

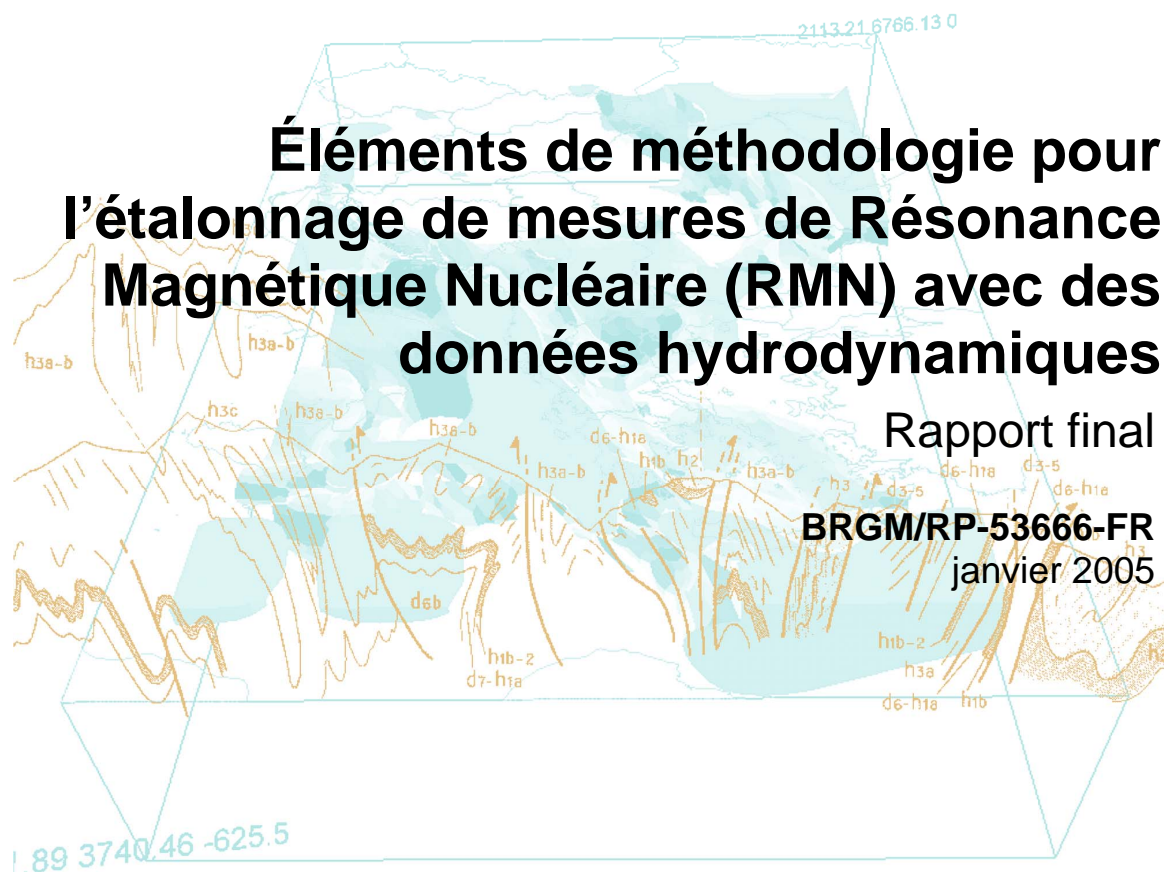


Éléments de méthodologie pour l'étalonnage de mesures de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) avec des données hydrodynamiques

Rapport final

BRGM/RP-53666-FR

janvier 2005



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Éléments de méthodologie pour l'étalonnage de mesures de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) avec des données hydrodynamiques

Étude réalisée sur le site expérimental de Saint-Cyr-en-Val

Rapport final

BRGM/RP-53666-FR

janvier 2005

Étude réalisée dans le cadre du projet
PNHR Waterscan

M. Boucher

Avec la collaboration de

J.F. Girard, A. Legtchenko, J.M. Baltassat

Vérificateur :

Original signé par : J.M. BALTASSAT

Approbateur :

Original signé par : H. FABRIOL

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Géophysique, Hydrogéologie, Résonance Magnétique Nucléaire (RMN), Sondages RMP, Panneau électrique, Forage, Teneur en eau, Porosité, Perméabilité, Loiret, Saint-Cyr-en-Val.

