes de transmissivité et du volume d'eau par mètre carré estimés par RMP sont présentées sur les figures 15 et 16.

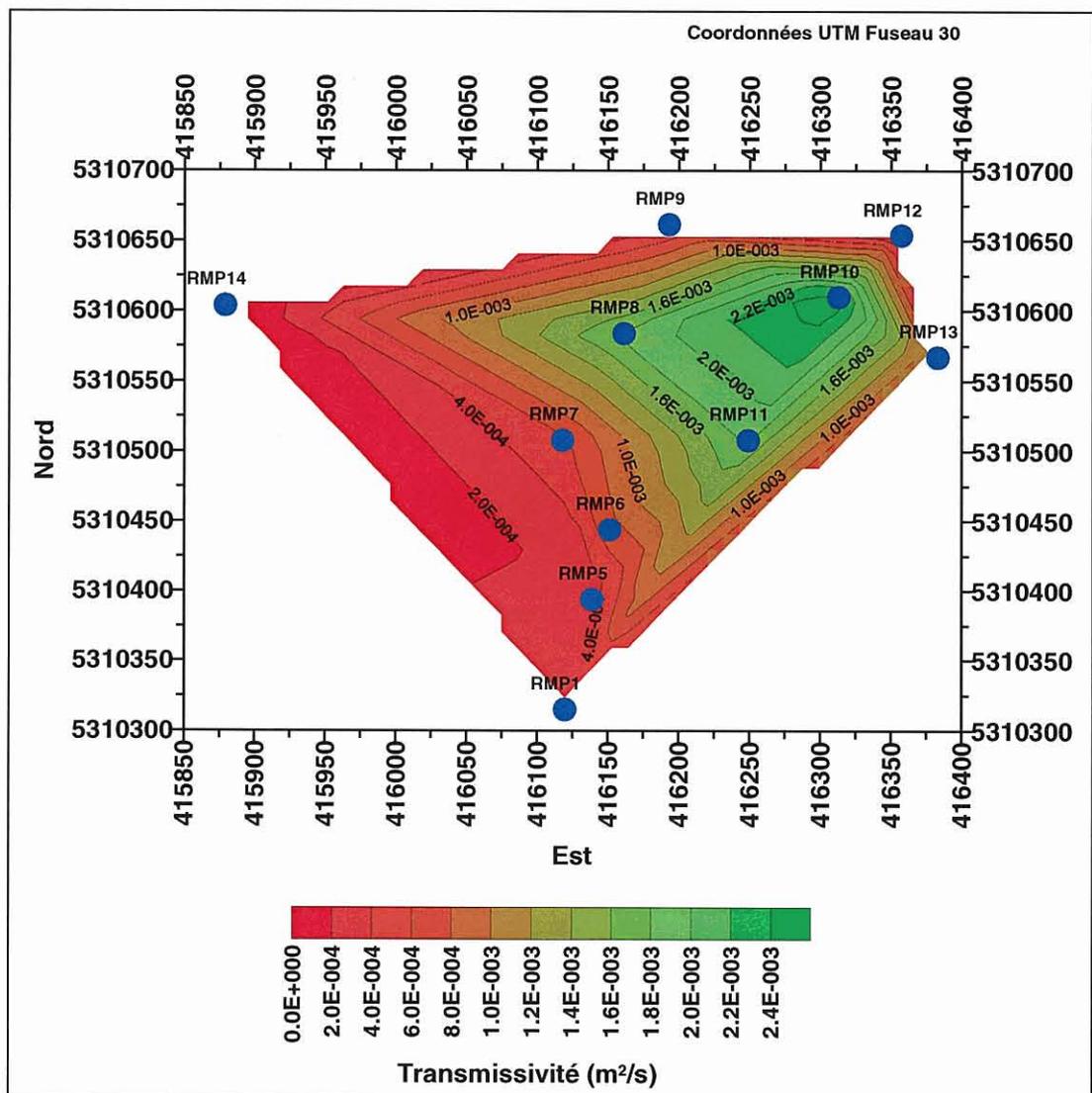


Fig. 15 - Carte de transmissivité d'aquifère estimée par la RMP.

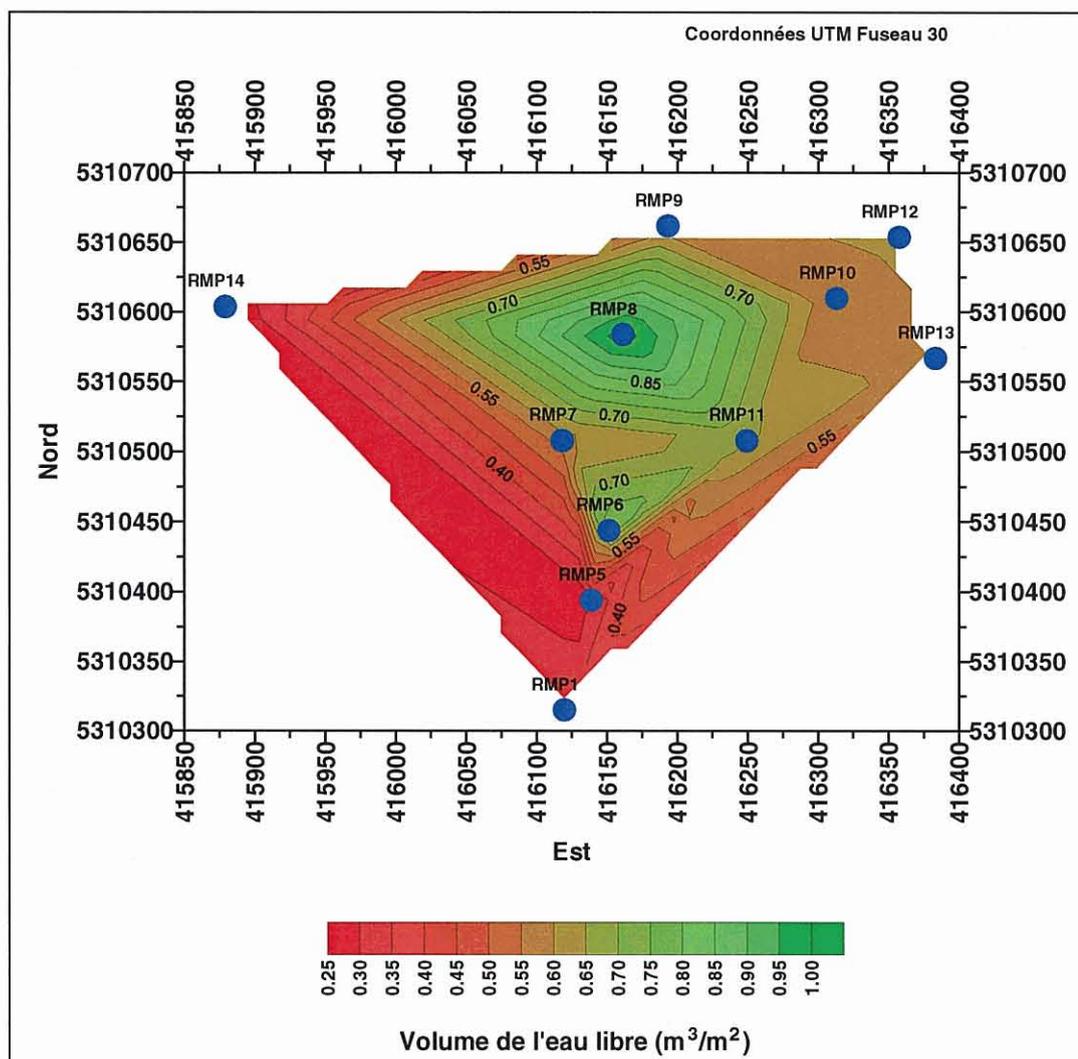


Fig. 16 - Carte de volume de l'eau libre par mètre carré estimé par la RMP.

La carte d'épaisseur de la nappe estimée par RMP est présentée sur la figure 17, et la carte de teneur en eau moyenne est présentée sur la figure 18.

