

*Caractérisation des aquifères du profil d'altération  
du socle par sondage de Résonance Magnétique  
Protonique (RMP), dans le Finistère nord*

*Carte géologique à 1/50 000 de Plabennec  
3ème phase d'acquisition*

juillet 1999  
R 40695



*Caractérisation des aquifères du profil d'altération  
du socle par sondage de Résonance Magnétique  
Protonique (RMP), dans le Finistère nord*

*Carte géologique à 1/50 000 de Plabennec  
3ème phase d'acquisition*

*Rédigé sous la responsabilité de  
F. Mathieu*

juillet 1999  
R 40695



**BRGM**  
L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

Mots-clés : Géophysique, RMP, Hydrogéologie, Socle, Aquifère fissuré, Altérites, Plabennec, Finistère, Bretagne.

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

Mathieu F. (1999) – Caractérisation des aquifères du profil d'altération du socle par sondage de Résonance Magnétique Protonique (RMP), dans le Finistère nord. Carte géologique à 1/50 000 de Plabennec. 3<sup>ème</sup> phase d'acquisition. Rap. BRGM R 40695, 85 p., 5 fig., 5 tabl., 4 ann.

© BRGM, 1999 : ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Dans le cadre du projet de développement « Cartographie 3D de paramètres (PRD 116) », une reconnaissance de caractéristiques hydrogéologiques des niveaux d'altération, en zone de socle a été entreprise en utilisant la Résonance Magnétique Protonique (RMP).

La zone retenue pour cette évaluation correspond approximativement à la partie est de la carte géologique à 1/50 000 de Plabennec.

Seize sondages RMP interprétables ont été mesurés lors de cette campagne d'acquisition, ce qui porte à 32 le nombre de sondages réalisés depuis le début du projet. Au total, dix formations géologiques ont été reconnues par RMP.

L'interprétation de ces sondages RMP a permis de mettre en évidence :

- une distribution organisée de l'amplitude du signal RMP en fonction de la géologie ;
- une décroissance systématique, quelle que soit l'unité géologique de l'amplitude lorsque l'altitude sol des sondages RMP augmente ;
- une classification des sondages RMP suivant deux types de modèle :
  - . un type 1 représenté par un modèle à deux couches tout à fait cohérent avec le schéma conceptuel de l'altération en zone de socle : la teneur en eau dans les arènes est de 3,5 % et de 1,5 % dans l'horizon fissuré ;
  - . un type 2 représenté par un modèle à trois couches qui se différencie du précédent par la présence d'un horizon à faible teneur en eau (0,5 %) intercalé entre les arènes et la zone fissurée.

Ces deux types de modèle ont une répartition géographique organisée. Les sondages appartenant au type 1 se répartissent sur la bordure nord et sur la bordure sud de la zone d'étude alors que ceux du type 2 occupent la partie centrale.

## Sommaire

<b>Introduction</b> .....	7
<b>1. Méthodes et moyens</b> .....	9
1.1. Principe de la Résonance Magnétique Protonique.....	9
1.2. Moyens mis en œuvre .....	10
1.2.1. Personnel.....	10
1.2.2. Calendrier.....	10
1.2.3. Equipement.....	10
1.3. Travaux réalisés .....	10
<b>2. Résultats</b> .....	15
2.1. Analyse des données .....	15
2.2. Synthèse des résultats .....	17
2.2.1. Résultats bruts.....	17
2.2.2. Inversions en continu et modélisations directes .....	22
<b>Conclusion</b> .....	25

## Liste des figures

Fig. 1 – Localisation de la zone d'étude. Echelle à 1/250 000 .....	6
Fig. 2 – Modèle conceptuel de l'altération en zone de socle .....	8
Fig. 3 – Diagrammes amplitude-temps de décroissance.....	16
Fig. 4 – Diagrammes amplitude-altitude .....	20
Fig. 5 – Répartition géographique des sondages RMP .....	24

## Liste des tableaux

Tabl. 1 – Récapitulatif des caractéristiques des sondages RMP (campagnes de juin 1998, septembre 1998 et mai 1999) .....	12
Tabl. 2 – Répartition des sondages RMP en fonction des formations géologiques .....	13
Tabl. 3 – Amplitudes et temps de décroissance du maximum et de la queue de courbe des sondages RMP.....	18
Tabl. 4 – Amplitudes et altitudes des sondages RMP .....	19
Tabl. 5 - Correspondance entre l'amplitude maximale du signal RMP et la géologie .	21
Tabl. 6 – Résultats des modélisations directes .....	22

## Liste des annexes

Ann. 1 – Localisation des sondages RMP sur extraits de la carte IGN à 1/25 000.....	27
Ann. 2 – Paramètres RMP mesurés.....	41
Ann. 3 – Résultats d'inversion .....	59
Ann. 4 – Une nouvelle méthode géophysique pour les études hydrogéologiques : l'application de la résonance magnétique nucléaire.....	77



Fig. 1 – Localisation de la zone d'étude. Echelle à 1/250 000.

## Introduction

Dans le cadre de son projet PRD 116 « Cartographie de paramètres », le BRGM souhaite évaluer les caractéristiques hydrogéologiques des niveaux d'altération, en zone de socle, en utilisant la Résonance Magnétique Protonique (RMP).

La zone retenue pour cette évaluation correspond approximativement à la carte géologique à 1/50 000 de Plabennec (fig. 1).

### • **Historique**

Une première série de mesures (6 sondages RMP) a été réalisée en juin 1998 sur deux zones tests représentées par les sites d'alimentation en eau potable de Plabennec et de Kernilis (Rap. BRGM R 40131). Sur le premier de ces sites, un bruit électromagnétique important rendait les mesures ininterprétables. Un sondage de bonne qualité avait toutefois été mesuré sur le deuxième site. Ainsi avait été démontrée la faisabilité de l'étude des aquifères du socle altéré jusqu'à environ 50 m de profondeur, dans les conditions d'environnement électromagnétique du Finistère nord. Des recommandations méthodologiques avaient alors été faites pour réaliser les mesures dans des conditions de bruit optimal et afin d'améliorer le rapport signal sur bruit.

Lors de la deuxième phase d'acquisition, réalisée en septembre 1998, 16 sondages RMP ont été mesurés (Rap. BRGM R 40419). Ces sondages intéressaient les formations géologiques suivantes :

- granite de Kernilis ;
- granite de Kersaint grossier ;
- granite de Kersaint fin ;
- diorite de Ploudaniel ;
- gneiss et micaschistes de Lesneven.

### • **Objectifs**

Les objectifs de la troisième phase d'acquisition effectuée en mai 1999 sont les suivants :

- caractérisation des formations géologiques n'ayant pas fait l'objet de mesure lors des précédentes campagnes, à savoir :
  - . orthogneiss de Plounévez-Lochrist,
  - . micaschistes de l'Aber Wrac'h,
  - . amphibolite de Lannilis,
  - . granite de Saint-Renan ;

- . granite de Saint-Renan ;
- . gneiss de Brest ;
- augmenter la population de sondages RMP dans certaines formations géologiques telles que les granites de Kersaint fins et les micaschistes de Lesneven ;
- aboutir à une répartition relativement homogène des sondages RMP sur l'ensemble de la carte géologique à 1/50 000 de Plabennec.

### • Contexte géologique

La zone d'altération, des arènes à la roche saine, a une puissance maximale d'environ 70 m. Elle comprend un horizon arénisé (0 à 30 m) recouvrant un horizon fissuré d'une puissance de 30 à 40 m (fig. 2).

Les mesures RMP ont été effectuées, dans la mesure du possible, sur des hauteurs topographiques où l'épaisseur de la frange altérée est maximum. Les situations en fond de vallée ont été évitées afin que les mesures ne soient pas perturbées par la présence d'un recouvrement alluvionnaire.

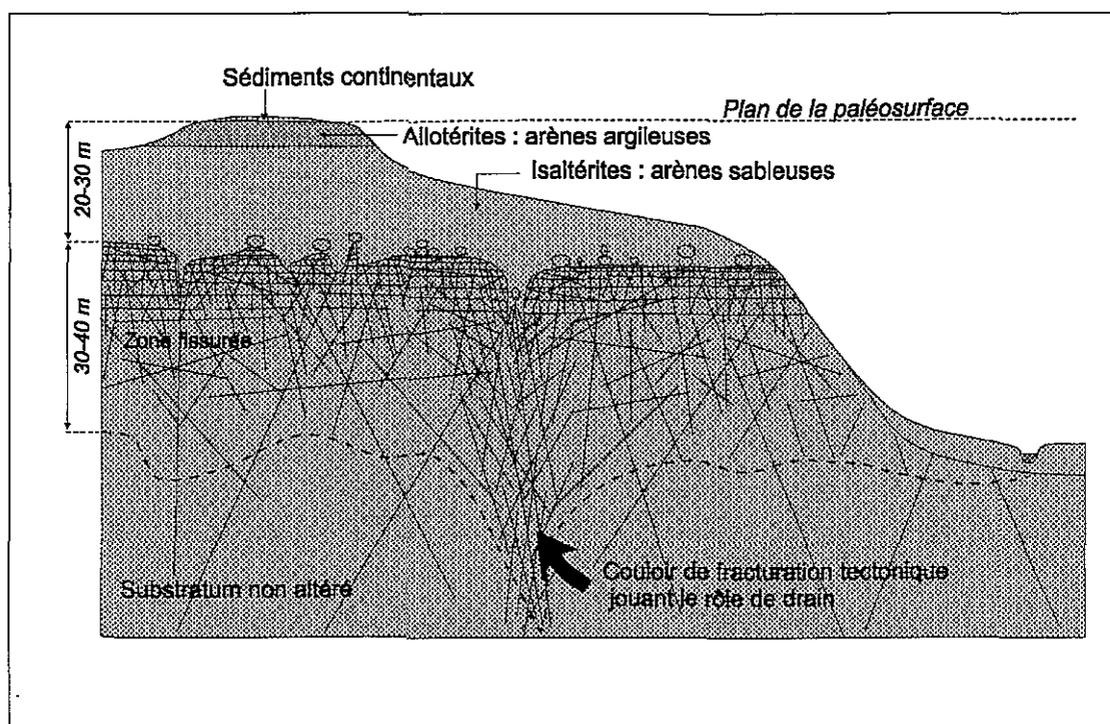


Fig. 2 – Modèle conceptuel de l'altération en zone de socle.

# 1. Méthodes et moyens

## 1.1. PRINCIPE DE LA RÉSONANCE MAGNÉTIQUE PROTONIQUE

(cf. ann. 4)

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'hydrogène 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 ( $\tau$ ) de quelques ms : 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 :

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

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 des pores du réservoir**.  $\omega$  correspond à la fréquence de Larmor et  $\phi$  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 effectuées 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. La teneur en eau est définie comme le rapport  $V1/V$  du volume d'eau libre,  $V1$  sur le volume total de sous-sol considéré,  $V$  avec  $V = V1 + Vb + Vr$  où :

- $Vb$  = 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 ;
- $Vr$  = 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 :

- 100 m de profondeur d'investigation pour une boucle circulaire de 100 m de diamètre ;
- 50 m de profondeur d'investigation pour une boucle en huit dont chaque cercle fait 50 m de diamètre ;

- 40 à 50 m de profondeur d'investigation pour une boucle en huit carrée de 37 m de côté.

## **1.2. MOYENS MIS EN OEUVRE**

### **1.2.1. Personnel**

- 2 géophysiciens : F. Mathieu et F. Dupont.

### **1.2.2. Calendrier**

Les mesures ont été effectuées du 17/05/1999 au 27/05/1999, amené et repli compris, soit un total de huit jours d'acquisition. Le système Numis était en enregistrement 24 h/24 h.

### **1.2.3. Equipement**

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

## **1.3. TRAVAUX REALISÉS**

L'expérience acquise lors des précédentes campagnes de mesures avait permis d'établir une procédure de travail qui a été suivie pour cette troisième phase d'acquisition. La procédure de travail est la suivante :

- visite du site de mesure prévisionnel et examen des conditions électromagnétiques apparentes (lignes électriques, téléphones, clôtures, ... ) ;
- recherche du propriétaire ou exploitant de la parcelle, pour autorisation d'accès et de mesure ;
- recherche des éleveurs entretenant des parcs électrifiés à proximité du site, pour coupure des clôtures électrifiées, autant que possible ;
- mise en place de la boucle selon une forme de huit carré de 37 m de côté et orientation selon la direction, à priori, la plus favorable ;
- mesure du champ magnétique terrestre ;

- mesure du bruit ambiant (bruit avant stack) :
  - . si celui-ci se maintient sous 1000 nV, la mesure peut être réalisée comme indiquée ci-dessous ;
  - . si celui-ci est supérieur à 1000 nV, la boucle est réinstallée selon une direction orthogonale, puis si nécessaire, selon la direction intermédiaire (45°) ; si le bruit reste supérieur à 1000 nV dans les trois positions, le site est abandonné sinon la mesure est réalisée comme indiqué ci-dessous ;
- la mesure est d'abord réalisée pour un ou deux numéros de pulse afin de vérifier la fréquence de Larmor ; le sondage complet est ensuite lancé pour un nombre de stacks au moins supérieur à 100 et un maximum de temps d'acquisition de 10 heures afin de permettre la mesure de deux sondages par jour.

Toutes les acquisitions ont été effectuées avec les paramètres suivants :

- boucle en huit carré de 37 m de côté ;
- longueur d'enregistrement : 240 ms ;
- largeur du filtre : 5 Hz ;
- optimisation du stack : oui ;
- nombre du pulse : 16 ;
- longueur du pulse : 40 ms ;
- puissance : 100 % ;
- valeur pleine échelle : 5 000 à 25 000 mV ;
- nombre de stack : 150 à 300.

Pendant les huit jours d'intervention sur le terrain, 16 sondages RMP ont été réalisés, ce qui représente un rendement de 2 sondages RMP par jour. Tous ces sondages sont de qualité moyenne à très bonne et ont donc pu faire l'objet d'inversions et de modélisations directes.

Cinq nouvelles formations géologiques ont été investiguées, il s'agit de :

- orthogneiss de Plounévez-Lochrist ;
- micaschistes et gneiss de l'Aber Wrac'h ;
- amphibolites de Lannilis ;
- granite de Saint-Renan ;
- gneiss de Brest.

Trois formations géologiques ; les orthogneiss de Lesneven, le Briovérien et les micaschistes du Conquet, n'ont pu faire l'objet de sondage RMP du fait de leur faible représentation spatiale et de leur proximité avec des zones urbanisées.

Numéro du sondage	Contexte Géologique	Dispositif	Profondeur d'investigation (m)	Bruit avant stack (nV)	Nombre de stack	Rapport signal/bruit	Qualité	Numéro du fichier
PLB1	gneiss et micaschistes de Lesneven	circulaire – 100 m en huit – 50 m en huit – 50 m	80 50 50	≥ 10 000 1 000 700	- 75 50	- - 1	mesures impossibles mauvaise mauvaise	PLB1 PLB1b PLB1c
PLB2	gneiss et micaschistes de Lesneven	circulaire – 100 m en huit – 50 m en huit – 50 m	80 50 50	15 000 ≥ 14 000 ≥ 14 000	- 50 50	- - 1.0	mesures impossibles mauvaise mauvaise	PLB2 PLB2a PLB2b
PLB3	gneiss et micaschistes de Lesneven	circulaire – 100 m en huit – 75 m en huit – 50 m	80 50 50	≥ 6 000 ≥ 1 000 400 – 1 000	50 100 50	- - 1.5	mesures impossibles mauvaise mauvaise	PLB3 PLB3a PLB3c
PLB4	gneiss et micaschistes de Lesneven	en huit – 50 m	50	700 – 2 500	50	1.5	mauvaise	PLB4
PLB5	gneiss et micaschistes de Lesneven	en huit – 50 m	50	≥ 4 000	50	1.5	mauvaise	PLB5
PLB6	granite de Kernilis	en huit – 50 m en huit – 50 m	50 50	400 – 800 400 – 800	50 100	2-10 3-26	moyenne bonne	PLB6a PLB6c
PLB7	granite de Kersaint grossier	en huit – 50 m	50	300 – 9 000	50	2	moyenne	PLB7b
PLB8	granite de Kersaint grossier	en huit carré 37 m	40	1 500 – 3 500	100		mauvaise	PLB8c
PLB9	granite de Kersaint fin	en huit carré 37 m	40	200 – 1 100	300	0.5-1	médiocre	PLB9c
PLB10	granite de Kersaint grossier	en huit carré 37 m	40	400 – 1 000	100	2-10	bonne	PLB10c
PLB11	diorite de Ploudaniel	en huit carré 37 m	40	200 – 900	350	2-6	très bonne	PLB11
PLB12	granite de Kersaint grossier	en huit carré 37 m	40	600 – 1 100	200	2-10	bonne	PLB12c
PLB13	granite de Kersaint grossier	en huit carré 37 m	40	250 – 900	200	0.5-2	moyenne	PLB13a
PLB14	granite de Kersaint fin	en huit carré 37 m	40	500 – 1 400	300	0.5-2	moyenne	PLB14c
PLB15	gneiss et micaschistes de Lesneven	en huit carré 37 m	40	400 – 1 000	200	1-2	bonne	PLB15
PLB16	gneiss et micaschistes de Lesneven	en huit carré 37 m	40	400 – 900	250	2-8	moyenne	PLB16
PLB17 = PLB3	gneiss et micaschistes de Lesneven	en huit carré 37 m	40	500 – 4 000	85	0.2-3	mauvaise	PLB17
PLB18	granite de Kernilis	en huit carré 37 m	40	150 – 500	200	2-14	bonne	PLB18
PLB19	gneiss et micaschistes de Lesneven	en huit carré 37 m	40	300 – 900	100	2-15	bonne	PLB19a
PLB20 (09/1998)	granite de Kernilis	en huit carré 37 m	40	400 – 950	250	2-5	bonne	PLB20a
PLB20 (05/1999)	granite de Kernilis	en huit carré 37 m	40	250	250	1-4.5	très bonne	PLB20d
PLB21	granite de Kernilis	en huit carré 37 m	40	400 – 1 000	300	2-13	bonne	PLB21a
PLB22	granite de Kernilis	en huit carré 37 m	40	600 – 800	200	1	moyenne	PLB22a
PLB23	orthoigneiss de Plouvévez Lochrist	en huit carré 37 m	40	1 300	200	2	bonne	PLB23c
PLB24	gneiss et micaschistes de Lesneven	en huit carré 37 m	40	390	200	2	bonne	PLB24d
PLB25	micaschistes et gneiss de l'Aber Wrac'h	en huit carré 37 m	40	1 000	150	4	bonne	PLB25c
PLB26	micaschistes et gneiss de l'Aber Wrac'h	en huit carré 37 m	40	500	250	6	bonne	PLB26c
PLB27	amphibolites de Lannilis	en huit carré 37 m	40	200	100	0.5	bonne	PLB27b
PLB28	gneiss et micaschistes de Lesneven	en huit carré 37 m	40	1 300	200	2	bonne	PLB28d
PLB29	granite de Kernilis	en huit carré 37 m	40	400	150	1.5	moyenne	PLB29c
PLB30	granite de Saint-Renan	en huit carré 37 m	40	1 600	250	2	moyenne	PLB30c
PLB31	granite de Saint-Renan	en huit carré 37 m	40	1 100	150	1	bonne	PLB31b
PLB32	granite de Saint-Renan	en huit carré 37 m	40	850	150	< 0.5	bonne	PLB32b
PLB33	granite de Kersaint fin	en huit carré 37 m	40	600	250	1.5	bonne	PLB33c
PLB34	granite de Kersaint fin	en huit carré 37 m	40	1 400	150	1	moyenne	PLB34d
PLB35	gneiss de Brest	en huit carré 37 m	40	500	250	2	bonne	PLB35b
PLB36	gneiss de Brest	en huit carré 37 m	40	300	150	< 1	moyenne	PLB36b
PLB37	granite de Kersaint fin	en huit carré 37 m	40	1 500	300	< 1	moyenne	PLB37d

Tabl. 1 – Récapitulatif des caractéristiques des sondages RMP (campagnes de juin 1998, septembre 1998 et mai 1999).

Trois autres formations géologiques : granite de Kersaint fin, granite de Kernilis et micaschistes de Lesneven, déjà investiguées lors des précédentes campagnes ont fait l'objet de compléments de mesure.

Deux essais avec une boucle carrée de 75 m de côté ont été effectués sur des sites peu bruités (PLB11 et PLB20) dans le but d'augmenter la profondeur d'investigation. Ces deux essais se sont révélés négatifs à cause d'un bruit avant stack supérieur à 5 000 nV.

Le tableau 1 présente un récapitulatif des caractéristiques principales de tous les sondages RMP effectués depuis juin 1998.

Le tableau 2 montre la répartition des sondages RMP en fonction des formations géologiques et les abréviations correspondantes utilisées dans la suite de l'analyse.

La localisation des sondages RMP est présentée en annexe 1 sur des extraits de cartes IGN à 1/25 000.

Granite de Kersaint grossier	5	KG
Granite de Kersaint fin	5	KF
Granite de Kernilis	6	KI
Granite de Saint-Renan	3	RE
Gneiss et micaschistes de Lesneven	6	LE
Micaschistes de l'Aber Wrac'h	2	AB
Diorite de Ploudaniel	1	PA
Orthogneiss de Plouvenez	1	PV
Amphibolites de Lannilis	1	LA
Gneiss de Brest	2	BR
Total	32	10

**Tabl. 2 – Répartition des sondages RMP en fonction des formations géologiques.**

## 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 considérés 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 2. Les informations concernant les niveaux de bruit, le rapport signal sur bruit et la qualité des mesures sont synthétisées dans le tableau 1.

On définit le signal RMP comme la composition de signal utile (généré par l'eau du sous-sol) et de bruit (généré par tout autre source électromagnétique). Le bruit est évalué par une mesure, réalisée avant la génération du pulse, qui est additionnée (stack) autant de fois que le signal RMP, mesuré après le pulse. Le rapport du signal RMP, « stacké » sur le bruit « stacké » (mesuré avant le pulse) permet de définir le rapport signal sur bruit qui contribue à juger de la qualité des mesures réalisées. 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. Néanmoins, lorsque l'optimisation du stack est choisie comme configuration de mesure, le rapport signal sur bruit, ci-dessus, n'est pas toujours significatif de la qualité des mesures. Elle doit alors être définie par l'examen de l'ensemble des données.

Le niveau du bruit avant stack permet d'évaluer l'environnement électromagnétique du site.

Les 16 sondages RMP effectués lors de cette troisième campagne d'acquisition sont de qualité suffisante pour faire l'objet d'une interprétation en terme de teneurs en eau. Par contre, en ce qui concerne les temps de décroissance, les mesures sont très bruitées et ne permettent d'avoir que des indications de niveau. Seuls les sondages PLB20, 25 et 26 présentent des courbes véritablement exploitables.

Les résultats d'inversion des sondages RMP sont présentés en annexe 3. Les interprétations ont été réalisées en utilisant deux types de modélisation :

- modèle « continu » composé d'un grand nombre de courbes d'épaisseur unitaire (courbes rouges continues sur les graphiques de l'annexe 3). Il s'agit d'une inversion automatique ;
- modèle « direct » composé d'un nombre limité de courbes. L'opération consiste à calculer la réponse théorique d'un modèle et d'ajuster les paramètres teneur en eau et épaisseur de couche de ce modèle jusqu'à obtenir coïncidence entre la courbe théorique et la courbe expérimentale. Cette modélisation directe est représentée en bleu sur les graphiques de l'annexe 3.

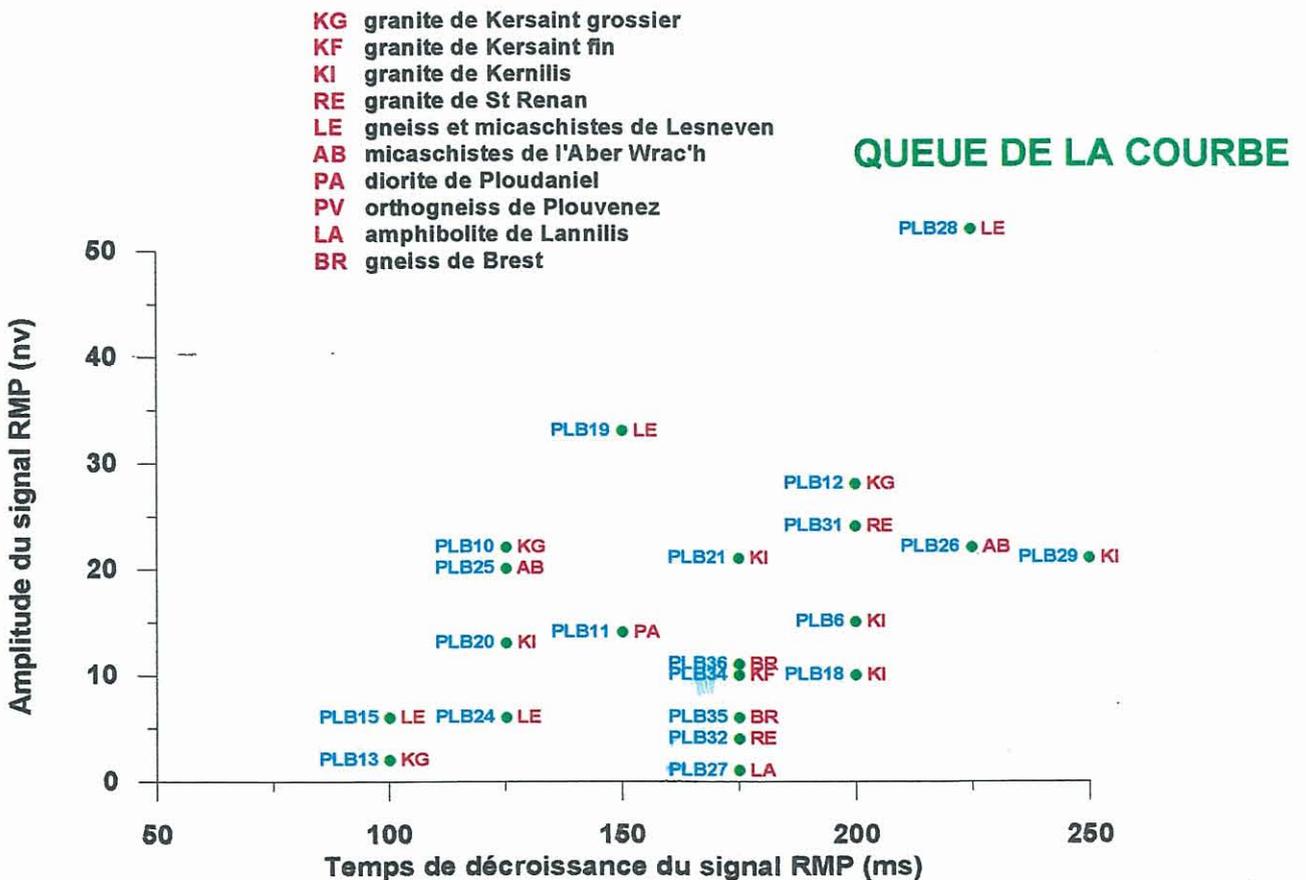
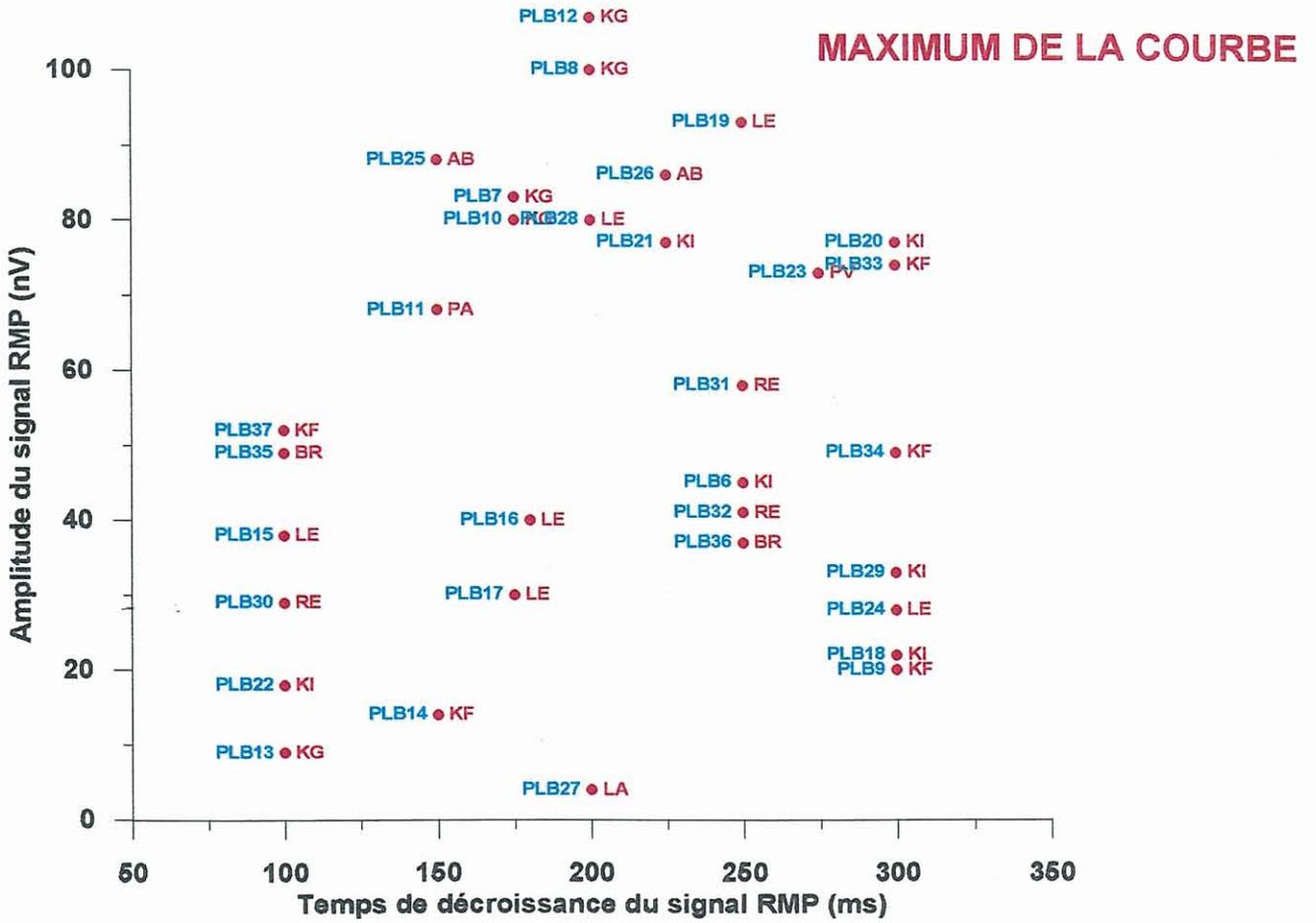


Fig. 3 – Diagrammes amplitude–temps de décroissance.