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

Boucher M., Girard J.F., Legtchenko A., Baltassat J.M. (2005) - Éléments de méthodologie pour l'étalonnage de mesures de Résonance Magnétique Nucléaire (NMR) avec des données hydrodynamiques. Rapport final. BRGM/RP-53666-FR, 69 p., 34 fig., 4 tabl., 2 ann.

Synthèse

Dans le cadre du projet de recherche et développement du BRGM, du projet PNRH Waterscan (programme national ACI-FNS « ECCO ») et de la convention cadre BRGM, IRD, IRIS-instruments, une étude géophysique et deux forages de reconnaissance avec prises d'échantillons ont été réalisés sur le site expérimental de Saint-Cyr-en-Val (Loiret). Les échantillons ont été analysés au laboratoire de géophysique appliquée de l'Université Technique de Berlin avec un spectromètre de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) et par des méthodes hydrologiques usuelles (pesée et perméamètre).

L'objectif de cette étude était de mettre en place une procédure de calibration des paramètres mesurés avec la technique de sondage par Résonance Magnétique Protonique (RMP) en comparaison avec des données hydrologiques. Ce travail était une étape préliminaire à une étude systématique dans différents contextes géologiques.

Les résultats ont permis de mieux connaître le site expérimental de Saint-Cyr-en-Val caractérisé par une alternance argilo-sableuse. Une lentille argileuse a été mise en évidence dans la partie est du terrain. D'autres forages avec essais de pompage sont prévus pour définir les caractéristiques hydrodynamiques du site.

Outre les difficultés techniques rencontrées lors de l'échantillonnage, l'expérimentation RMN a montré que les paramètres RMP mesurés sur le terrain et les paramètres RMN mesurés en laboratoire ne sont pas facilement comparables. Ainsi, des expérimentations complémentaires sont envisagées pour déterminer l'influence conjointe de la susceptibilité magnétique et du changement de fréquence sur le temps de relaxation du signal.

Lorsque le lien entre les mesures RMP et RMN sera bien établi, il sera possible de quantifier l'eau qui n'est pas détectable en RMP à cause du temps mort instrumental en utilisant le résultat de mesures effectuées en laboratoire dans des conditions beaucoup mieux contraintes que sur le terrain. Par ailleurs, un travail important reste à faire pour améliorer les relations empiriques entre paramètres RMP et la perméabilité des terrains.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Méthode et moyens	11
2.1. LA RÉSONNANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE (RMN)	11
2.1.1. Principe de la méthode	11
2.1.2. Sondages RMP	12
2.1.3. RMN en laboratoire	19
2.2. PANNEAUX ÉLECTRIQUES	23
2.2.1. Principes généraux des méthodes électriques par courant continu	24
2.2.2. Procédures d'acquisition des mesures de panneau électrique	24
2.2.3. Interprétation	26
2.3. MESURES HYDROGÉOLOGIQUES	26
2.3.1. Teneur en eau et porosité	26
2.3.2. Perméabilité	27
2.4. MOYENS MIS EN ŒUVRE	28
2.4.1. Calendrier et personnel	28
2.4.2. Équipement	29
3. Travaux réalisés	31
3.1. LOCALISATION	31
3.2. PANNEAUX ÉLECTRIQUES	32
3.3. PRÉLÈVEMENTS	33
3.4. SONDAGES RMP	34
3.5. MESURES EN LABORATOIRES	34
3.5.1. Mesures « en continu »	34
3.5.2. Mesures sur échantillons	34
4. Résultats et discussion	37
4.1. PROFILS ÉLECTRIQUES	37
4.2. LOG GÉOLOGIQUE	40

4.3. SONDAGES RMP	41
4.4. LOG RMN.....	42
4.5. MESURES SUR ÉCHANTILLONS	44
4.5.1. Teneur en eau et porosité	44
4.5.2. Temps de relaxation T_1 et T_2	45
4.5.3. Perméabilité	49
5. Conclusion et perspectives.....	51
5.1. CONNAISSANCE DU SITE EXPÉRIMENTAL DE SAINT-CYR-EN-VAL	51
5.2. MÉTHODOLOGIE RMN.....	51
5.3. PERSPECTIVES.....	51
6. Bibliographie	53