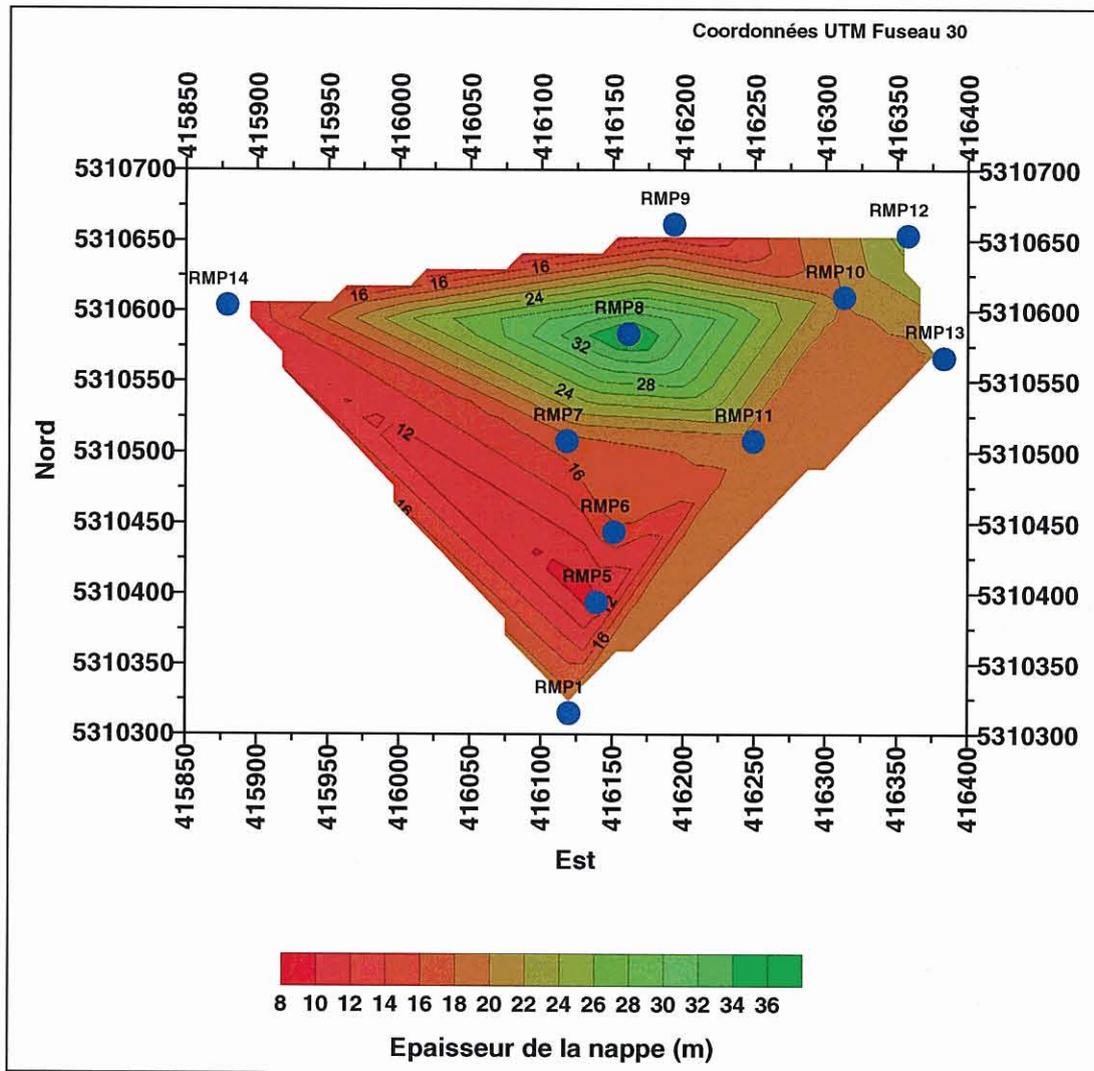


Fig. 17 - Carte d'épaisseur de la nappe estimée par la RMP.

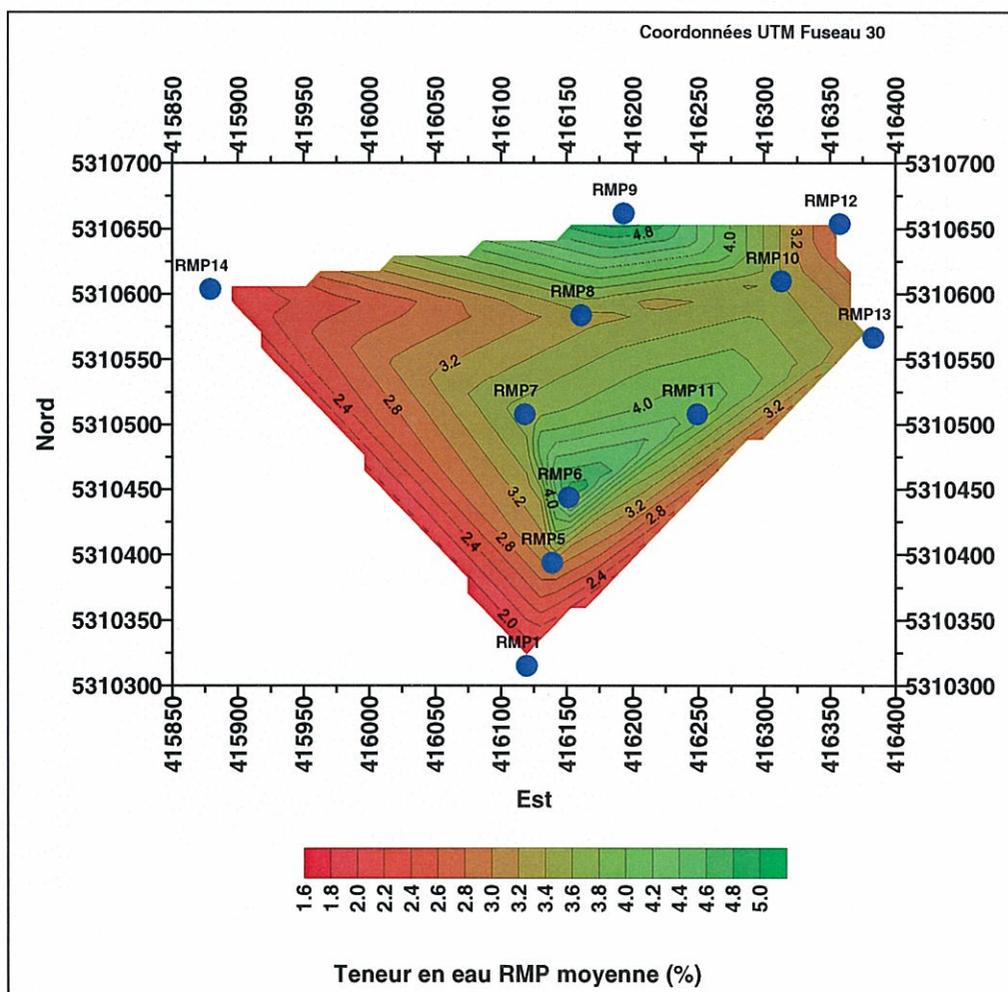


Fig. 18 - Carte de teneur en eau moyenne estimée par la RMP.

L'ensemble des sondages RMP forme trois profils de teneur en eau et de perméabilité qui sont présentés sur les figures 19-21.