## 2.2. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

### 2.2.1. Résultats bruts

Les résultats bruts des 32 sondages RMP interprétables effectués lors des trois campagnes d'acquisition ont été synthétisés sous forme de deux types de diagrammes binaires.

Le premier de ces diagrammes fait intervenir l'amplitude et le temps de décroissance du signal RMP (fig. 3). Le deuxième combine l'amplitude du signal RMP et l'altitude du sondage (fig. 4).

#### **a) Diagrammes amplitude - temps de décroissance (fig. 3)**

Pour construire ces diagrammes, les paramètres amplitude du signal RMP et temps de décroissance du signal RMP observés d'une part, au maximum et d'autre part, en queue des courbes de sondages, ont été utilisés. Cette procédure est justifiée, considérant qu'en première approximation, les courbes de sondages font apparaître deux couches d'eau :

- une première couche responsable du maximum de la courbe ;
- une deuxième plus profonde se manifestant en queue de courbe.

Compte tenu de la qualité des mesures, (en particulier, du temps de décroissance), les valeurs d'amplitude et de temps de décroissance pour le maximum et la queue de la courbe, ont été prises sur des courbes lissées (cf. ann. 3). Les valeurs utilisées pour construire les diagrammes de la figure 3 sont présentées dans le tableau 3.

L'analyse de ces deux diagrammes montre que la répartition est plutôt aléatoire et qu'il n'y a, à priori, aucune corrélation entre amplitude ou temps de décroissance et unité géologique.

Cette observation vient à l'encontre de l'analyse des mêmes diagrammes construits seulement à partir des 14 sondages RMP de 1998 (cf. rap. R 40419). Une distinction prépondérante, selon les paramètres amplitude et temps de décroissance avait été mise en évidence entre les formations géologiques suivantes : granite de Kersaint grossier, granite de Kernilis et micaschistes de Lesneven.

Une analyse plus poussée des diagrammes de la figure 3, tenant compte de la position exacte des sondages RMP dans le schéma conceptuel de l'altération, devrait permettre de retrouver une distribution organisée des paramètres amplitude et temps de décroissance, en fonction du contexte géologique. Une augmentation de l'effectif des observations permettrait également de mieux asseoir cette analyse.

*Caractérisation d'aquifères par RMP, Finistère nord*

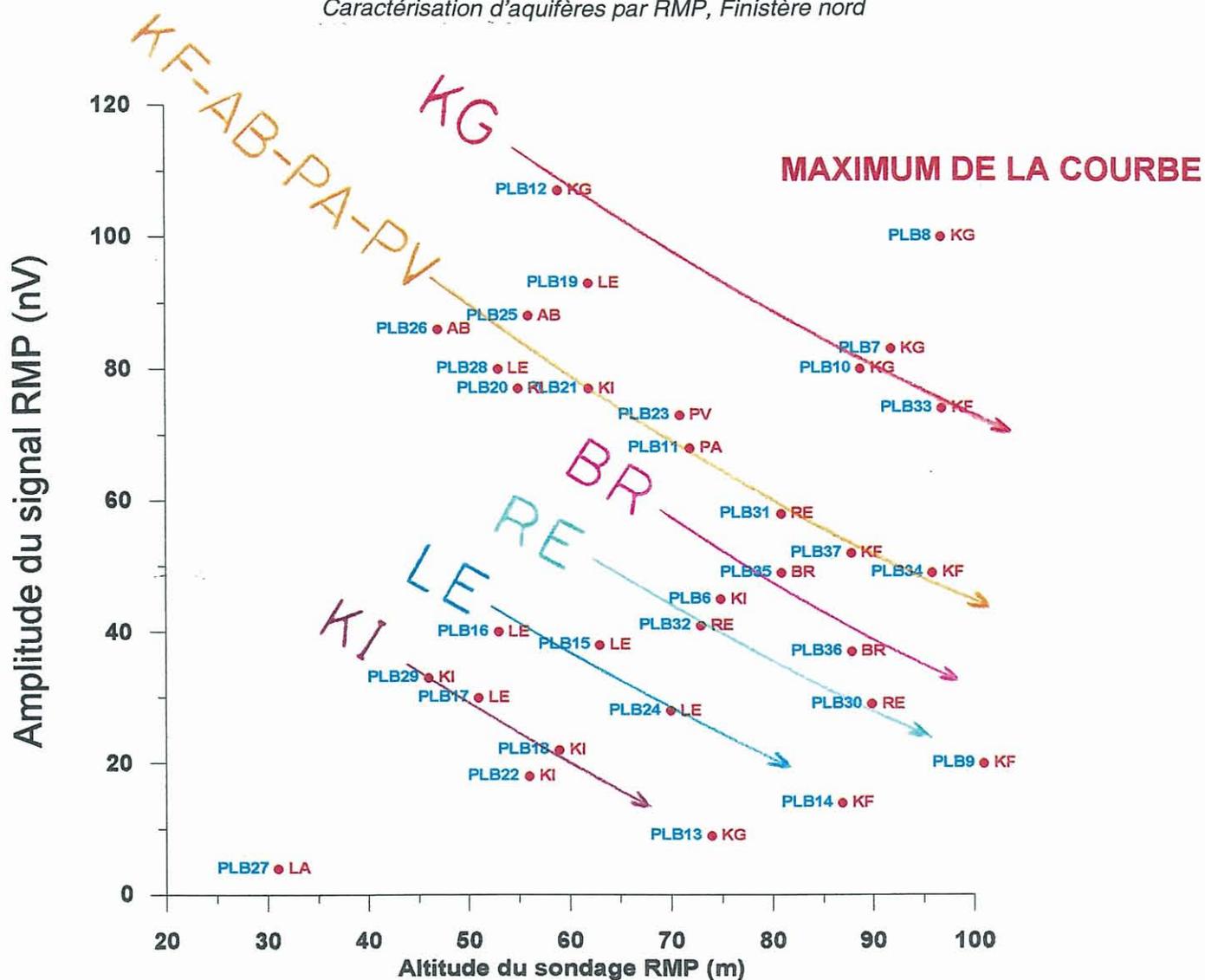
Numéro du Sondage RMP	e (nv) maximum de la courbe	T (ms) maximum de la courbe	e (nv) queue de la courbe	T (ms) queue de la courbe	Formation géologique
PLB6	45	250	15	200	Granite de Kernilis
PLB7	83	175	32	?	Granite de Kersaint grossier
PLB8	100	200			Granite de Kersaint grossier
PLB9	20	300			Granite de Kersaint fin
PLB10	80	175	22	125	Granite de Kersaint grossier
PLB11	68	150	14	150	Diorite de Ploudaniel
PLB12	107	200	28	200	Granite de Kersaint grossier
PLB13	9	100	2	100	Granite de Kersaint grossier
PLB14	14	150			Granite de Kersaint fin
PLB15	38	100	6	100	Micaschiste de Lesneven
PLB16	40	180			Micaschiste de Lesneven
PLB17	30	175			Micaschiste de Lesneven
PLB18	22	300	10	200	Granite de Kernilis
PLB19	93	250	33	150	Micaschiste de Lesneven
PLB20	67/77	200/300	21/13	?/125	Granite de Kernilis
PLB21	77	225	21	175	Granite de Kernilis
PLB22	18	100			Granite de Kernilis
PLB23	73	275	13	?	Orthogneiss de Plouvenez
PLB24	28	300	6	125	Micaschiste de Lesneven
PLB25	88	150	20	125	Micaschiste de l' Aber Wrac'h
PLB26	86	225	22	225	Micaschiste de l' Aber Wrac'h
PLB27	4	200	1	175	Amphibolite de Lannilis
PLB28	80	200	52	225	Micaschiste de Lesneven
PLB29	33	300	21	250	Granite de Kernilis
PLB30	29	100	8	?	Granite de Saint-Renan
PLB31	58	250	24	200	Granite de Saint-Renan
PLB32	41	250	4	175	Granite de Saint-Renan
PLB33	74	300	29	?	Granite de Kersaint fin
PLB34	49	300	10	175	Granite de Kersaint fin
PLB35	49	100	6	175	Gneiss de Brest
PLB36	37	250	11	175	Gneiss de Brest
PLB37	52	100	14	?	Granite de Kersaint fin

**Tabl. 3 – Amplitudes et temps de décroissance du maximum et de la queue de courbe des sondages RMP.**

Caractérisation d'aquifères par RMP, Finistère nord

Numéro du Sondage RMP	Altitude (m)	e (nv) maximum de la courbe	e (nv) queue de la courbe	Formation géologique
PLB6	75	45	15	Granite de Kernilis
PLB7	92	83	32	Granite de Kersaint grossier
PLB8	97	100		Granite de Kersaint grossier
PLB9	101	20		Granite de Kersaint fin
PLB10	89	80	22	Granite de Kersaint grossier
PLB11	72	68	14	Diorite de Ploudaniel
PLB12	59	107	28	Granite de Kersaint grossier
PLB13	74	9	2	Granite de Kersaint grossier
PLB14	87	14		Granite de Kersaint fin
PLB15	63	38	6	Micaschiste de Lesneven
PLB16	53	40		Micaschiste de Lesneven
PLB17	51	30		Micaschiste de Lesneven
PLB18	59	22	10	Granite de Kernilis
PLB19	62	93	33	Micaschiste de Lesneven
PLB20	55	77	13	Granite de Kernilis
PLB21	62	77	21	Granite de Kernilis
PLB22	56	18		Granite de Kernilis
PLB23	71	73	13	Orthogneiss de Plouvenez
PLB24	70	28	6	Micaschiste de Lesneven
PLB25	56	88	20	Micaschiste de l'Aber Wrac'h
PLB26	47	86	22	Micaschiste de l'Aber Wrac'h
PLB27	31	4	1	Amphibolite de Lannilis
PLB28	53	80	52	Micaschiste de Lesneven
PLB29	46	33	21	Granite de Kernilis
PLB30	90	29	8	Granite de Saint-Renan
PLB31	81	58	24	Granite de Saint-Renan
PLB32	73	41	4	Granite de Saint-Renan
PLB33	97	74	29	Granite de Kersaint fin
PLB34	96	49	10	Granite de Kersaint fin
PLB35	81	49	6	Gneiss de Brest
PLB36	88	37	11	Gneiss de Brest
PLB 37	88	52	14	Granite de Kersaint fin

Tabl. 4 – Amplitudes et altitudes des sondages RMP.



- KG granite de Kersaint grossier
- KF granite de Kersaint fin
- KI granite de Kernilis
- RE granite de St Renan
- LE gneiss et micaschistes de Lesneven
- AB micaschistes de l'Aber Wrac'h
- PA diorite de Ploudaniel
- PV orthogneiss de Plouvenez
- LA amphibolite de Lannilis
- BR gneiss de Brest

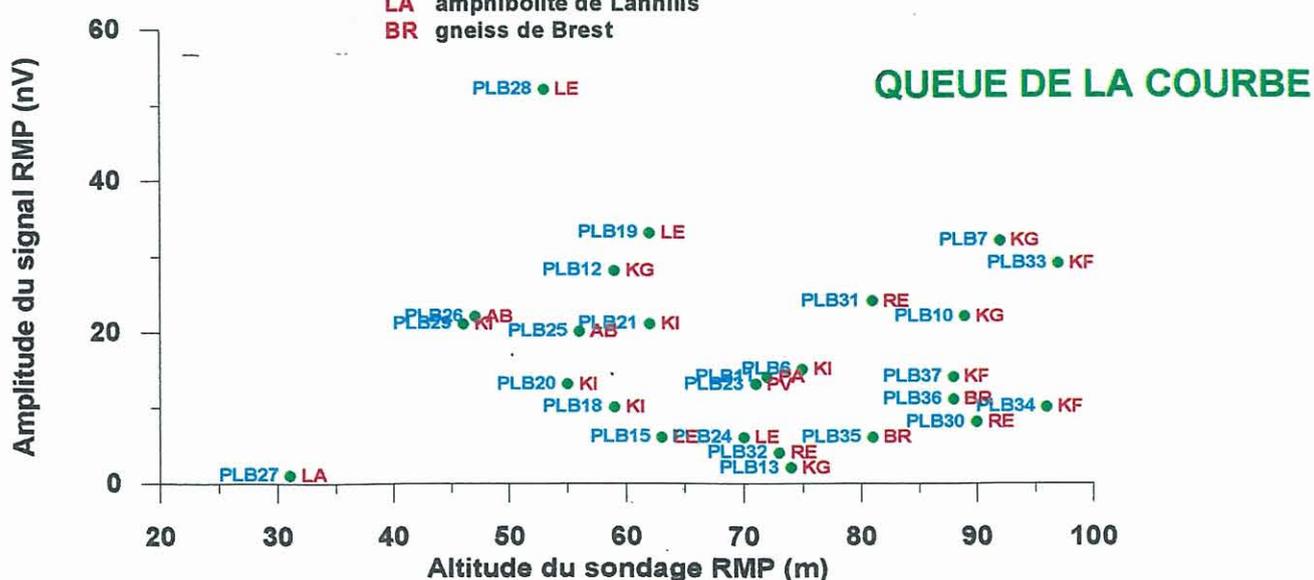


Fig. 4 – Diagrammes amplitude–altitude.

**b) Diagrammes amplitude – altitude (fig. 4)**

Pour construire ces diagrammes la procédure est la même que précédemment, le temps de décroissance a été remplacé par l'altitude du sondage RMP.

Les valeurs, utilisées pour construire les diagrammes de la figure 4, sont présentées dans le tableau 4.

L'analyse de ces diagrammes montre, qu'en ce qui concerne l'amplitude du signal en queue de courbe, la répartition selon l'unité géologique est complètement aléatoire. Par contre, au niveau du maximum de la courbe, deux lois sont mises en évidence :

- une certaine distribution de l'amplitude du signal en fonction de la géologie qui s'établit tel que présenté dans le tableau 5.

Certains sondages ne s'intègrent pas dans cette distribution. Certaines de ces valeurs anormales (PLB19, PLB9, PLB14 et PLB13) ont déjà été expliquées dans le rapport R 40419 ;

unité géologique	amplitude du signal RMP (nv)
granite de Kersaint grossier	110-80
granite de Kersaint fin	90-50
micaschistes de l'Aber Wrac'h	90-50
diorite de Ploudaniel	90-50
orthogneiss de Plouvenez	90-50
gneiss de Brest	50-35
granite de Saint-Renan	40-25
micaschiste de Lesneven	40-25
granite de Kernilis	30-20

**Tabl. 5 – Correspondance entre l'amplitude maximale du signal RMP et la géologie.**

- au sein des différentes formations géologiques, une décroissance systématique de l'amplitude lorsque l'altitude augmente. Il est peu vraisemblable qu'il existe une relation directe entre l'amplitude du signal RMP et l'altitude du sondage. Par contre, d'autres paramètres, directement liés à l'altitude, comme la surface piézométrique ou l'altitude du mur des arènes, pourraient expliquer cette loi de décroissance.

## 2.2.2. Inversions en continu et modélisations directes (cf. ann. 3)

Les résultats des modélisations directes sont synthétisés dans le tableau 6.

Type de modèle	Numéro du Sondage RMP	Piézo (m)	Alluvions		Arènes		Horizon Intermédiaire		Horizon fissuré		Géologie
			Teneur %	Mur (m)	Teneur %	Mur (m)	Teneur (%)	Mur (m)	Teneur %	Mur (m)	
Type 1	PLB23	0.7	4.5	1.5	3	19	-	-	1	> 40	PV
	PLB24	5	-	-	2	14	-	-	.5	30	LE
	PLB25	3	2.5	5	6	10	-	-	2	35	AB
	PLB26	3	-	-	5	8	-	-	3	> 45	AB
	PLB30	4	1	12	3	18	-	-	.6	> 40	RE
	PLB35	5.5	-	-	3	18	-	-	1	25	BR
	PLB36	9	-	-	2.5	18	-	-	1	> 40	BR
	PLB37	5	-	-	2.5	18	-	-	1.5	> 40	KF
Type 2	PLB20	0.5	-	-	4	10	1	23	4	> 40	KI
	PLB28	2	1	5	5.5	10	.5	17	4	> 40	LE
	PLB29	1	1	4	4	10	.5	30	3	> 40	KI
	PLB31	1.5	-	-	4	8	.5	20	2	> 40	RE
	PLB33	2.5	-	-	5	9	.5	22	2.5	> 40	KF
	PLB34	0.5	-	-	7	2	1	15	3.3	30	KF
Cas particuliers	PLB27	5	-	-	.5	11	-	-	-	-	LA
	PLB32	4	3.5	12	-	-	-	-	-	-	RE

**Tabl. 6 – Résultats des modélisations directes.**

Ces modélisations directes qui ne concernent que les sondages RMP effectués en 1999 ont permis de mettre en évidence deux types de modèles :

- type 1 : il s'agit d'un modèle à 2 couches, abstraction faite de l'aquifère alluvionnaire de subsurface. Ce modèle est constitué d'une couche dont la teneur en eau est en moyenne de 3,5 %, attribuée aux arènes, surmontant un horizon dont la teneur en eau n'est plus que de 1,5 % en moyenne et qui correspondrait à la zone fissurée.

Le mur des arènes se situe entre 8 à 19 m de profondeur. Par contre, le mur de l'horizon fissuré n'est que rarement atteint à la profondeur de 40 m qui correspond à la profondeur d'investigation maximum avec une boucle en huit de 37 m de côté ;

- type 2 : ce modèle est constitué de 3 couches, abstraction faite des alluvions de subsurface. Il se différencie du type 1 par la présence entre les arènes et la zone fissurée, d'un horizon à faible teneur en eau (0,5 %) ayant une puissance de 10 à 20 m.

Il est à noter que les teneurs en eau dans les arènes et dans la zone fissurée ont des valeurs légèrement supérieures à celles du type 1 (5 % pour les arènes et 3 % pour la zone fissurée) ;

- cas particuliers : les sondages PLB27 et PLB32 ne s'intègrent dans aucun de ces deux types.

PLB27 est situé en bordure d'une profonde vallée (Aber Wrac'h) qui constitue probablement un drain très important, ce qui expliquerait l'absence d'eau au niveau de ce sondage RMP.

PLB32 se trouve en fond de vallée sur une zone probablement remblayée. L'horizon aquifère mis en évidence entre 4 et 12 m peut être attribué à des remblais et des alluvions surmontant la roche saine.

Aucune relation évidente n'a été mise en évidence entre le type de modèle et les unités géologiques. Par contre, il semble y avoir une certaine organisation dans la répartition géographique des sondages RMP.

Les sondages appartenant au type 1 se répartissent sur la bordure nord et sur la bordure sud de la zone d'étude alors que ceux du type 2 occupent la partie centrale (fig. 5).

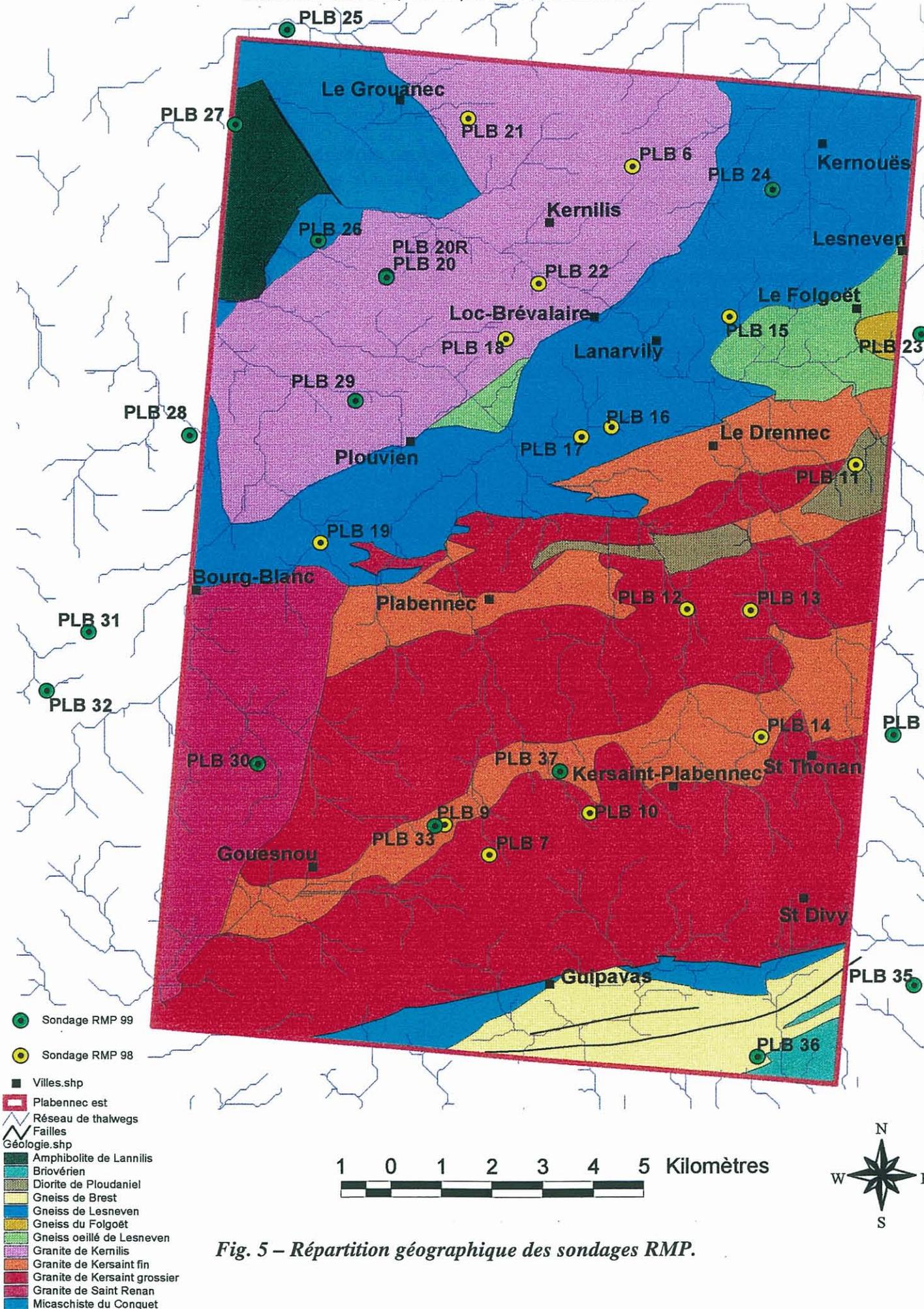


Fig. 5 – Répartition géographique des sondages RMP.

## Conclusion

Cette troisième campagne de sondages RMP dans le Finistère nord sur la carte géologique à 1/50 000 de Plabennec a permis d'investiguer cinq nouvelles formations géologiques, ce qui porte à dix le nombre de formations géologiques reconnues par RMP. Le nombre de sondages RMP est ainsi passé de 17 à 32.

L'analyse des paramètres significatifs de tous les sondages RMP (amplitude et temps de décroissance du signal) montre :

- une distribution organisée de l'amplitude du signal en fonction de la géologie ;
- une répartition aléatoire des temps de décroissance du signal en fonction de la géologie. Cette absence de cohérence est probablement due à la mauvaise qualité des courbes de temps de décroissance ;
- une décroissance systématique, quelle que soit l'unité géologique, de l'amplitude lorsque l'altitude sol des sondages RMP augmente.

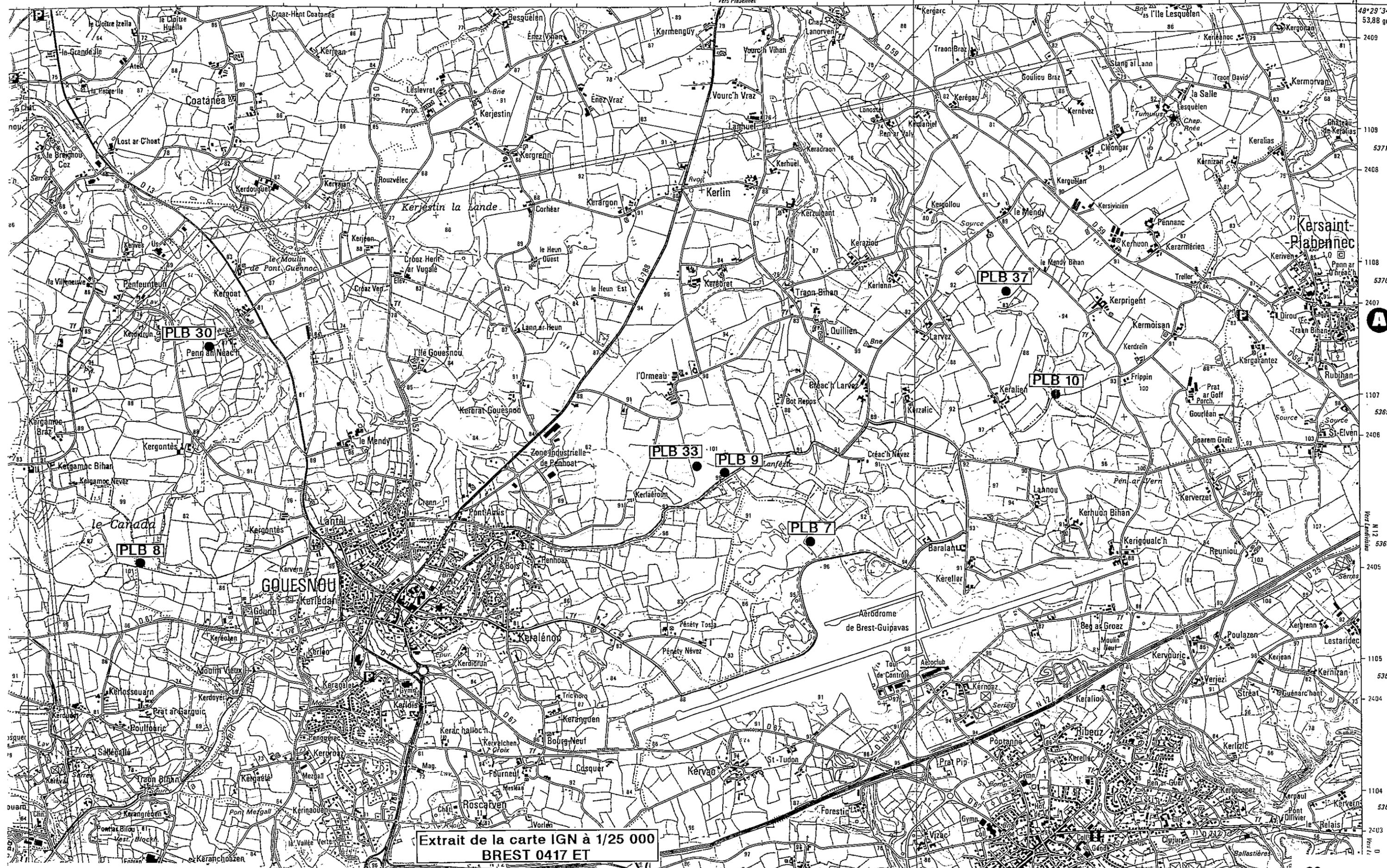
Les modélisations directes des sondages RMP effectués en 1999 ont mis en évidence la présence de deux types de modèles sur la zone d'étude :

- le type 1 représenté par un modèle à deux couches tout à fait cohérent avec le schéma conceptuel de l'altération, avec une teneur en eau de l'ordre de 3,5 % dans les arènes et de 1,5 % au niveau de l'horizon fissuré ;
- le type 2 est un modèle à trois couches qui se différencie du précédent par la présence d'un horizon à faible teneur en eau (0,5 %), intercalé entre les arènes et la zone fissurée.

Ces deux types de modèles ont une répartition géographique organisée. Les sondages appartenant au type 1 se répartissent sur la bordure nord et sur la bordure sud de la zone d'étude alors que ceux du type 2 occupent la partie centrale.

