



Ministère de l'Economie,
des Finances et
de l'Industrie

*Caractérisation des aquifères du profil d'altération
du socle par sondage de
Résonnance Magnétique Protonique RMP
dans la région de Plabennec (29)*

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 98-G-420

juin 1998
R 40131





Ministère de l'Economie,
des Finances et
de l'Industrie



*Caractérisation des aquifères du profil d'altération
du socle par sondage de
Résonance Magnétique Protonique RMP
dans la région de Plabennec (29)*

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 98-G-420

juin 1998
R 40131



Mots clés : Géophysique, RMP, Hydrogéologie, Socle, Aquifère fracturé, Plabennec, Finistère, Bretagne.

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

BRGM (1998) - Caractérisation des aquifères du profil d'altération du socle par sondage de Résonance Magnétique Protonique, RMP dans la région de Plabennec (Finistère). Rap. BRGM R 40131, 41 p., 2 fig., 1 tabl., 3 ann.

© BRGM, 1998, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre du projet "Ressource du sous-sol et environnement en Bretagne" (fiche de Service public 98-G-420), le Service Géologique Régional de Bretagne souhaite évaluer les caractéristiques hydrogéologiques des niveaux d'altération en zone de socle.

Cinq sondages RMP ont été réalisés dans la zone des captages pour l'alimentation en eau potable de Plabennec. Ils présentent un bruit électromagnétique organisé, assez important, qui empêche d'étudier l'aquifère par RMP.

Dans la zone de captage de Kernilis, les bruits sont du même ordre de grandeur mais, désorganisés, sont mieux réduits par stack. Le sondage RMP réalisé dans cette dernière zone montre, entre 0 et 50 m de profondeur, un aquifère principal qui pourrait correspondre aux arènes.

Le sondage démontre la possibilité d'étudier les caractéristiques hydrodynamiques du profil d'altération du socle par RMP si les conditions de bruit sont favorables.

Pour des conditions plus défavorables, telles que rencontrées sur la zone de Plabennec, des recommandations sont faites sur la méthodologie à mettre en oeuvre pour obtenir des résultats.

Sommaire

Introduction	7
1. Méthode et moyens	9
1.1. Méthode de la Résonance Magnétique Protonique.....	9
1.2. Moyens mis en oeuvre.....	10
1.2.1. Personnel.....	10
1.2.2. Matériel.....	10
2. Résultats	13
2.1. Analyse des données.....	13
2.2. Résultats du sondage PLB6.....	14
Conclusion	17

Liste des illustrations

Fig. 1 - Localisation des sites de mesure.....	8
Fig. 2 - Résultat d'interprétation du sondage RMP PLB6.....	15
Tabl. 1 - Caractéristiques des sondages RMP.....	11

Liste des annexes

Ann. 1 - Localisation des sondages RMP sur les plans du cadastre et agrandissement du 1/25 000.....	19
Ann. 2 - Paramètres RMP mesurés.....	23
Ann. 3 - Une nouvelle méthode géophysique pour les études hydrogéologiques : l'application de la résonance magnétique nucléaire.....	31

Introduction

Dans le cadre du projet "Ressource du sous-sol et environnement en Bretagne" (fiche de Service public 98-G-420), le Service Géologique Régional (SGR) de Bretagne, souhaite évaluer les caractéristiques hydrogéologiques des niveaux d'altération en zone de socle en utilisant la Résonance Magnétique Protonique (RMP).

Une zone test recoupant les sites de captage pour l'alimentation en eau potable de la ville de Plabennec a été proposée par le SGR. Dix points de mesure définissent un profil recoupant la zone globalement d'est en ouest (fig. 1). Ces points sont d'une part, des forages d'eau ayant fait l'objet de pompages d'essai qui doivent servir à calibrer les mesures RMP, d'autre part, des forages présentant des profils d'altération variés.

L'objectif est, sur ces différents points, de mettre en évidence par RMP des variations, de la teneur en eau et, (au travers de calibrations) d'autres paramètres hydrodynamiques, le long du profil d'altération.

La zone d'altération, des arènes à la roche saine, a une puissance maximale d'environ 70 m, mais la zone d'intérêt est limitée aux altérites qui constituent le réservoir principal et dont l'épaisseur est inférieure ou égale à 50 m.

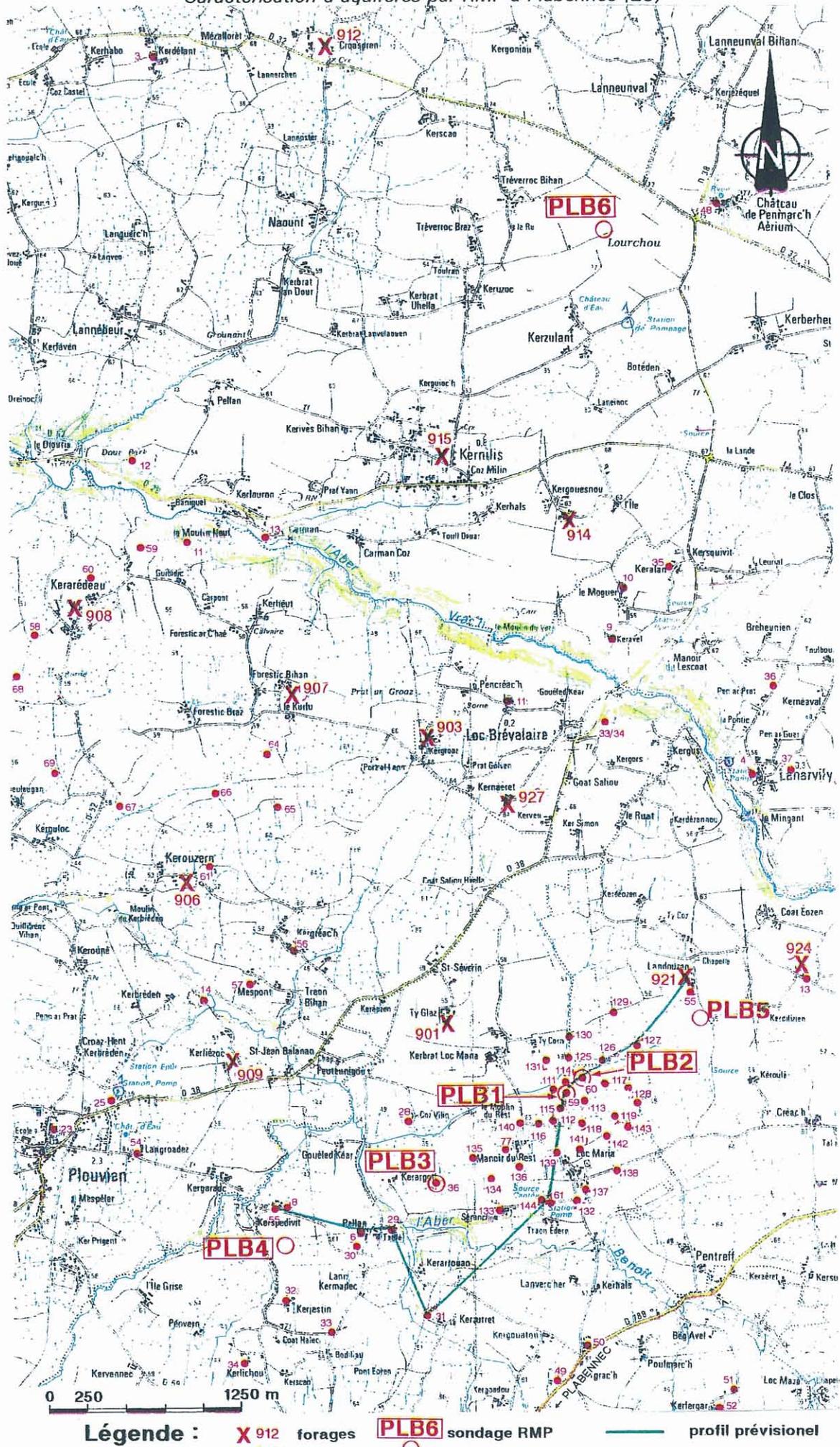


Fig. 1 - Localisation des sites de mesure.

1. Méthodes et moyens

1.1. PRINCIPE DE LA RESONANCE MAGNETIQUE PROTONIQUE

La Résonance Magnétique Protonique (RMP) est une propriété des protons de certains noyaux atomiques, et en particulier de l'hydrogène, qui produisent un champ magnétique de relaxation après avoir été excités à la fréquence de Larmor. C'est la fréquence de précession des protons, f qui dépend directement de l'intensité du champ magnétique terrestre, H ($f = \gamma H$).

La très grande majorité des atomes d'hydrogènes présents dans le sous-sol sont contenus dans les molécules d'eau. Par la mesure du champ magnétique de relaxation des protons, on déduit la quantité d'eau contenue dans le sous-sol.

Une boucle est installée à la surface du sol. Un courant alternatif de haute intensité, $i(t) = I \cos(\omega t)$ est injecté dans la boucle pendant une durée (τ) de quelques minutes : c'est le pulse caractérisé par le paramètre $q = I \tau$. Après coupure du courant d'injection, la décroissance du champ magnétique de relaxation est de la forme :

$$e(t) = E(q) \sin(\omega t + \varphi) \exp(-t/T)$$

où E (amplitude du signal) et T (temps de décroissance du signal) sont les paramètres significatifs directement liés à la **teneur en eau** et à la **taille moyenne des pores du réservoir, respectivement**. ω correspond à la fréquence de Larmor, et φ dépend de la conductivité du sous-sol.

Des valeurs croissantes de pulse sont injectées pour une profondeur d'investigation croissante. L'ensemble des mesures de décroissance du champ magnétique de relaxation, effectué pour différentes valeurs de pulse, réalise un sondage RMP en profondeur. L'inversion des données selon un modèle de couches planes horizontales (1D) permet d'obtenir la distribution de la teneur en eau et du temps de décroissance en fonction de la profondeur. Cette teneur en eau est définie comme le rapport du volume d'eau libre, V_l sur le volume total de sous-sol considéré, V avec $V = V_l + V_b + V_r$ où :

V_b = volume de l'eau liée = eau liée aux grains de la roche (notamment aux argiles) et qui ne peut être extraite, par opposition à l'eau libre ;

V_r = volume occupé par la roche.

La profondeur d'investigation est également contrôlée par la taille de la boucle et est grossièrement donnée comme égale au diamètre de la boucle ; pour des terrains dont la résistivité est de l'ordre de 100 $\Omega \cdot m$:

- 100 m de profondeur d'investigation pour une boucle circulaire de 100 m ;

- 50 m de profondeur d'investigation pour une boucle en huit dont chaque cercle fait 50 m de diamètre.

La pénétration diminue quand la résistivité des terrains investigués diminue.

1.2. MOYENS MIS EN OEUVRE

1.2.1. Personnel

- 2 géophysiciens.

1.2.2. Equipement

- 1 système RMP IRIS-BRGM Numis ;
- 1 magnétomètre ;
- 600 m de câble d'injection et de mesure.

1.3. TRAVAUX REALISES

Cinq sondages ont été réalisés sur la zone des captages de Plabennec, définie initialement. Les sites des forages 59 et 60 du futur captage de Ty Corn ont d'abord été mesurés (sondages RMP PLB1 et PLB2) comme ils présentaient les informations géologiques et hydrodynamiques les plus complètes et la situation la plus éloignée de toute source électromagnétique. Le site du captage de Traon Edern (61) a été délaissé à priori, car il est le lieu de croisement de nombreuses lignes électriques aériennes. Au vu du fort parasitage électromagnétique observé sur PLB1 et PLB2, des sites, ne figurant pas dans le programme initial, ont alors été choisis pour leur éloignement de toute source électrique (PLB3, PLB4, PLB5).

Enfin, devant la difficulté de réaliser des mesures de bonne qualité en raison de bruits électromagnétiques parasites difficiles à éliminer sur l'ensemble de la zone des captages de Plabennec, celle-ci a été abandonnée au profit du site du captage de Kerzulant pour l'alimentation en eau potable du village de Kernilis. Sur cette deuxième zone, un sondage (PLB6) a été réalisé. Présentant un bon rapport signal sur bruit, il a été mesuré deux fois : d'abord avec un nombre de stack de 50, puis avec un nombre de stack de 100.