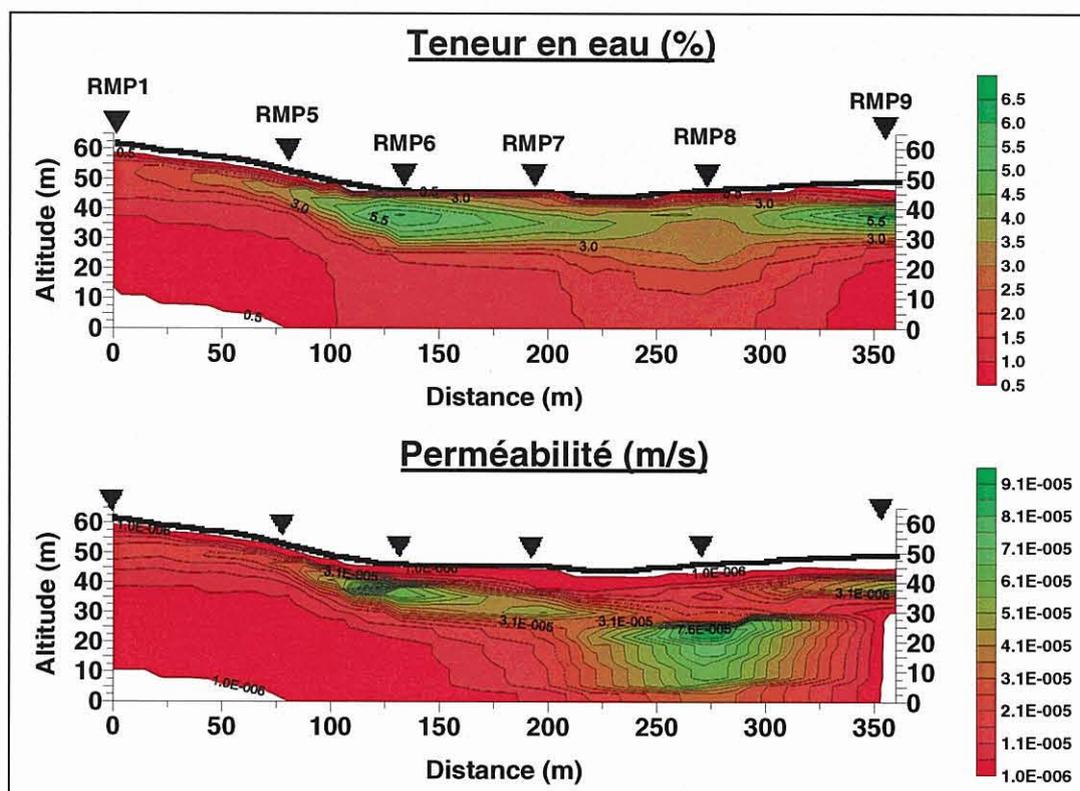


Fig. 19 - Résultats RMP : profil 1.

Dans la zone étudiée des variations importantes des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ont été observées. Selon les résultats RMP la transmissivité d'aquifère augmente vers le nord-est du bassin (sondages RMP10, 11) et la différence entre cette zone et les zones de ouest, sud-ouest et sud moins perméables (sondages RMP1, 5, 14) fait deux ordres de magnitude environ ($2,64 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ pour RMP14 contre $2,58 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour RMP10).

La zone d'altération la plus épaisse a été mise en évidence par le sondage RMP8. Le stockage de l'eau libre est localisé dans la zone centrale du bassin (entre les sondages RMP6, 8, 11).

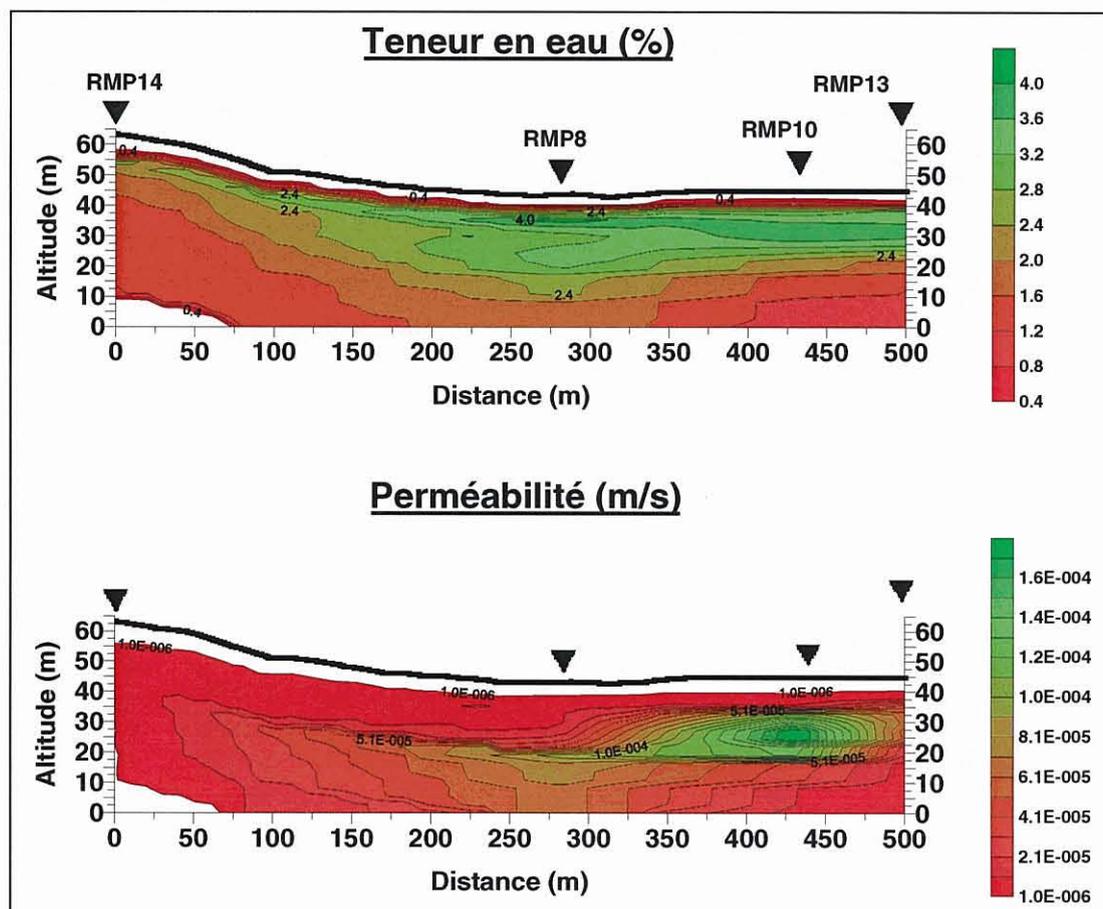


Fig. 20 - Résultats RMP : profil 2.

Les sections RMP montrent une structure d'aquifère typique pour le contexte géologique du socle : une zone d'altération proche de la surface et la zone fissurée au-dessous. Une faible perméabilité au sud et sud-ouest du bassin peut être expliquée par une faible épaisseur de la zone altérée ou bien par la teneur en argile plus élevée par rapport à la zone nord-est qui est beaucoup plus perméable. Cette ambiguïté pourrait être résolue par l'interprétation conjointe des données RMP et des données de panneau électrique. Compte tenu des structures 2D mises en évidence par les résultats RMP, l'application de la méthode de panneau électrique devrait également améliorer la précision des résultats obtenus sur la géométrie de l'aquifère.