Liste des figures

Figure 1 - Principe de mesure RMN.....	12
Figure 2 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.....	13
Figure 3 - Équipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS LITE ».....	13
Figure 4 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.....	14
Figure 5 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1	15
Figure 6 - Résultats d'inversion des données théoriques.	17
Figure 7 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie.	18
Figure 8 - Spectromètre RMN Maran Ultra 2 Mhz de Resonance Instruments	19
Figure 9 - Vue à l'intérieur du Maran Ultra 2 MHZ.	20
Figure 10 - Séquence de mesure de T_2^* dite FID.....	21
Figure 11 - Séquence du spin écho (CPMG)	21
Figure 12 - Séquence de pulse « Inversion-Recovery »	22
Figure 13 - Mesure de T_1 : amplitude RMN en fonction du délai τ_1	22
Figure 14 - Exemple de résultats obtenus avec WinDXP sur une séquence CPMG.....	23

Figure 15 - Système multi-électrodes de IRIS-Instruments qui permet l'automatisation des séquences de mesure de panneaux électriques.....	24
Figure 16 - Schéma de la procédure d'acquisition d'un panneau électrique dipôle-dipôle et de présentation sur une pseudo-coupe.....	25
Figure 17 - Perméamètre à charge variable. a- Principe. b- Appareil	28
Figure 18 - Matériel de forage « géoprobe ».	30
Figure 19 - Localisation du site.	31
Figure 20 - Localisation des mesures.	32
Figure 21 - Positions des profils électriques.	37
Figure 22 - Panneaux électriques DC1, DC2 et DC3.	38
Figure 23 - Panneaux électriques DC6 et DC7.	39
Figure 24 - Géologie du forage M01.	40
Figure 25 - Géologie du forage M02.	41
Figure 26 - Résultats d'interprétation de sondages antérieurs à l'étude.	41
Figure 27 - Teneur en eau, temps de décroissance et géologie simplifiée du forage M01.....	43
Figure 28 - Teneur en eau, temps de décroissance et géologie simplifiée du forage M02.....	44
Figure 29 - Teneurs en eau et porosités mesurées par RMN et par pesée sur échantillons.....	45
Figure 30 - Exemple de distribution continue et discontinue des temps de relaxation sur un échantillon saturé.	46
Figure 31 - Schéma d'un échantillon.	47
Figure 32 - Temps de décroissance T_2 dans le forage M01.....	47
Figure 33 - Temps de décroissance T_2 dans le forage M02.....	48
Figure 34 - Relation entre T_1 et T_2 sur les échantillons initiaux et saturés.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1 - Paramètres du modèle.	17
Tableau 2 - Calendrier des travaux.	28
Tableau 3 - Caractéristiques des panneaux électriques.	33
Tableau 4 - Temps de relaxation de l'échantillon 695-700.....	50

Liste des annexes

Annexe 1 - Résultats des mesures sur échantillons	55
Annexe 2 - Résultats des sondages RMP.....	65

1. Introduction

Le sondage par Résonance Magnétique Protonique (RMP) est une technique qui a montré lors de ces dernières années son efficacité à caractériser les propriétés hydrodynamiques des aquifères. Cependant, les équations, pour calculer les paramètres hydrogéologiques du milieu à partir des mesures RMP, ont un caractère empirique et par conséquent la précision des résultats dépend de la procédure de calibration.

Dans le cadre du projet de recherche et développement du BRGM, du projet PNRH Waterscan (programme national ACI-FNS « ECCO ») et de la convention cadre BRGM, IRD, IRIS-instruments, la calibration des paramètres RMP avec des données hydrologiques en fonction de la géologie est une des principales voies de développement. Dans ce contexte, deux forages de reconnaissance avec prise d'échantillons ont été réalisés sur le site expérimental de Saint-Cyr-en-Val dans le Loiret. Les échantillons ont été amenés au laboratoire de géophysique appliquée de l'Université Technique de Berlin (TUB) et analysés avec un spectromètre de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN). Auparavant, six panneaux électriques ont été effectués, afin de mieux connaître la structure géologique du terrain et de choisir au mieux l'emplacement des forages.

Ce travail est une étape préliminaire à l'étude systématique des paramètres RMN, en comparaison avec les caractéristiques hydrodynamiques de différents contextes géologiques. L'objectif est de mettre en place une méthodologie d'étude, notamment en recensant toutes les difficultés techniques rencontrées lors de cette première analyse.