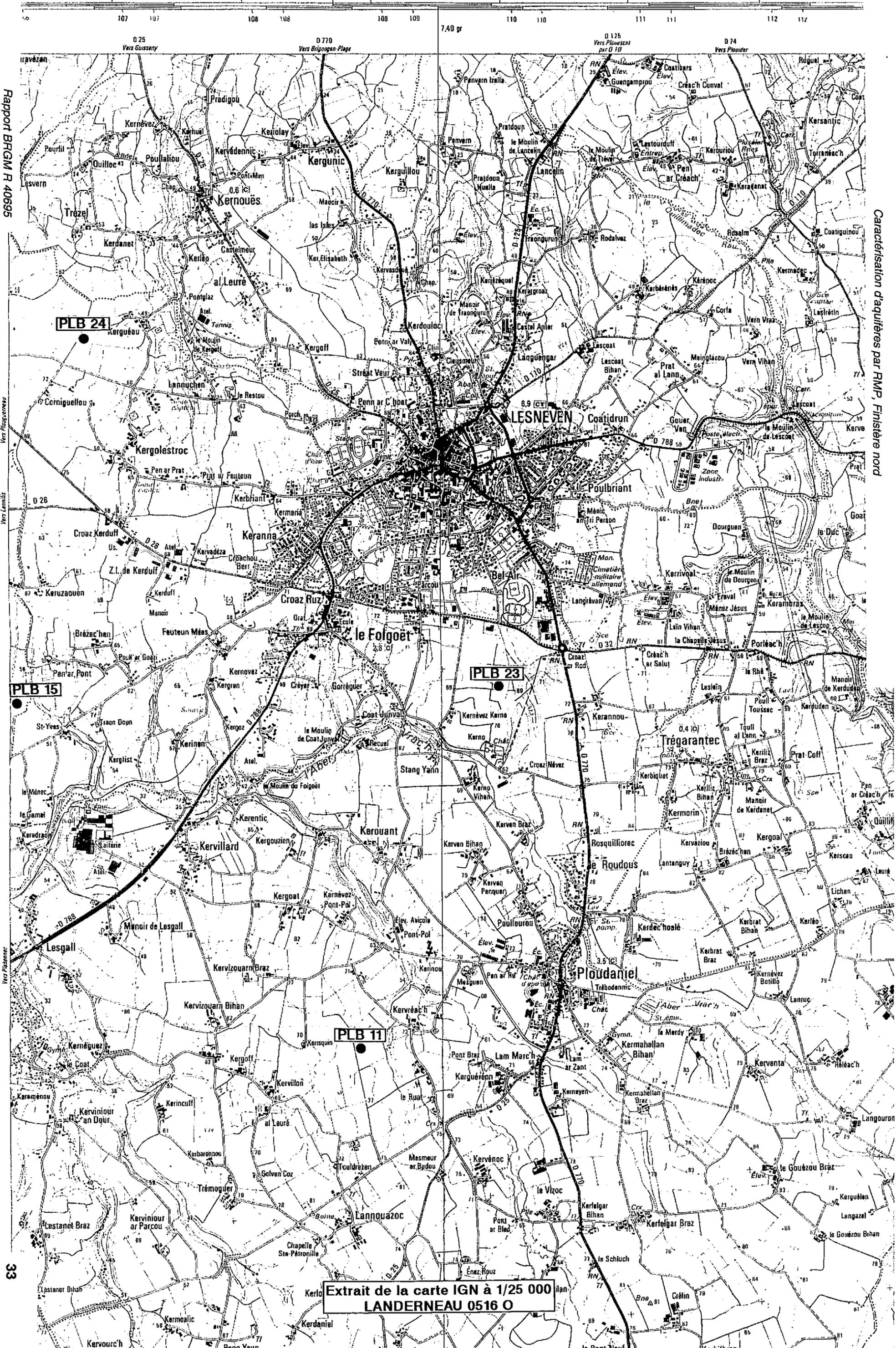
## **ANNEXE 1**

### **Localisation des sondages RMP sur extraits de la carte IGN à 1/25 000**



Extrait de la carte IGN à 1/25 000  
BREST 0417 ET



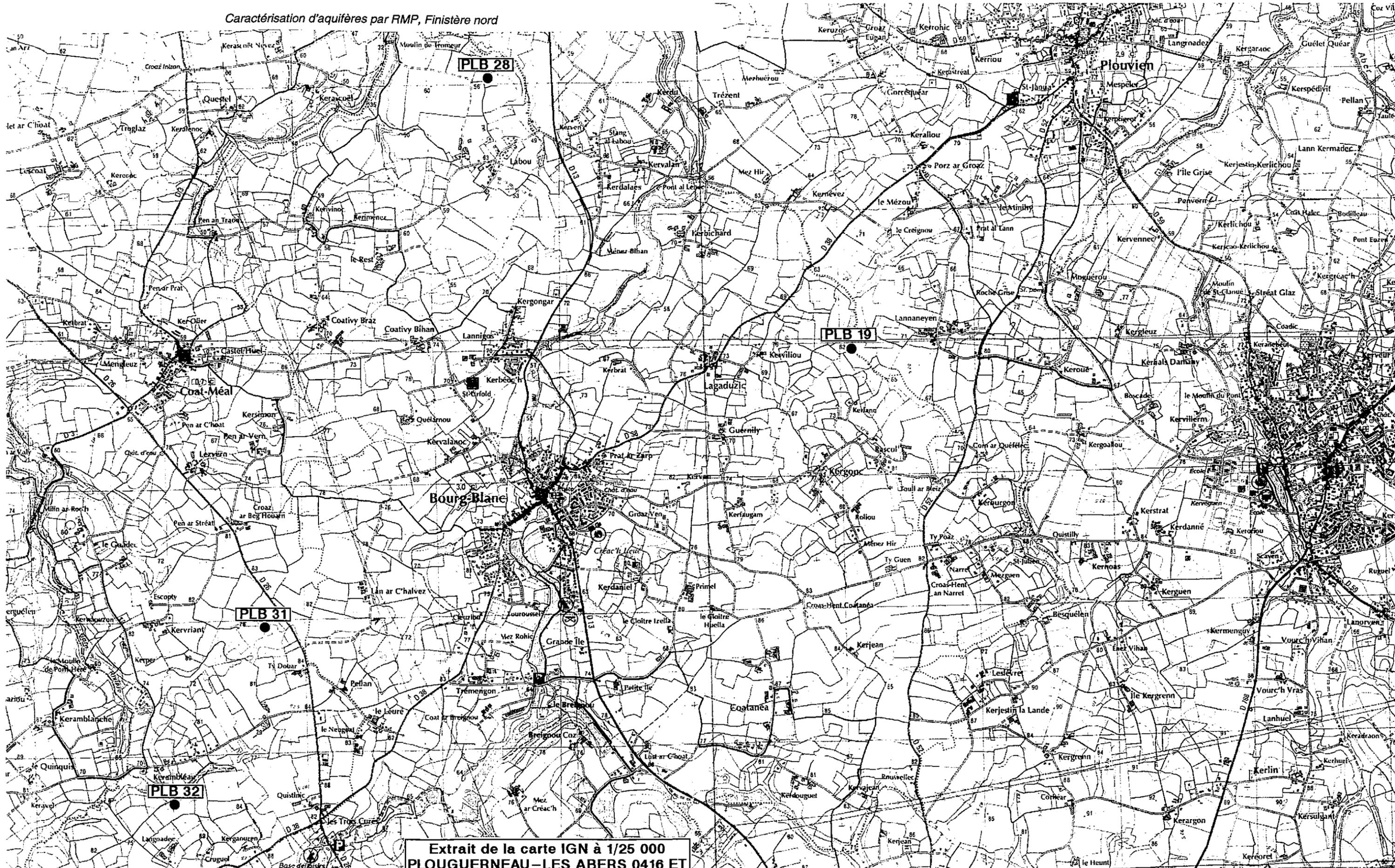


Rapport BRGM R 40695

Caractérisation d'aquifères par RMP, Finistère nord

Extrait de la carte IGN à 1/25 000  
LANDERNEAU 0516 O

33

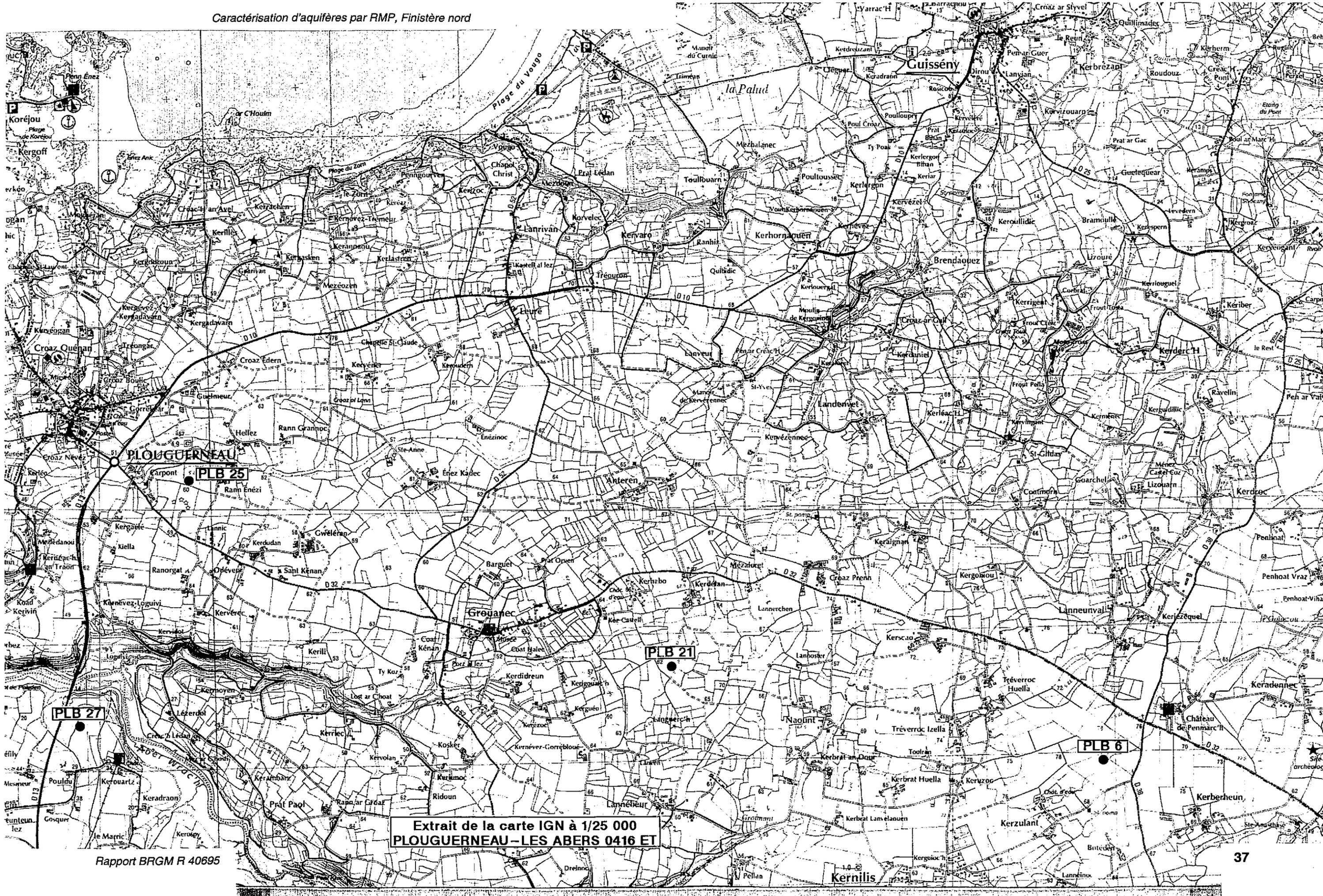


Extrait de la carte IGN à 1/25 000  
PLOUGUERNEAU-LES ABERS 0416 ET

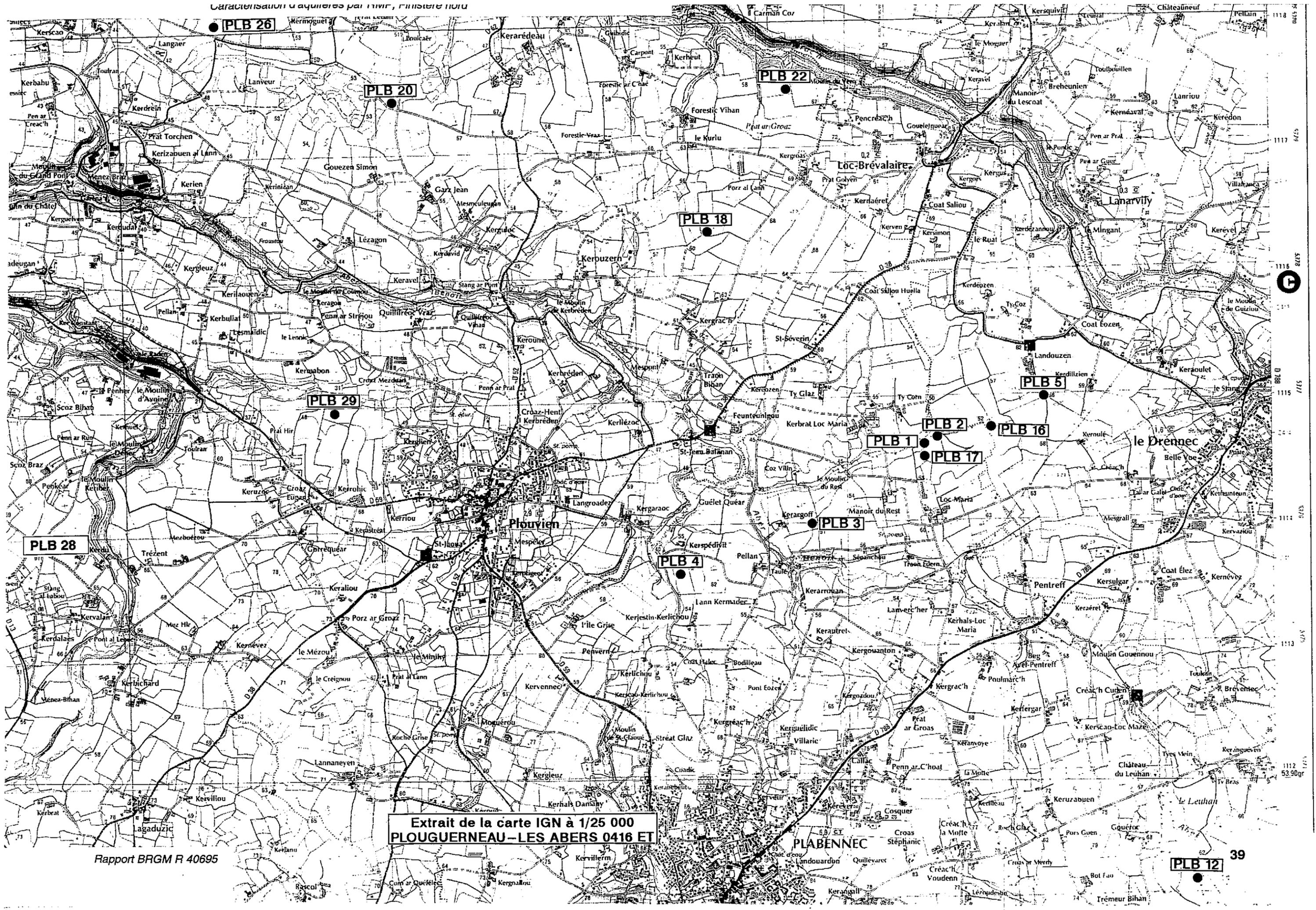
8

9

10



Extrait de la carte IGN à 1/25 000  
PLOUGUERNEAU - LES ABERS 0416 ET



PLB 26

PLB 20

PLB 22

PLB 18

PLB 29

PLB 5

PLB 2

PLB 16

PLB 1

PLB 17

PLB 28

Plouguerneau

PLB 4

PLB 3

Extrait de la carte IGN à 1/25 000  
PLOUGUERNEAU - LES ABERS 0416 ET

PLABENNEC

PLB 12

39

## **ANNEXE 2**

### **Paramètres RMP mesurés**

# PMR data PLB20d

Antenna type: square  
Stacking number: 250  
Filter window: 5 Hz

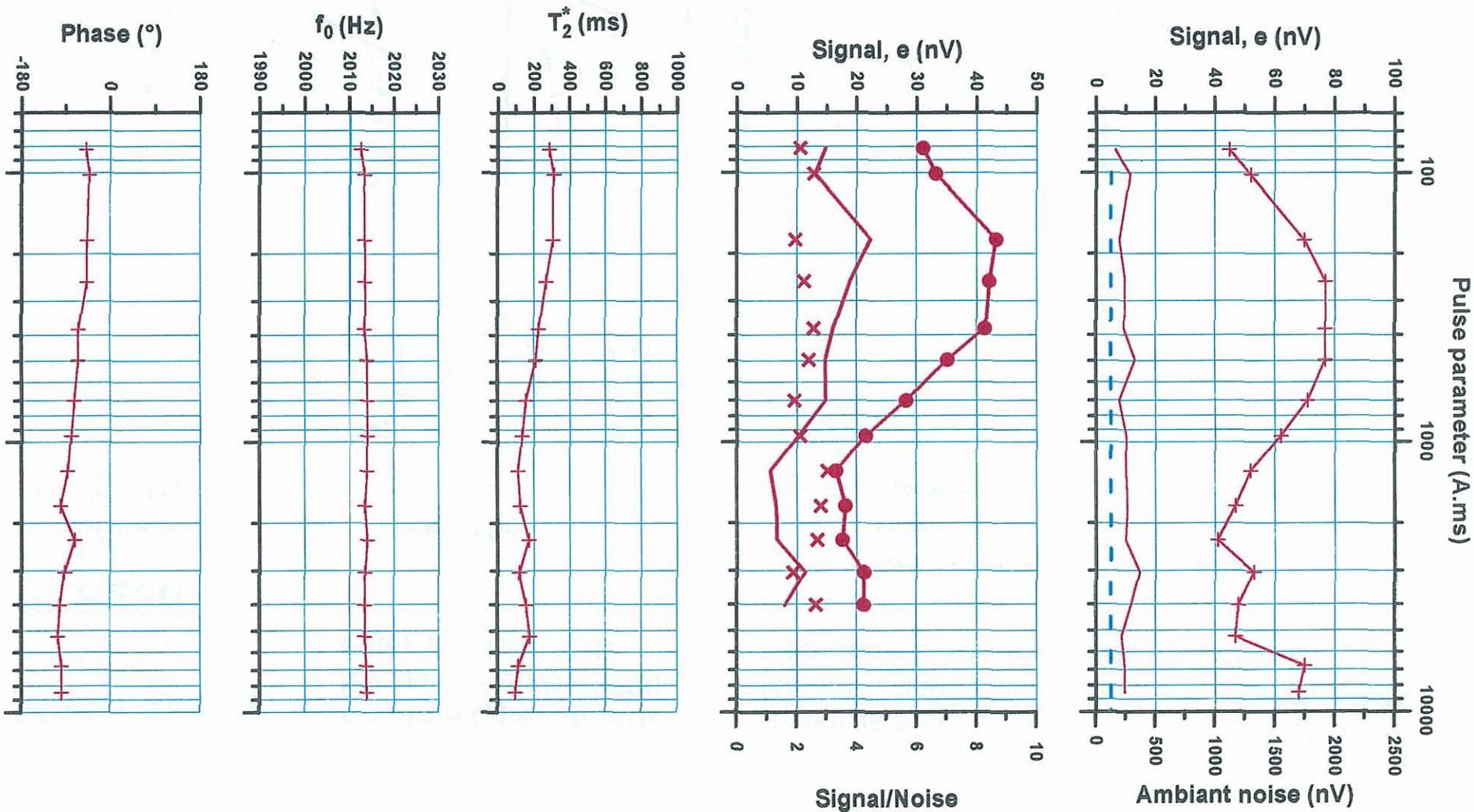
Antenna side: 37m  
Measuring window: 240 ms  
Géologie: Granite de Kernilis

Date: 22/05/99  
Site: PLABENNEC

measured freq.

● average signal  
× average noise  
— signal/noise

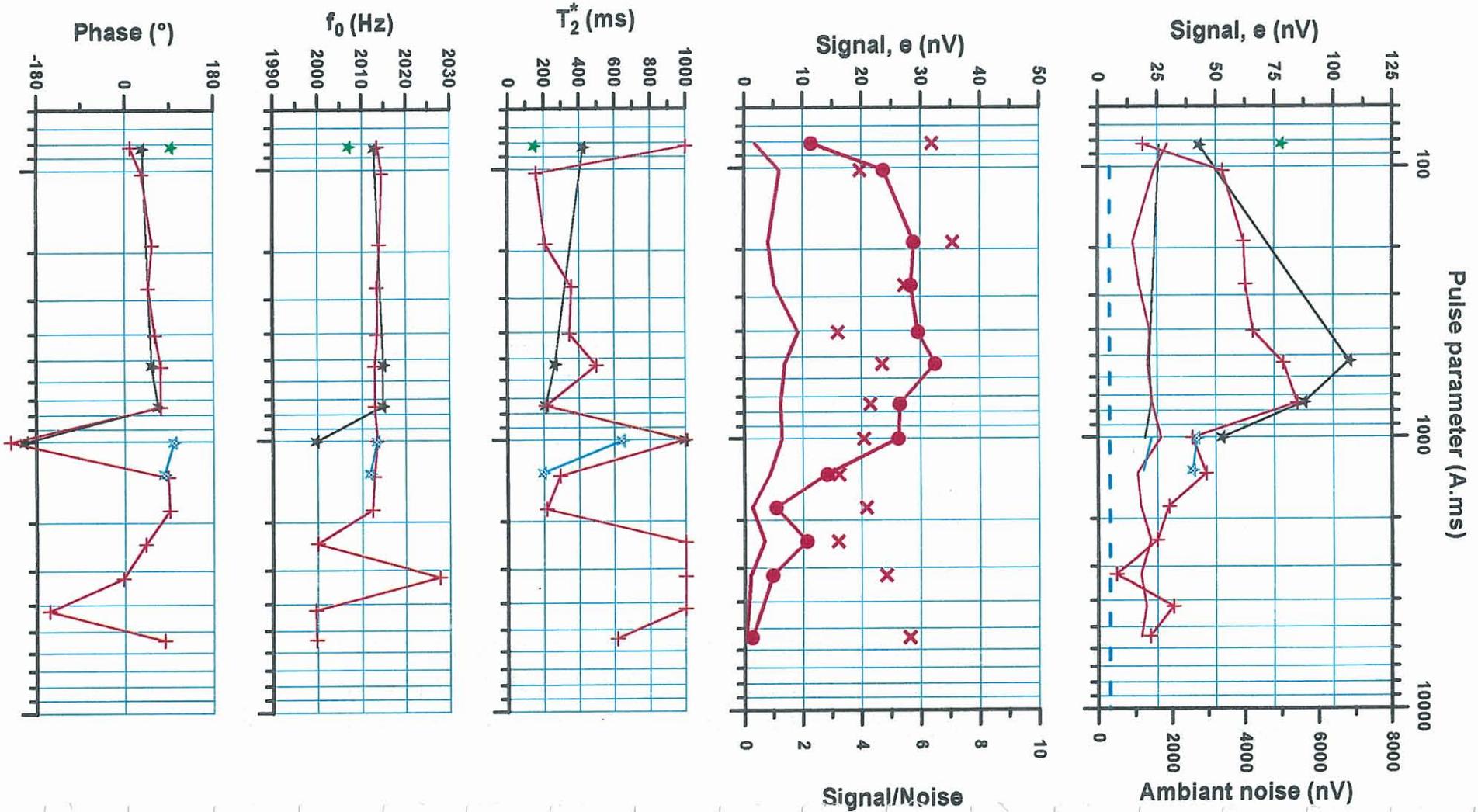
+ signal  
— noise before stack  
- - - instrumental noise level



**PMR data**  
**PLB23c**  
**PLB23d**  
**PLB23b**  
**PLB23a**

Antenna type: square  
 Stacking number: 200  
 Filter window: 5 Hz

Antenna side: 37m  
 Measuring window: 240 ms  
 Géologie: Orthogneiss de Plounevez  
 Date: 18/05/99  
 Site: PLABENNEC



# PMR data

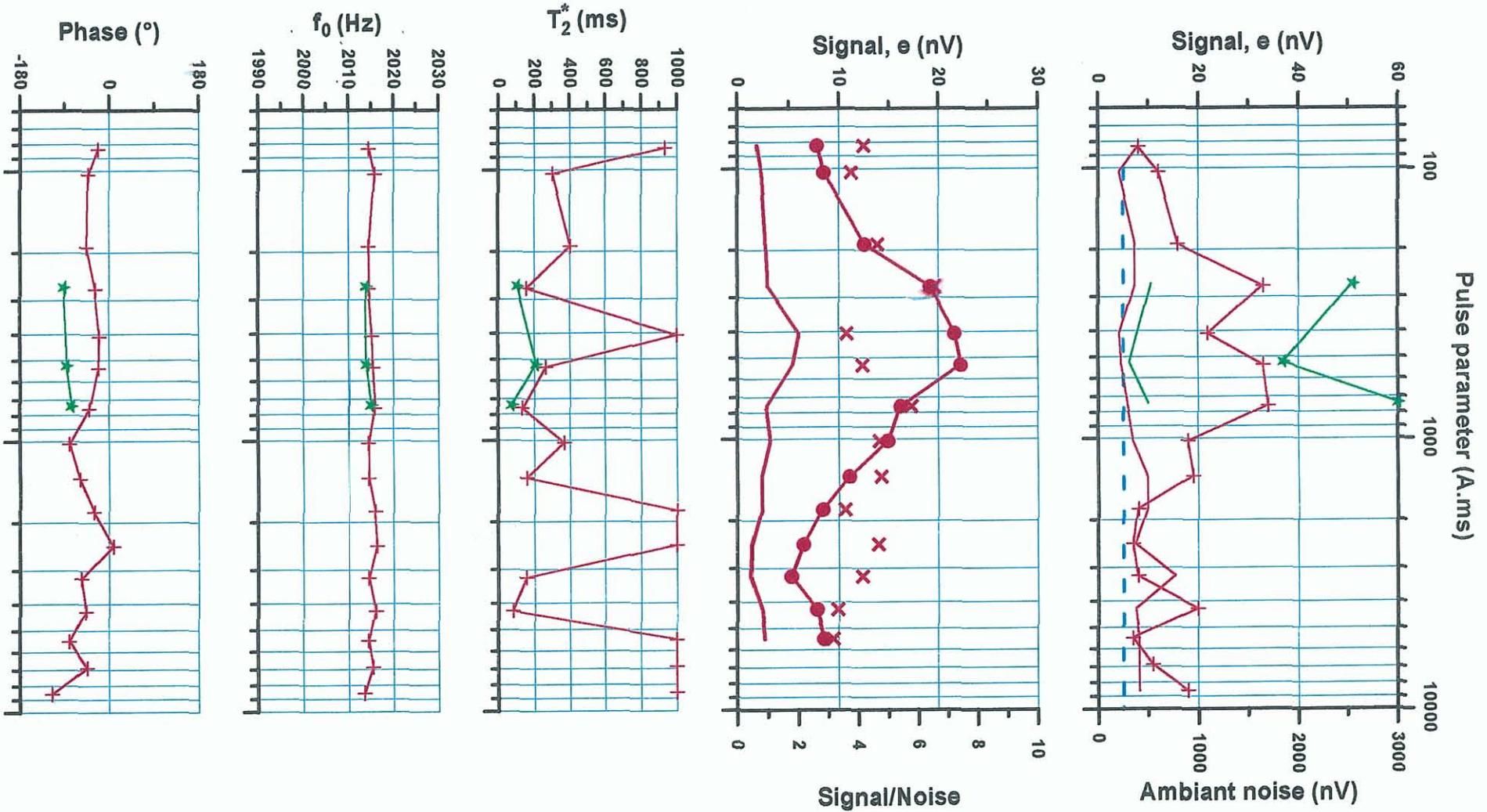
## PLB24d

## PLB24c

Antenna type: square  
 Stacking number: 200  
 Filter window: 5 Hz

Antenna side: 37m  
 Measuring window: 240 ms  
 Géologie: Gneiss de Lesneven

Date: 18/05/99  
 Site: PLABENNEC

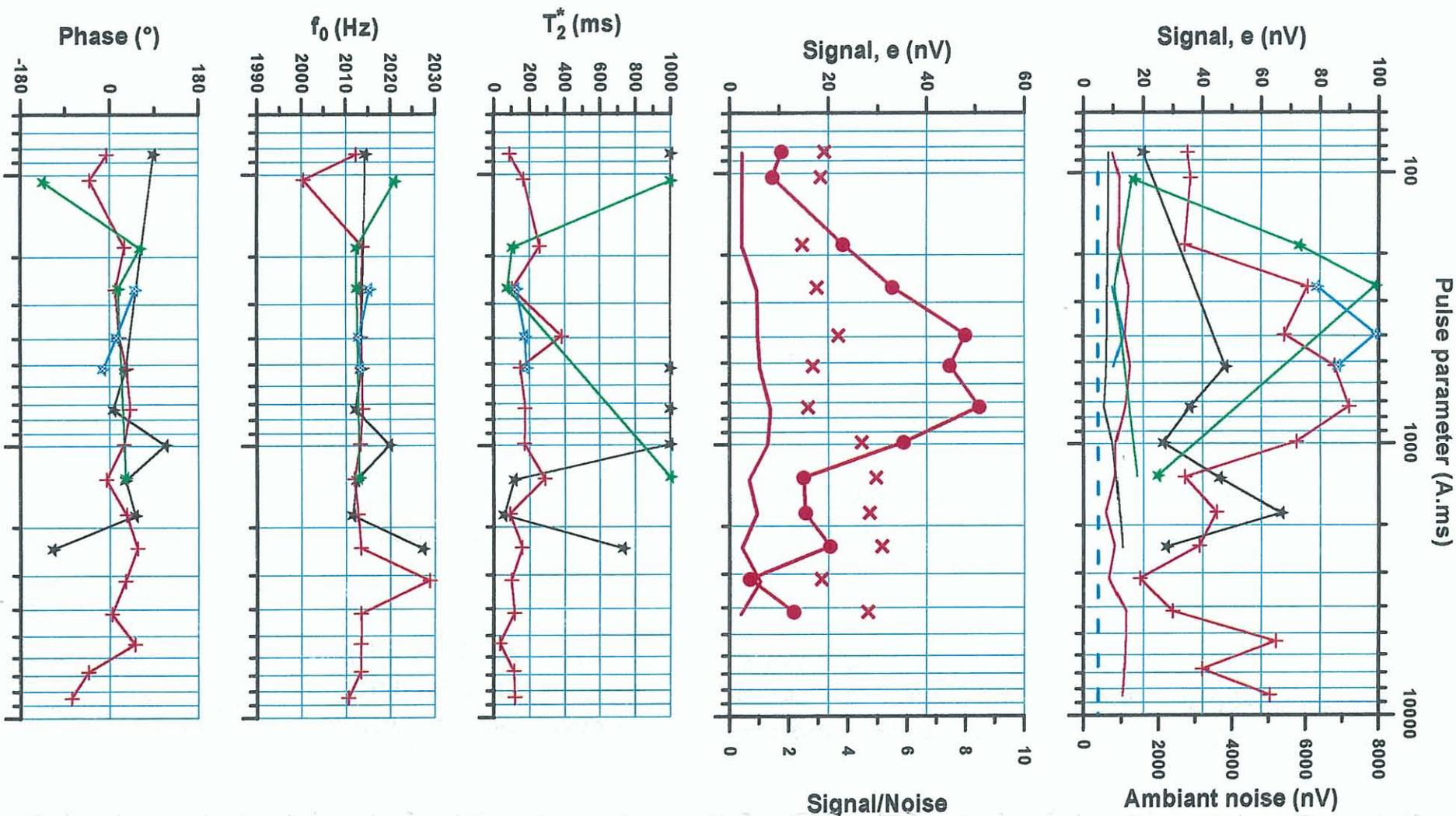


# PMR data

**PLB25c**  
**PLB25b**  
**PLB25d**  
**PLB25a**

Antenna type: square  
 Stacking number: 150  
 Filter window: 5 Hz

Antenna side: 37m  
 Measuring window: 240 ms  
 Géologie: Micaschistes de l'Aber Wrac'h  
 Date: 19/05/99  
 Site: PLABENNEC



# PMR data

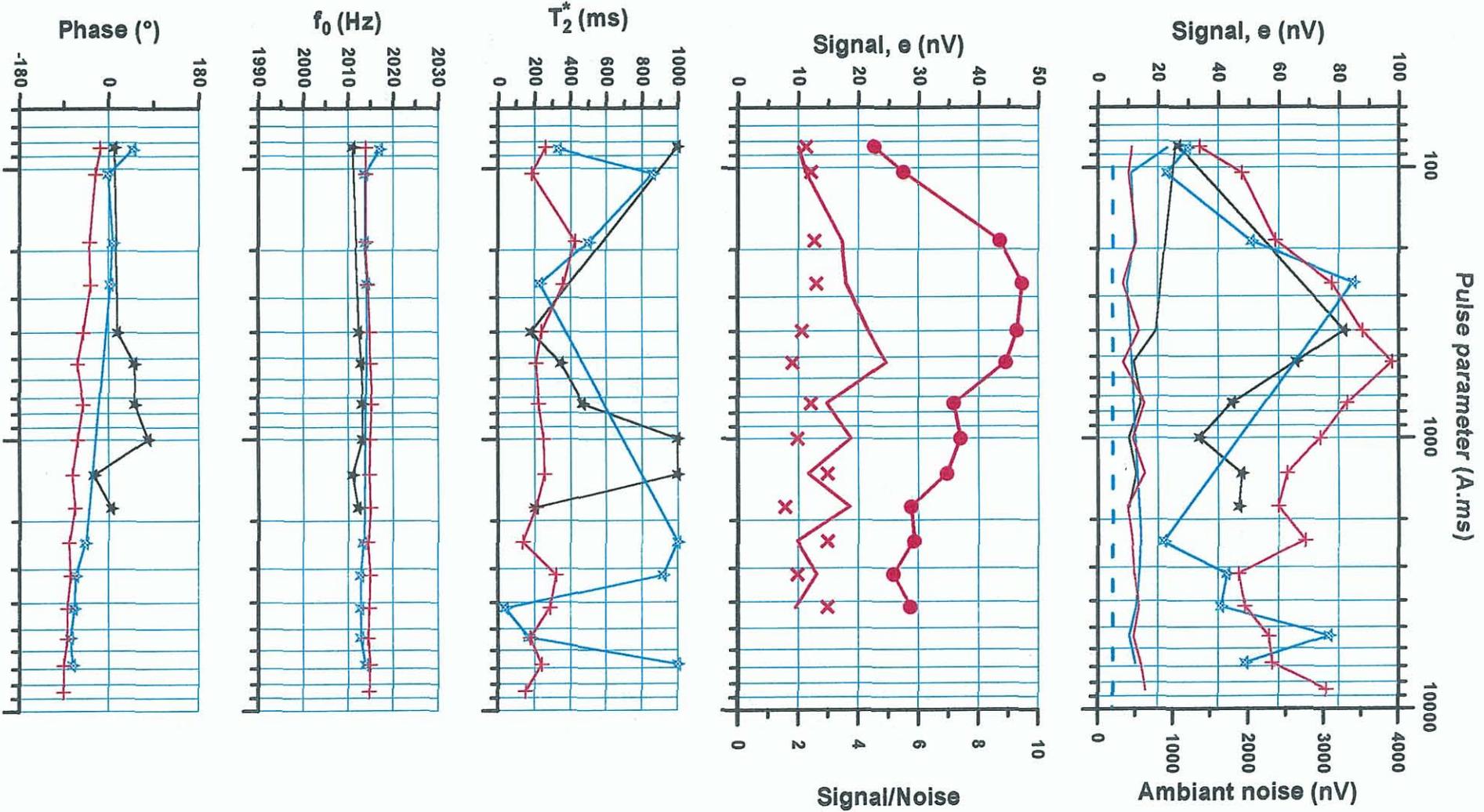
**PLB26c**  
**PLB26b**  
**PLB26a**

Antenna type: square  
Stacking number: 250  
Filter window: 5 Hz

Antenna side: 37m  
Measuring window: 240 ms  
Géologie: Micashistes du Conquet  
Date: 19/05/99  
Site: PLABENNEC

measured freq.