Les caractéristiques principales de chaque sondage sont présentées dans le tableau 1.

La profondeur d'investigation (tabl. 1) est estimée, à priori, en prenant en compte le type d'antenne utilisé et la résistivité présumée des terrains. La résistivité est estimée à 200 ohm.m pour les altérites et 500 à 1000 ohm.m pour le socle plus ou moins sain.

Caractérisation d'aquifères par RMP à Plabennec (29)

Sondage	Forage	Zone de captage de	N° de fichier	Dispositif d'antenne	Profondeur d'investigation à priori (m)	Niveau de bruit avant stack (nV)	Rapport signal/bruit	Qualité des données	Observation du signal
PLB1	59	Plabennec	PLB1	circulaire, d = 100 m	80-100	10 000-30 000	mesures impossibles		non
			PLB1b	en huit, d = 50 m	40-50	600-1 000		mauvaise	non
			PLB1c	en huit, d = 50 m	40-50	400-700	0.5	mauvaise	non
PLB2	60	Plabennec	PLB2	circulaire, d = 100 m	80-100	15 000	mesures impossibles		non
			PLB2a	en huit, d = 50 m	40-50	1 400-2 400		mauvaise	non
			PLB2b	en huit, d = 50 m	40-50	1 400-2 400	1.0	mauvaise	non
PLB3	36	Plabennec	PLB3	circulaire, d = 100 m	80-100	6 000-20 000	mesures impossibles		non
			PLB3a	en huit, d = 75 m	40-50	1 000-2 000		mauvaise	non
			PLB3c	en huit, d = 50 m	40-50	400-1 000	1	mauvaise	non
PLB4	150 m au S de 55 et 8	Plabennec	PLB4	en huit, d = 50 m	40-50	700-2 500 (4 000)	1	mauvaise	non
PLB5	200 m au S de 55	Plabennec	PLB5	en huit, d = 50 m	40-50	4 000-10 000	1	mauvaise	non
PLB6	600 m au N	Kemilis	PLB6a	en huit, d = 50 m	40-50	400-800	2-10	moyenne	oui
	du captage		PLB6c	en huit, d = 50 m	40-50	400-800	3-26	bonne	oui

Tabl. 1 - Caractéristiques des sondages RMP.

2. Résultats

En l'absence d'étalonnage, les pourcentages de teneur en eau donnés ici n'ont qu'une valeur relative destinée à permettre la comparaison des résultats des différents sondages entre eux. Ils ne doivent, en aucun cas, être considérées comme les teneurs véritables des aquifères.

2.1. ANALYSE DES DONNÉES (cf.ann. 2)

Les données RMP mesurées sont présentées pour chaque sondage en annexe 1. Les informations concernant les niveaux de bruit, le rapport signal sur bruit et la qualité des mesures sont synthétisés dans le tableau 1.

On définit le signal RMP comme la composition de signal utile (généralisé par l'eau du sous-sol) et de bruit (généralisé par tout autre source électromagnétique). Le bruit est évalué par une mesure, réalisée avant la génération du pulse, qui est additionnée (stack) de la même manière que le signal RMP, mesuré après le pulse. Le rapport du signal RMP sur le bruit mesuré avant le pulse permet de définir le rapport signal sur bruit. Le niveau du bruit avant stack permet d'évaluer l'environnement électromagnétique du site.

Le résultat d'un sondage est d'autant plus sûr et la confiance en l'interprétation qui en sera faite, sera d'autant plus grande, que le rapport signal sur bruit est élevé. Pour les valeurs du rapport signal sur bruit de l'ordre ou inférieur à 1, le signal RMP n'émerge pas du bruit et aucune information utile concernant l'eau ne peut être tirée des sondages. Dans ce cas, l'inversion n'a pas de sens et n'est donc pas effectuée.

Les mesures ont d'abord été tentées avec des dispositifs de boucle circulaire et un rayon de 100 m, pour viser des profondeurs d'investigation de l'ordre de 100 m (PLB1, PLB2, PLB3). Les niveaux de bruit avant stack sont dans ces conditions de boucle très élevés (6 000 à 30 000 nV) et empêchent de réaliser les mesures.

Des dispositifs de mesure en huit qui ont la propriété de réduire le bruit, ont alors été testés avec des diamètres de 75 (PLB3) et 50 m. Ces dispositifs s'avèrent efficaces. Le bruit avant stack est diminué, généralement dans un rapport supérieur à 10 (PLB1, PLB2, PLB3) et s'établit à un niveau très raisonnable de 500 à 1 000 nV pour les diamètres de 50 m. Pour les sondages suivants PLB4, PLB5, PLB6, seuls des dispositifs en huit, de 50 m de diamètre, ont été utilisés. Cependant, on rappellera que la profondeur d'investigation se trouve réduite à 50 m, dans ces conditions de boucle.

Pour les sondages PLB1, PLB2, PLB3 et PLB6, bien que les niveaux de bruit avant stack soient du même ordre de grandeur, les niveaux de bruit après stack sont variables. Il n'est que de 0,5 pour PLB1c, qui présente le plus faible niveau de bruit avant stack (400-700), alors qu'il atteint un maximum de 26 pour PLB6c dont le bruit avant stack est pourtant légèrement supérieur (400-800). Il apparaît donc que l'efficacité du stack

n'est pas constante. On en déduit que, sur Plabennec, le bruit est plutôt organisé alors qu'il est inorganisé sur Kernilis, ce qui permet une bonne efficacité du stack. Cette efficacité permet d'améliorer, dans un rapport de 1,5 à 2,5 fois le rapport signal sur bruit du sondage PLB6 quand on passe d'un nombre de stack de 50 (PLB6a) à 100 (PLB6c) (cf. comparaison en annexe 2).

Dans cet environnement rural, les probables sources de bruit sont l'alimentation en électricité des élevages de porcs, les clôtures électriques des parcs à vaches (ces installations existent dans chacune des fermes de la zone de Plabennec et forment un réseau assez dense) et, sur l'ensemble de la région, un réseau EDF très ramifié en raison de la dispersion des habitations.

Dans la zone de Kernilis, les parcelles sont plus grandes, cultivées le plus souvent, le réseau des installations d'élevages et de parcs est moins dense. Cette situation explique, peut-être les meilleures conditions de bruit rencontrées sur cette zone.

Cinq des six sondages mesurés montrent un rapport signal/bruit de l'ordre de 1 et sont inexploitable. Seul le sondage PLB6 est donc inversé. Les résultats qu'il apporte sont discutés dans le paragraphe suivant.

2.2. RESULTAT DU SONDAGE RMP PLB6 (fig. 2)

Les logs de teneur en eau et du temps de décroissance, obtenus à partir du sondage PLB6c, sont présentés sur les graphiques de la partie inférieure de la figure 2.

Deux inversions sont utilisées : la première, représentée par un trait continu, fait intervenir un modèle contenant un grand nombre de couches ; la seconde, en trait discontinu, un nombre limité de couche (une seule dans ce cas).

On observe que l'aquifère principal (teneur de l'ordre de 2,5 %) est compris entre 8 et 26 m de profondeur. Il surmonte, si on prend en compte la courbe continue, un second aquifère dont la teneur est moindre, jusqu'à une profondeur de 50 m (limite de l'investigation).

Les temps de décroissance, du fait d'un niveau de bruit, malgré tout, assez élevé, n'ont pu être déterminés que pour le premier aquifère. Ils apparaissent assez élevés entre 150 et 400 ms indiquant une taille moyenne des pores assez importante.

Si l'on se réfère aux forages voisins (912, 914, 915 où 15 à 25 m d'arène surmontent le granite) et à un niveau statique mesuré (le 23/07/93) à 6 m sous la surface du sol, il est possible que l'aquifère, caractérisé par une teneur de 2 % et un temps de décroissance de 150 à 400 ms, mis en évidence entre 8 et 25 m par RMP, corresponde aux arènes.

SONDAGE RMP PLB6

résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8
 Diametre d'antenne: 50 m

Nombre de stack: 100
 Processing window: 200 ms
 Filt. time constant: 10 ms

Date: 12/06/98

Site: Plabennec

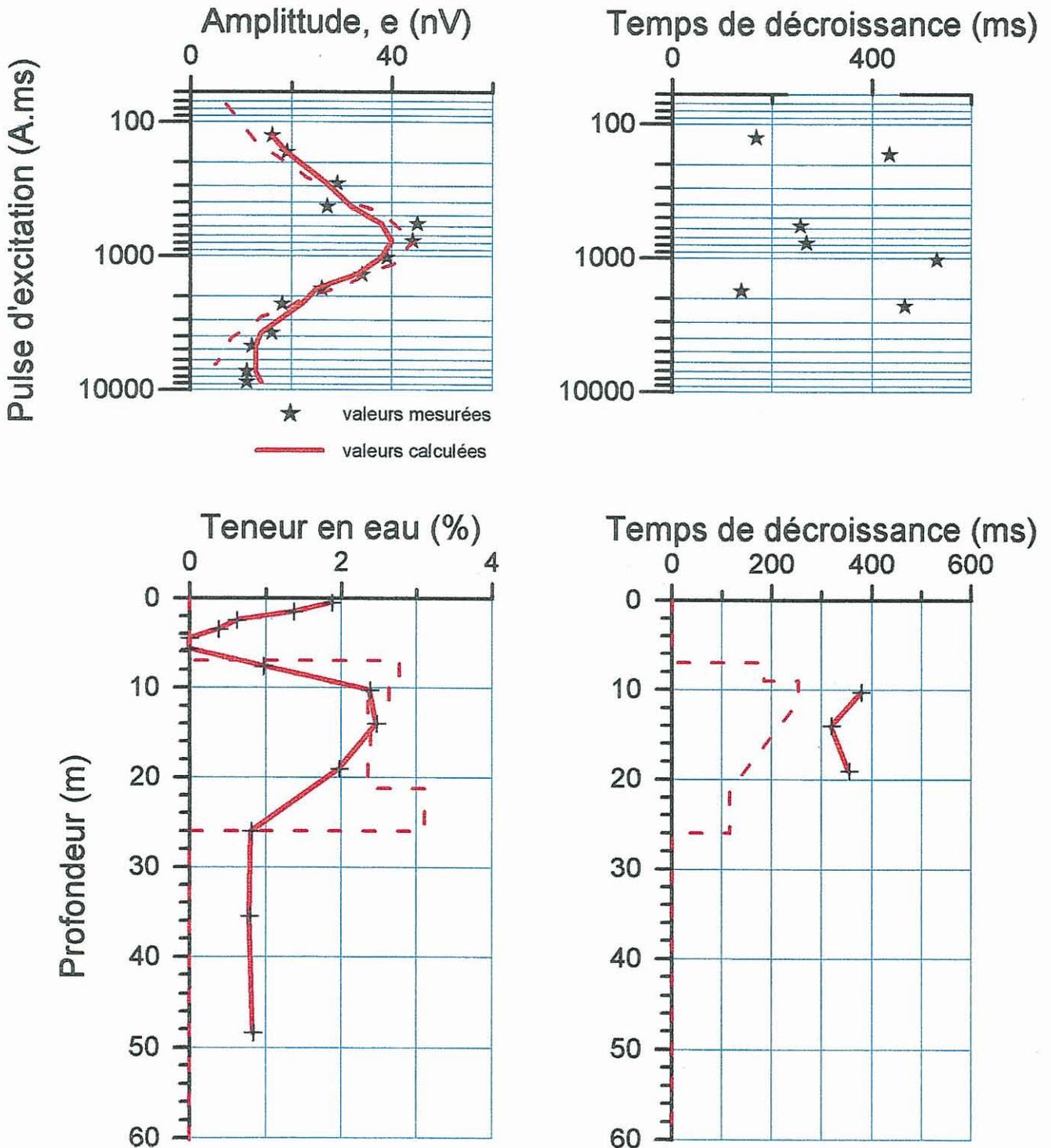


Fig. 2 - Résultat d'interprétation du sondage RMP PLB6.