Ce rapport présente les informations obtenues sur la structure géologique du site expérimental, les résultats des mesures RMN et hydrogéologiques en laboratoire faites sur les échantillons de Saint-Cyr-en-Val, et les enseignements tirés de cette expérimentation.

2. Méthode et moyens

2.1. LA RÉSONNANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE (RMN)

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

Contrairement à ces méthodes géophysiques, l'information déduite par Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) est directement liée à l'eau contenue dans le sous-sol. La technique RMN peut être utilisée en laboratoire, en diagraphie ou en sondage. Le principe de la méthode est le même dans les trois cas. Les deux principales différences entre les sondages RMP (Résonance Magnétique Protonique) et la RMN en laboratoire sont : le volume investigué et l'intensité du champ magnétique primaire qui est le champ magnétique terrestre dans le cas du sondage et qui est artificiel en laboratoire.

2.1.1. Principe de la méthode

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

L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre et provoque une précession des moments magnétiques autour de la direction du champ magnétique initial. Après coupure du champ excitateur, au cours du retour à l'état d'équilibre, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons, constituant ainsi la réponse RMN. L'amplitude de ce champ est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, et donc que la teneur en eau est importante.

La fréquence spécifique à laquelle les protons sont excités est caractéristique de l'atome d'hydrogène et assure ainsi que la méthode est sélective. La très grande majorité des noyaux d'hydrogène présents dans le proche sous-sol sont ceux des molécules d'eau. Ceci implique que la méthode RMN renseigne spécifiquement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié, ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

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

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

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

Ces phénomènes de relaxation sont liés à la taille moyenne des pores contenant les molécules d'eau. Dans différents environnements géologiques impliquant différentes conditions de susceptibilité magnétique et de champ magnétique rémanent, l'effet de l'inhomogénéité du champ magnétique est différent. Ainsi T_2^* est en outre lié aux conditions géophysiques du réservoir.

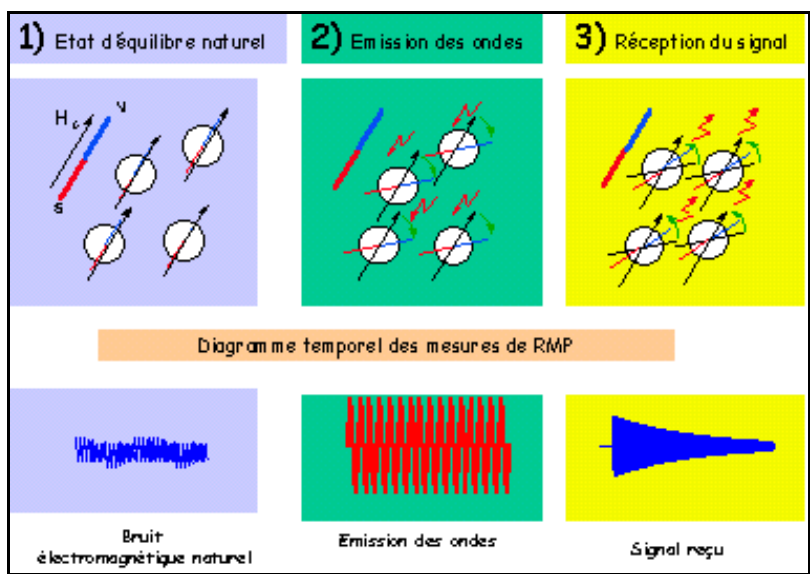


Figure 1 - Principe de mesure RMN.

2.1.2. Sondages RMP

a) L'équipement « NUMIS »

L'équipement NUMIS se compose d'un générateur de courant alternatif, une unité réceptrice, un détecteur de signal RMP, une antenne et un microprocesseur (fig. 2).