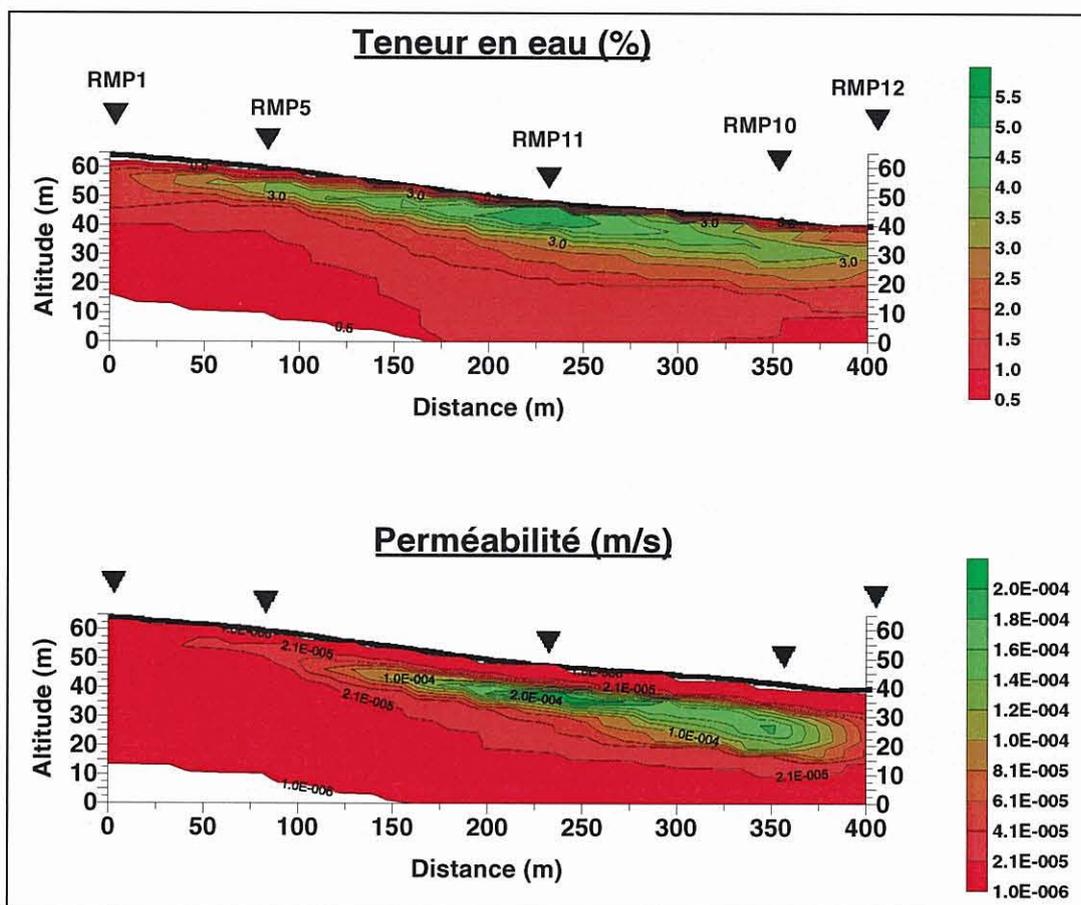


Fig. 21 - Résultats RMP : profil 3.

5. Conclusions

Cette campagne de mesures a montré que dans la zone d'étude le niveau des bruits électromagnétiques est très important (800-8 000 nV) et le signal RMP est généralement faible (< 90 nV). Dans ces conditions, la méthode de RMP est efficace pour la caractérisation des aquifères entre 0 et 40 m de profondeur.

Dans le bassin versant de Kerbernez le toit de la nappe a été localisé entre 2 et 6 m de profondeur et l'épaisseur de nappe varie entre 10 et 40 m environ. L'épaisseur augmente vers la zone centrale du bassin. Cette zone est localisée comme la zone principale du stockage d'eau.

Dans le secteur étudié des variations des caractéristiques hydrodynamiques d'aquifère très importantes sont mises en évidence. Par exemple, la différence en transmissivité hydraulique de deux ordres de magnitude entre les zones différentes a été observée (entre $2,64 \times 10^{-5}$ et $2,58 \times 10^{-3}$ m²/s).

Les cartes de variations des paramètres hydrodynamiques et les sections RMP peuvent servir comme l'information utile pour une modélisation hydrogéologique de fonctionnement du bassin.

Cependant, pour augmenter la fiabilité de l'estimation des paramètres hydrodynamiques on recommande également d'effectuer des essais de pompage pour mieux caler les résultats RMP.

Il est également recommandé d'effectuer l'interprétation conjointe des données RMP et de panneau électrique pour mieux définir la géométrie de l'aquifère et expliquer les variations des paramètres hydrodynamiques.

6. Bibliographie

- Chang D., Vinegar H., Morriss C., and Straley C. (1997) - Effective porosity, producible fluid and permeability from NMR logging. *The Log Analyst*, March-April, pp. 60-72.
- Farrar T.C., and Becker E.D. (1971) - *Pulse and Fourier transform NMR*, Academic Press, New York.
- Kenyon W.E. (1997) - Petrophysical Principles of Applications of NMR Logging. *The Log Analyst*, March-April, pp. 21-43.
- Legchenko A.V., Beauce A., Guillen A., Valla P. and 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*, vol. 2, n° 2, p. 173-190.
- Legchenko A.V. and Shushakov O.A. (1998) - Inversion of surface NMR data: *Geophysics*, vol. 63, n° 1, p. 75-84.
- Legchenko A., Baltassat J.M., Beauce A. and Bernard J. (2001) - Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *Jour. Appl. Geophys.*, in press.
- Slichter C.P. (1990) - *Principles of magnetic resonance*. 3rd edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Schirov M., Legchenko A. and Creer G. (1991) - New direct non-invasive ground water detection technology for Australia. *Expl. Geophys.*, **22**, p. 333-338.
- Semenov A.G., Schirov M.D. and Legchenko A.V. (1987) - On the technology of subterranean water exploration founded on application of nuclear magnetic resonance tomograph "Hydroscope". IXth Ampere summer school, Abstracts, Novosibirsk, September 20-26, 1987, p. 214.
- Semenov A.G., Schirov M.D., Legchenko A.V., Burshtein A.I. and Pusep A.Yu. (1989) - Device for measuring the parameter of underground mineral deposit. G.B. Patent 2198540B.
- 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, p. 855-862.

ANNEXE 1

Résultats RMP

Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)

Site: Kerbernez, site 1 (one pulse)

Date: 10.07.2001; Time: 19:06

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbenez-2001\INTER1\KERB1A.inp

matrix: C:\moi\REPORTS\kerbenez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 55 degr, magnitude= 47223.00 nT