- average signal
- × average noise
- signal/noise
- + signal
- noise before stack
- - - instrumental noise level



# PMR data

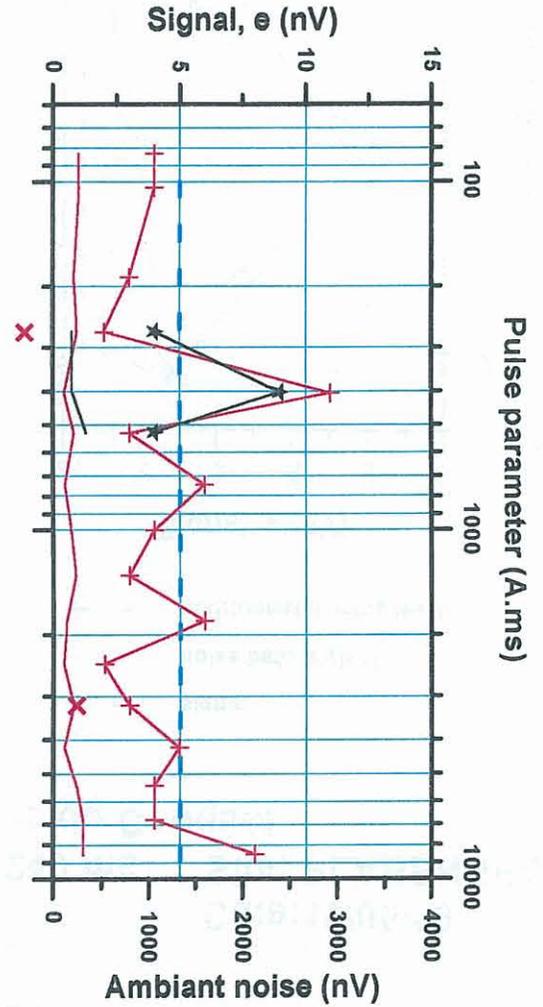
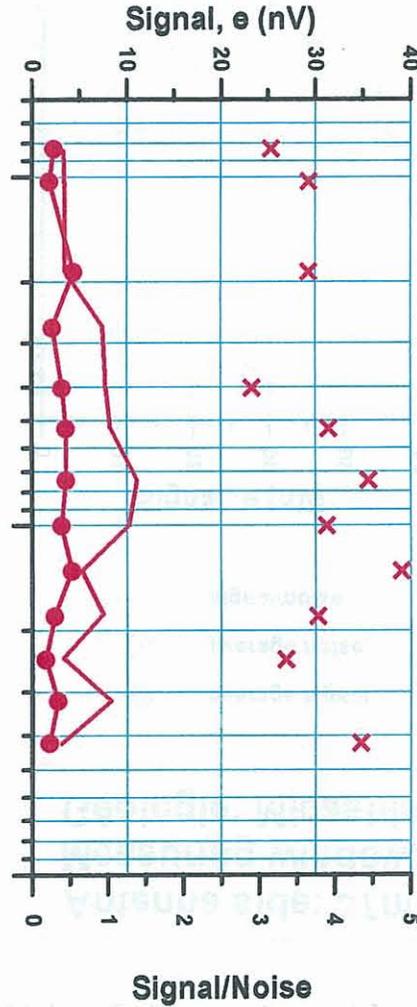
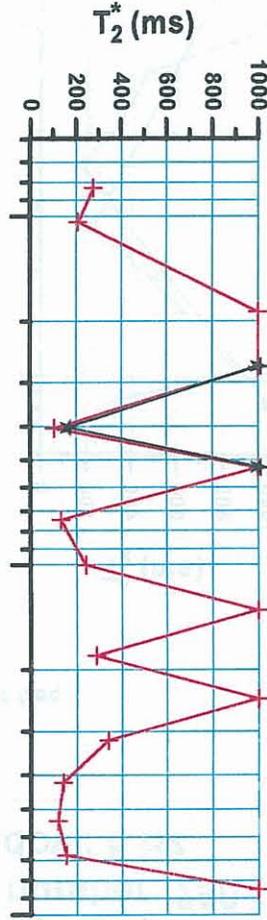
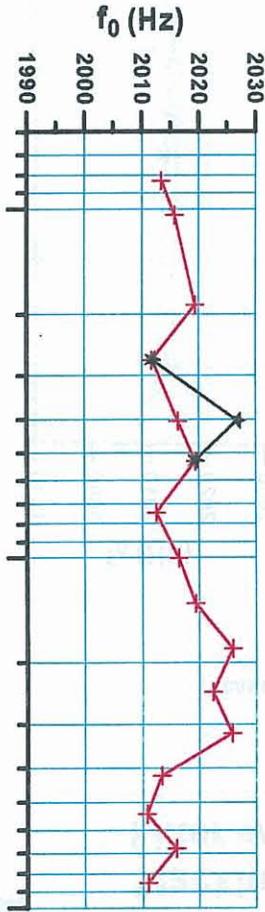
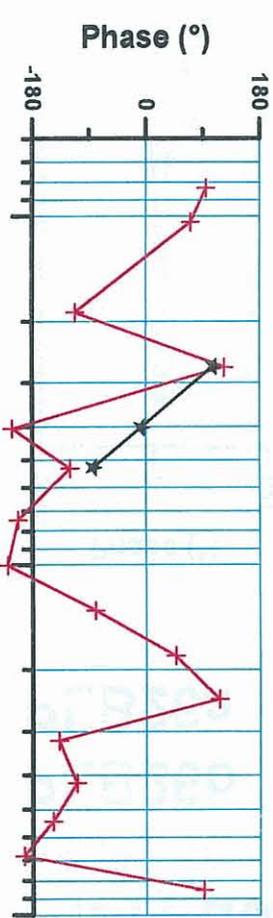
## PLB27b

## PLB27c

Antenna type: square  
 Stacking number: 100  
 Filter window: 5 Hz

Antenna side: 37m  
 Measuring window: 240 ms  
 Géologie: Amphibolites de Lannilis

Date: 20/05/99  
 Site: PLABENNEC

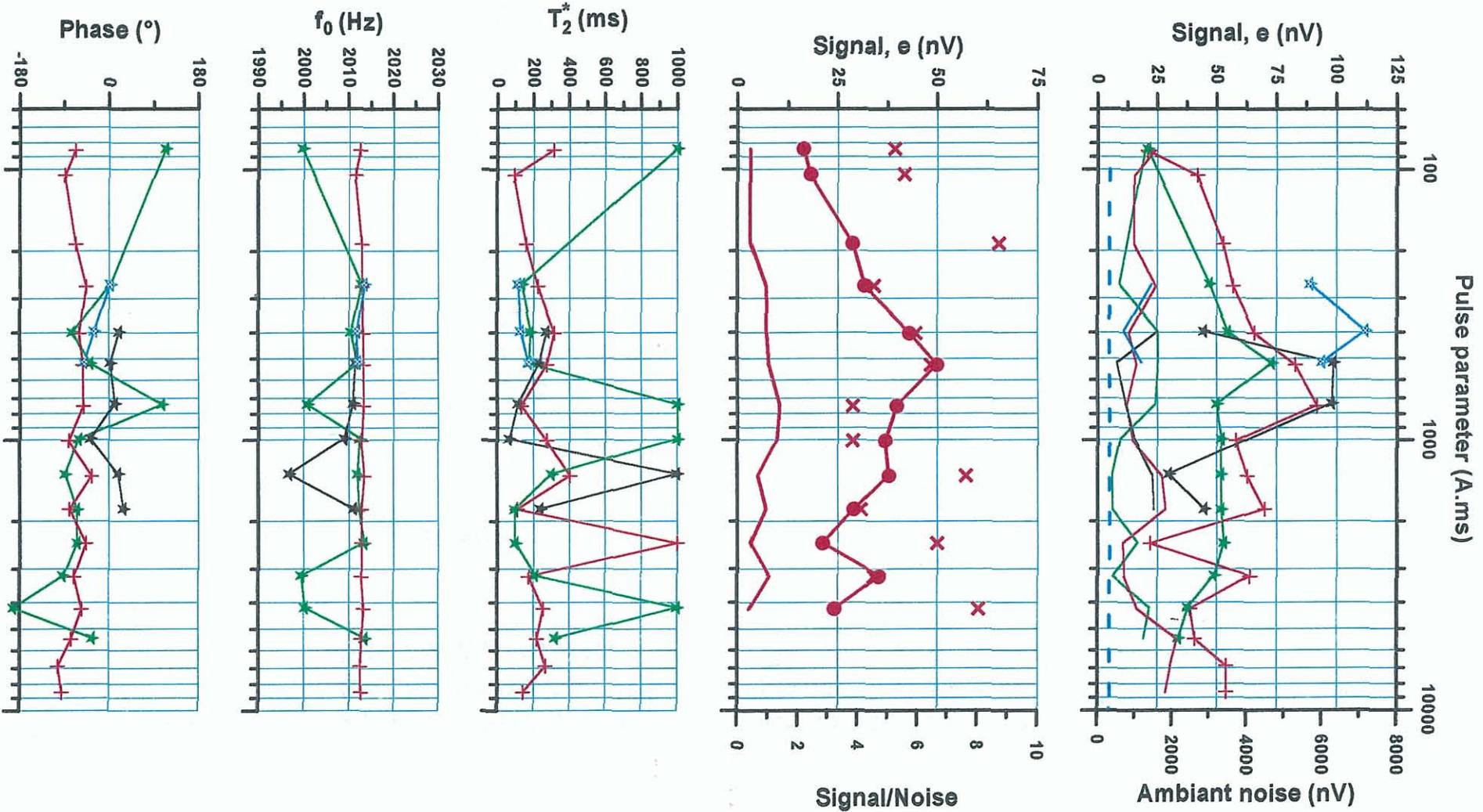


**PMR data**  
**PLB28a**  
**PLB28b**  
**PLB28c**  
**PLB28d**

Antenna type: square  
 Stacking number: 200  
 Filter window: 5 Hz

Antenna side: 37m  
 Measuring window: 240 ms  
 Géologie: Gneiss de Lesneven

Date: 20/05/99  
 Site: PLABENNEC



# PMR data

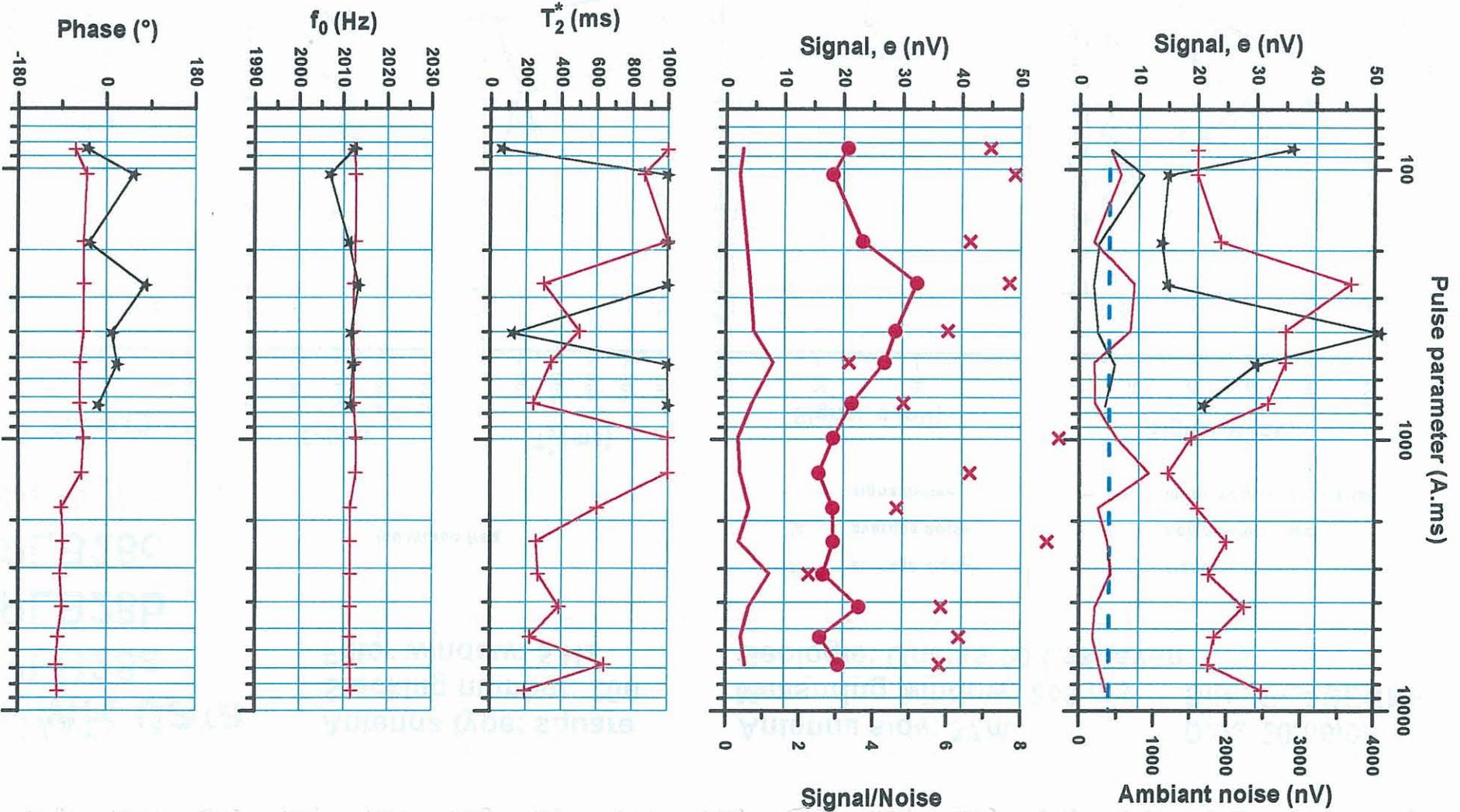
## PLB29c

## PLB29b

Antenna type: square  
 Stacking number: 150  
 Filter window: 5 Hz

Antenna side: 37m  
 Measuring window: 240 ms  
 Géologie: Granite de Kernilis

Date: 21/05/99  
 Site: PLABENNEC



# PMR data

## PLB30c

## PLB30b

Antenna type: square  
Stacking number: 250  
Filter window: 5 Hz

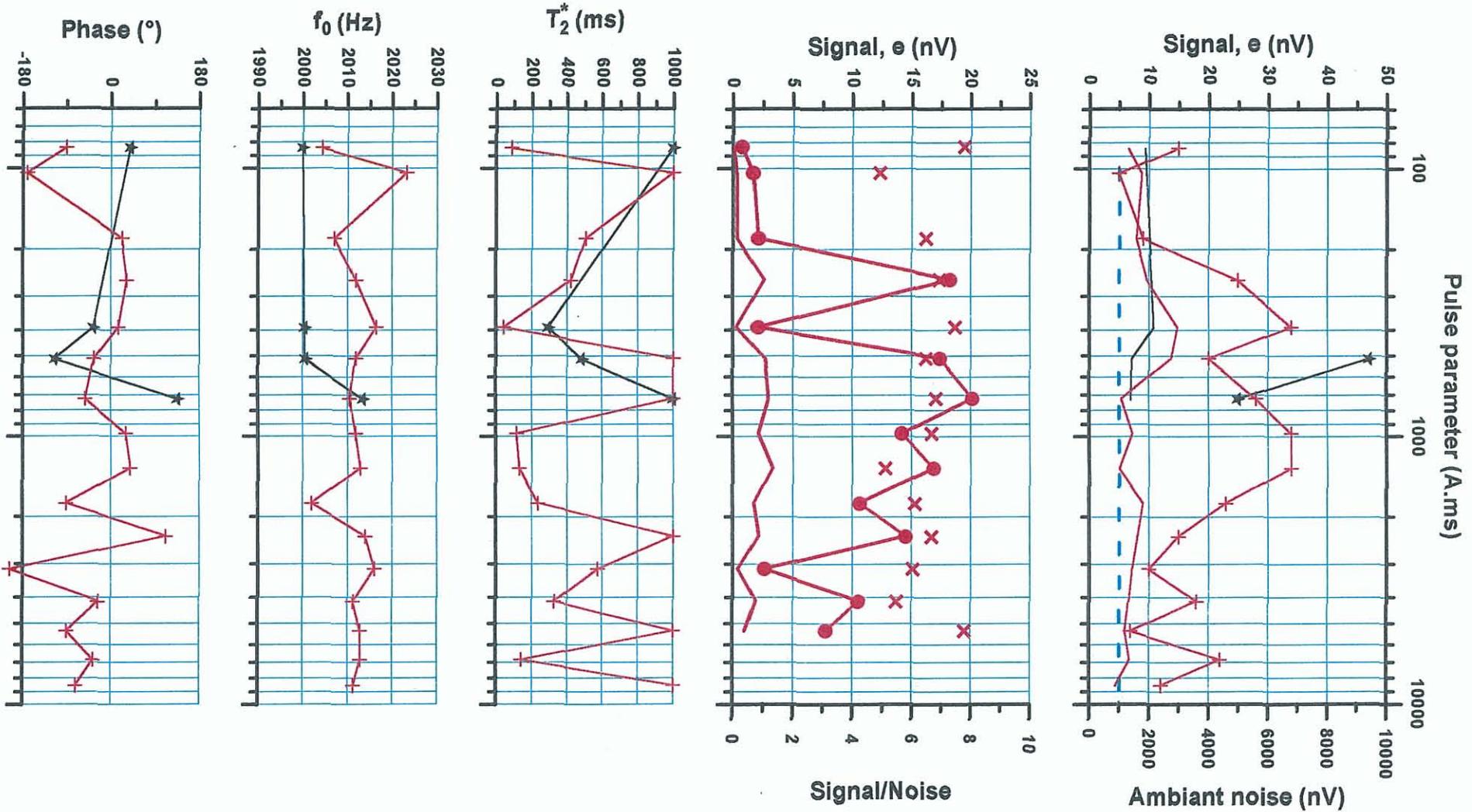
Antenna side: 37m  
Measuring window: 240 ms  
Géologie: Granite de Saint Renan

Date: 21/05/99  
Site: PLABENNEC

—+— measured freq.

● average signal  
× average noise  
— signal/noise

+ signal  
— noise before stack  
- - - instrumental noise level



# PMR data

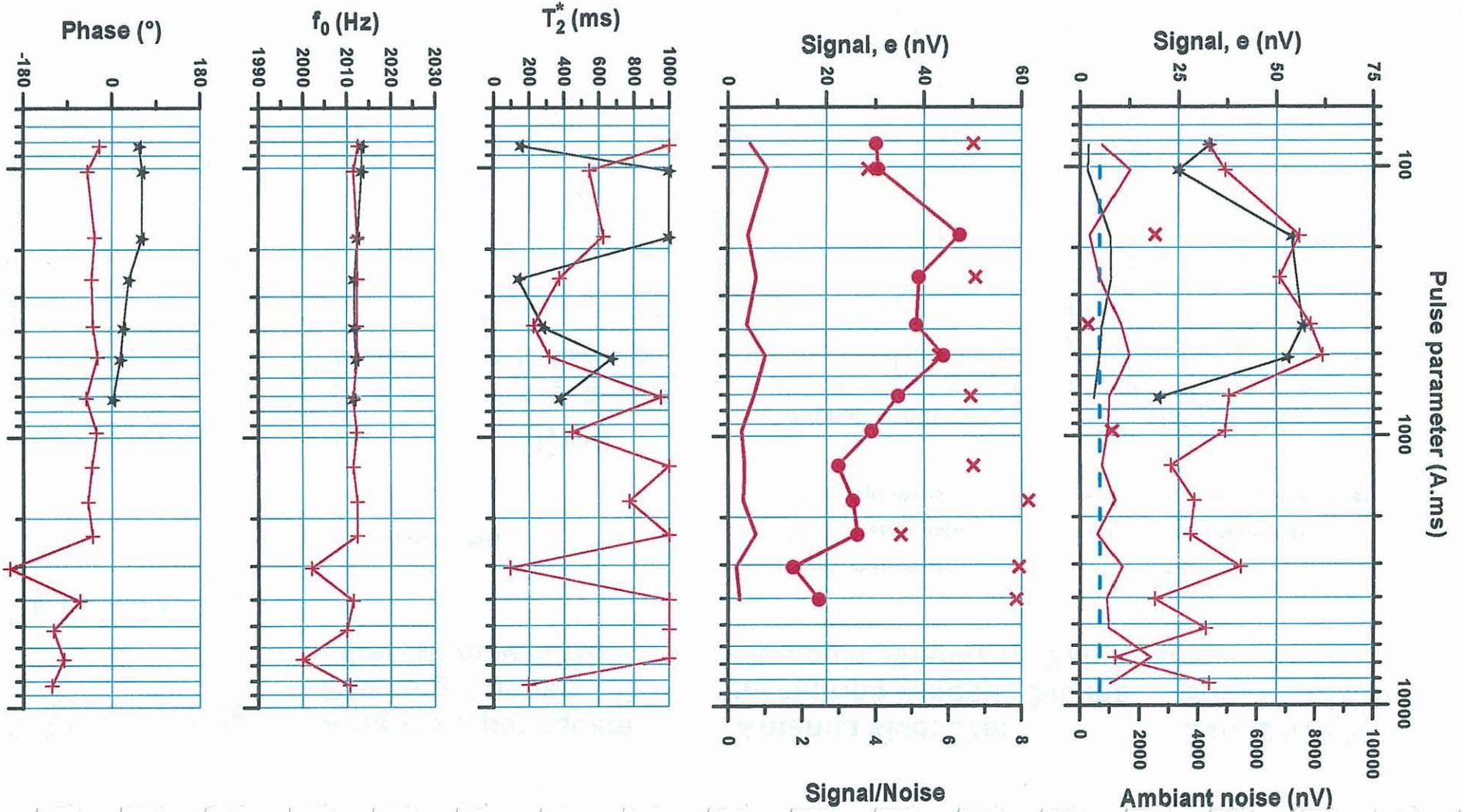
## PLB31b

## PLB31a

Antenna type: square  
 Stacking number: 150  
 Filter window: 5 Hz

Antenna side: 37m  
 Measuring window: 240 ms  
 Géologie: Granite de Saint Renan

Date: 22/05/99  
 Site: PLABENNEC



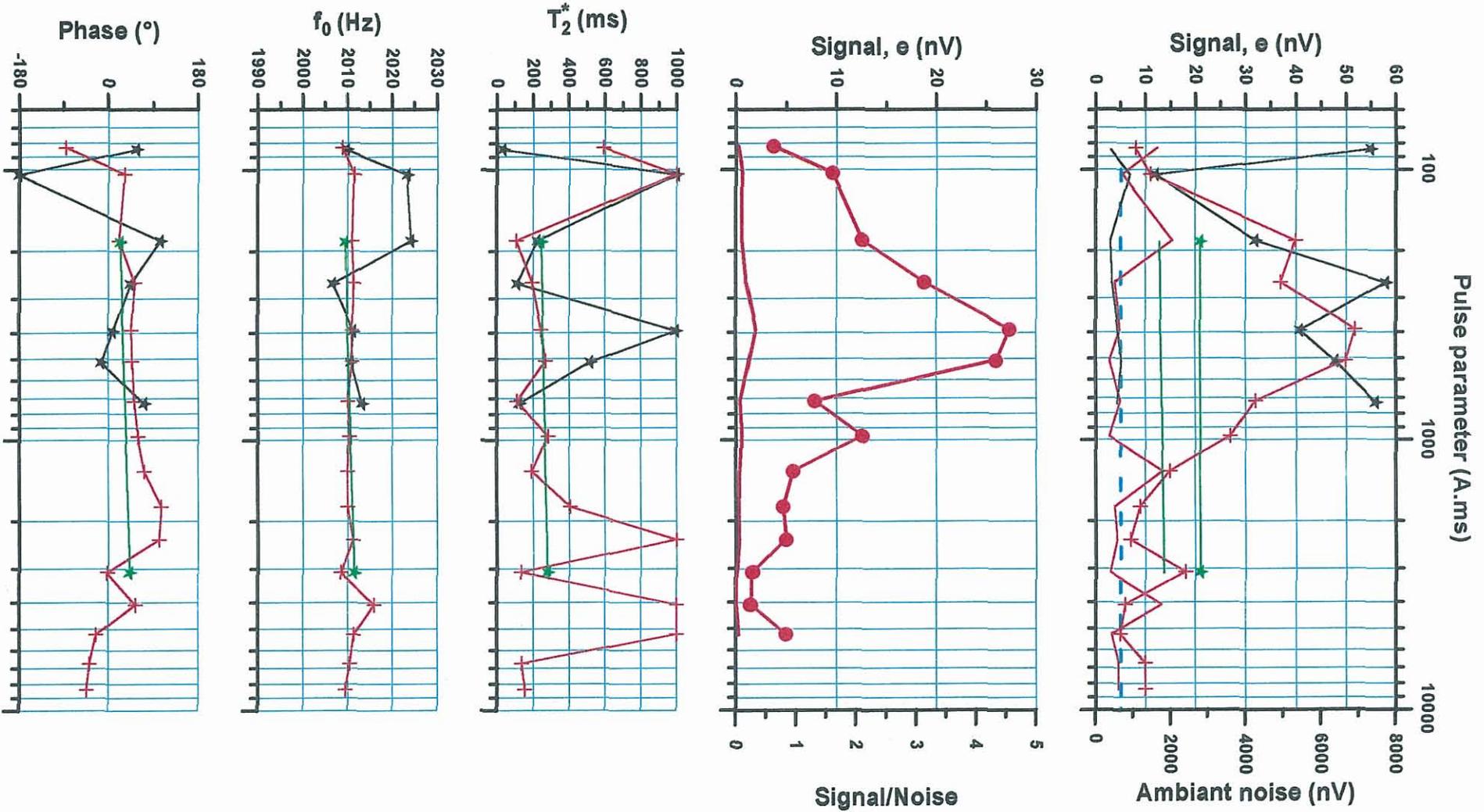
# PMR data

**PLB32b**  
**PLB32c**  
**PLB32a**

Antenna type: square  
Stacking number: 150  
Filter window: 5 Hz

Antenna side: 37m  
Measuring window: 240 ms  
Géologie: Granite de Saint Renan

Date: 24/05/99  
Site: PLABENNEC



# PMR data

## PLB33c

## PLB33b

Antenna type: square  
 Stacking number: 250  
 Filter window: 5 Hz

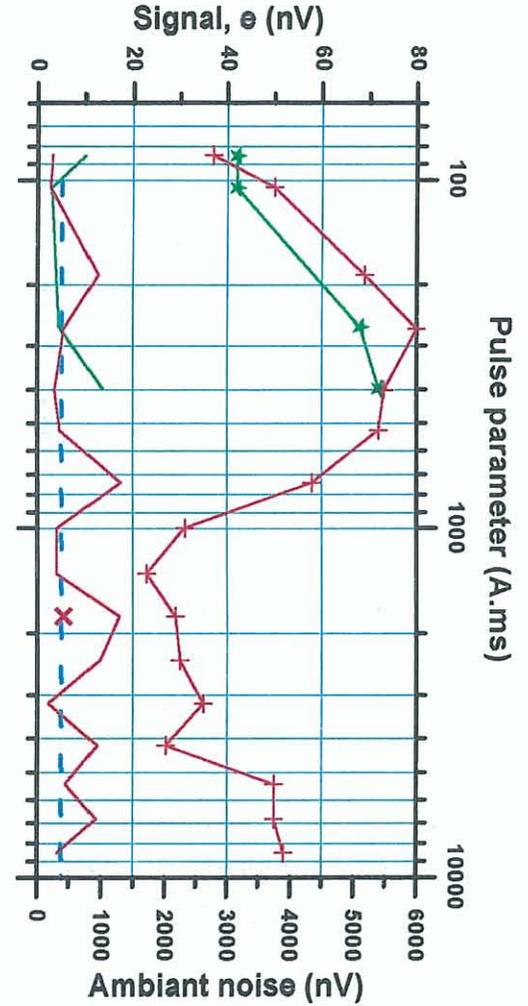
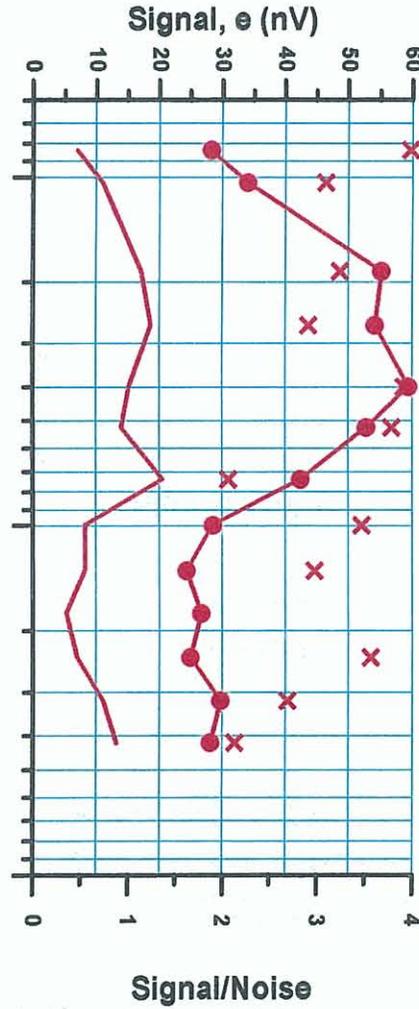
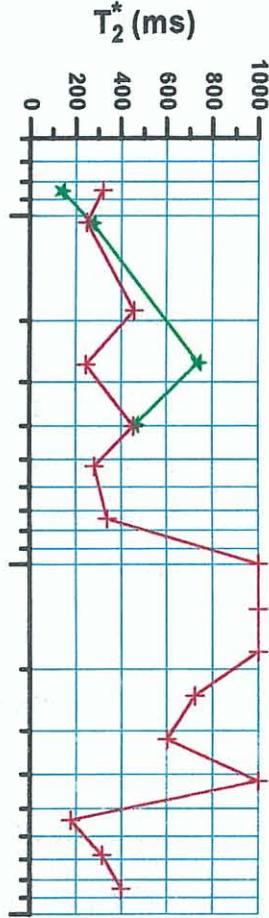
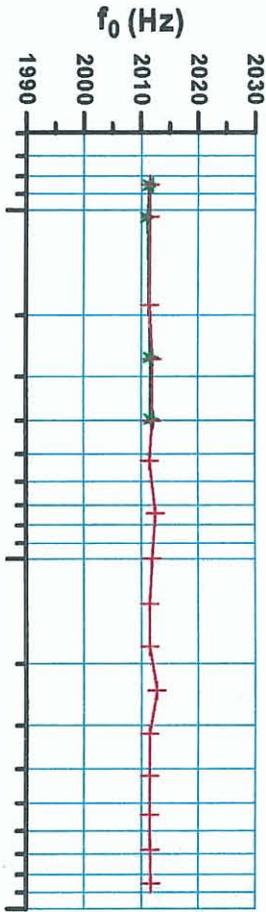
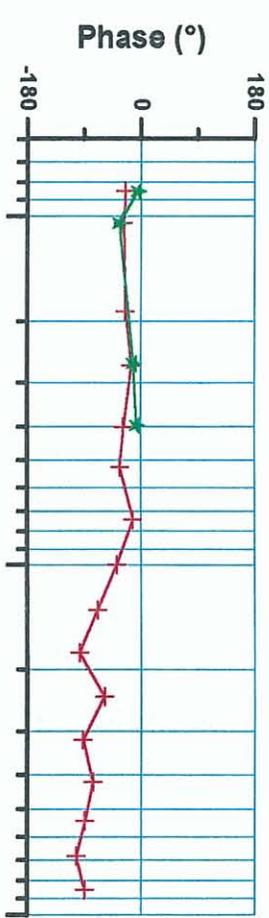
Antenna side: 37m  
 Measuring window: 240 ms  
 Géologie: Granite de Kersaint fin

Date: 24/05/99  
 Site: PLABENNEC

—+— measured freq.