Conclusion

Parmi les six sites reconnus, cinq, situés dans la zone des captages pour l'alimentation en eau potable de Plabennec, présentent un bruit électromagnétique organisé très important qui empêche d'étudier l'aquifère par RMP. Sur le sixième site, dans la zone de captage de Kernilis, les bruits sont du même ordre de grandeur mais, désorganisés, sont mieux réduits par stack.

Les résultats obtenus, entre 0 et 50 m de profondeur, sur ce dernier site, montrent un aquifère principal qui pourrait correspondre aux arènes.

Cette étude démontre la possibilité d'étudier les caractéristiques hydrodynamiques du profil d'altération du socle par RMP si les conditions de bruit sont favorables.

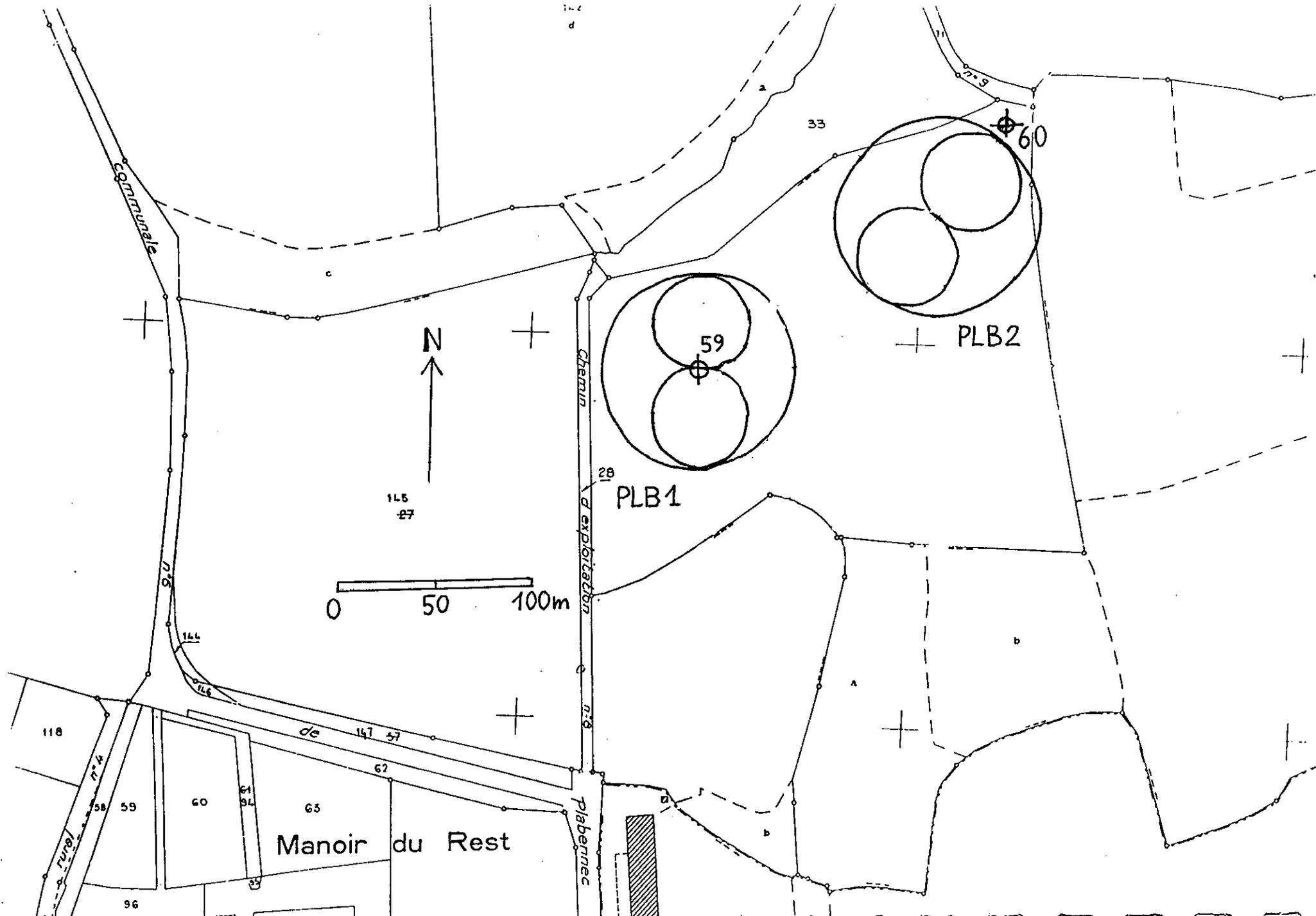
Afin de réaliser les mesures RMP dans des conditions de bruit optimal et afin d'améliorer le rapport signal sur bruit, les recommandations suivantes sont faites :

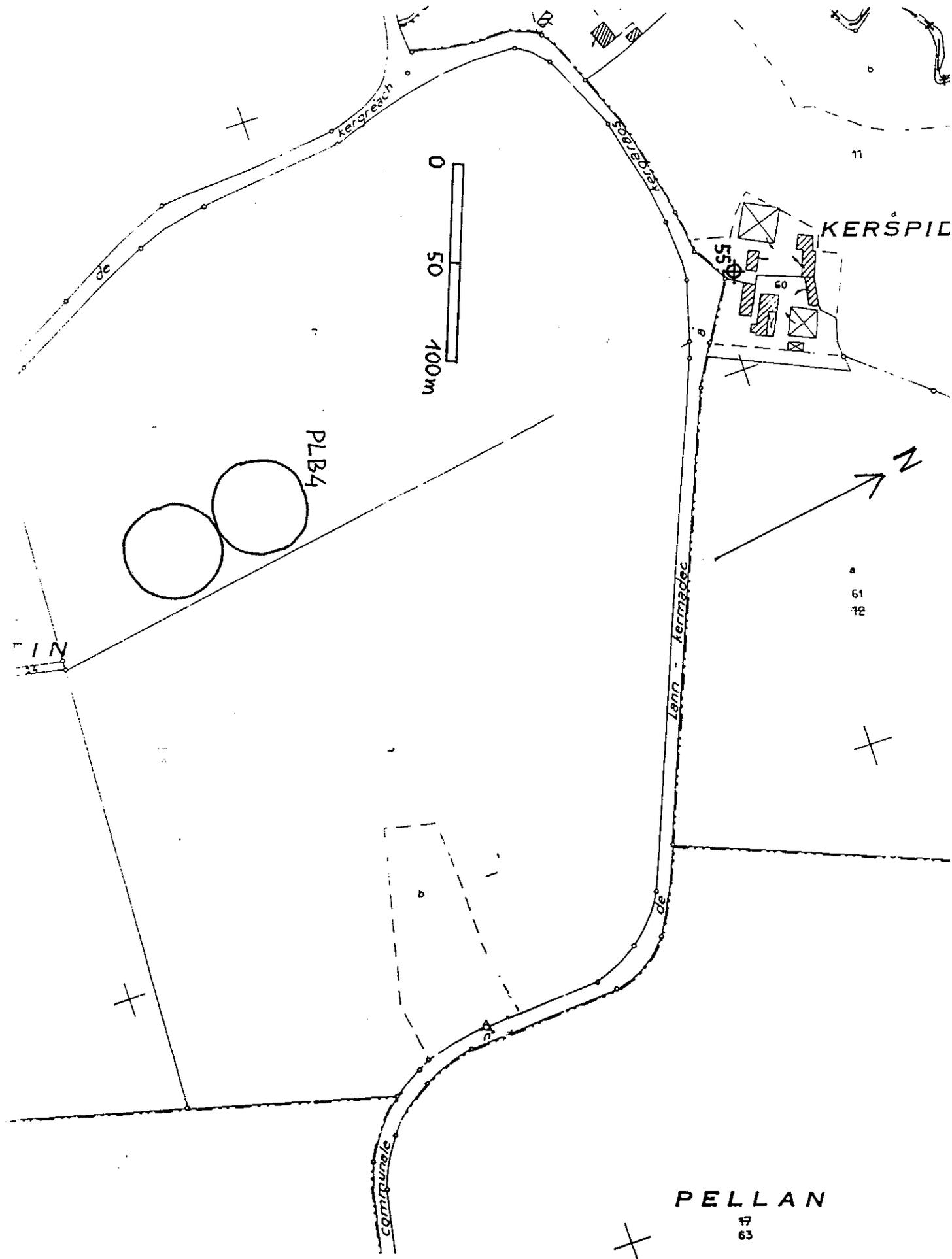
- choix des sites de mesure en fonction de leur environnement électromagnétique visible (éviter les zones à forte densité d'installation agricole, à réseau électrique dense et désorganisé,...) ;
- tenter de faire stopper toutes les clôtures électriques de parcs sur l'ensemble des zones pendant la durée des mesures ;
- optimiser systématiquement les antennes en huit ;
- améliorer le rapport signal sur bruit en final par la mesure de programmes longs avec un nombre de stack plus important.

Les sondages réalisés lors de cette étude avec un nombre de stack de 50 duraient environ 3 heures et avec 100 stack (sur PLB6c), 6 heures. Il est possible d'envisager de doubler encore ce temps d'acquisition pour un maximum de deux sondages de 12 heures par 24 heures. Un rendement de deux sondages par jour reste économique par rapport à des forages et pompages d'essais ou des essais Lugeon.

Annexe 1

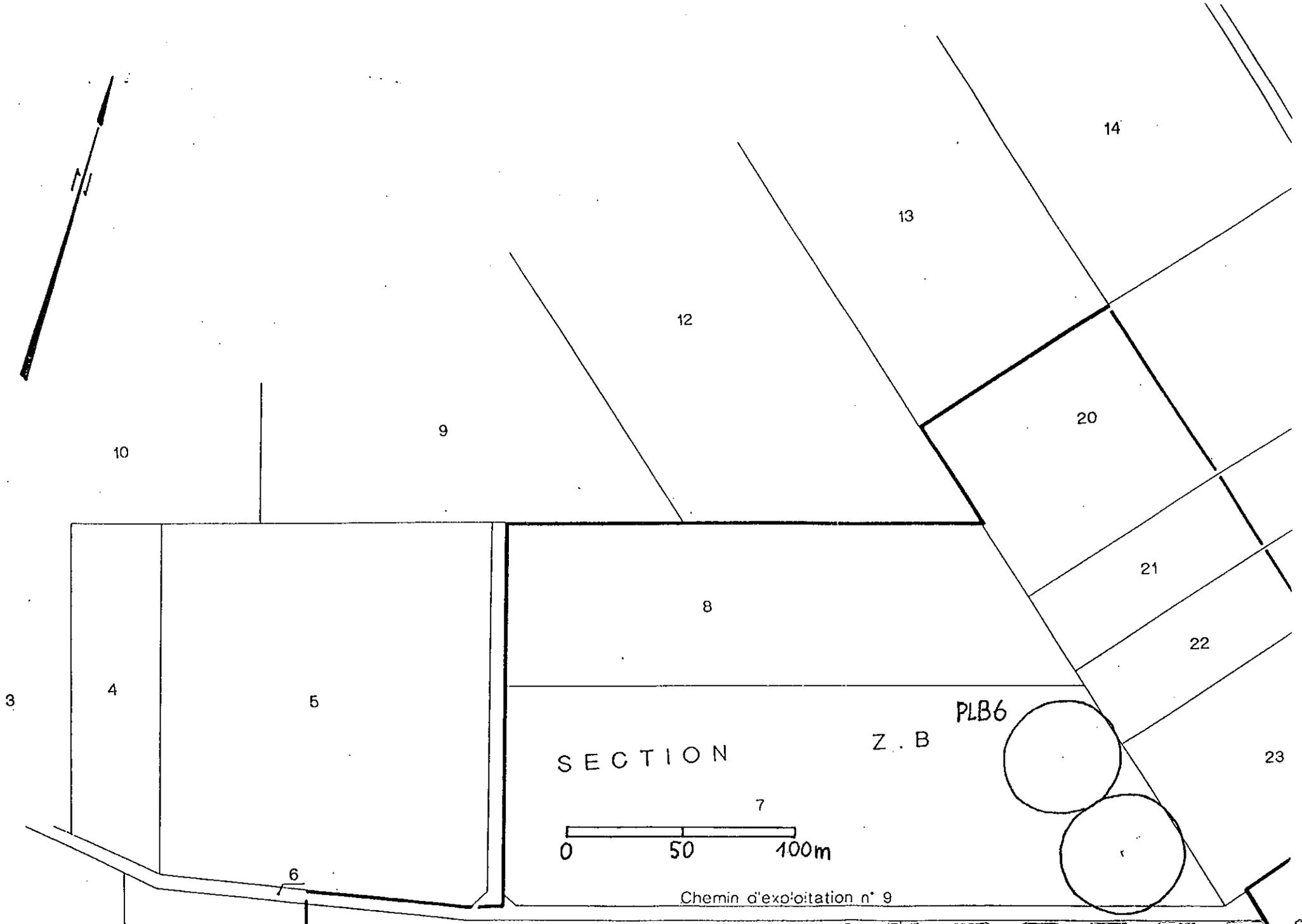
Localisation des sondages RMP sur les plans du cadastre et agrandissement du 1/25 000