filtering window = 198.8 ms

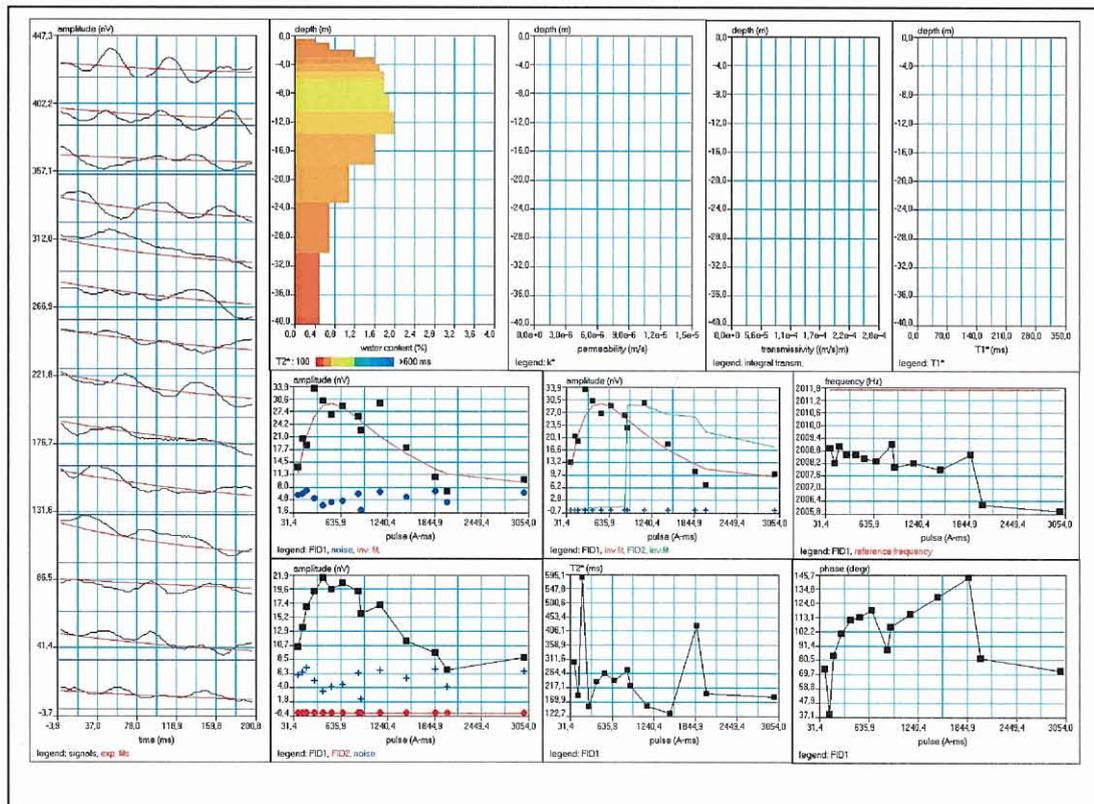
time constant = 15.00 ms

average S/N = 3.91

fitting error = 4.530 %

parameter of regularization = 1.0

permeability constant Cpx = 7.00e-09

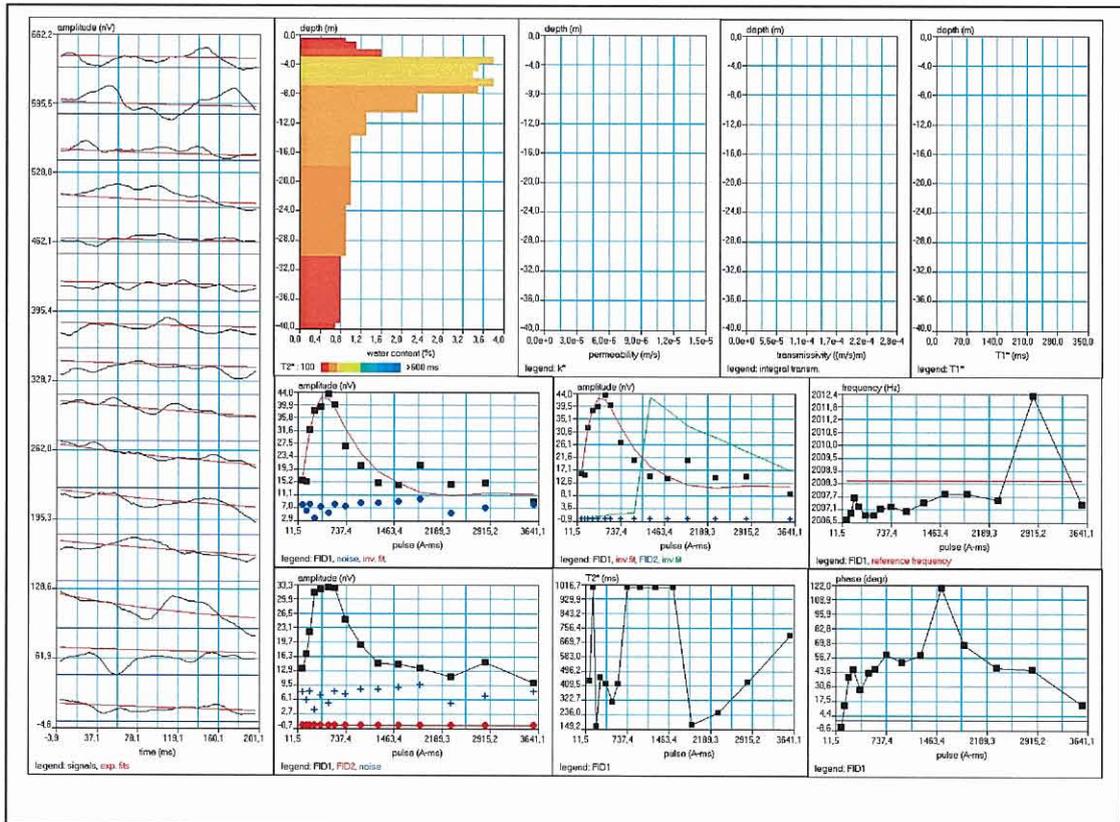


Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)

Site: Kerbernez, site 5 (one pulse)
 Loop: 4 - 37.5 Date: 11.07.2001 Time: 10:08

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbenez-2001\INTER1\KERB5.inp
 matrix: C:\moi\REPORTS\kerbenez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 3.26
 fitting error = 4.769 %
 parameter of regularization = 1.0
 permeability constant Cpx = 7.00e-09



Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)

Site: Kerbernez, site 6

Date: 12.07.2001; Time: 09:38

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbenez-2001\INTER1\KERB6A.inp

matrix: C:\moi\REPORTS\kerbenez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms

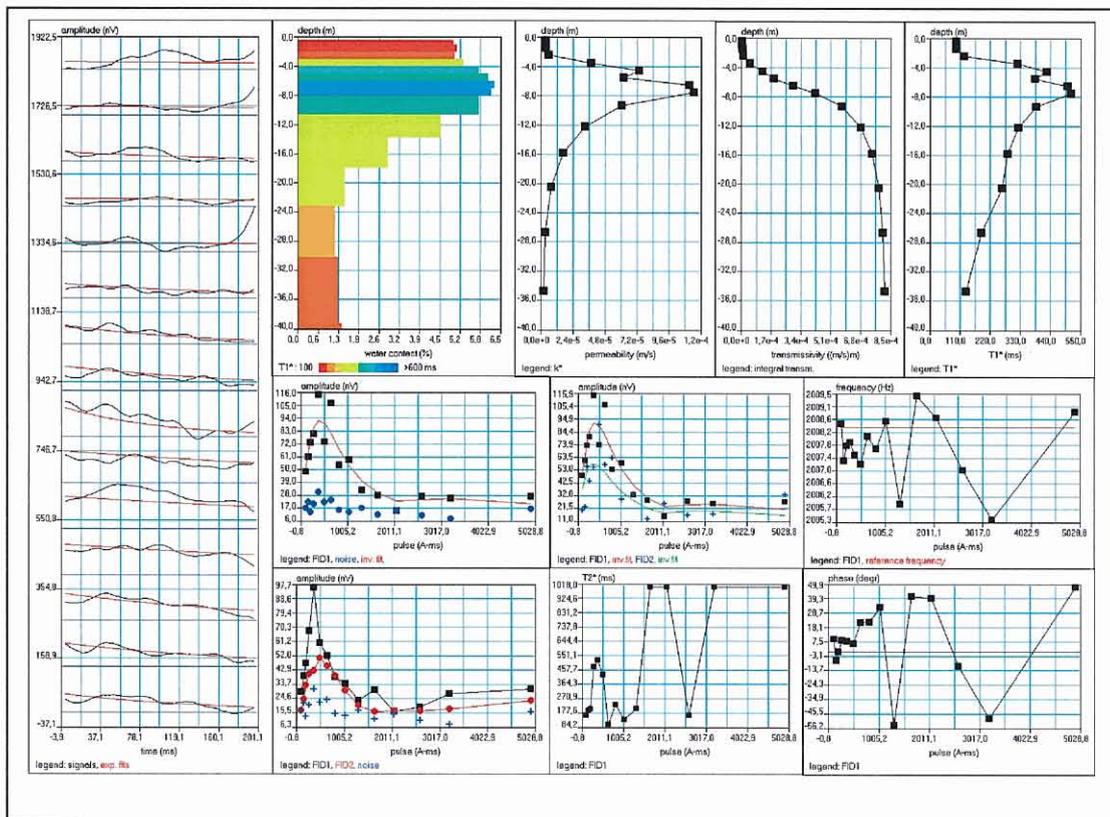
time constant = 15.00 ms

average S/N = 3.08

fitting error = 5.241 %

parameter of regularization = 1.0

permeability constant Cpx = 7.00e-09



Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)

Site: Kerbernez, site 7

Date: 12.07.2001; Time: 15:14

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\INTER1\KERB7.inp

matrix: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms

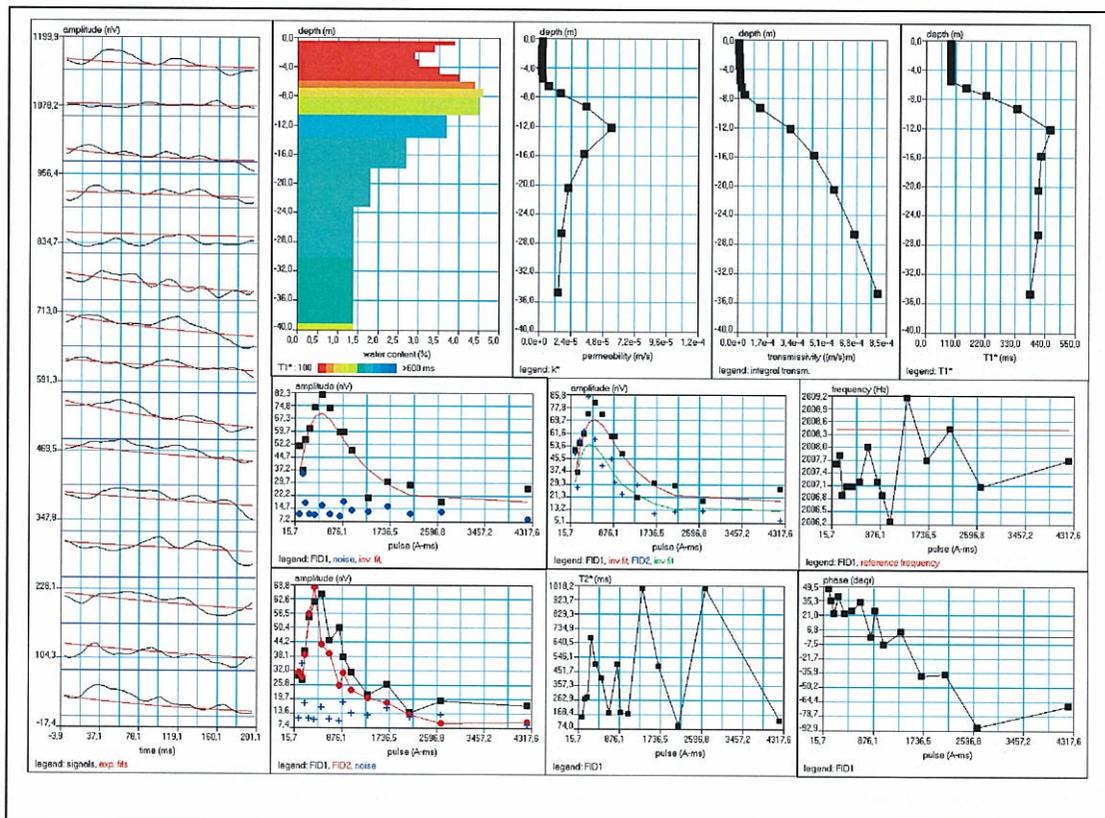
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.99