● average signal  
 × average noise  
 — signal/noise

+ signal  
 — noise before stack  
 - - - instrumental noise level



# PMR data

## PLB34d

## PLB34c

Antenna type: square  
 Stacking number: 150  
 Filter window: 5 Hz

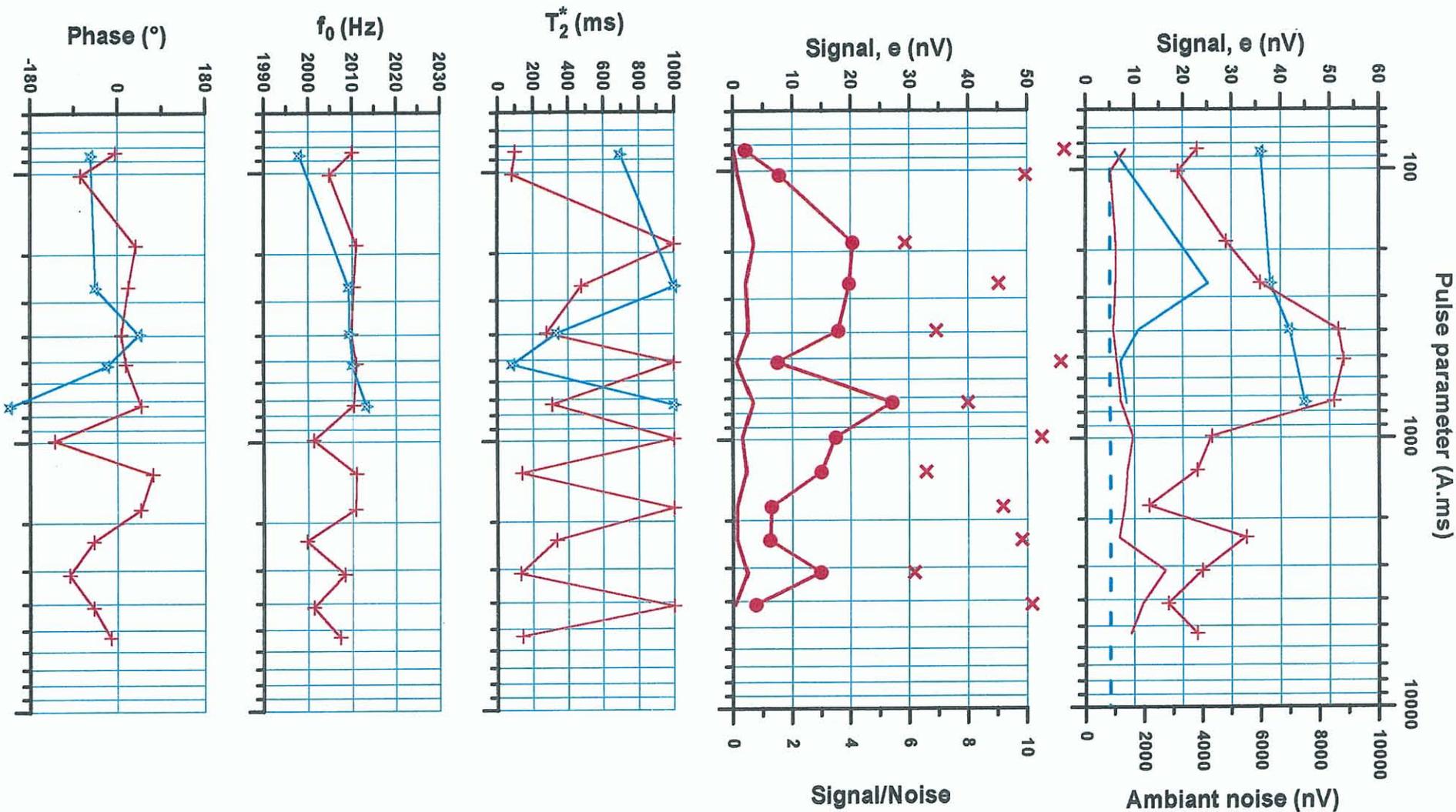
Antenna side: 37m  
 Measuring window: 240 ms  
 Géologie: Granite de Kersaint grossier

Date: 25/05/99

Site: PLABENNEC

—+— measured freq.

● average signal  
 × average noise  
 — signal/noise  
 + signal  
 — noise before stack  
 - - - instrumental noise level



# PMR data

## PLB35b

## PLB35a

Antenna type: square  
Stacking number: 250  
Filter window: 5 Hz

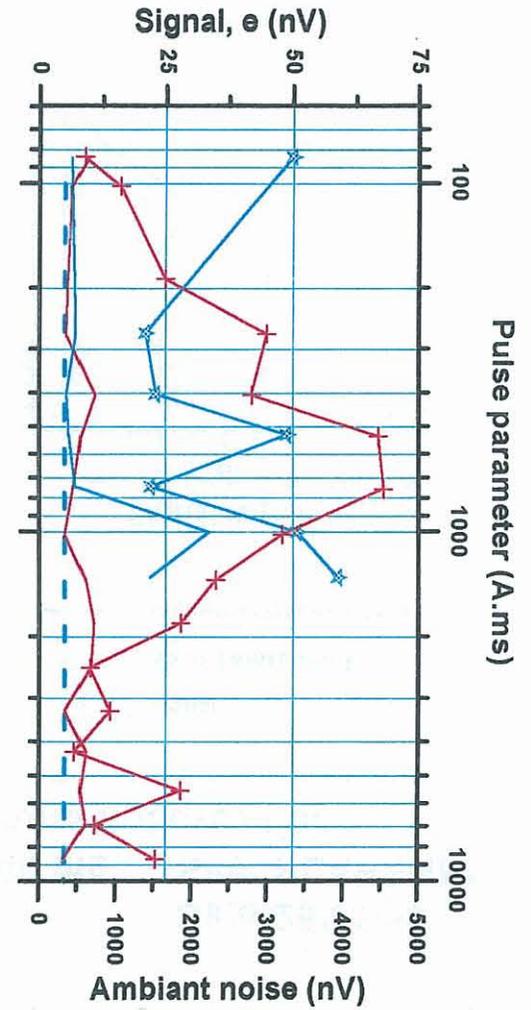
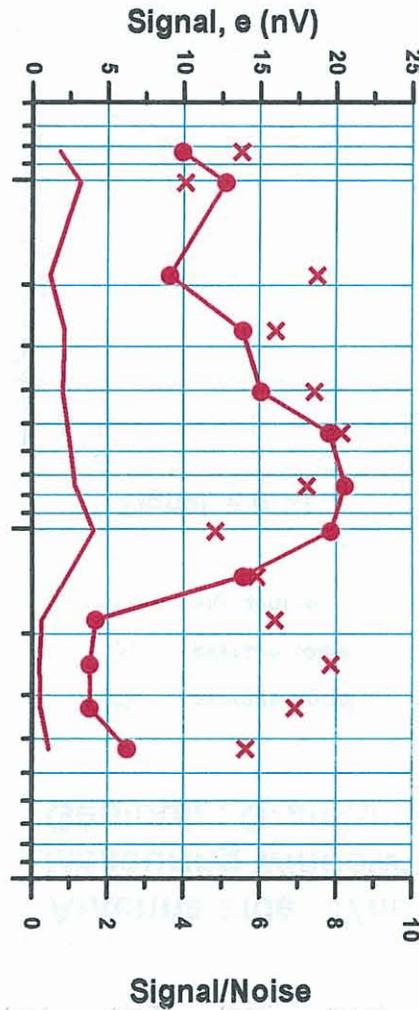
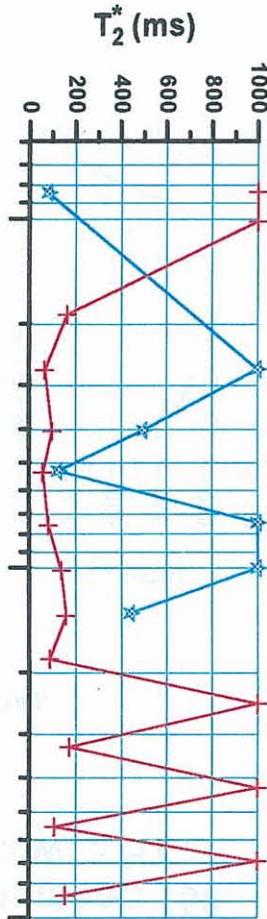
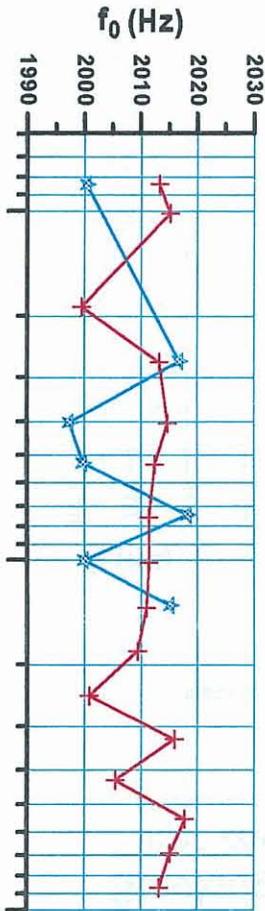
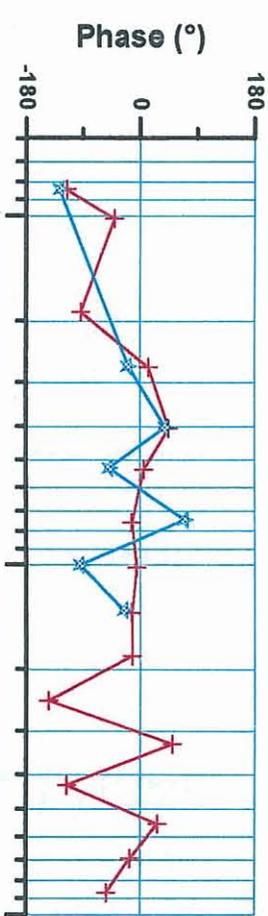
Antenna side: 37m  
Measuring window: 240 ms  
Géologie: Gneiss de Brest

Date: 25/05/99  
Site: PLABENNEC

measured freq.

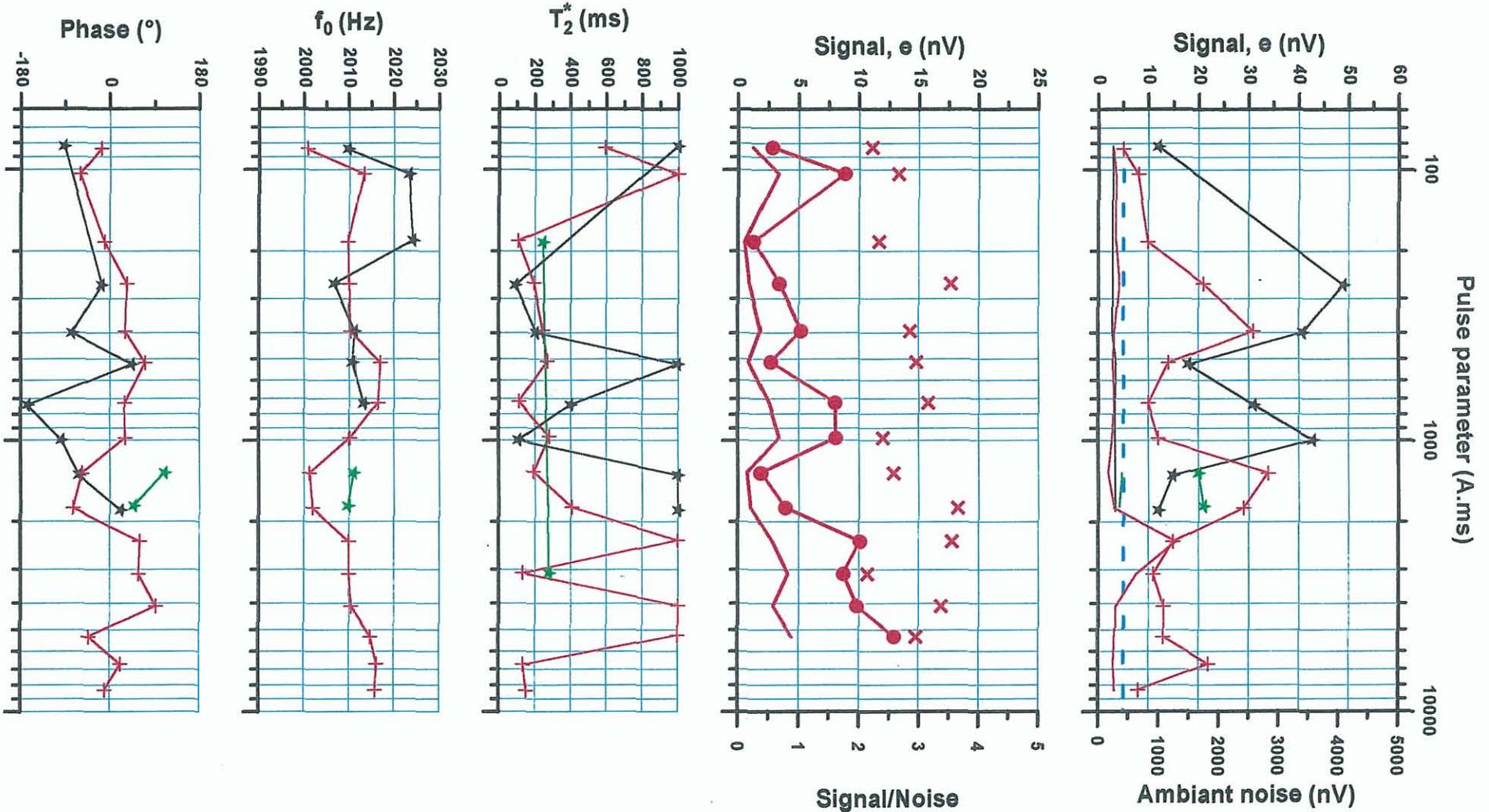
● average signal  
× average noise  
— signal/noise

+ signal  
— noise before stack  
- - instrumental noise level



**PMR data**  
**PLB36b**  
**PLB36c**  
**PLB36a**

Antenna type: square      Antenna side: 37m      Date:26/05/99  
 Stacking number: 150      Measuring window: 240 ms      Site: PLABENNEC  
 Filter window: 5 Hz      Géologie: Gneiss de Brest



# PMR data

**PLB37d**  
**PLB37c**

Antenna type: square  
Stacking number: 300  
Filter window: 5 Hz

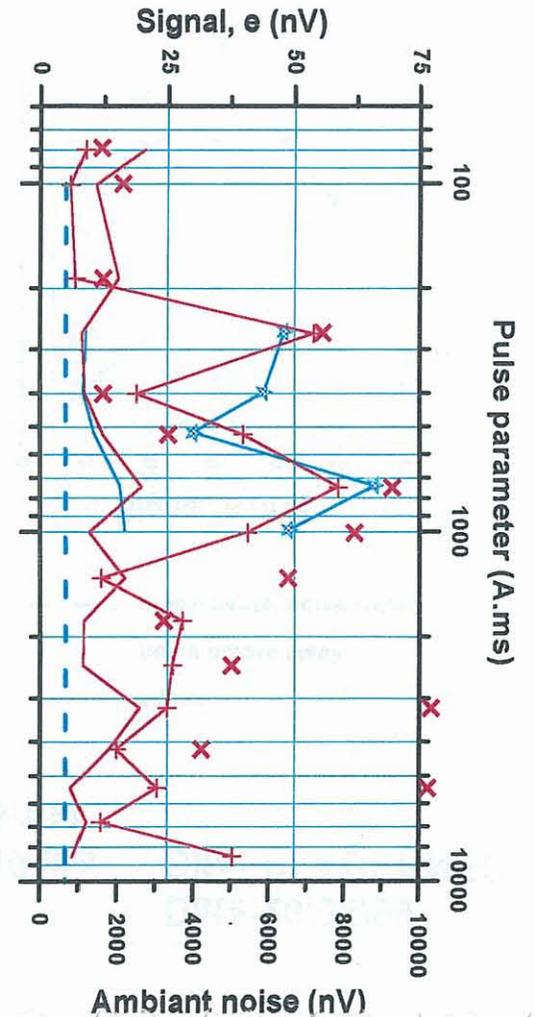
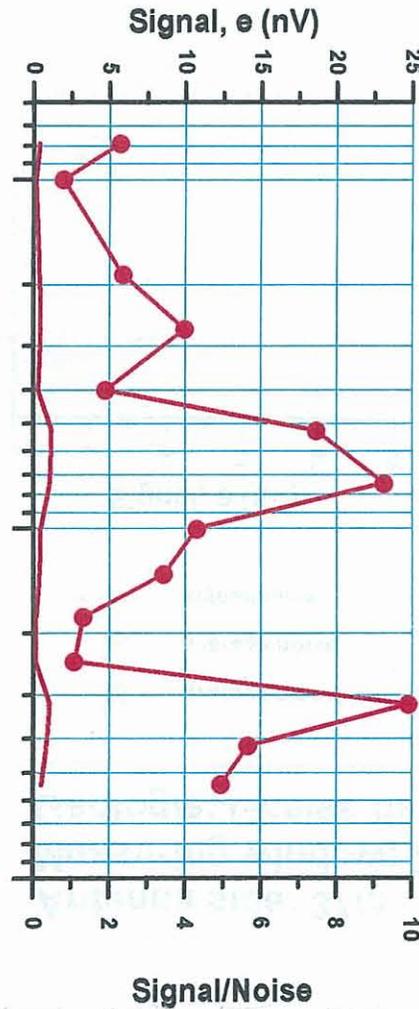
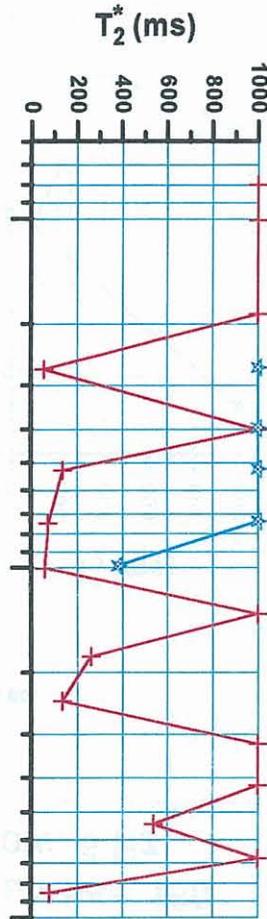
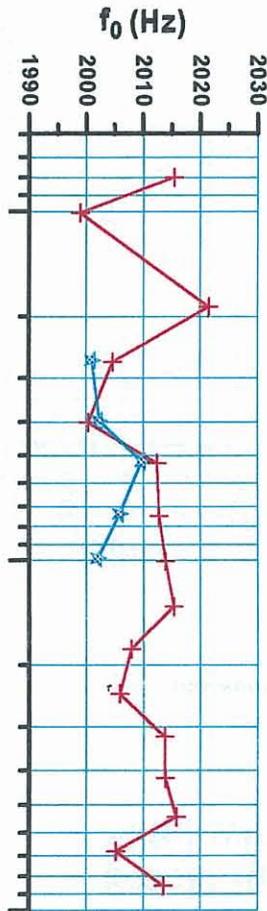
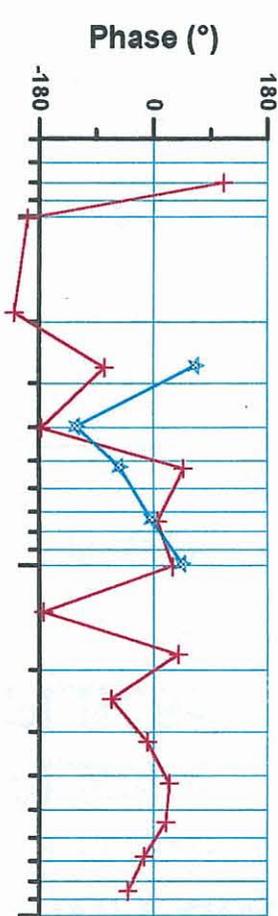
Antenna side: 37m  
Measuring window: 240 ms  
Géologie: Granite de Kersaint fin

Date: 26/05/99  
Site: PLABENNEC

measured freq.

● average signal  
× average noise  
— signal/noise

+ signal  
— noise before stack  
- - - instrumental noise level



## **ANNEXE 3**

### **Résultats d'inversion**

# SONDAGE RMP PLB20

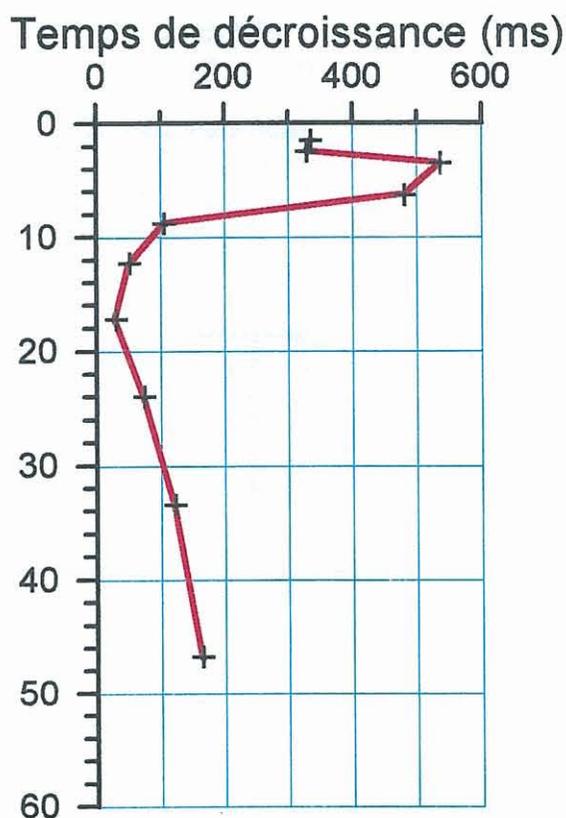
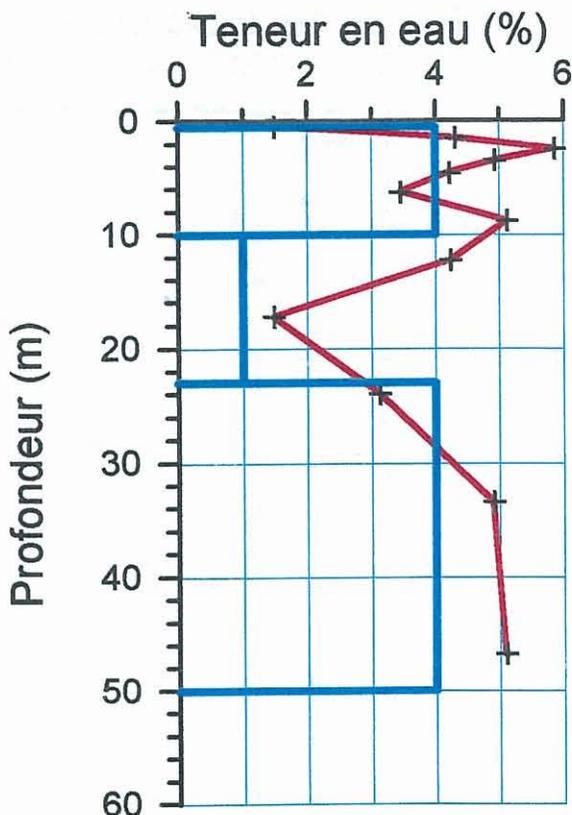
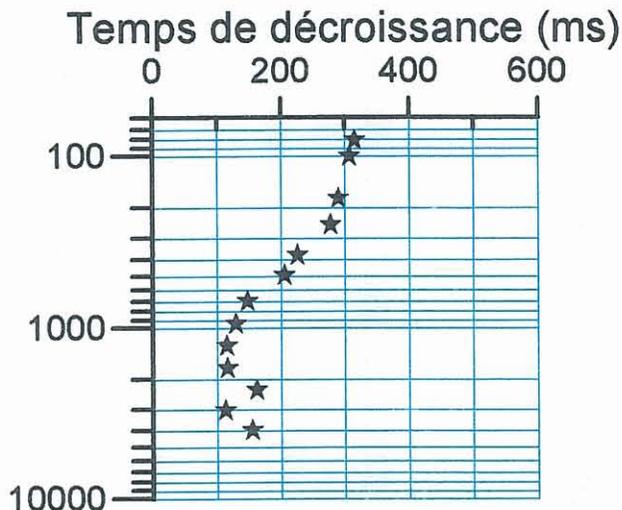
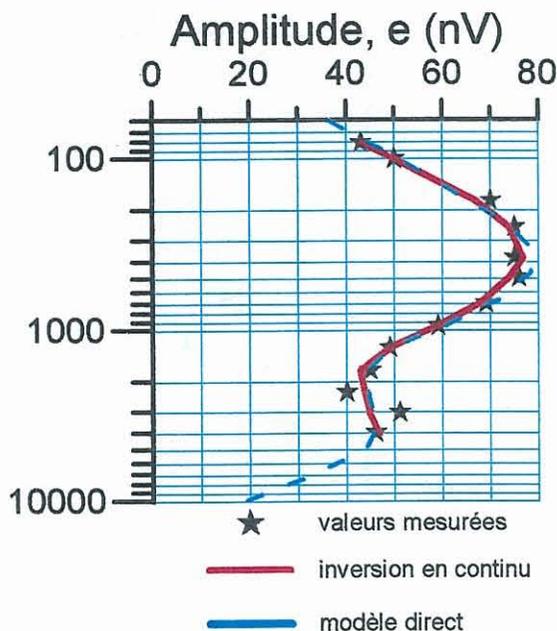
## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 22-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 250  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Granite de Kernilis

édition: 07/20/9912:16:23

Pulse d'excitation (A.ms)