PELLAN

17
63



Annexe 2

Paramètres RMP mesurés

PMR data

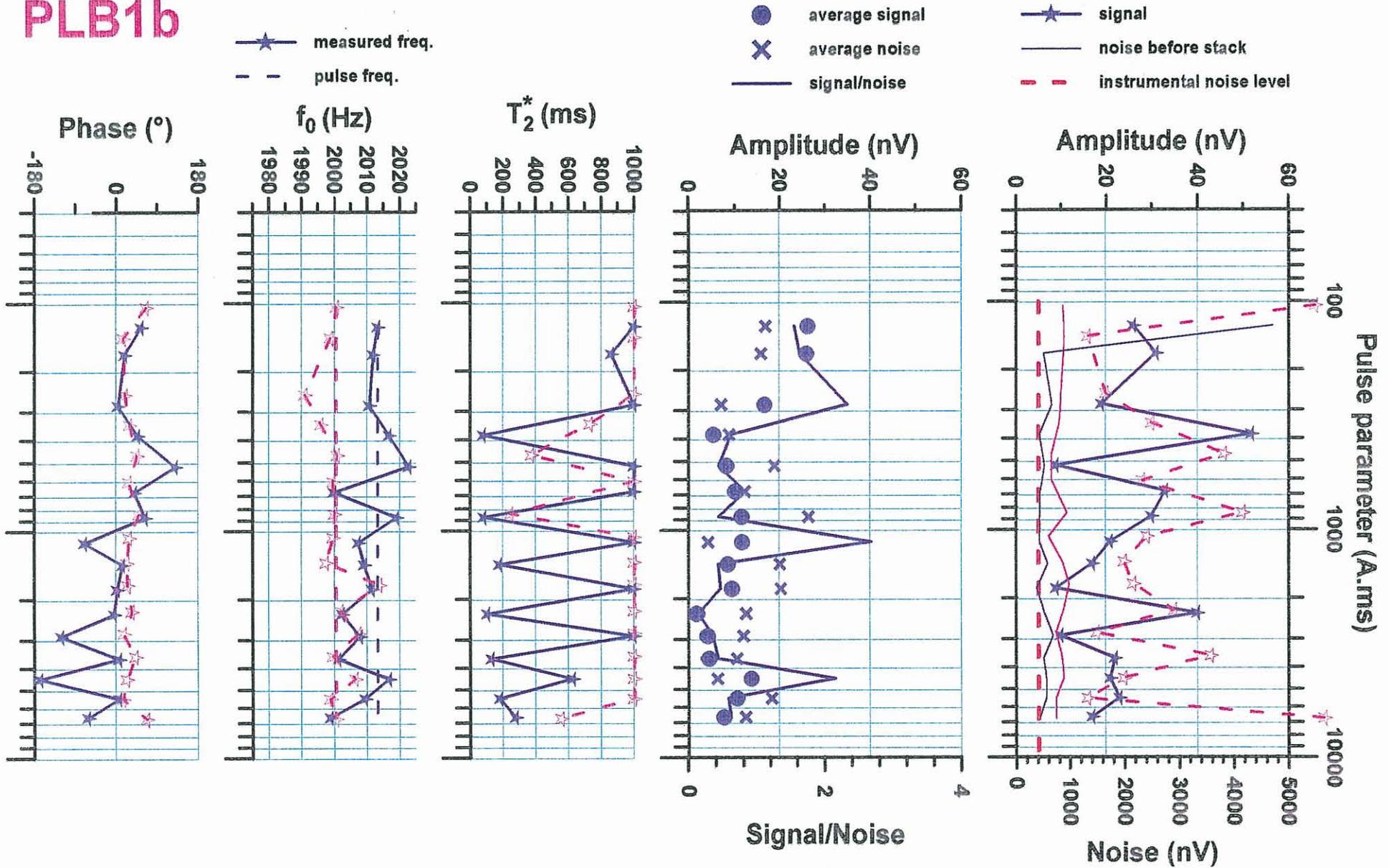
PLB1c

PLB1b

Antenna type: 8-shape
 Stacking number: 50
 Filt.time constant: 20 ms

Antenna diameter: 50 m
 Measuring window: 240 ms

Date:09/06/98
 Site: Plabennec

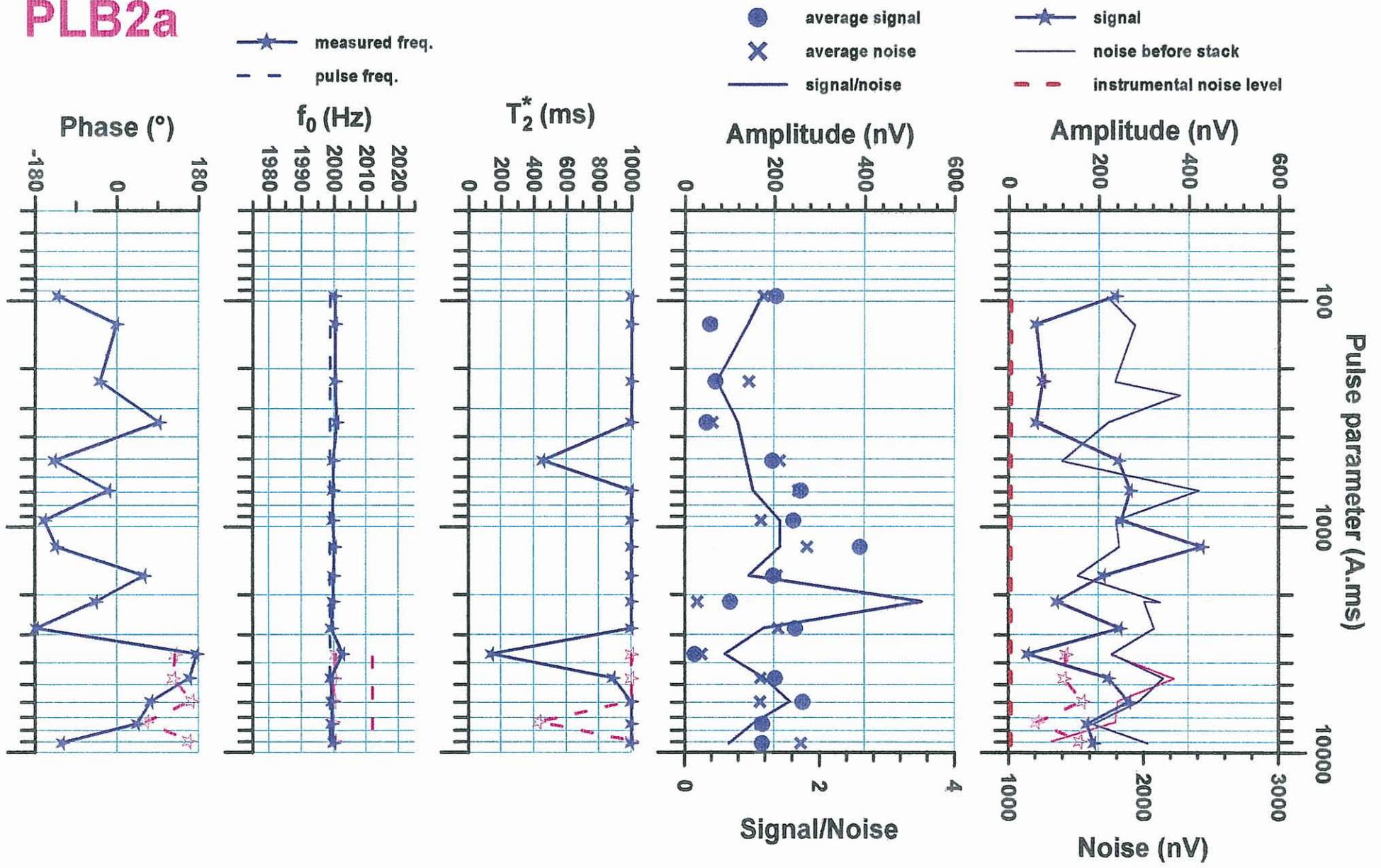


PMR data

PLB2b

PLB2a

Antenna type: 8-shape	Antenna diameter: 50 m	Date: 09/06/98
Stacking number: 50	Measuring window: 240 ms	Site: Plabennec
Filt.time constant: 20 ms		



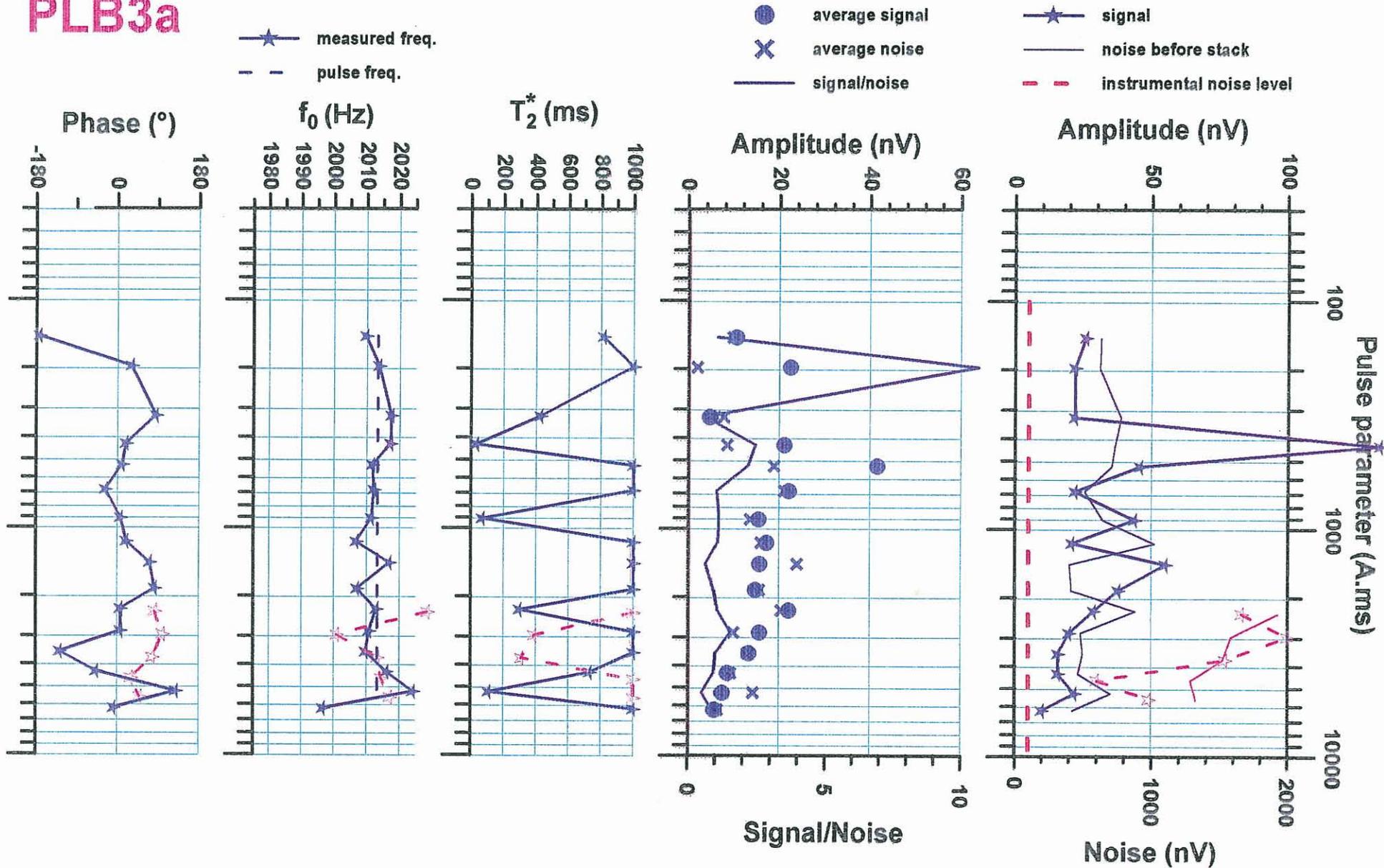
Caractérisation d'aquifères par RMP à Plabennec (29)