fitting error = 4.186 %

parameter of regularization = 1.0

permeability constant Cpx = 7.00e-09



Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)

Site: Kerbernez, site 8

Date: 12.07.2001; Time: 18:57

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\INTER1\KERB8.inp

matrix: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms

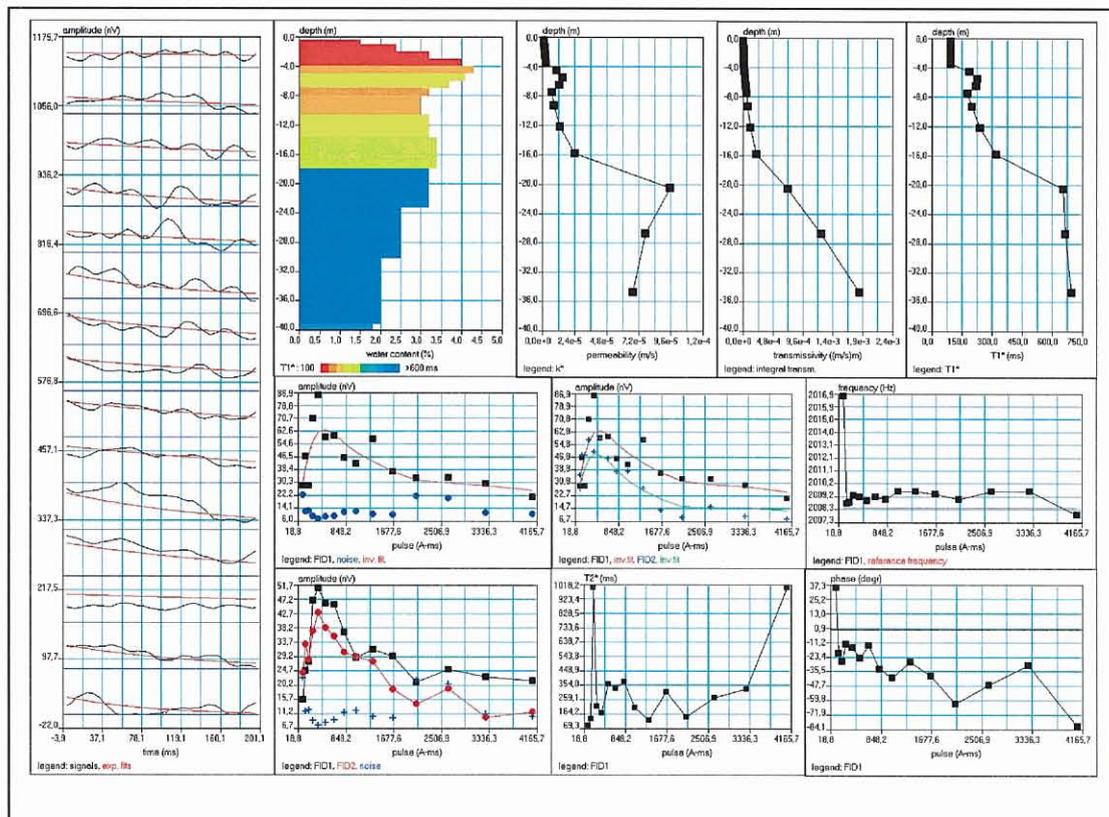
time constant = 15.00 ms

average S/N = 3.37

fitting error = 5.847 %

parameter of regularization = 1.0

permeability constant Cpx = 7.00e-09



Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)

Site: Kerbernez, site 9

Date: 16.07.2001; Time: 17:20

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\INTER1\KERB9.inp

matrix: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms

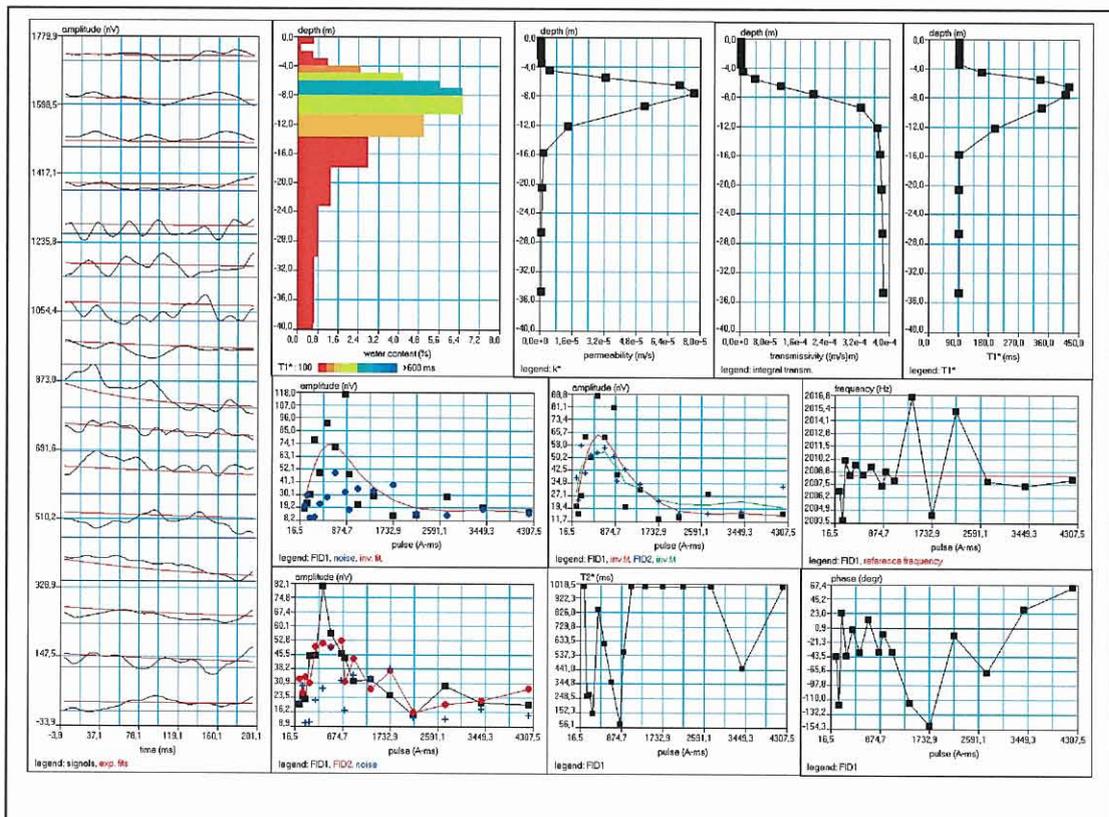
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.72

fitting error = 11.340 %

parameter of regularization = 2500.0

permeability constant Cpx = 7.00e-09



Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)