# SONDAGE RMP PLB23

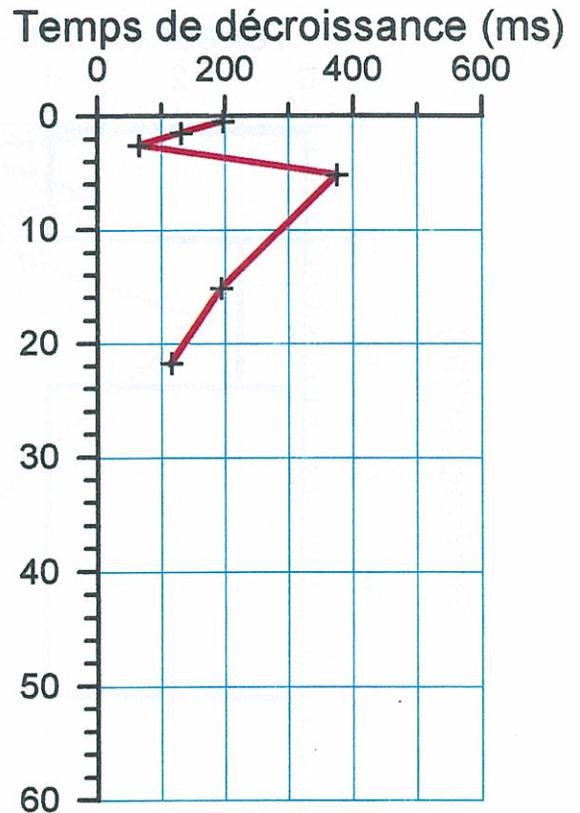
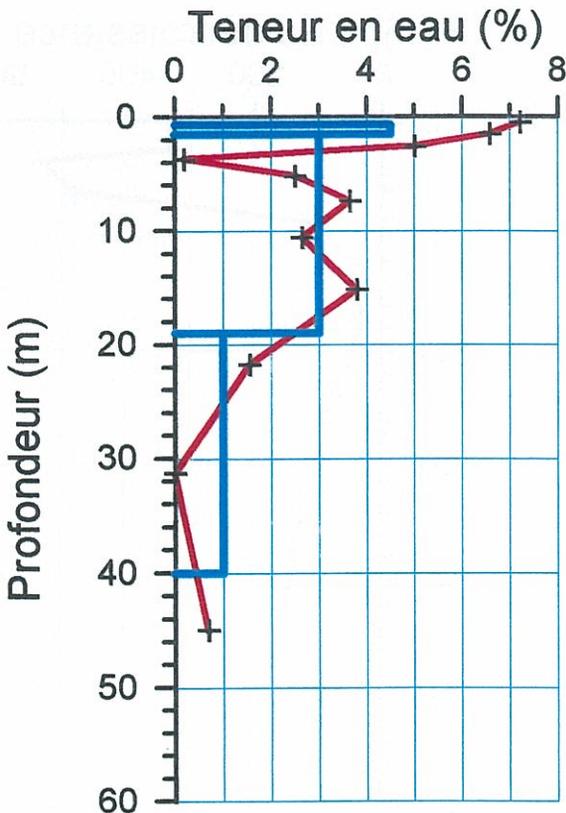
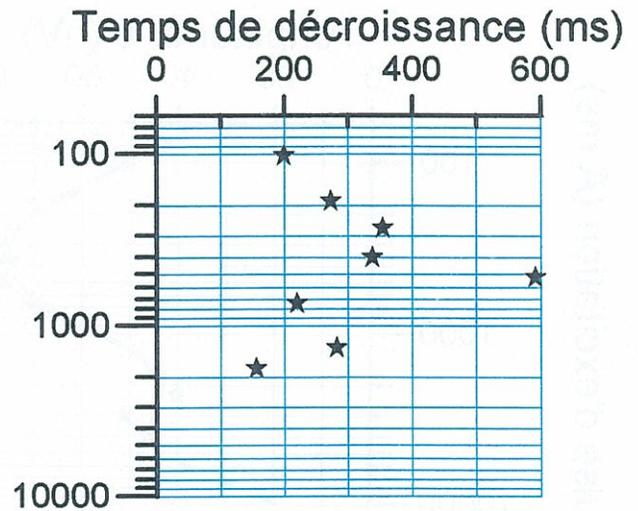
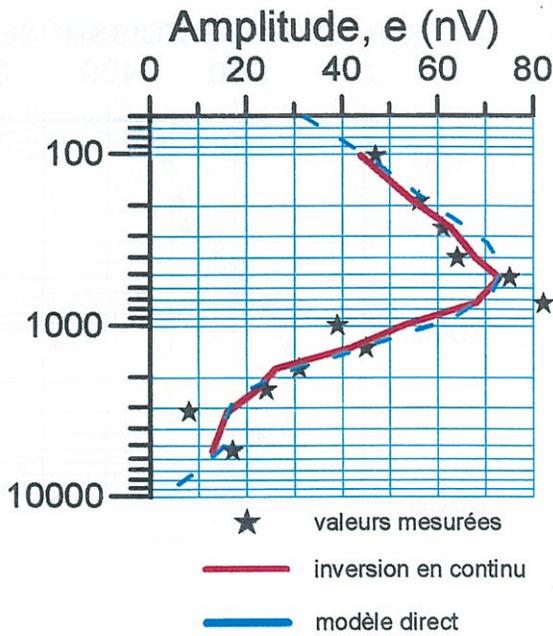
## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date:18-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 200  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Orthogneiss de Plounevez

édition: 07/20/9912:17:07

Pulse d'excitation (A.ms)



# SONDAGE RMP PLB24

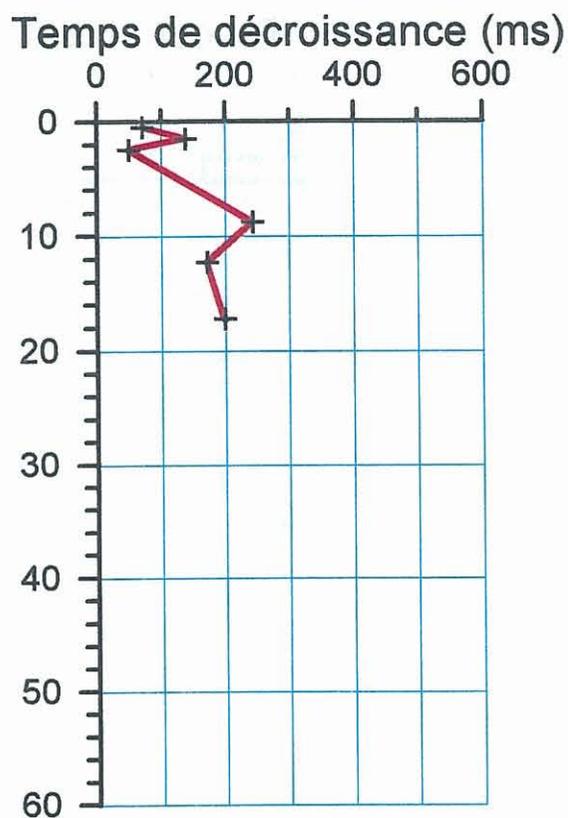
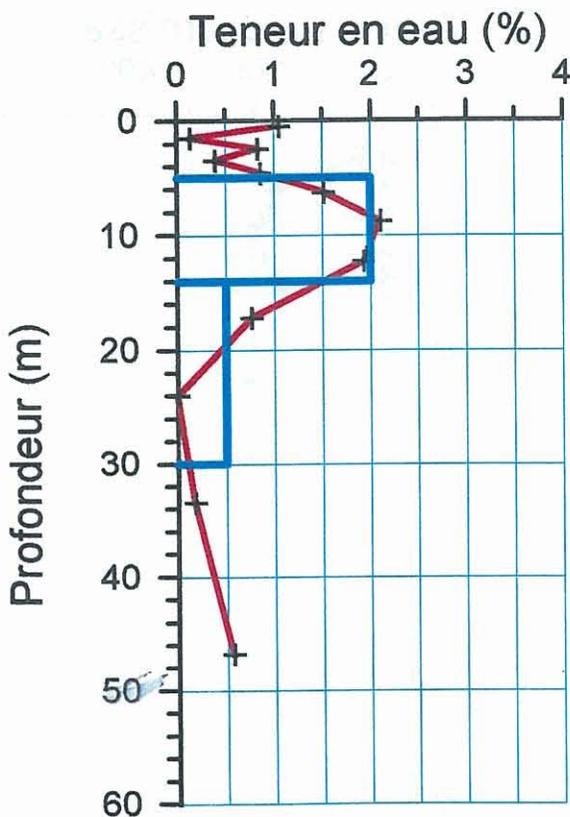
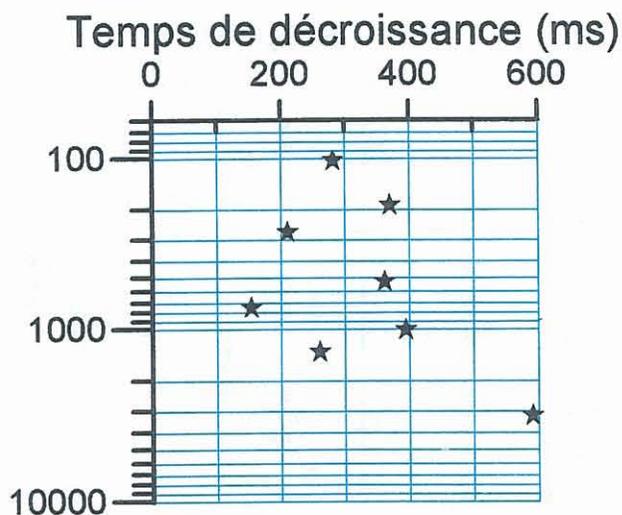
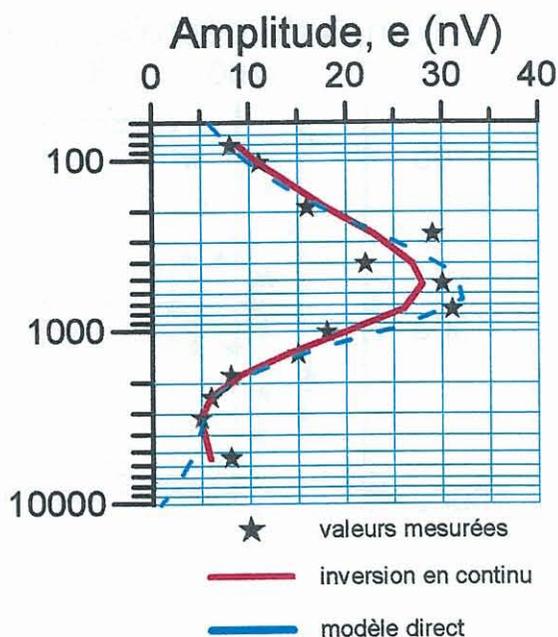
## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
 Diametre d'antenne: 37 m  
 Date: 18-05-99  
 Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 200  
 Processing window: 240 ms  
 Filt. time constant: 15Hz  
 Géologie: Gneiss de Lesneven

édition: 07/20/9912:17:42

Pulse d'excitation (A.ms)



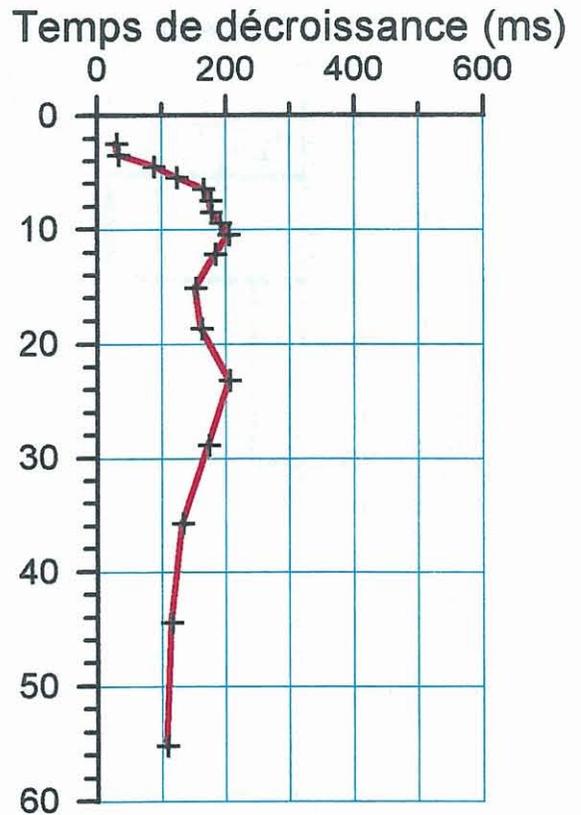
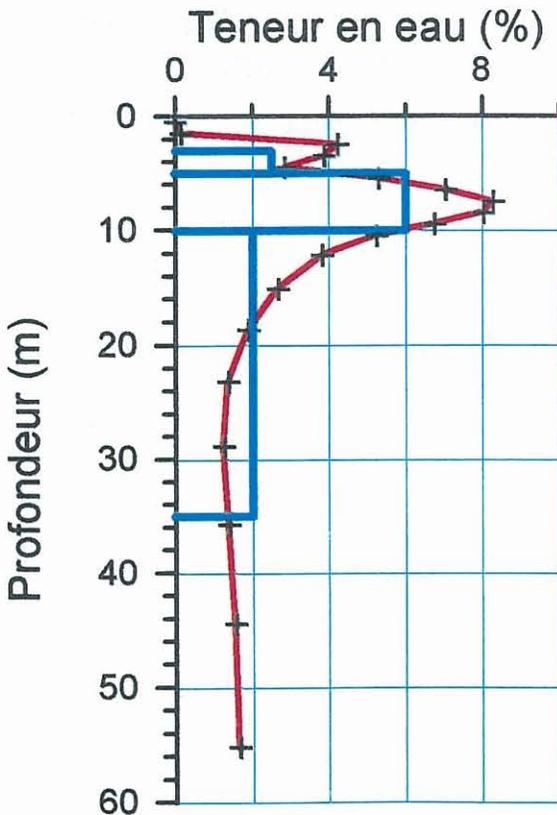
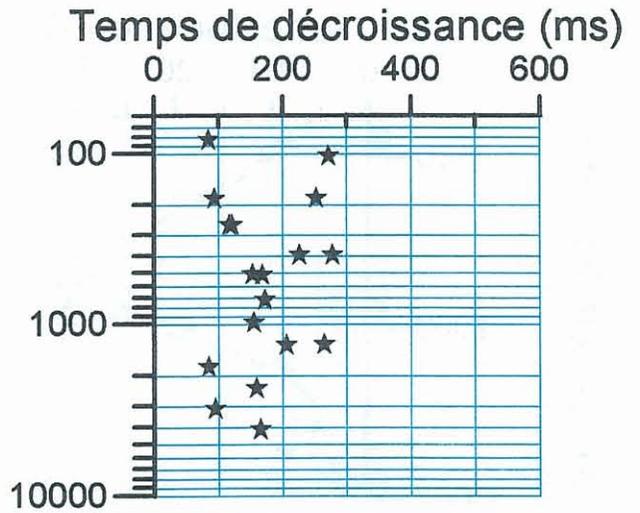
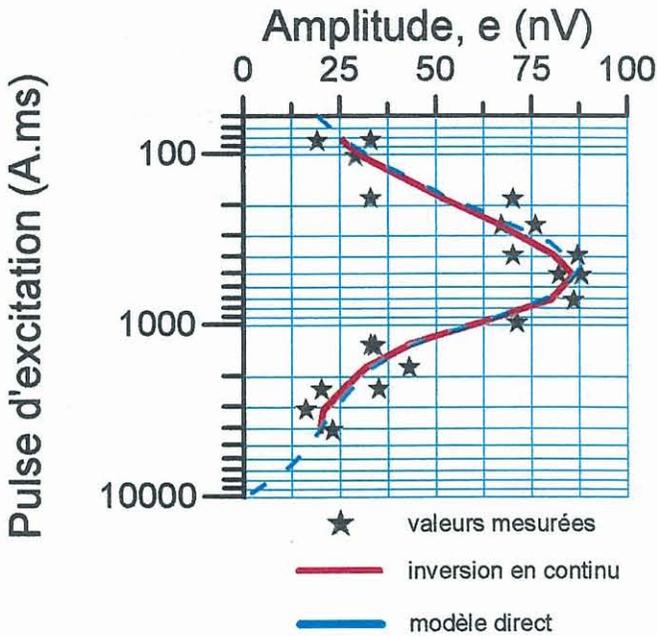
# SONDAGE RMP PLB25

## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diamètre d'antenne: 37 m  
Date: 19-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 150  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Micaschistes de l'Aber Wrac'h

édition: 07/20/99 12:18:16



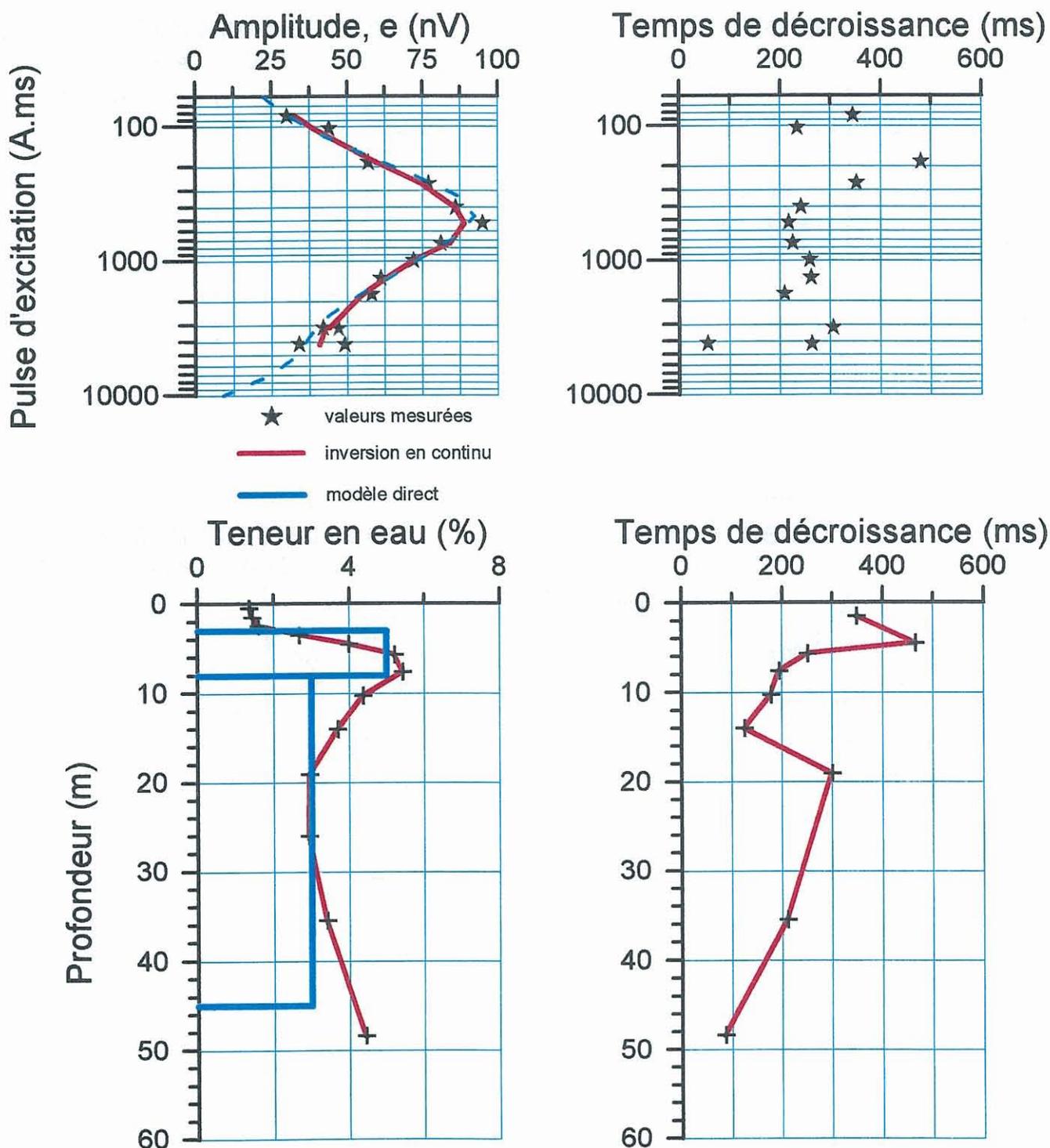
# SONDAGE RMP PLB26

## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 19-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 250  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Micaschistes de l'Aber Wrac'h

édition: 07/20/9912:18:56



# SONDAGE RMP PLB27

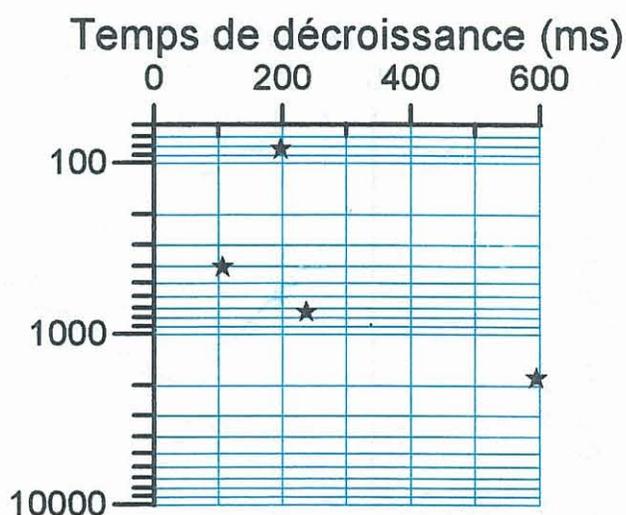
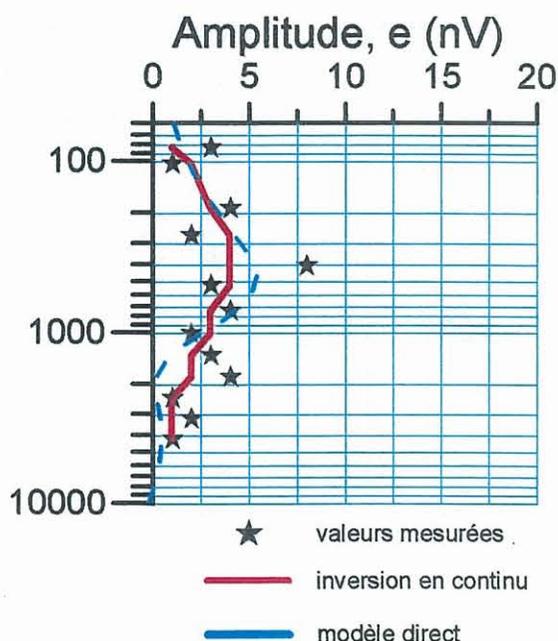
## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
 Diametre d'antenne: 37 m  
 Date: 20-05-99  
 Site: PLABENNEC 99

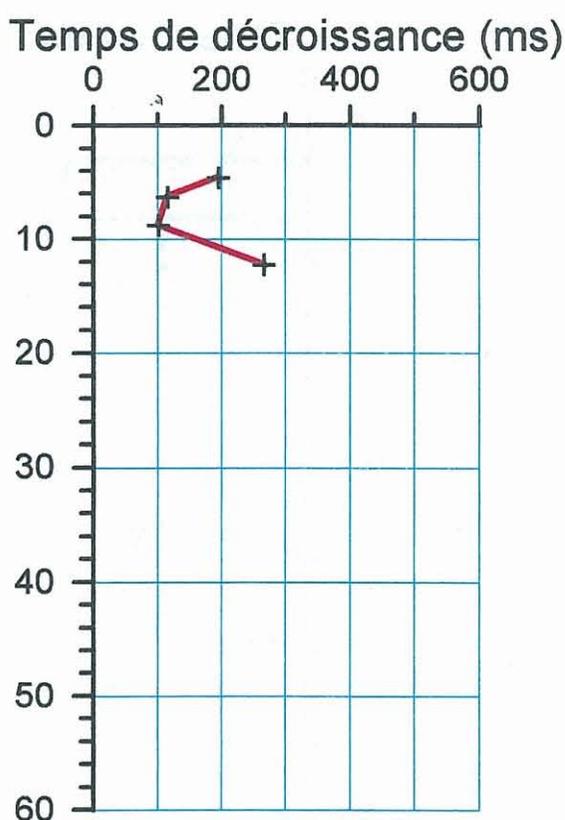
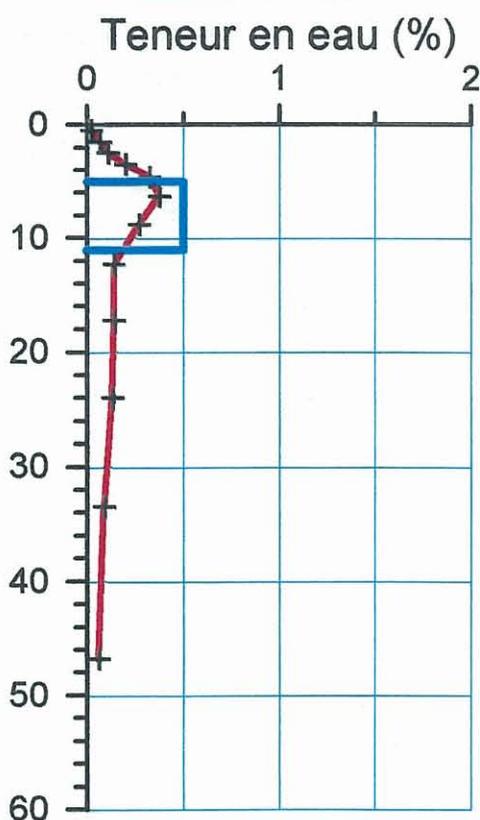
Nombre de stack: 250  
 Processing window: 100 ms  
 Filt. time constant: 15Hz  
 Géologie: Amphibolites de Lannilis

édition: 07/20/9912:19:30

Pulse d'excitation (A.ms)



Profondeur (m)



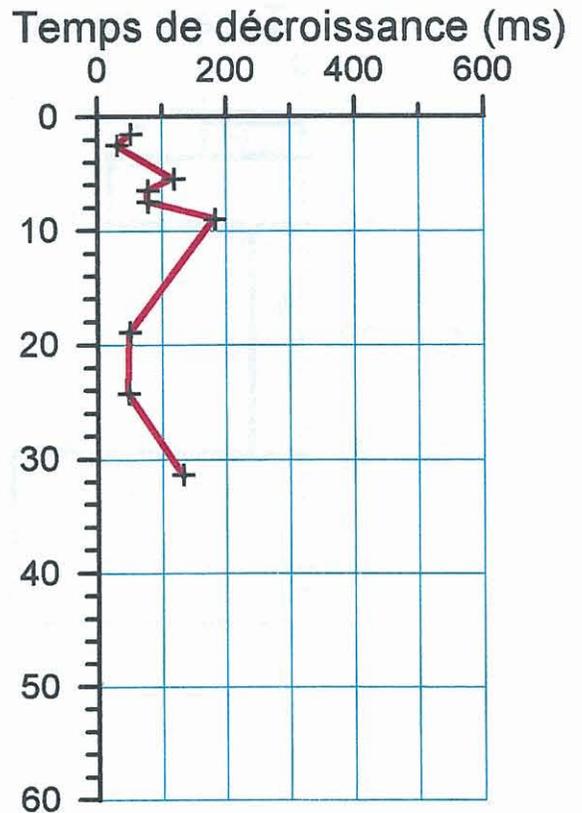
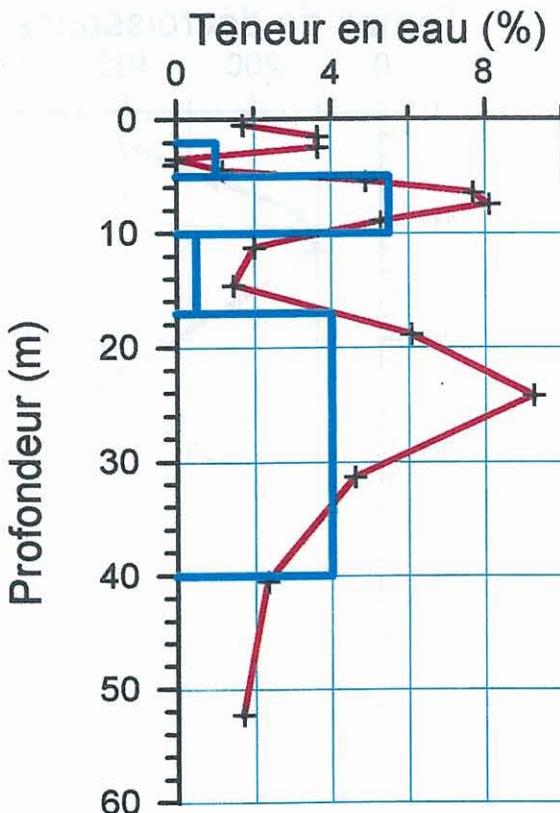
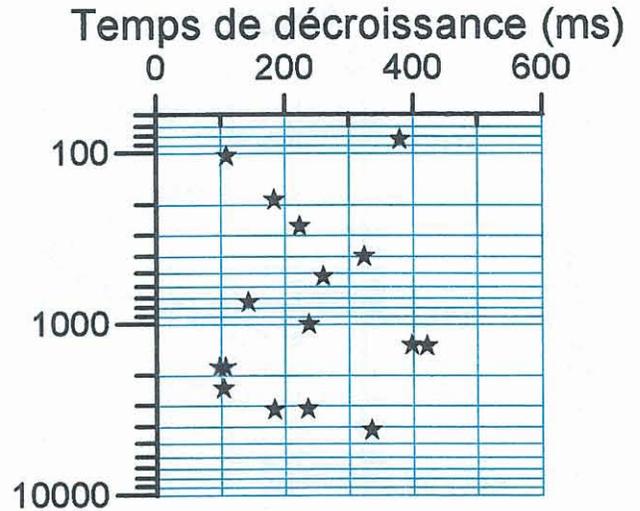
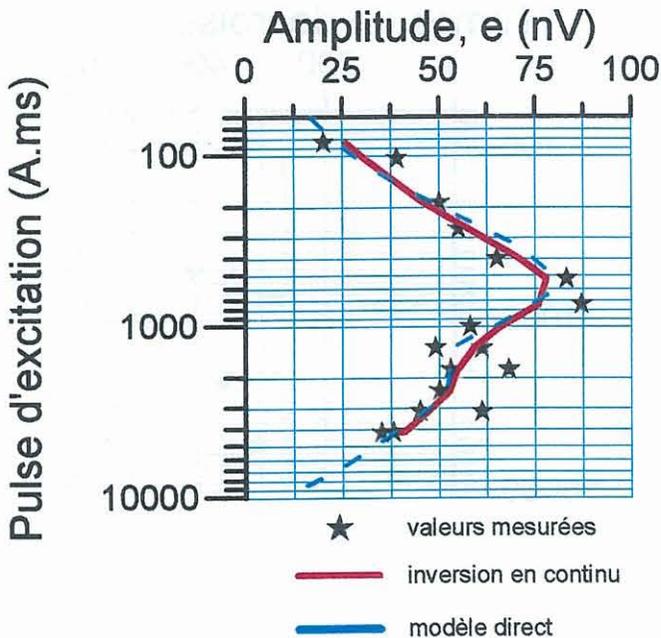
# SONDAGE RMP PLB28

## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 20-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 200  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Gneiss de Lesneven