PMR data

PLB3c

PLB3a

Antenna type: 8-shape Antenna diameter: 50 m **75 m** Date:10/06/98
 Stacking number: 50 **100** Measuring window: 240 ms Site: Plabennec
 Filt.time constant: 20 ms



PMR data

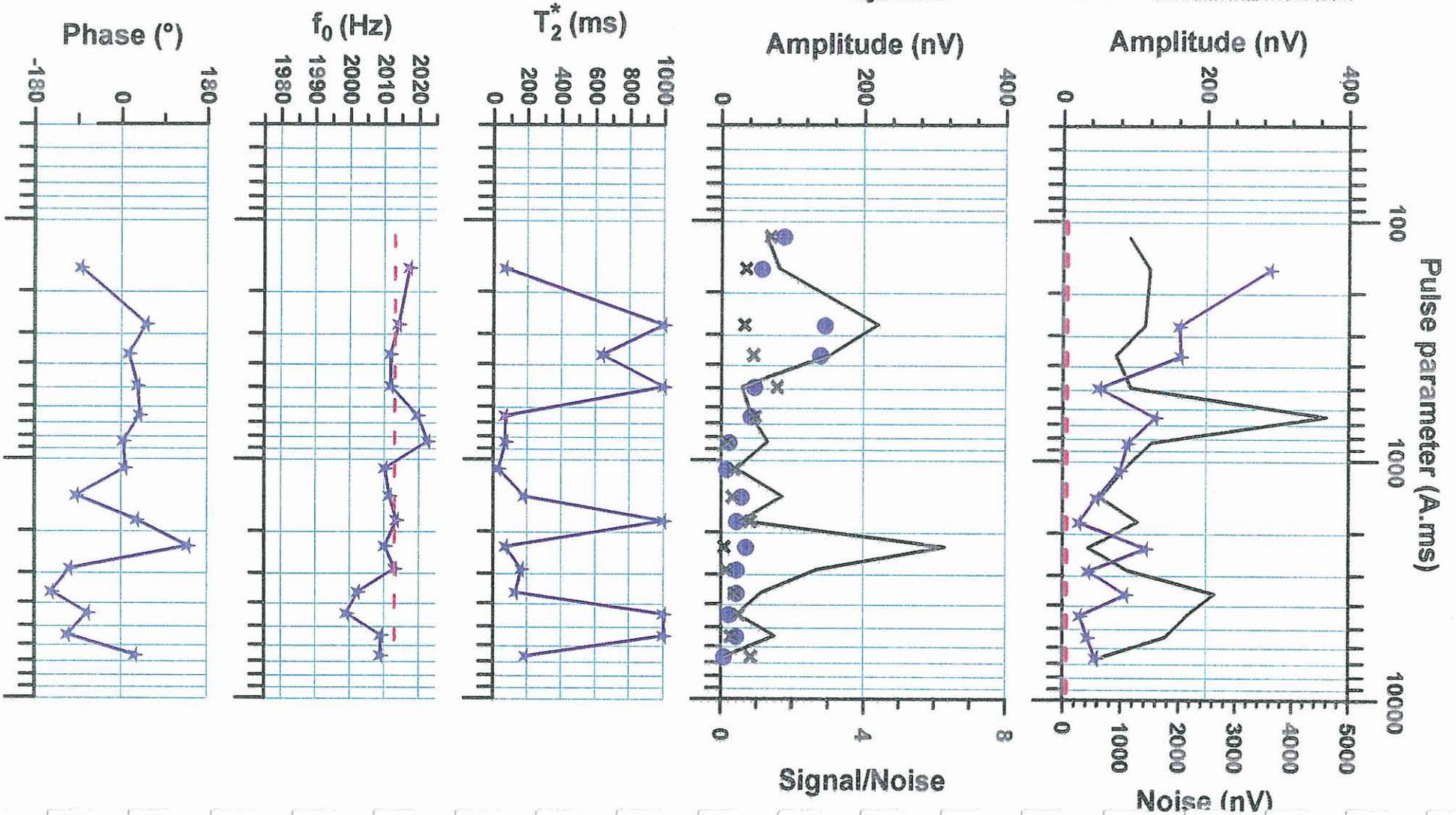
PLB4

Antenna type: 8-shape
 Stacking number: 50
 Filt.time constant: 20 ms

Antenna diameter: 50 m
 Measuring window: 240 ms

Date: 11/06/98
 Site: Plabennec

- ★ measured freq.
- - - pulse freq.
- average signal
- × average noise
- signal/noise
- ★ signal
- noise before stack
- - - instrumental noise level



PMR data

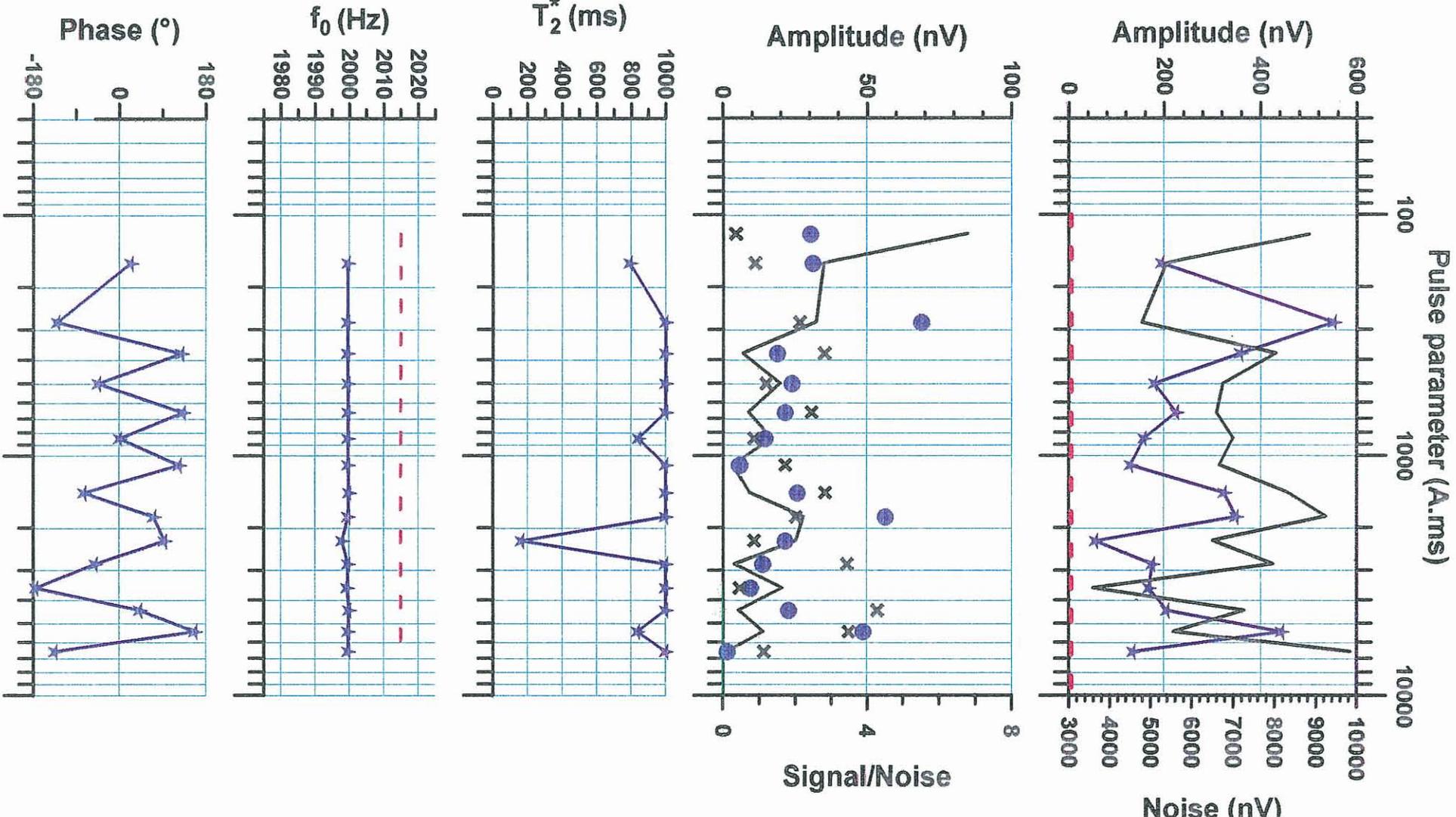
PLB5

Antenna type: 8-shape
 Stacking number: 50
 Fil.t time constant: 20 ms

Antenna diameter: 50 m
 Measuring window: 240 ms

Date: 12/06/98
 Site: Plabennec

- ★ measured freq.
- - - pulse freq.
- average signal
- × average noise
- signal/noise
- ★ signal
- noise before stack
- - - instrumental noise level