Site: Kerbernez, site 10

Date: 17.07.2001; Time: 18:54

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\INTER1\KERB10.inp

matrix: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms

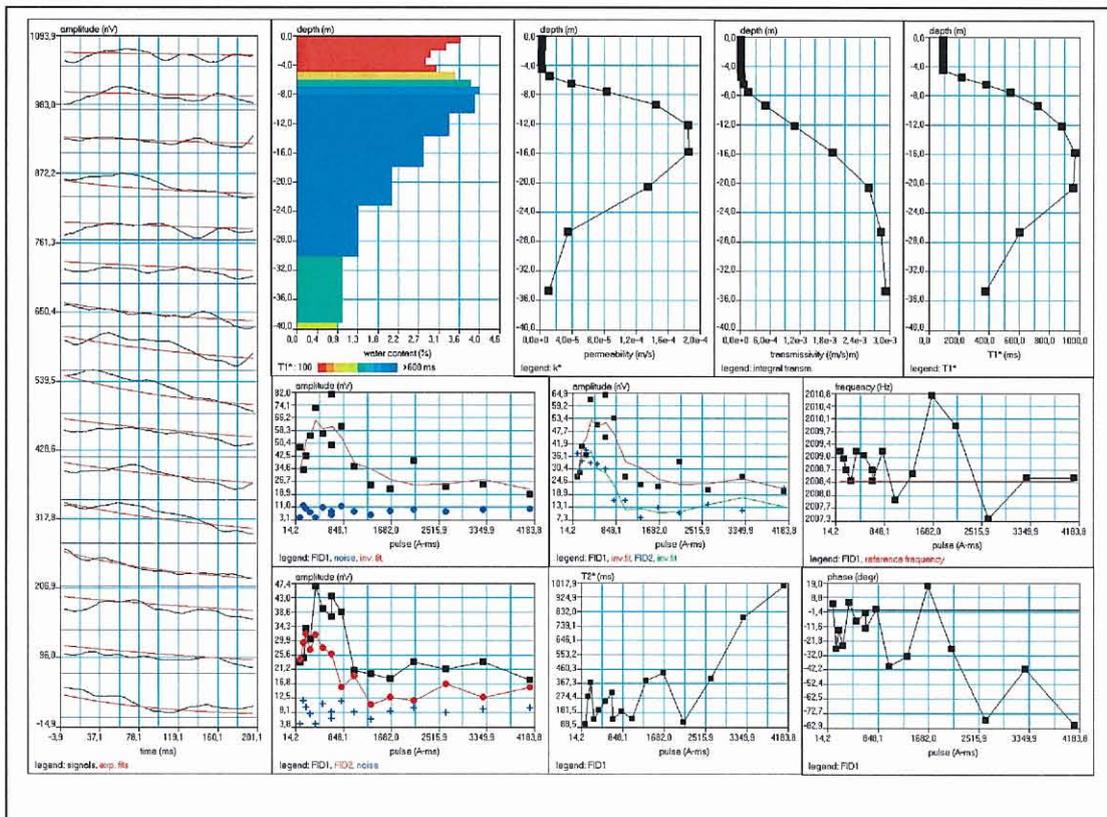
time constant = 15.00 ms

average S/N = 4.63

fitting error = 5.392 %

parameter of regularization = 2500.0

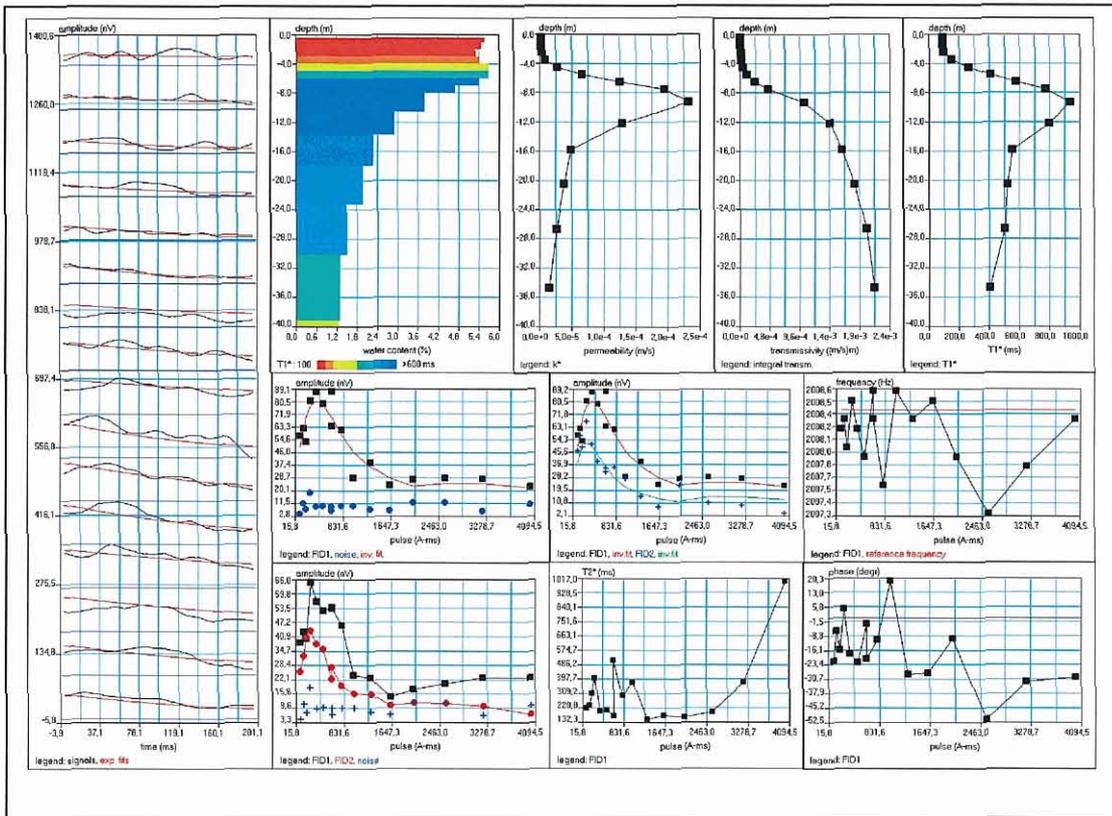
permeability constant Cpx = 7.00e-09



Site: Kerbernez, site 11
 Date: 18.07.2001; Time: 07:37

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\INTER1\KERB11.inp
 matrix: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 5.48
 fitting error = 4.028 %
 parameter of regularization = 1.0
 permeability constant Cpx = 7.00e-09

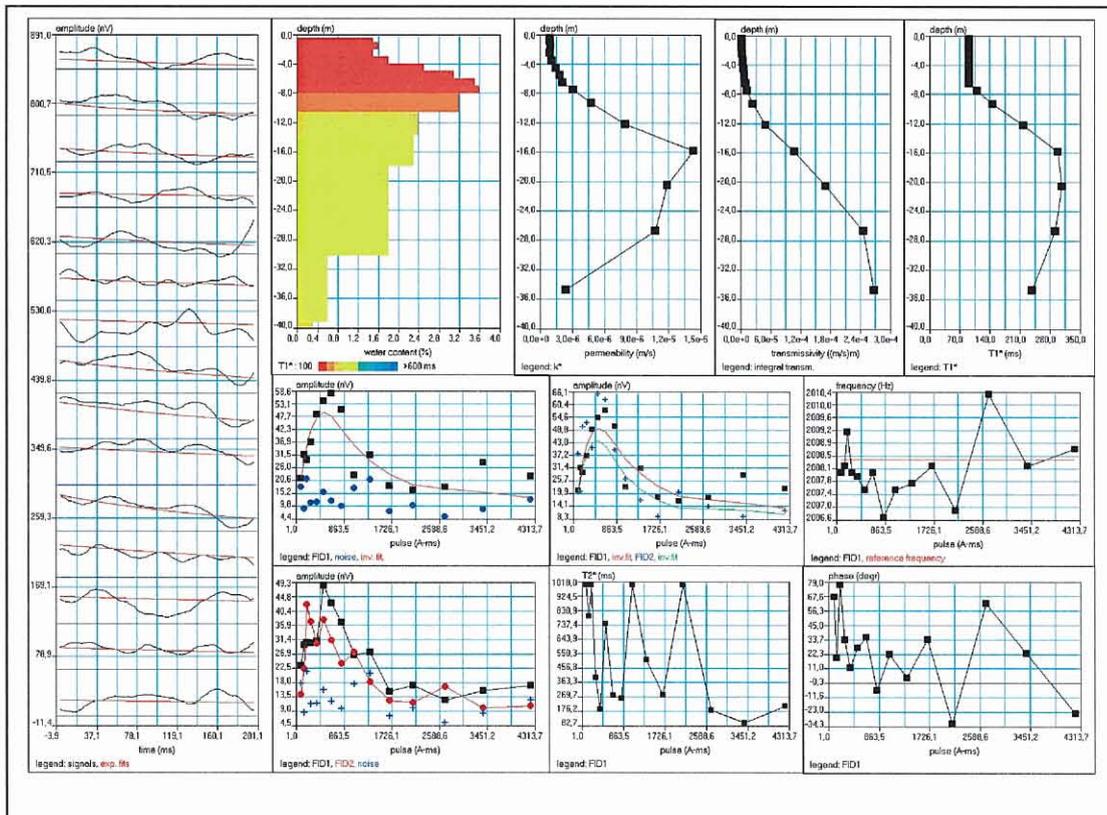


Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)