édition: 07/20/9912:28:46



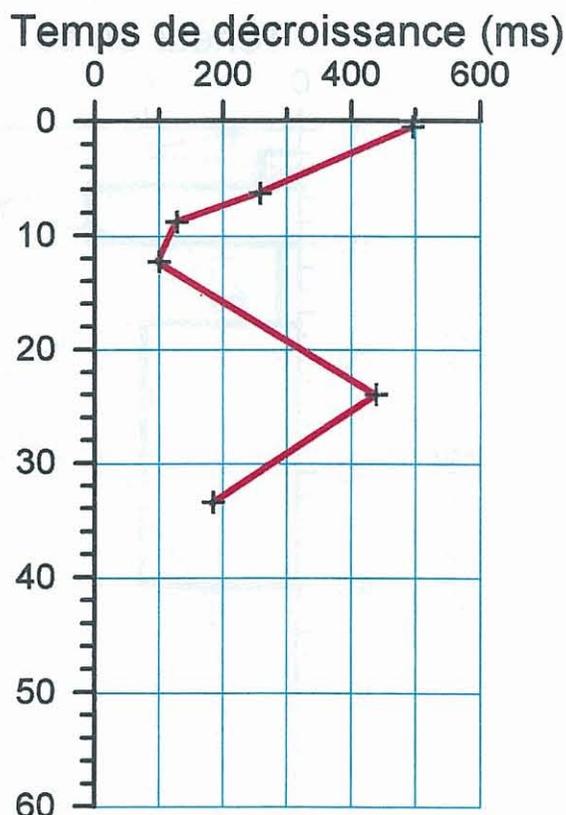
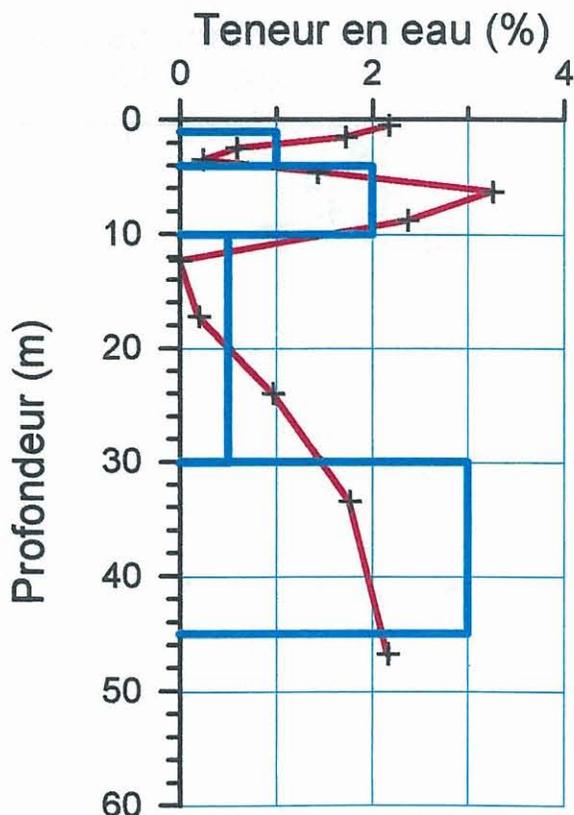
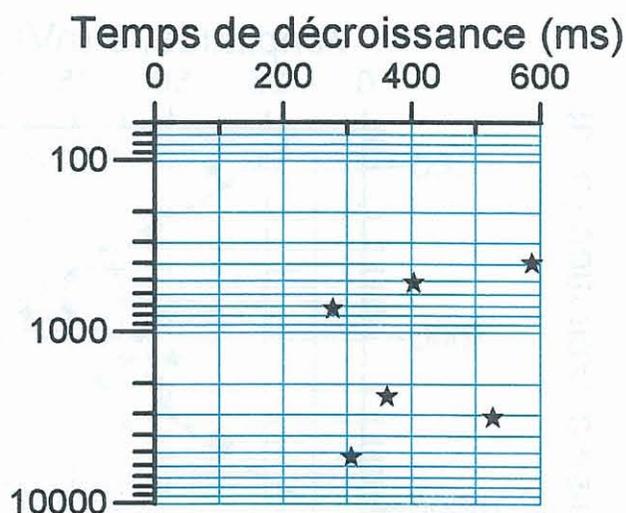
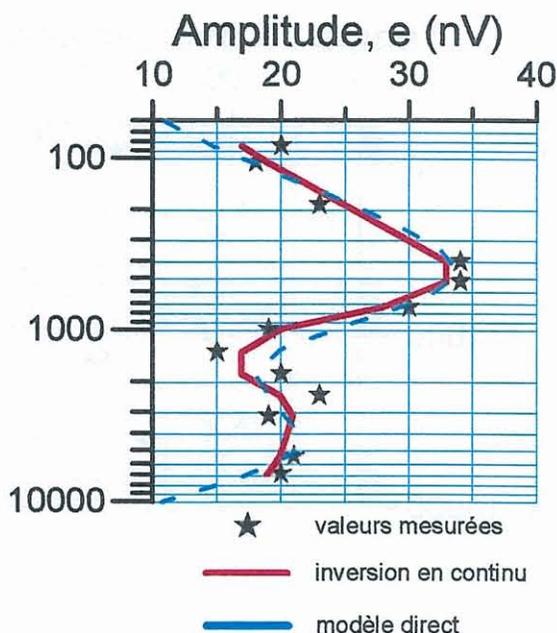
# SONDAGE RMP PLB29

## résultats d'inversions

<p>Type d'antenne: en 8 carré                  Diametre d'antenne: 37 m                  Date: 21-05-99                  Site: PLABENNEC 99</p>	<p>Nombre de stack: 150                  Processing window: 240 ms                  Filt. time constant: 15Hz                  Géologie: Granite de Kernilis</p>
---	--

édition: 07/20/9912:29:16

Pulse d'excitation (A.ms)



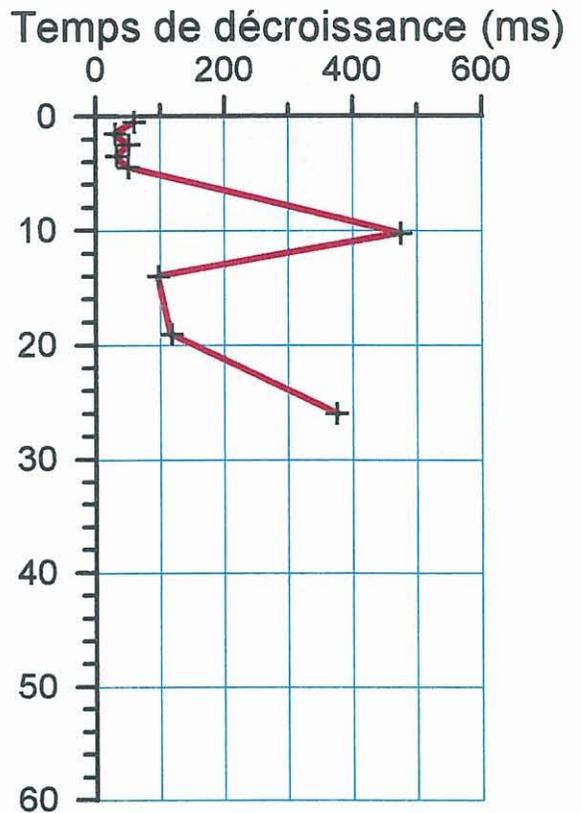
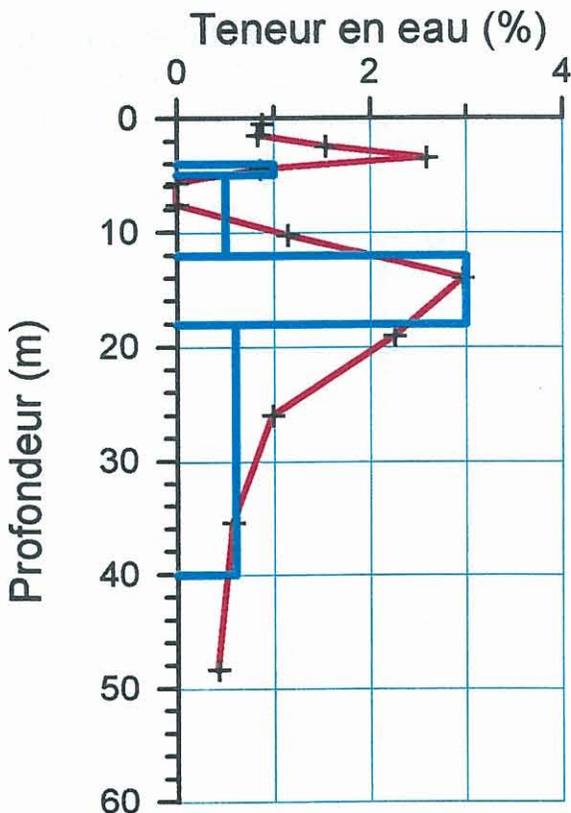
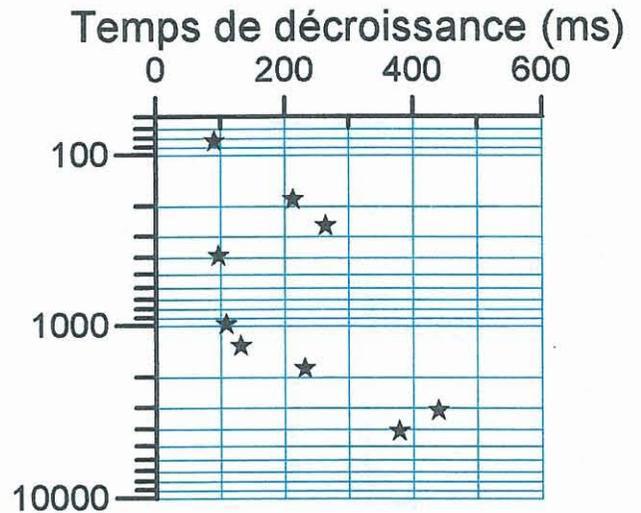
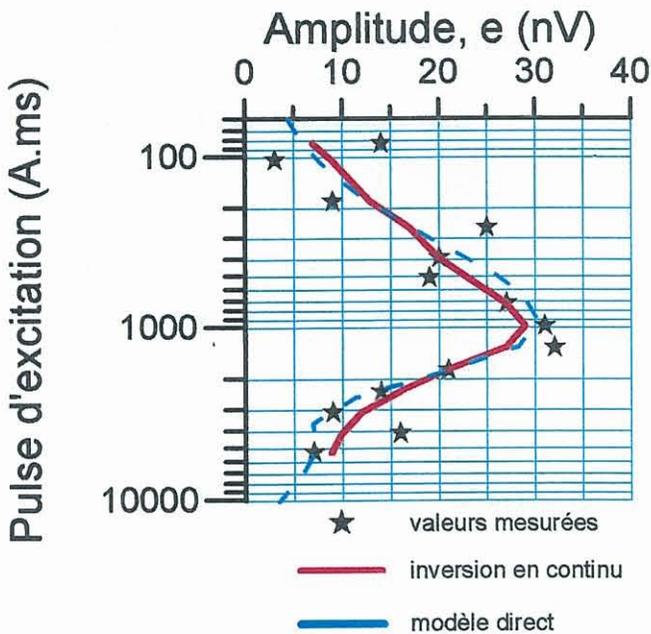
# SONDAGE RMP PLB30

## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 21-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 250  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Granite de Saint Renan

édition: 07/20/9912:15:05



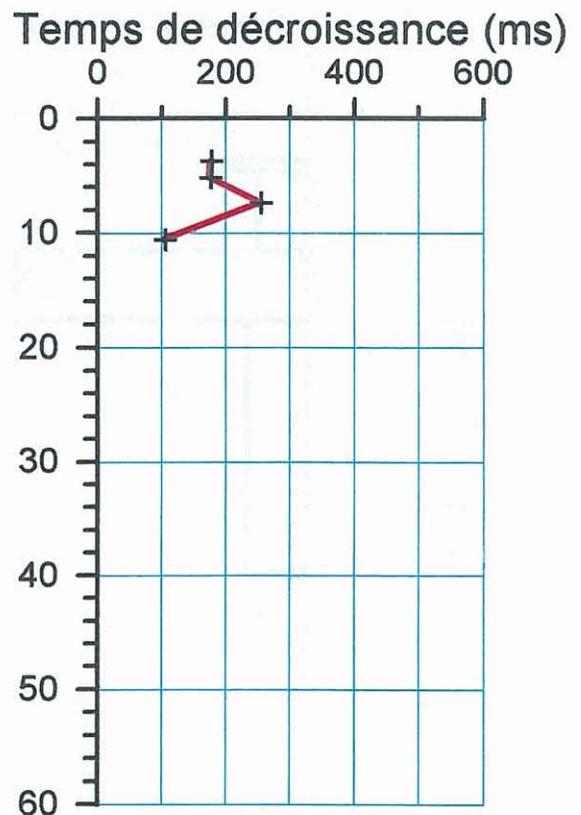
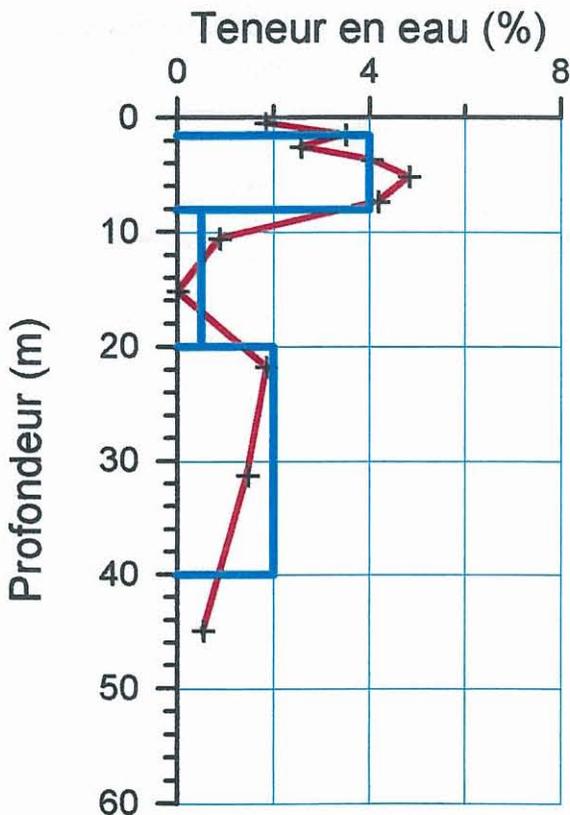
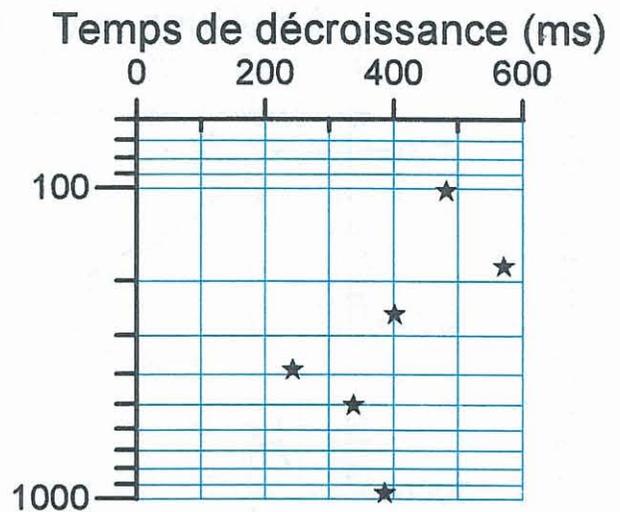
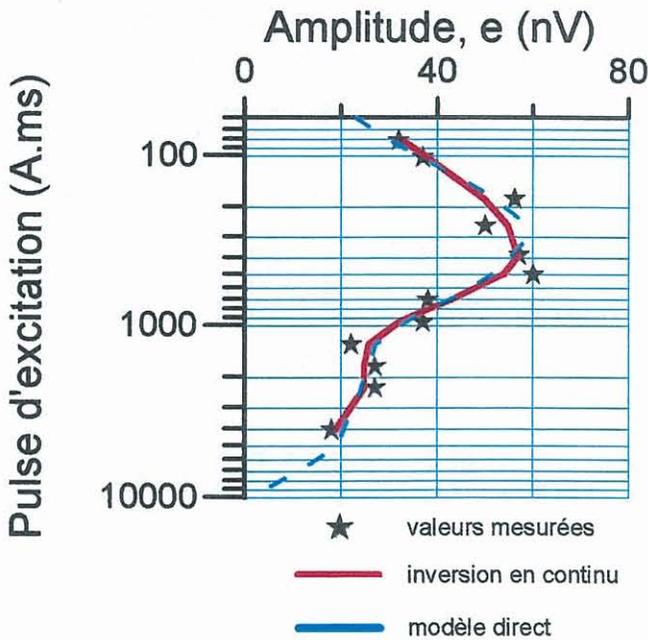
# SONDAGE RMP PLB31

## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 22-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 150  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Granite de Saint Renan

édition: 07/20/9912:30:56



# SONDAGE RMP PLB32

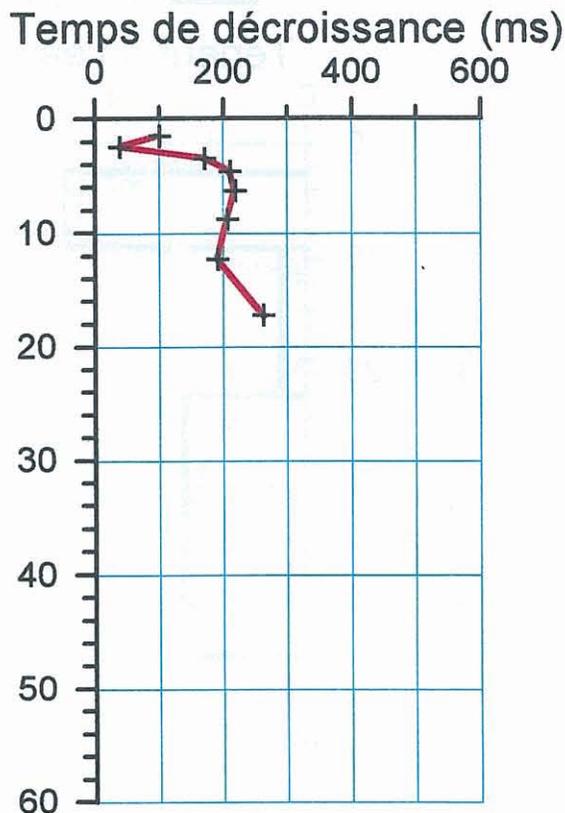
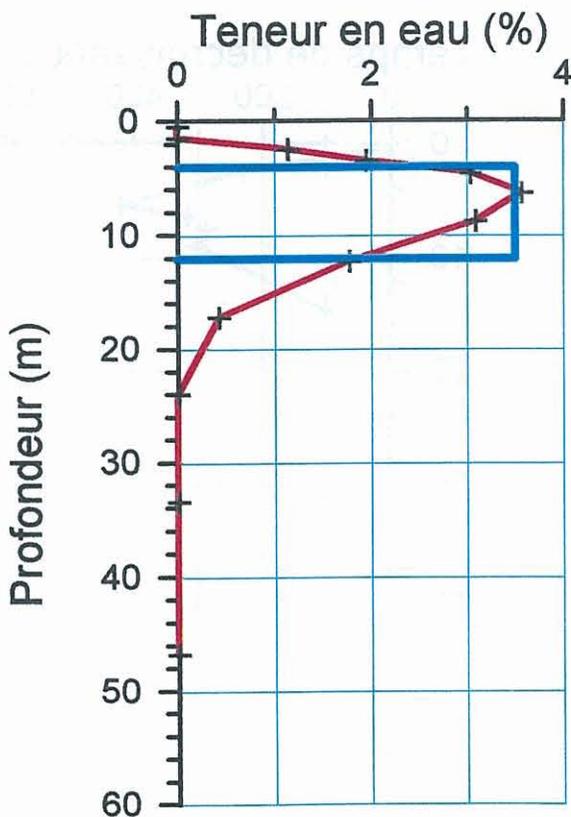
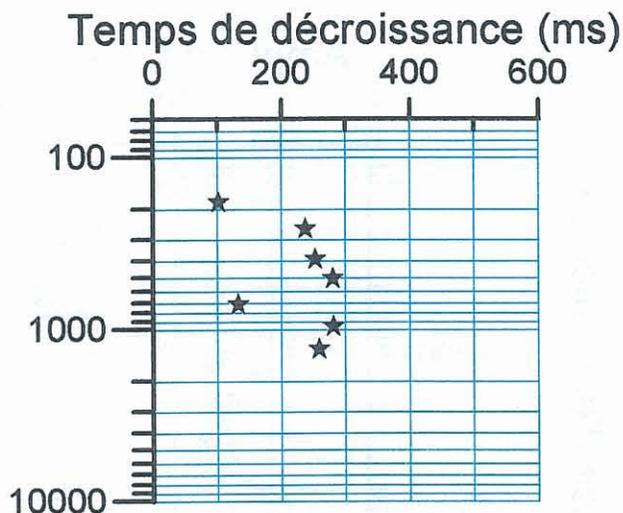
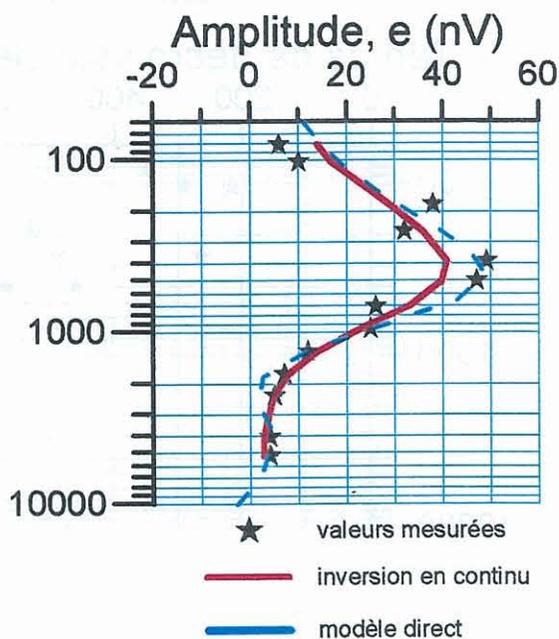
## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 24-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 150  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Granite de Saint Renan

édition: 07/20/9912:31:27

Pulse d'excitation (A.ms)



# SONDAGE RMP PLB33

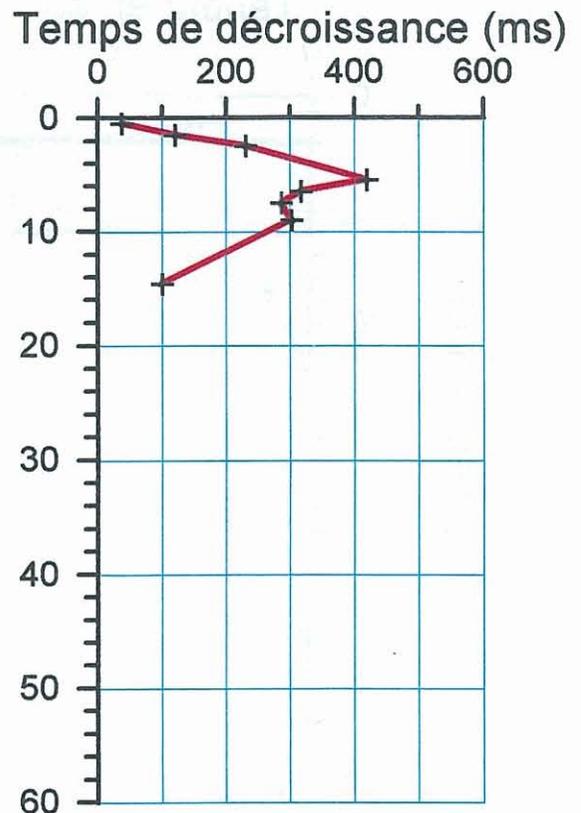
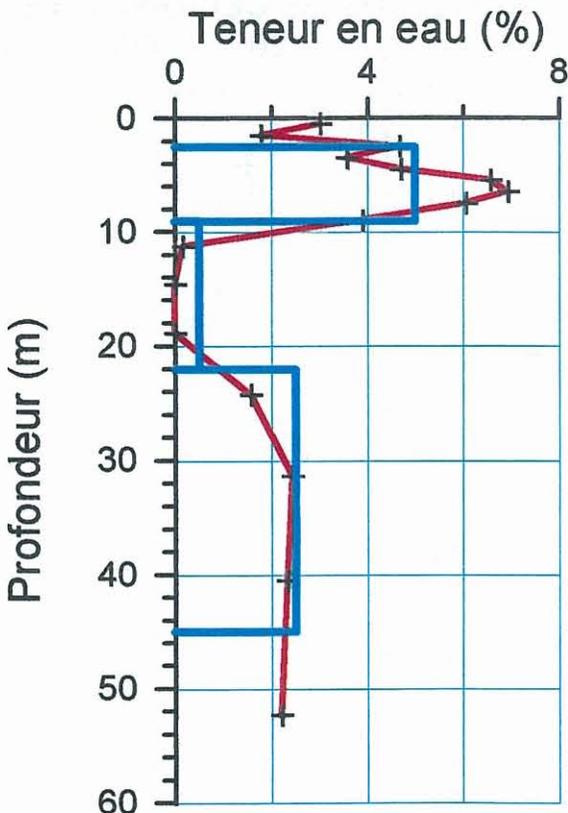
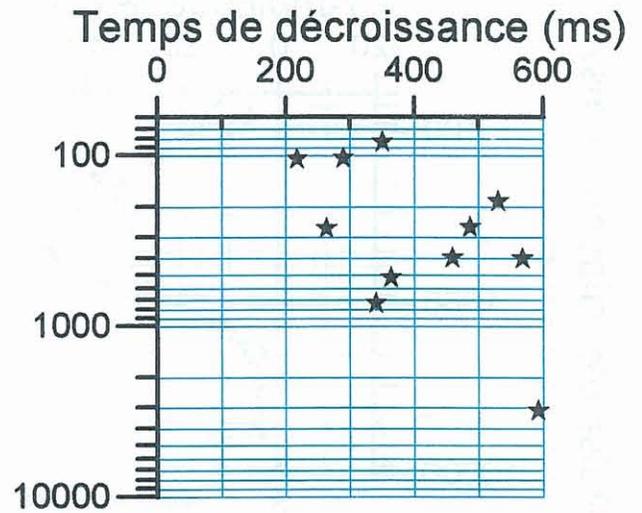
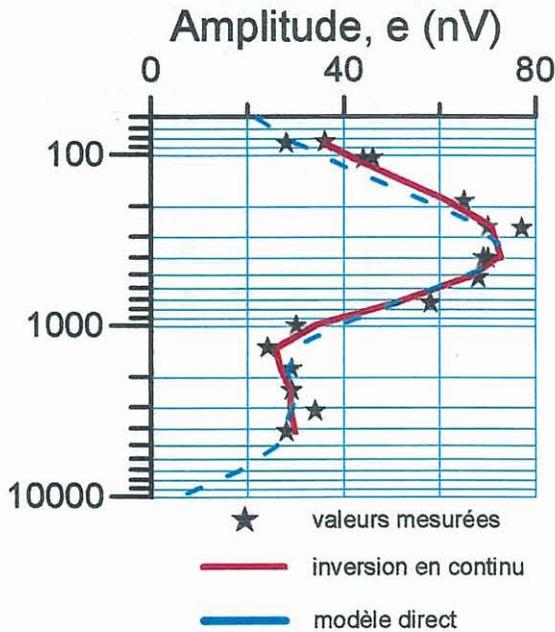
## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 24-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 250  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Granite de Kersaint fin

édition: 07/20/9912:32:11

Pulse d'excitation (A.ms)



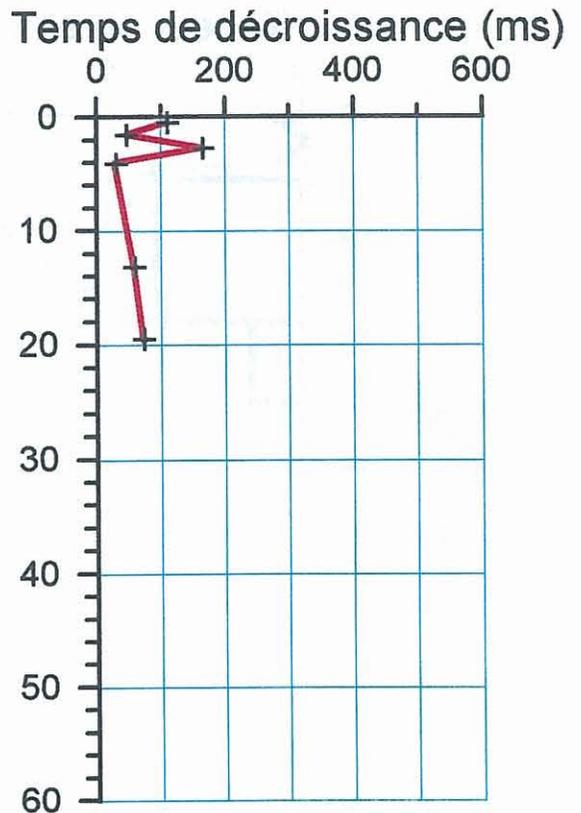
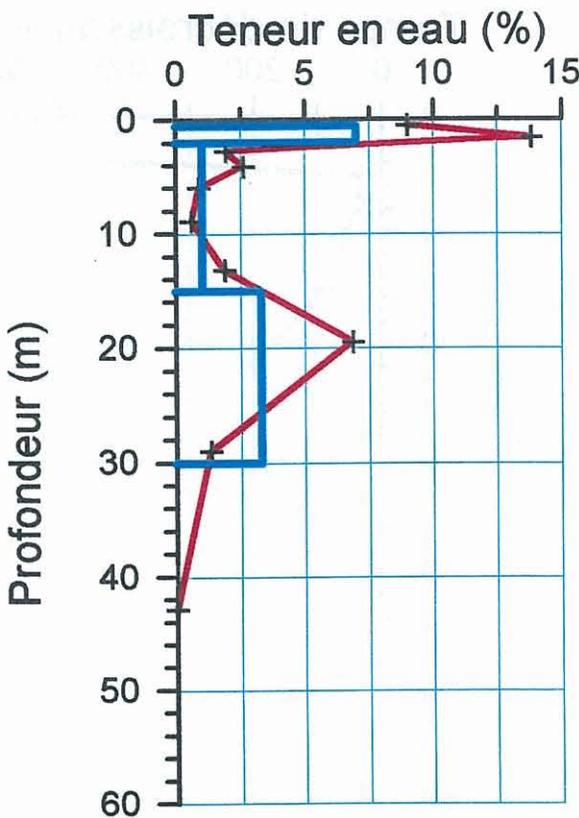
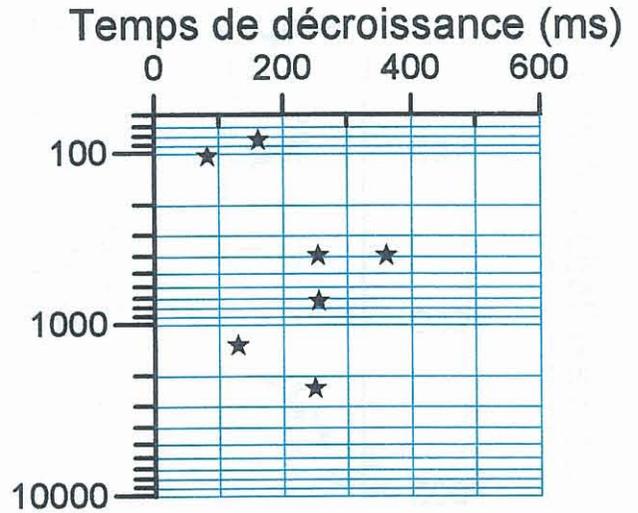
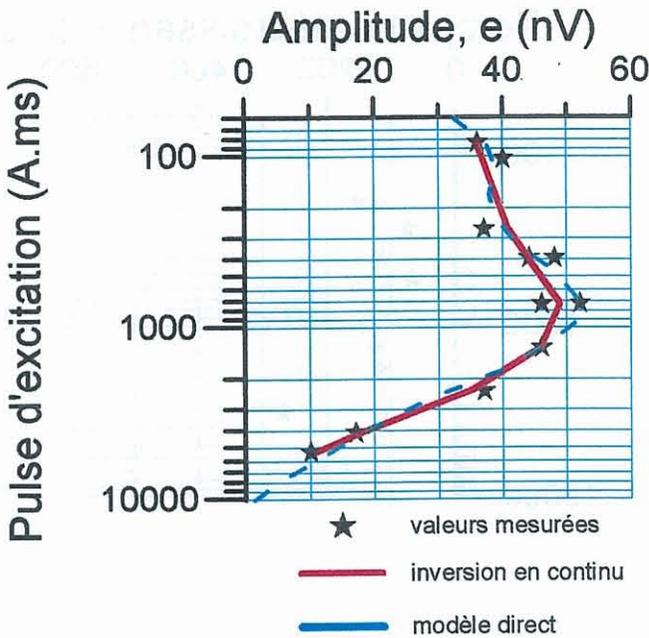
# SONDAGE RMP PLB34

## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 25-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 150  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Granite de Kersaint grossier

édition: 07/20/9912:32:46



# SONDAGE RMP PLB35

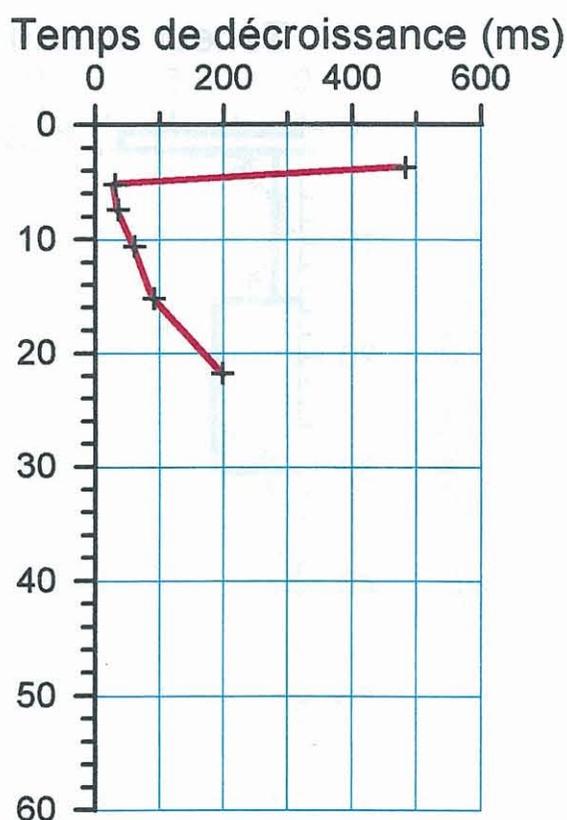
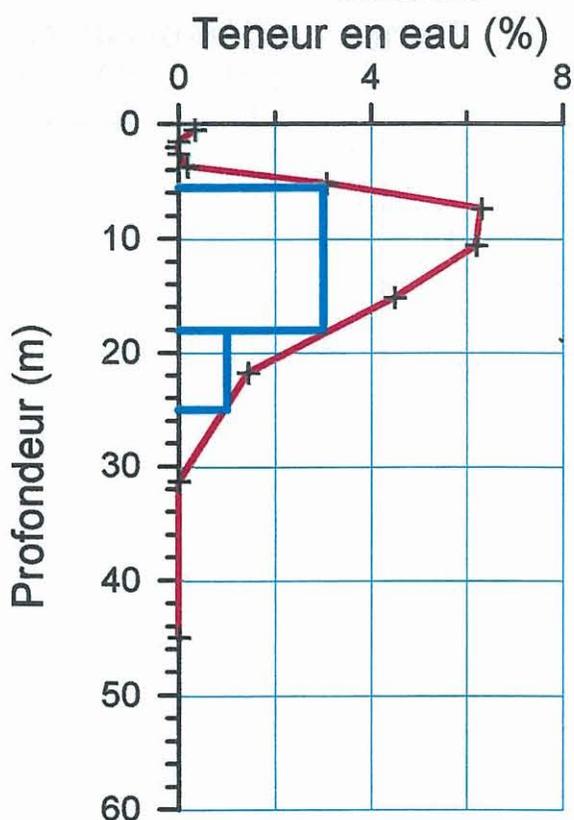
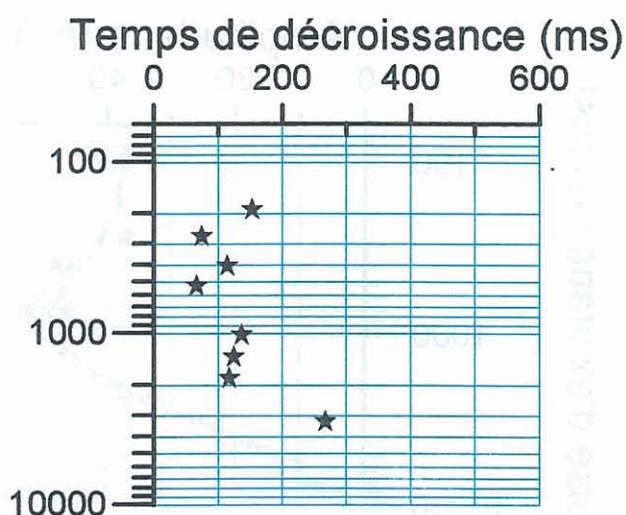
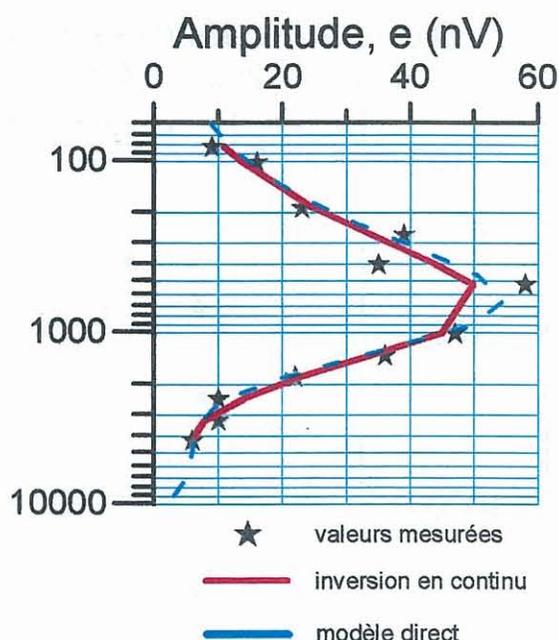
## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 25-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 250  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Gneiss de Brest

édition: 07/20/9912:33:24

Pulse d'excitation (A.ms)



# SONDAGE RMP PLB36

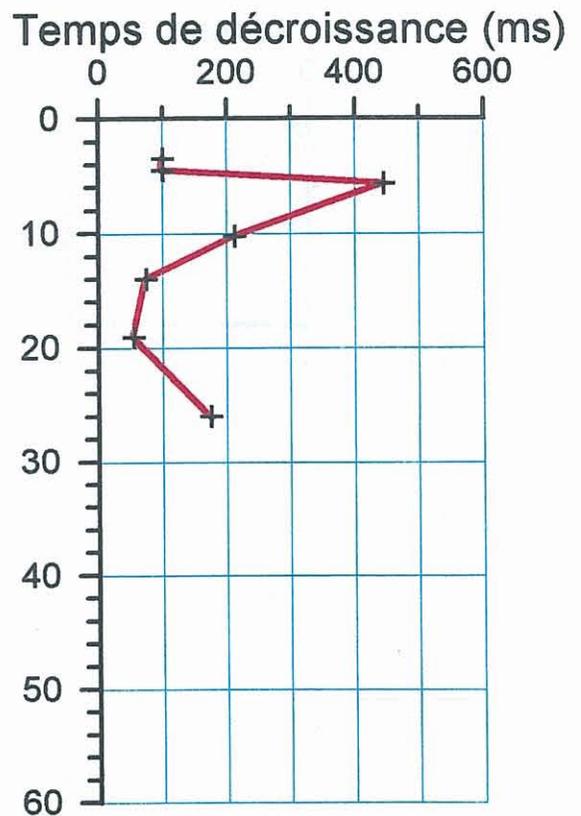
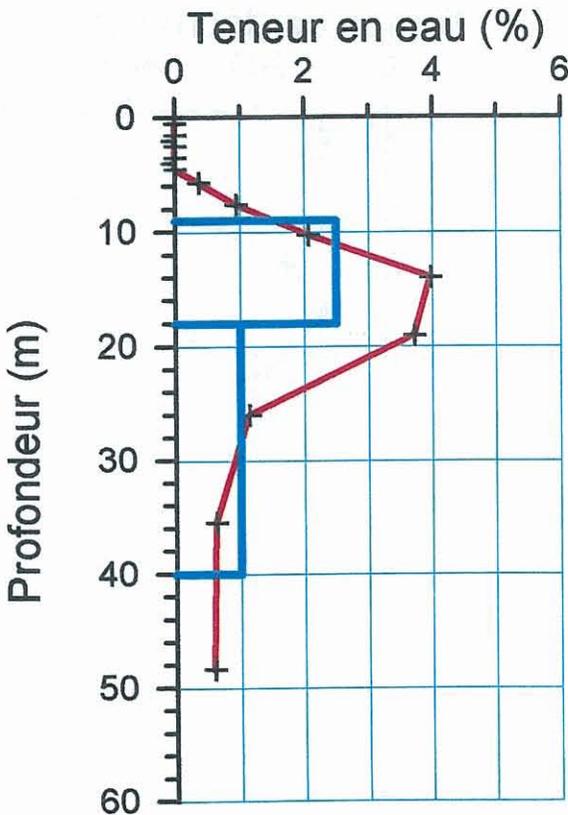
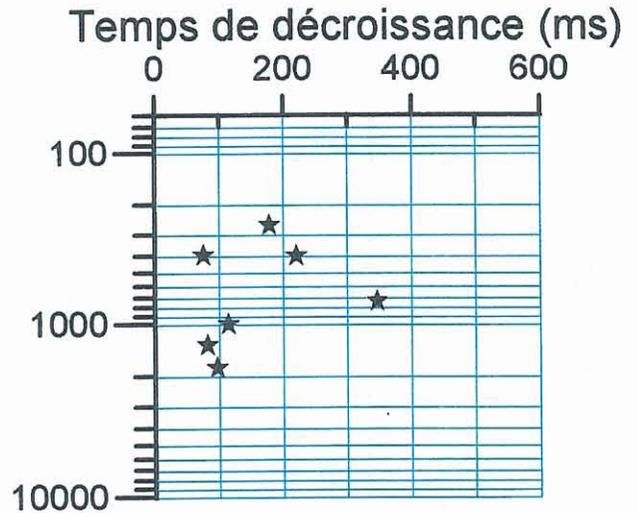
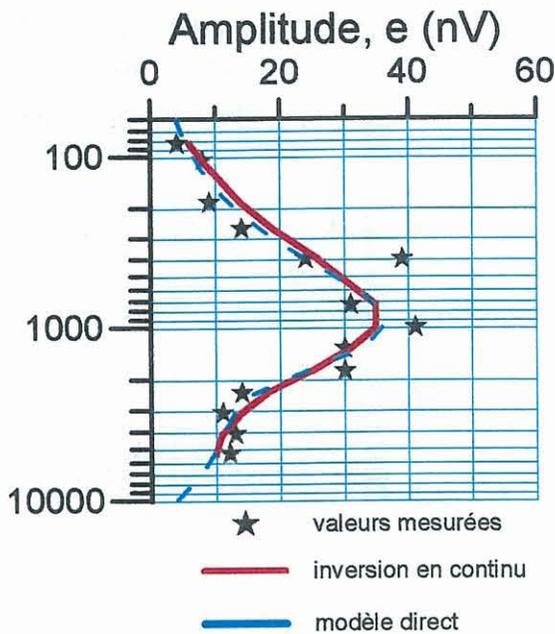
## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 26-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 150  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Gneiss de Brest

édition: 07/20/9912:34:00

Pulse d'excitation (A.ms)



# SONDAGE RMP PLB37

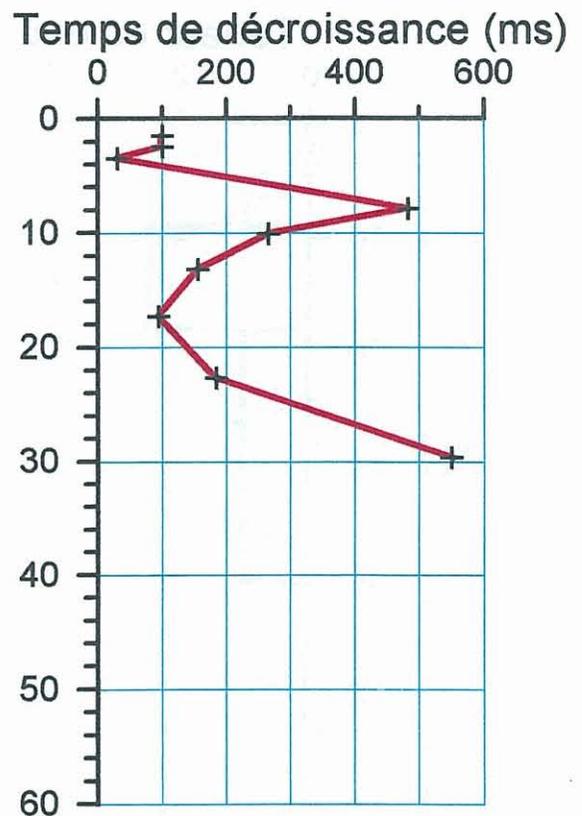
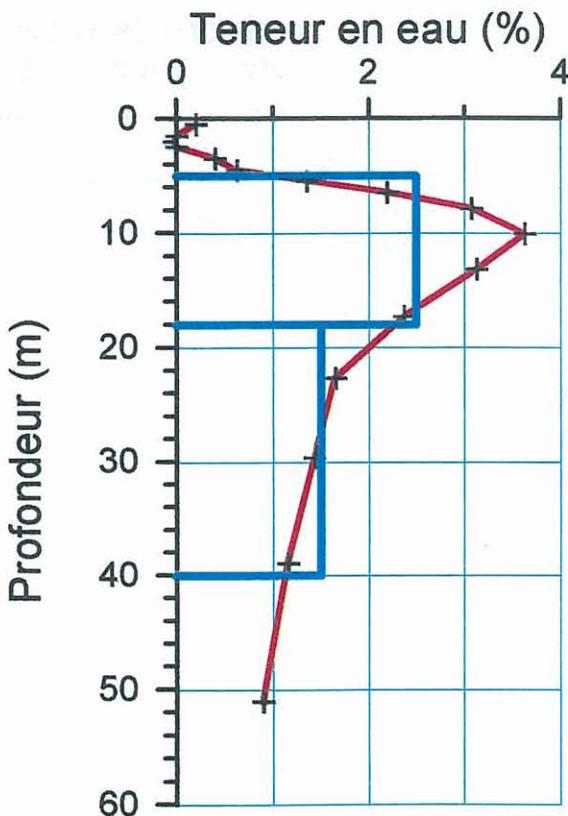
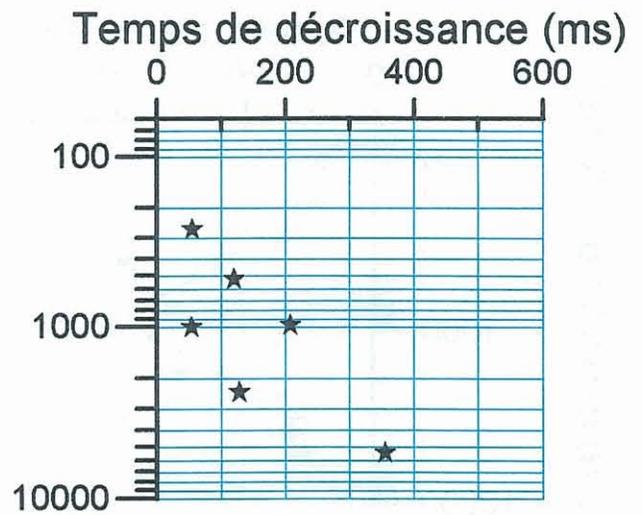
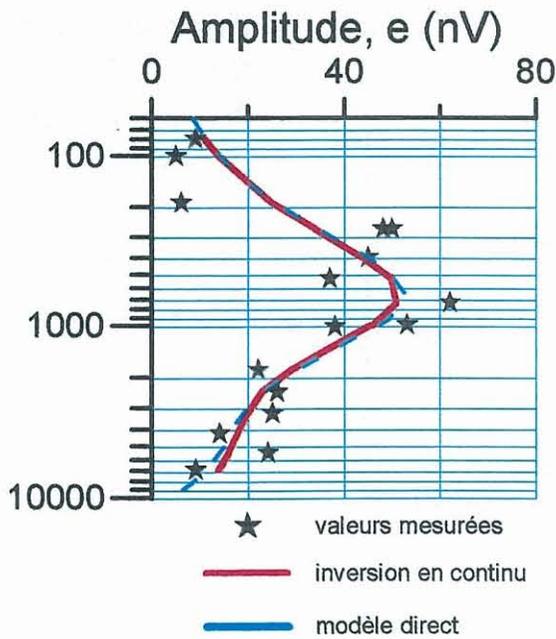
## résultats d'inversions

Type d'antenne: en 8 carré  
Diametre d'antenne: 37 m  
Date: 26-05-99  
Site: PLABENNEC 99

Nombre de stack: 300  
Processing window: 240 ms  
Filt. time constant: 15Hz  
Géologie: Granite de Kersaint fin

édition: 07/20/9912:34:38

Pulse d'excitation (A.ms)



## **ANNEXE 4**

### **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 <sup>(1)</sup>

Jean BERNARD <sup>(2)</sup>

Anatoly LEGCHENKO <sup>(1,3)</sup>

Pierre VALLA <sup>(1)</sup>

*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 ; Barringer 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<sup>(1)</sup> 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.

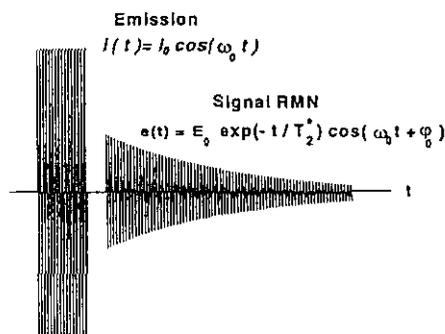


Fig. 1. - Courant d'excitation et champ magnétique de relaxation.

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

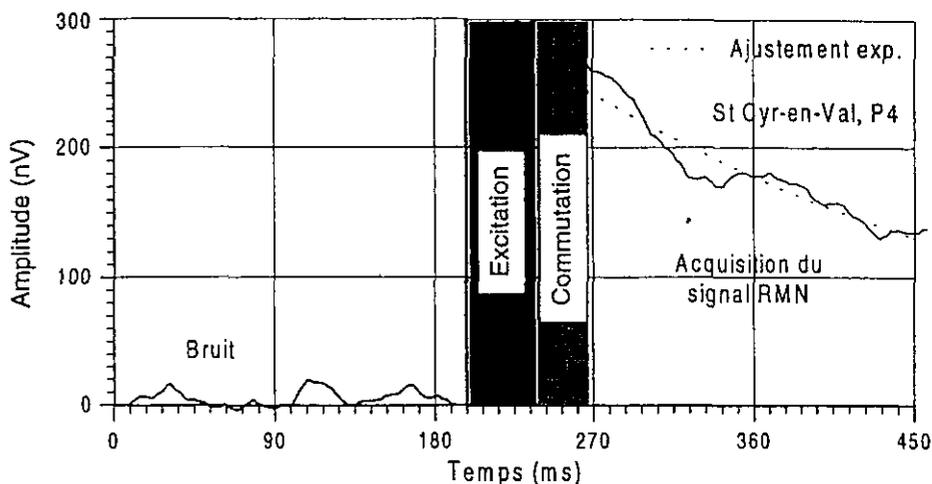


Fig. 2. - Exemple d'enregistrement du signal dû au champ magnétique de relaxation.

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.

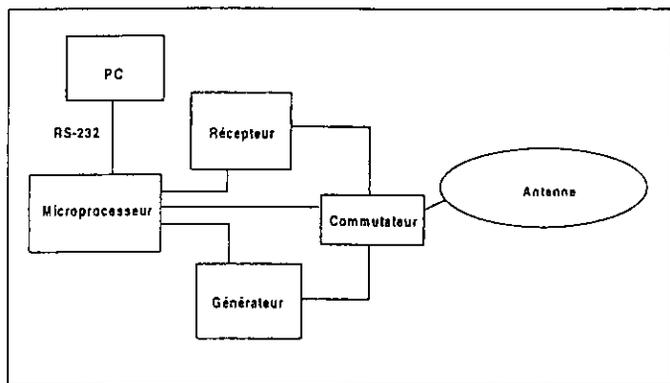


Fig. 3. – Schéma fonctionnel du dispositif instrumental pour les mesures de RMN.

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

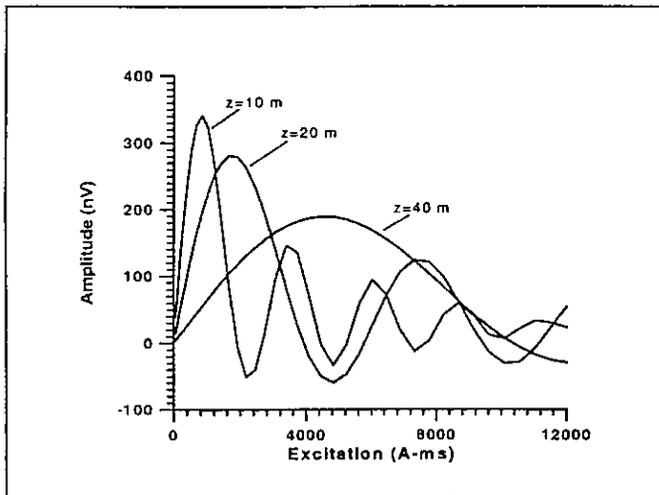


Fig. 4. – Courbes théoriques de réponse en amplitude pour une couche d'eau d'un mètre d'épaisseur située à des profondeurs de 10, 20 et 40 mètres (terrain électriquement résistant ; champ magnétique terrestre d'inclinaison 90°).

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°).

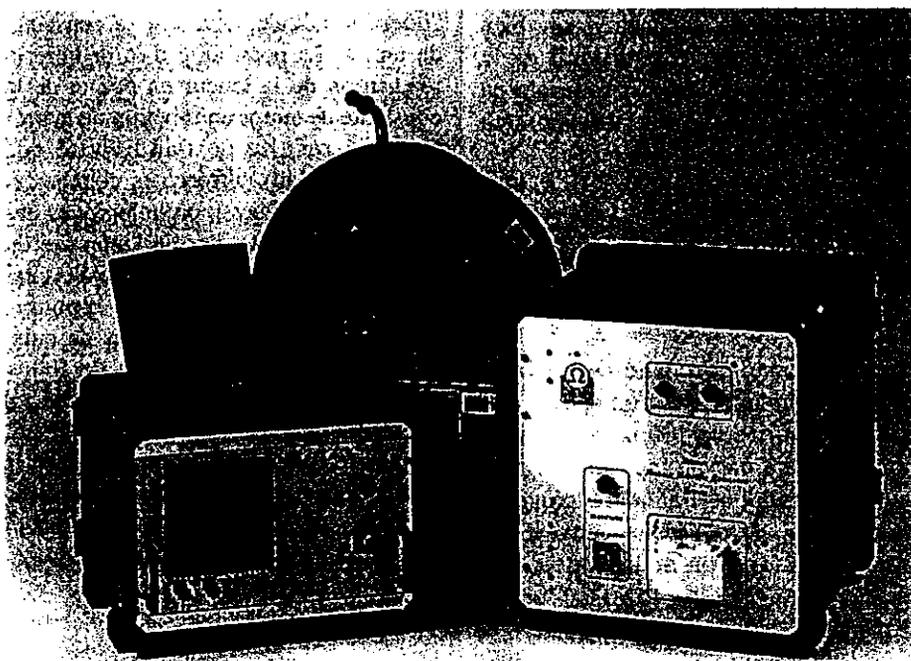


Fig. 5. – Nouvel équipement pour les mesures RMN développé par IRIS-Instruments.

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 ;

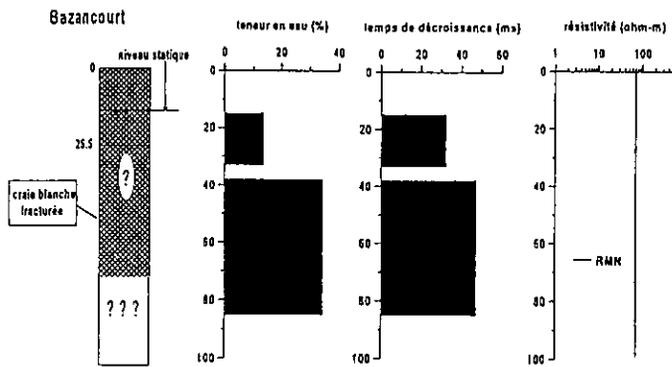


Fig. 6. - Coupe géologique du forage de Bazancourt (Marne - N° BSS 108-6-022, fond de forage à 25,5 m) et résultats de l'inversion des mesures de RMN : teneur en eau, temps de décroissance et résistivité.

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.

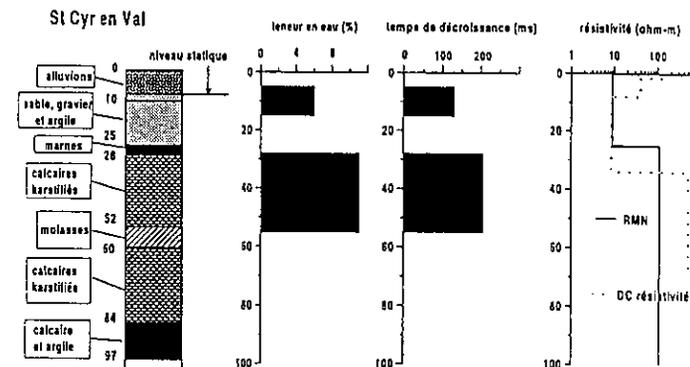


Fig. 7. - Coupe géologique du forage de Saint-Cyr en Val (Loiret - N°BSS 398-3-268) et résultats de l'inversion des mesures de RMN : teneur en eau, temps de décroissance et résistivité.

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.

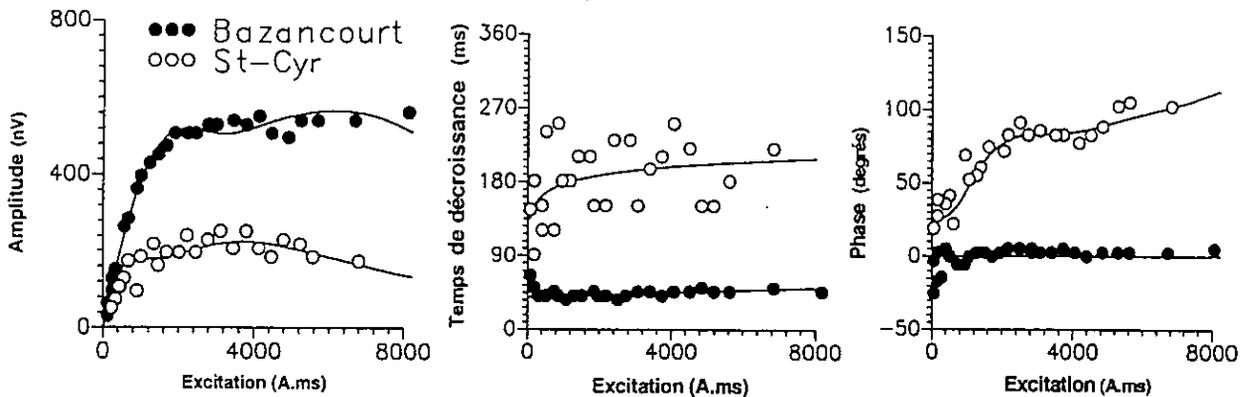


Fig. 8. - Comparaison des mesures d'amplitude, de constante de temps de décroissance et de phase pour les deux sites étudiés.

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 m<sup>2</sup>/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.
- SEMOV 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).

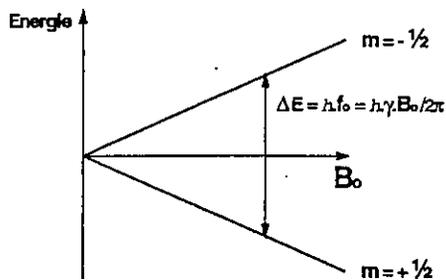


Fig. A1. - Niveaux d'énergie d'un noyau atomique de spin 1/2 placé dans un champ magnétique statique  $B_0$ ; l'écart d'énergie  $\Delta E$  est proportionnel à la fréquence de Larmor  $f_0$  ( $h$  est la constante de Planck et  $\gamma$  le facteur gyromagnétique du noyau).

Fig. A1. - Energy levels of an atom nucleus with a spin 1/2 in a static magnetic field  $B_0$ ; the energy difference  $\Delta E$  is proportional to the Larmor frequency  $f_0$  ( $h$  is the Planck constant and  $\gamma$  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 excitateur 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 excitateur 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

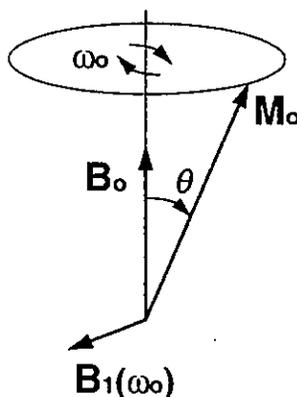


Fig. A2. - Mouvement de précession du moment magnétique macroscopique  $M_0$  induit dans un champ statique  $B_0$ ; l'angle de précession  $\theta$  est proportionnel au produit du champ excitateur  $B_1$  par la durée d'excitation.

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

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

Tabl. 1. - Propriétés de résonance magnétique nucléaire de quelques noyaux atomiques ( $\gamma$  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 ( $\gamma$  is the gyromagnetic factor and f the Larmor frequency for an earth field of 50 000 nanoteslas).

**BRGM**  
**SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL**  
**Département Cartographie**  
BP 6009 - 45060 ORLEANS cedex 2 - France - Tél. : (33).02.38.64.34.34