PMR data

PLB6c

PLB6a

Antenna type: 8-shape

Antenna diameter: 50 m

Date: 12/06/98

Stacking number: 100 **50**

Measuring window: 240 ms

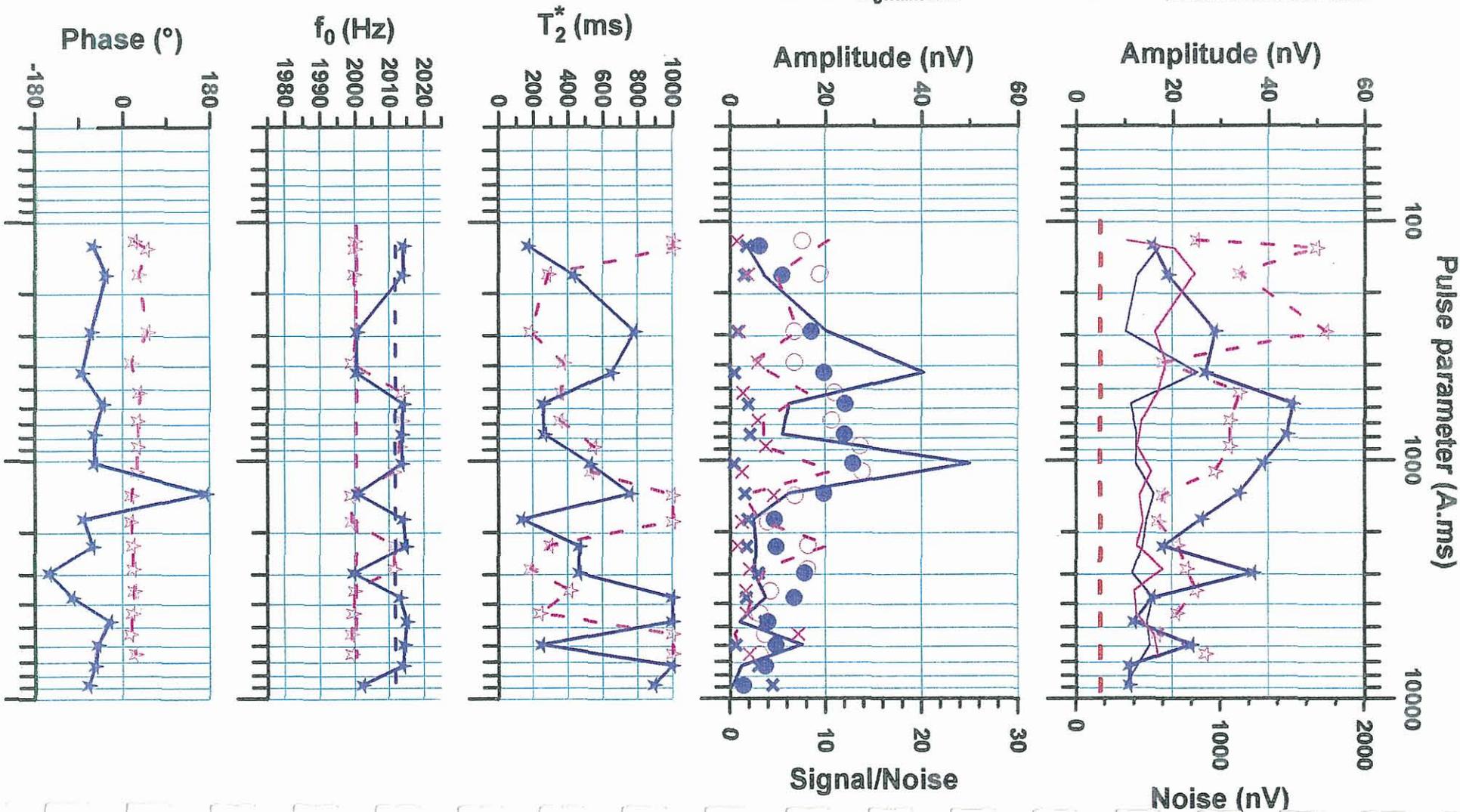
Site: Plabennec

Filt. time constant: 20 ms

★ measured freq.
- - pulse freq.

● average signal
× average noise
— signal/noise

★ signal
— noise before stack
- - instrumental noise level



Annexe 3

Une nouvelle méthode géophysique pour les études hydrogéologiques l'application de la résonance magnétique nucléaire

Une nouvelle méthode géophysique pour les études hydrogéologiques : l'application de la résonance magnétique nucléaire

Alain BEAUCE ⁽¹⁾
Jean BERNARD ⁽²⁾
Anatoly LEGCHENKO ^(1,3)
Pierre VALLA ⁽¹⁾

A new geophysical technique for hydrogeological studies: the application of the nuclear magnetic resonance

Hydrogéologie, n° 1, 1996, pp. 71-77, 8 fig., 1 annexe.

Mots-clés : Méthode nouvelle, Sondage géophysique, Résonance magnétique nucléaire, Nappe eau, Porosité, Teneur eau, Marne (Bazancourt), Loiret (Saint-Cyr-en-Val).

Key-words: New methods, Sounding, Nuclear magnetic resonance, Aquifers, Porosity, Water content, Marne (Bazancourt), Loiret (Saint-Cyr-en-Val).

Résumé

Depuis quelques années, des développements instrumentaux, fondés sur un concept proposé par une équipe de recherche russe permettent d'utiliser une méthode de résonance magnétique nucléaire pour les études hydrogéologiques portant sur la première centaine de mètres. Cette méthode consiste à mesurer le champ magnétique de relaxation créé par les noyaux d'hydrogène après une excitation à la fréquence appropriée. A partir des mesures réalisées à la surface du sol la distribution de la teneur en eau en fonction de la profondeur, ainsi qu'une estimation de la taille des pores peuvent être déterminés.

La mise en oeuvre implique une boucle dans laquelle est envoyé un fort courant électrique; cette boucle, après commutation, capte le champ magnétique de relaxation des noyaux d'hydrogène. Deux exemples sur des sites français, de caractéristiques géologiques différentes, sont présentés. Ils montrent que cette méthode est bien opérationnelle et peut devenir un outil de choix pour la caractérisation hydrogéologique des cents premiers mètres.

Extended abstract

A new geophysical technique based upon the nuclear magnetic resonance (NMR) property of hydrogen nuclei (protons) was developed a few years ago by a russian team. The spin of the protons are energized within the earth magnetic field through an harmonic magnetic field at the proper frequency (about 2 kilohertz) created by a large current (a few hundreds of amperes) driven within a transmitter loop laid on the ground. The same loop is then used to record the relaxation magnetic field of the protons. From the relaxation harmonic transient three main parameters are obtained: the amplitude, the time constant and the phase lag. Since the signal is the direct sum of the contributions due to the various aquifers (up to the depth of investigation of the method which is in the order of the loop diameter, namely one hundred meters) and since these contributions are of different "wavelength" in the excitation domain, the data can be inverted to get the water content and the relaxation time constant of each underground layers. Just like for the well-known electrical soundings, there

some parameters are unresolved due to equivalence, but some relevant factors are well defined, such as the product of a thin layer thickness by its water content. The size of the pores can be estimated through the NMR relaxation time constant: the shorter the time constant, the smaller the pore size. This allows to assess the possible water productivity of a planned drillhole. As for the phase, it gives an indication of the electrical conductivity which may partly scale down the depth of investigation.

A test of this technique have been performed on two sites in France, in different geological settings. The first site is at Bazancourt (Marne) in the northeastern part of the Paris basin, above a thick bed of cracked white chalk. The depth of the water table is well resolved, as checked through a nearby hole. A high water content (up to 35%) is obtained together with short time constants (30 to 50 milliseconds), indicative of small pore sizes. Variations of the water content with depth are inferred from the NMR data but could not be correlated to independant hydrogeological information, holes in the vicinity being too shal-

(1) BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 2, France.

(2) IRIS-Instruments, 1 avenue Buffon, BP 6007, 45060 Orléans Cedex 2, France.

(3) ICKC, Russian Academy of Science, 3 Institutskaya Street, Novosibirsk 630090, Russie.

low. The second site is located in Saint-Cyr en Val (Loiret) in the mid-southern part of the Paris basin, where the geological sequence includes alluvium of sand, gravel and clay, karstic limestone beds together with some marls and sandstone interbeddings. A somewhat lower water content (5 to 10%) is obtained together with quite long time constants (100 to 200 milliseconds), indicative of fairly large pore sizes and hence of higher transmissivity. On this site the higher electrical conductivity of the first tens of meters induces an attenuation of the energizing harmonic magnetic field, leading to a depth of investigation of some 60 meters.

Even though NMR measurements involve a fairly high-technology instrumentation, the duration of data acquisition is about the same as for electrical soundings and only a small team is needed (one geophysicist and one assistant). Since the NMR method is currently the only one which is directly sensitive to ground water, and is giving information related to borehole productivity, it should be a prime tool for hydrogeological studies about the first one hundred meters.

Introduction

L'implantation optimale de forages d'alimentation en eau est un des défis quotidiens que relèvent les hydrogéologues : il faut identifier une ressource adéquate en quantité et en qualité et obtenir une productivité répondant aux besoins. Pour ce faire des méthodes d'investigation non intrusives, essentiellement géophysiques, sont généralement utilisées pour contribuer à la définition des lieux d'implantation des forages. Jusqu'à présent les méthodes disponibles étaient indirectes en ce sens que le paramètre physique étudié n'était pas l'un des paramètres hydrodynamiques ou hydrochimiques principaux (teneur en eau, perméabilité, salinité, ...) mais était lié, parmi d'autres facteurs, à l'un ou plusieurs de ceux-ci :

- la conductivité électrique (inverse de la résistivité électrique) des roches réservoirs est certes proportionnelle à la conductivité électrique du fluide et à une certaine puissance de la porosité (Archie,

1942), mais il existe des roches, telles les argiles ou certains schistes, dont la conductivité est liée à leurs caractéristiques minéralogiques (y compris, pour les argiles, l'eau adsorbée non mobilisable) ;

- la vitesse des ondes sismiques est influencée par le degré de fracturation, lui-même déterminant pour la perméabilité, ainsi que par la porosité matricielle, mais il existe également des roches imperméables de faible vitesse sismique.

Une nouvelle méthode géophysique est aujourd'hui à même de fournir une information directe sur les paramètres hydrodynamiques (teneur en eau et perméabilité) : le sondage de résonance magnétique nucléaire (RMN). Les premières idées en la matière datent d'une trentaine d'années (Varian, 1962 ; Baringer et White, 1968), mais c'est dans la dernière décennie qu'a été défini un concept amélioré débouchant sur une méthode opérationnelle (Semenov *et al.*, 1988). Cette méthode fait déjà l'objet d'une utilisation régulière en Russie et des tests méthodologiques ont été réalisés en Australie (Shirov *et al.*, 1991) et en Israël (Goldman *et al.*, 1994).

Principe général d'une investigation par RMN

La résonance magnétique nucléaire (RMN) est une propriété de certains noyaux atomiques, et en particulier de l'hydrogène, qui produisent un champ magnétique de relaxation lorsqu'ils ont été excités à une certaine fréquence. La très grande majorité des atomes d'hydrogène présents dans le sous-sol provenant des molécules d'eau, on entrevoit aisément ce que cette méthode peut apporter à des hydrogéologues : la détection directe de l'eau, alors que les méthodes de géophysique conventionnelles n'amènent que des renseignements indirects (structures géologiques).

Dans la RMN, trois champs magnétiques interviennent :

- le champ terrestre⁽¹⁾ dont l'intensité fixe la valeur de la fréquence de précession des protons (l'effet RMN éventuel d'autres noyaux se produit à des

fréquences différentes - voir tableau 1 en annexe) ;

- le champ d'excitation, émis par une boucle de courant placée à la surface du sol, à une fréquence égale à la fréquence de précession des protons (fréquence dite de Larmor) ;

- le champ de relaxation émis en retour par les protons sous l'effet du champ d'excitation. Le champ des protons mesuré en surface est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, donc que la teneur en eau est élevée.

La propriété de résonance magnétique nucléaire est déjà utilisée de façon routinière par les géophysiciens dans les magnétomètres à protons, mais dans le but de déterminer l'amplitude du champ magnétique terrestre : dans ce cas les protons excités sont ceux situés dans la bobine (bouteille d'eau dopée au kérosène), la grandeur mesurée est la fréquence de résonance et la grandeur physique déduite est l'amplitude du champ magnétique terrestre, dont les variations révèlent les structures magnétiques du sous-sol. Dans la RMN appliquée à la recherche d'eau, les protons excités sont ceux de l'eau du sous-sol ; la grandeur mesurée est l'amplitude du champ magnétique de relaxation et le paramètre physique déduit est la teneur en eau du sous-sol.

La théorie de la RMN montre qu'il est possible d'obtenir depuis la surface du sol des renseignements sur la teneur en eau à différentes profondeurs d'investigation, c'est-à-dire d'effectuer un "sondage RMN" analogue dans son principe au "sondage électrique" bien connu des géophysiciens et des hydrogéologues. Pour un sondage électrique, le paramètre modulable qui permet l'investigation en profondeur est "AB/2" (demi-longueur de la ligne d'émission), la grandeur mesurée est la résistivité apparente et le

(1) Alors que les applications médicales ou chimiques de la RMN utilisent un champ magnétique statique artificiel dont la maîtrise permet de cibler un plan d'investigation particulier (tomographie), l'impossibilité pratique de créer un tel champ d'intensité suffisante pour pouvoir négliger le champ magnétique terrestre conduit à utiliser directement ce dernier comme champ magnétique statique.

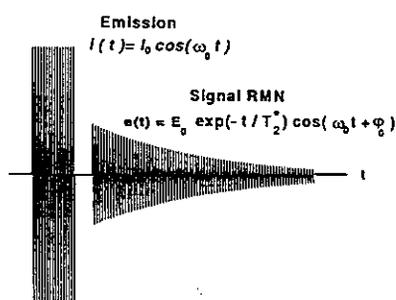


Fig. 1. - Courant d'excitation et champ magnétique de relaxation.