Site: Kerbernez, site 12
 Date: 18.07.2001; Time: 12:58

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\INTER1\KERB12.inp
 matrix: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 2.56
 fitting error = 5.347 %
 parameter of regularization = 1.0
 permeability constant Cpx = 7.00e-09



Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)

Site: Kerbernez, site 13

Date: 18.07.2001; Time: 18:27

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\INTER1\KERB13.inp

matrix: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms

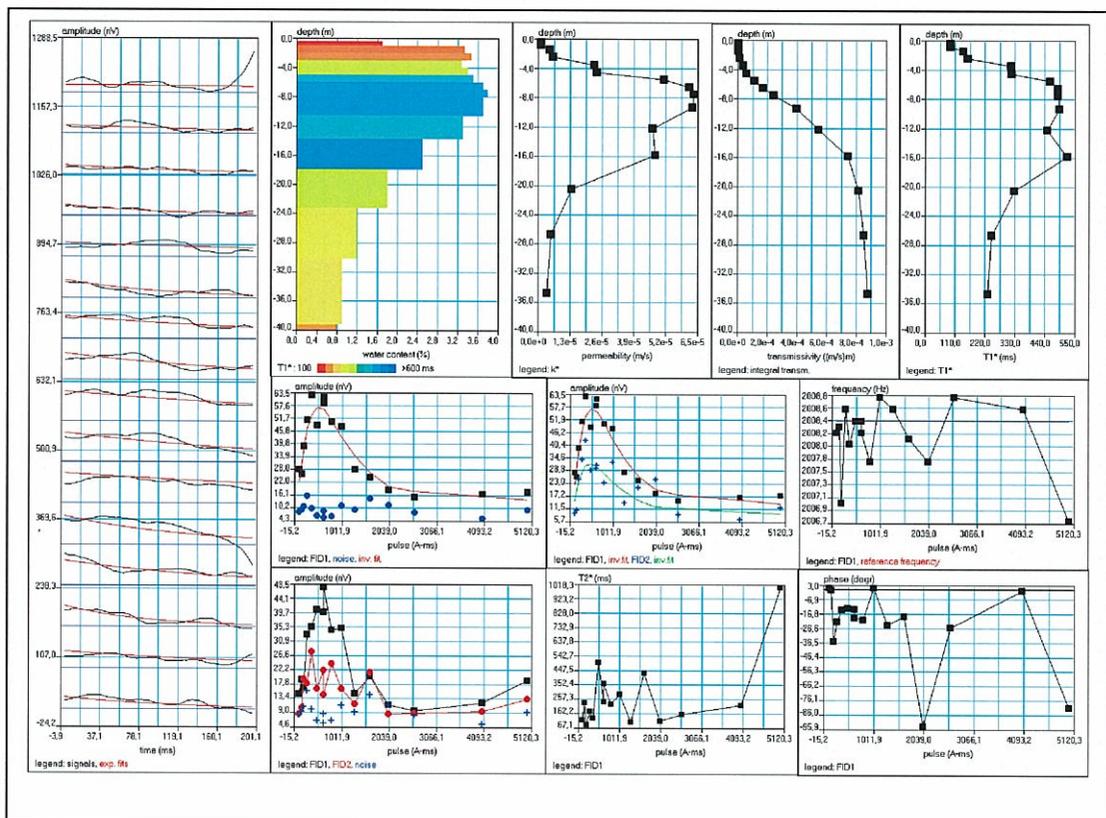
time constant = 15.00 ms

average S/N = 3.77

fitting error = 3.121 %

parameter of regularization = 1.0

permeability constant Cpx = 7.00e-09



Caractérisation hydrodynamique du bassin versant de Kerbernez (Bretagne)

Site: Kerbernez, site 14

Date: 19.07.2001; Time: 12:03

NUMIS data set: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\INTER1\KERB14.inp

matrix: C:\moi\REPORTS\kerbernez-2001\MATRIX\KERB_1.MRM

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 55 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms

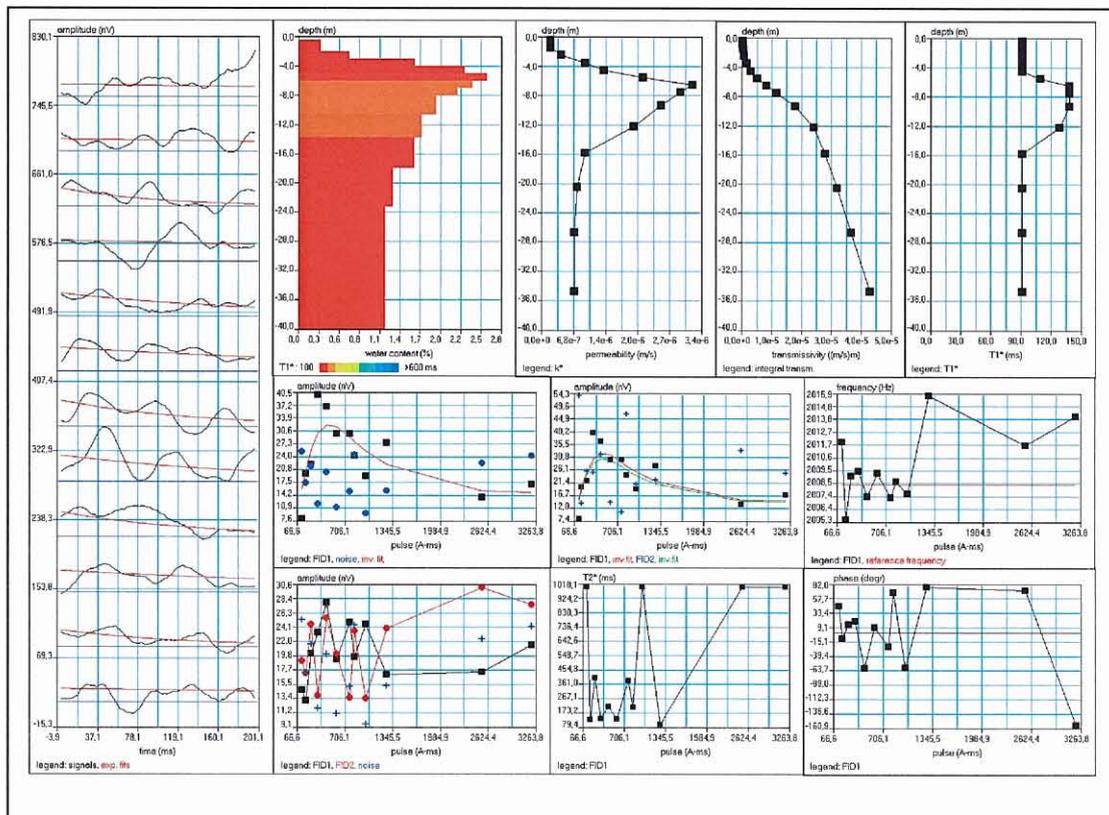
time constant = 15.00 ms

average S/N = 0.96

fitting error = 5.847 %

parameter of regularization = 1.0

permeability constant Cpx = 7.00e-09



BRGM
SERVICE AMÉNAGEMENT ET RISQUES NATURELS
Unité Mesure, reconnaissance, surveillance
BP 6009 – 45060 Orléans cedex 2 – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34