Fig. 1. - Energizing current and relaxation magnetic field.

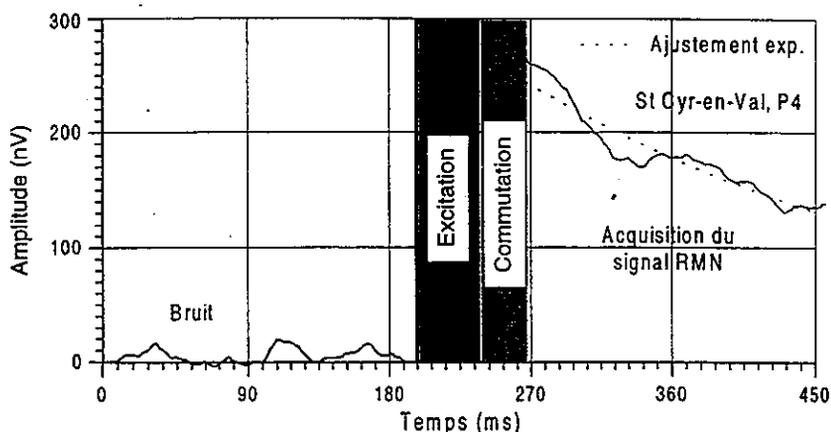


Fig. 2. - Exemple d'enregistrement du signal dû au champ magnétique de relaxation.

Fig. 2. - Example of recording of a relaxation magnetic field signal.

paramètre physique que l'on cherche à déterminer est la résistivité électrique vraie des différentes couches du sous-sol. Pour un sondage RMN, le paramètre modulable est la quantité d'excitation "q" (produit de l'intensité du courant à la fréquence de résonance par la durée d'impulsion), la grandeur mesurée est le champ magnétique de relaxation créé par les protons excités et le paramètre physique que l'on cherche à déterminer est la teneur en eau des différentes couches du sous-sol.

De façon plus précise, après qu'une impulsion d'excitation ait été émise, les grandeurs mesurées en RMN sont les suivantes :

- l'amplitude initiale du champ de relaxation produit par les protons, amplitude proportionnelle à la teneur en eau ;
- la constante de temps de décroissance du champ de relaxation dont la valeur est liée à la taille des pores, d'où une identification possible de l'eau libre (réservoir poreux) et de l'eau liée (couche argileuse) ;
- le déphasage du champ de relaxation par rapport au courant, dont la valeur est fonction de la résistivité des terrains.

L'interprétation des données RMN consiste à déterminer la teneur en eau pour chaque couche, dans l'hypothèse où le sous-sol est composé de couches planes et horizontales à l'échelle de la dimension de la boucle. Comme en son-

dage électrique, il existe des indéterminations et des équivalences dans les solutions théoriques fournies par une inversion, mais certains paramètres sont bien définis, par exemple le produit de la puissance d'une couche par sa teneur en eau, si cette couche est suffisamment mince.

Modalités de mise en oeuvre du sondage RMN

En pratique, pour faire des mesures de RMN sur le terrain, on utilise une boucle émettrice de 100 m de diamètre pour atteindre une profondeur d'investigation de l'ordre de 100 m. La fréquence d'excitation est comprise entre 1,5 et 2,5 kHz en fonction de l'amplitude du champ magnétique terrestre. Le courant d'excitation injecté dans la boucle doit pouvoir atteindre 200 à 300 ampères pendant quelques dizaines de millisecondes. Le champ magnétique de relaxation créé par les protons (fig. 1) est mesuré dans la boucle d'émission elle-même, après coupure du courant et commutation sur un circuit de réception. Le signal est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de nanovolts (fig. 2). Compte tenu de la faiblesse de son amplitude, le signal doit être accumulé pour diminuer l'influence relative du bruit électromagnétique naturel ou anthropique. Les différentes composantes du dispositif instrumental sont schématisées sur la figure 3.

Pour une suite de valeurs de la quantité d'excitation sont ainsi obtenues les courbes de relaxation dont on détermine l'intensité initiale, ainsi que la constante de temps. La possibilité d'en déduire la répartition de la teneur en eau et de la constante de temps en fonction de la profondeur résulte de l'additivité des signaux dus aux différentes couches et des caractéristiques morphologiques des courbes représentatives de l'intensité du signal en fonction de la quantité d'excitation. La figure 4 illustre les réponses liées à une couche d'un mètre de puissance avec une teneur en eau de 100 % située à trois profondeurs différentes : il est visible que la "longueur d'onde" suivant l'axe d'excitation augmente avec la profondeur. La résolution du problème inverse pour obtenir le profil de teneur en eau s'apparente donc à une décomposition en composantes spectrales.

Exemple

Afin d'évaluer les performances effectives de la RMN pour l'évaluation des ressources d'eau, des mesures ont été effectuées en 1992 sur deux sites tests en France avec l'équipement Hydroscope de fabrication russe (A. Legchenko *et al.*, 1995). Ces mêmes sites ont également été utilisés plus récemment pour vérifier le bon fonctionnement du nouvel équipement (fig. 6) dont le développement par la société IRIS-Instruments est en voie d'aboutir dans le cadre d'une coopération nouée entre le BRGM et l'institut russe ICKC, initiateur de la technique.

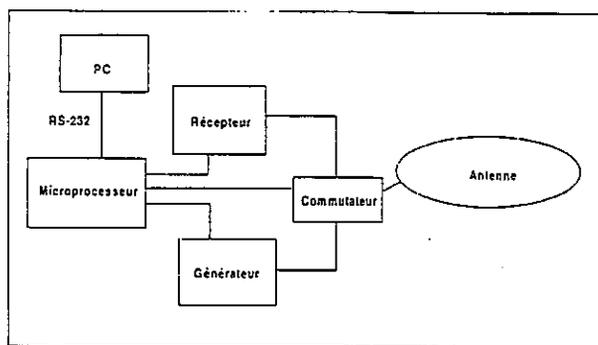


Fig. 3. - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental pour les mesures de RMN.

Fig. 3. - Diagram of the instrumentation set up for NMR measurements.

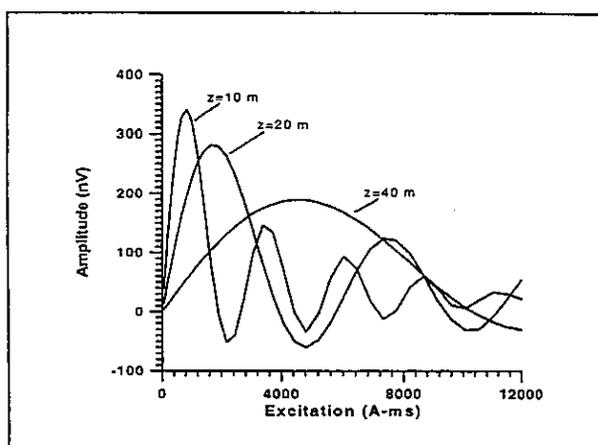


Fig. 4. - Courbes théoriques de réponse en amplitude pour une couche d'eau d'un mètre d'épaisseur située à des profondeurs de 10, 20 et 40 mètres (terrain électriquement résistant ; champ magnétique terrestre d'inclinaison 90°).

Fig. 4. - Theoretical curves of the amplitude response for a one meter thick water layer at 10, 20, and 40 meters depth (electrically resistive host medium, earth magnetic field inclined at 90°).

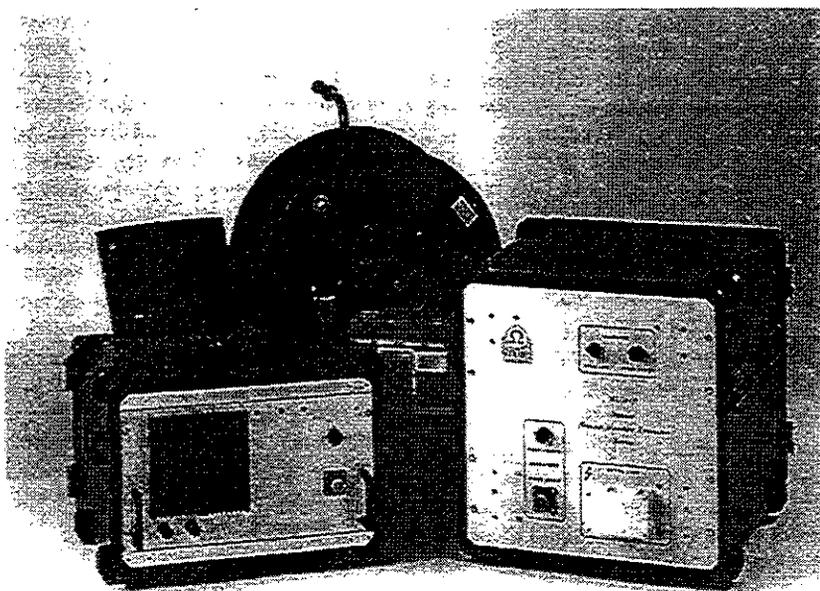


Fig. 5. - New equipment for NMR measurements designed by IRIS-Instruments.

Fig. 5. - New equipment for NMR measurements designed by IRIS-Instruments.

Site de Bazancourt (Marne)

Ce premier site se trouve sur un niveau épais (100 à 120 m) de craie blanche fissurée dont la porosité est d'environ 40 %. Un forage profond de 25,5 m à 600 m de distance indique que le niveau hydrostatique est à 13 m de

profondeur : la transmissivité y a été trouvée égale à $3,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

L'interprétation des mesures de RMN conduit à l'individualisation de deux niveaux aquifères (fig. 6) :

le premier de 15 à 33 m avec une teneur en eau de 13 % ;

- le second de 38 à 85 m avec une teneur en eau de 35 %.

L'insuffisante profondeur du forage ne permet pas de confirmer l'existence du niveau de faible teneur en eau vers 35 m et d'en identifier la nature ; sa faible épaisseur le situe à la limite de résolution de la méthode et il peut être le reflet d'une transition entre les deux niveaux de teneurs en eau différentes. De même la base du second niveau est à la limite de la profondeur d'investigation du dispositif utilisé et ne peut être considérée comme bien définie. En revanche le niveau hydrostatique, l'augmentation de la teneur en eau au-dessus de 40 m et les valeurs moyennes de teneur en eau sont bien déterminés par les mesures RMN. De plus la faible valeur des constantes de temps de décroissance du signal (30 à 50 millisecondes) reflète des pores de petite taille qui expliquent la faible transmissivité du forage.

Site de Saint-Cyr en Val (Loiret)

Ce deuxième site se trouve sur une alternance de niveaux sablo-argileux et calcaires de Beauce karstifiés. De façon plus précise la coupe lithologique déterminée par un forage de 97 m comporte :

- des alluvions sur une dizaine de mètres ;

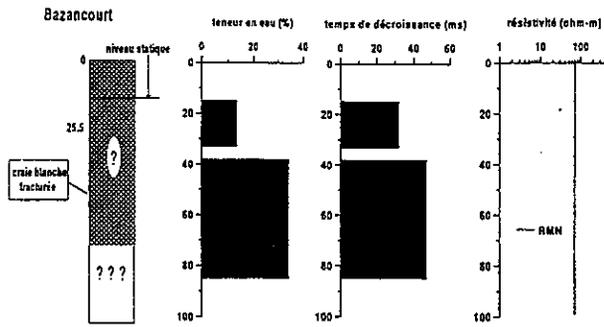


Fig. 6. – Coupe géologique du forage de Bazancourt (Marne - N° BSS 108-6-022, fond de forage à 25,5 m) et résultats de l'inversion des mesures de RMN : teneur en eau, temps de décroissance et résistivité.

Fig. 6. – Geological cross-section of Bazancourt borehole (Marne - N° BSS 108-6-022, bottom hole at 25,5 m) and inversion results of the NMR data: water content, decay time and resistivity.

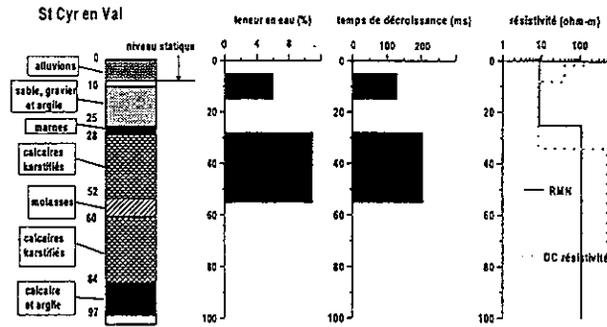


Fig. 7. – Coupe géologique du forage de Saint-Cyr en Val (Loiret - N°BSS 398-3-268) et résultats de l'inversion des mesures de RMN : teneur en eau, temps de décroissance et résistivité.

Fig. 7. – Geological cross-section of St Cyr-en-Val borehole (Loiret - N° BSS 398-3-268) and inversion results of the NMR data: water content, decay time and resistivity.

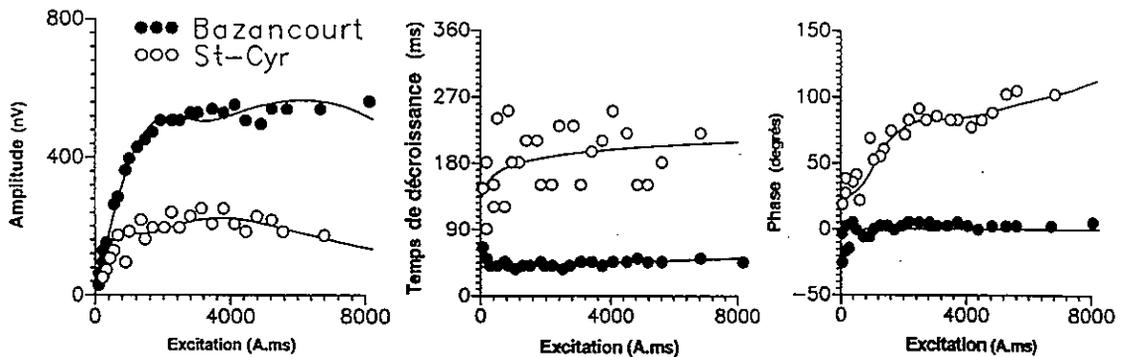


Fig. 8. – Comparaison des mesures d'amplitude, de constante de temps de décroissance et de phase pour les deux sites étudiés.

Fig. 8. – Comparison between amplitudes, decay times and phases for both studied sites.

- un niveau hétérogène de sables, graviers et argiles de 10 à 25 m ;
- une couche de marnes de 3 m de puissance ;
- un banc de calcaires karstifiés de 28 à 52 m ;
- un banc de molasses de 8 m de puissance ;
- un banc de calcaires karstifiés de 60 à 84 m ;
- un niveau de calcaires argileux.

Ce forage, situé à quelques centaines de mètres de la station de mesures RMN, a fourni une valeur de transmissivité égale à 0,28 m²/s.

L'interprétation des mesures de RMN conduit à l'individualisation de deux niveaux aquifères (fig. 7) :

- le premier de 5 à 15 m avec une teneur en eau de 6 % ;
- le second de 28 à 55 m avec une teneur en eau de 11 %.

Le niveau hydrostatique apparaît ainsi plus superficiel qu'indiqué par le forage. Cela peut être dû tant à des variations spatio-temporelles qu'à une influence de la zone non-saturée. Les valeurs de déphasage du signal RMN mettent en évidence une assez forte conductivité des premiers terrains, ce qui a été confirmé par un sondage électrique de contrôle. Il en résulte une moindre profondeur de pénétration du champ électromagnétique exciteur et donc une moindre profondeur d'investigation. C'est ce qui explique que le deuxième aquifère de calcaires karstifiés

ne soit pas identifié. La forte valeur des constantes de temps de décroissance du signal (120 à 200 millisecondes) reflète des pores de taille substantielle qui expliquent la bonne transmissivité du forage.

Comparaison des mesures RMN sur les deux sites

La comparaison des mesures obtenues sur les deux sites (fig. 8) montre :

- l'influence de la valeur de la teneur en eau sur l'intensité du signal ;
- l'écart des valeurs de constantes de temps qui traduit des tailles de pores différentes (la dispersion des valeurs obtenues à Saint-Cyr-en-Val est liée à une fenêtre de mesure un peu courte pour

bien définir une constante de temps élevée, ainsi qu'à un bruit industriel assez élevé) ; ceci est à mettre en relation avec les différences de taille de grains des matériaux, gros à Saint-Cyr-en-Val et fins à Bazancourt ;

– l'influence de la conductivité des terrains sur les valeurs de phase.

Conclusion

La nouvelle méthode géophysique fondée sur l'effet de la résonance magnétique nucléaire des protons permet d'accéder directement à la teneur en eau du sous-sol et donne, via une constante de

temps de relaxation, une indication sur la taille des pores. Les deux tests présentés montrent une bonne correspondance entre les résultats d'interprétation des mesures RMN et les informations issues des forages existants.

Compte tenu des puissances d'émission utilisables, la profondeur d'investigation des équipements disponibles est d'une centaine de mètres. Bien que l'obtention de mesures RMN nécessite de mettre en oeuvre une instrumentation d'assez haute technologie, la durée d'acquisition est similaire à celle d'un sondage électrique et une équipe restreinte (un géophysicien assisté d'un manoeuvre) suffit.

Le fait que cette méthode soit actuellement la seule à être directement sensible à l'eau du sous-sol, et qu'elle fournisse une indication de productivité possible d'un forage, en fera très certainement un outil de choix pour les études hydrogéologiques concernant la première centaine de mètres.

Remerciements

Les résultats présentés ont été obtenus dans le cadre du programme de recherche scientifique du BRGM. Cet article constitue la contribution BRGM 96-015.

Références bibliographiques

- ARCHIE G.E. (1942). – The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. - AIME Technical paper 1422, Petroleum Geology (Jan. 1942), pp. 54-62.
- BARRINGER A.R., WHITE J.F. (1968). – Groundwater survey method and apparatus. - U.S. Patent # 3 398 355.
- FEYNMAN R.P. (1979). – Cours de physique, Electromagnétisme 2 (traduction française). - InterEditions, 416 p.
- GOLDMAN M., RABINOVITCH B., RABINOVITCH M., GILAD D., GEV I., SHIROV M. (1994). – Application of integrated NMR - TDEM method in groundwater exploration in Israel. - *Journal of Applied Geophysics*, n° 31, pp. 27-52.
- LEGCHENKO A.V., SHUSHAKOV O.A., PERRIN J., PORTSELAN A.A. (1995). – Non-invasive NMR study of subsurface aquifers in France. - Expanded abstracts of the 65th SEG international meeting, pp. 364-367.
- SEMENOV A.G., BURSHEIN A.I., PUSEP, YU. A. SHIROV M.D. (1988). – A device for measurement of underground mineral parameters. - USSR Patent # 1 079 063.
- SHIROV M., LEGCHENKO A., CREER G. (1991). – New direct non-invasive groundwater detection technology for Australia, *Exploration Geophysics*, n° 22, pp. 333-338.
- VARIAN N.H. (1962). – Ground liquid prospecting method and apparatus, U.S. Patent # 3 019 383.

ANNEXE

Fondements physiques

Les techniques de résonance magnétique nucléaire, dont on sait que l'usage s'est déjà largement développé en imagerie médicale, tirent parti du comportement du moment magnétique des noyaux atomiques du spin non nul. Lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique statique, ces noyaux ont plusieurs états quantiques, dont les écarts d'énergie (fig. A1) sont proportionnels à une fréquence électromagnétique caractéristique, la fréquence de Larmor, elle-même proportionnelle au champ magnétique statique (voir par exemple Feynman, 1979).

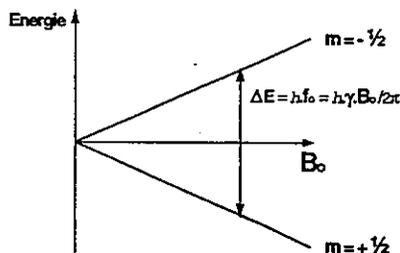


Fig. A1. - Niveaux d'énergie d'un noyau atomique de spin 1/2 placé dans un champ magnétique statique B_0 ; l'écart d'énergie ΔE est proportionnel à la fréquence de Larmor f_0 (h est la constante de Planck et γ le facteur gyromagnétique du noyau).

Fig. A1. - Energy levels of an atom nucleus with a spin 1/2 in a static magnetic field B_0 ; the energy difference ΔE is proportional to the Larmor frequency f_0 (h is the Planck constant and γ is the gyromagnetic factor of the nucleus).

Au niveau macroscopique, les noyaux atomiques génèrent un moment magnétique induit lié à la différence des populations de chacun des états. De plus

sous l'action d'un champ magnétique exciteur à la fréquence de Larmor le moment magnétique bascule progressivement et décrit un mouvement de précession autour de la direction du champ magnétique statique (fig. A2). L'angle de précession est proportionnel au produit de l'intensité de la composante transverse du champ magnétique exciteur par la durée de cette excitation. A l'arrêt de l'excitation, le retour à la position d'équilibre met en œuvre différents phénomènes de relaxation : pour ce qui concerne la méthode présentée ici, la constante de temps $T2^*$ est essentiellement liée d'une part à la taille des pores de la matrice rocheuse, d'autre part aux

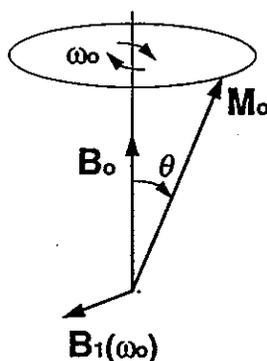


Fig. A2. - Mouvement de précession du moment magnétique macroscopique M_0 induit dans un champ statique B_0 ; l'angle de précession θ est proportionnel au produit du champ exciteur B_1 par la durée d'excitation.

Fig. A2. - Precession movement of a macroscopic magnetic moment M_0 induced in a static field B_0 ; the precession angle θ is proportional to the product of the excitation field B_1 by the excitation duration.

éventuelles inhomogénéités locales du champ exciteur créés par des variations de la susceptibilité magnétique.

Parmi les différents noyaux atomiques, ceux qui présentent l'effet RMN le plus important sont listés dans le tableau 1 ci-dessous. Il en résulte immédiatement que c'est pour le proton (^1H) qu'une application pratique de la RMN peut être de prime abord escomptée.

noyau	spin	occurrence isotopique	$\gamma \times 10^7$ rad/T/s	f (Hz)
^1H	1/2	100%	26,751	2 129
^7Li	3/2	93%	25,181	2 004
^{19}F	1/2	100%	10,829	862
^{31}P	1/2	100%	10,396	827
^{23}Na	3/2	100%	8,579	683
^{11}B	3/2	80%	8,158	649
^{27}Al	5/2	100%	7,602	605
^{55}Mn	5/2	100%	7,225	575
^{59}Co	7/2	100%	7,097	565
^{63}Cu	3/2	69%	7,076	563
^{65}Cu	3/2	31%	7,036	560
^{45}Sc	7/2	100%	6,970	555
^{51}V	7/2	100%	6,702	533
^{69}Ga	3/2	60%	6,620	527
^{70}Ga	3/2	40%	6,498	517
^{79}Br	3/2	51%	6,420	511
^{81}Br	3/2	49%	6,347	505

Tabl. 1. - Propriétés de résonance magnétique nucléaire de quelques noyaux atomiques (γ est le facteur gyromagnétique et f la fréquence de Larmor pour un champ terrestre de 50 000 nanoteslas).

Table. 1. - Nuclear magnetic resonance properties of various atom nuclei (γ is the gyromagnetic factor and f the Larmor frequency for an earth field of 50 000 nanoteslas).



BRGM
SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
Département Infrastructures Géologique et Géophysique
BP 6009 - 45060 ORLEANS cedex 2 - France - Tel.: (33) 02 38 64 34 34