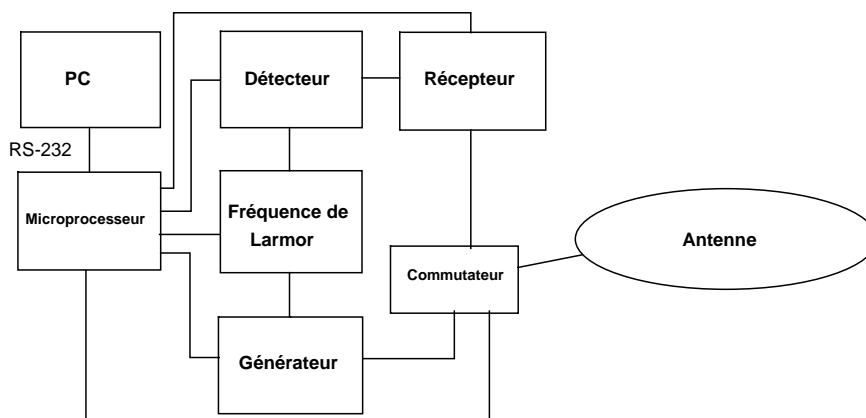


Figure 2 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.

Le microprocesseur pilote la commutation de l'antenne du mode émission au mode réception. Il contrôle également la génération de la fréquence de référence égale à la fréquence de Larmor. Une enveloppe du signal provenant du détecteur synchrone est enregistrée par le microprocesseur sous forme digitale sur une durée programmable de 2 s au maximum.

Un PC portable est utilisé pour le stockage sur disque et le traitement des données. Le poids total de l'ensemble est d'environ 60 kg dans la version « Lite » (fig. 3).



Figure 3 - Équipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS LITE ».

b) Le sondage RMP

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

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

I_o et τ caractérisent respectivement l'amplitude et la durée de l'impulsion. La pulsation du courant émis ω_o doit être aussi proche que possible de la fréquence de Larmor, caractéristique des protons placés dans le champ géomagnétique $f_o = \gamma H_o / 2\pi$ avec H_o l'amplitude du champ géomagnétique et γ le facteur gyromagnétique des protons (constante physique caractéristique). La valeur de cette fréquence est déduite de l'amplitude du champ géomagnétique mesuré avec un magnétomètre à proton.

Le champ magnétique oscillant créé par cette impulsion de courant entraîne une précession des protons autour du champ géomagnétique. Cette précession crée à son tour un champ magnétique alternatif qui est détecté après coupure de l'injection de courant. En pratique, l'enregistrement de la réponse RMP n'est possible qu'après un délai instrumental (dit « temps mort ») de 40 ms dans le cas de la version actuelle de NUMIS. Le processus d'acquisition d'une mesure est schématisé sur la figure 4.

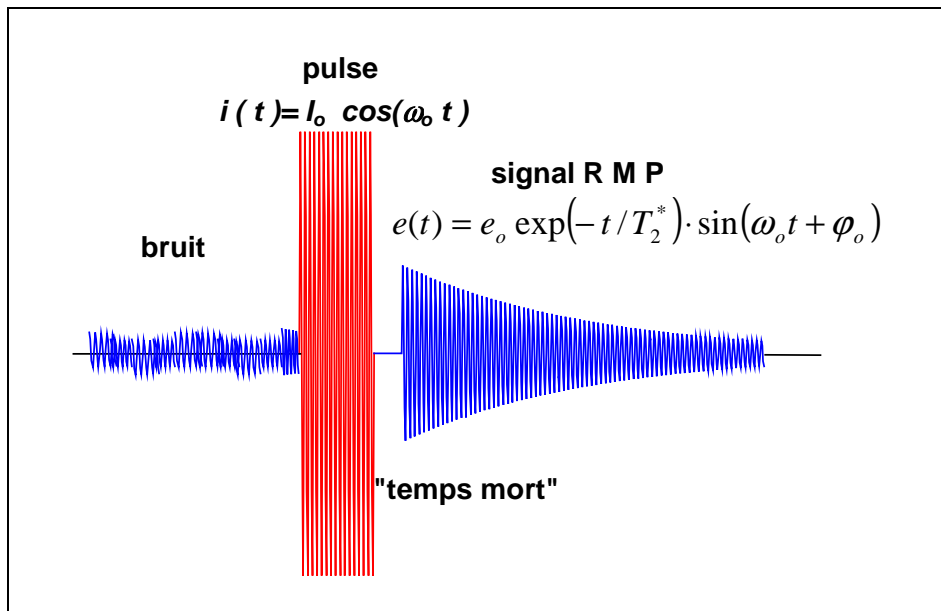


Figure 4 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.

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

$$e(t,q) = e_o(q) \exp(-t/T_2^*) \cos(\omega_o t + \varphi_o) \quad (2)$$

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

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

Pour la mesure de T_1 , une adaptation technique d'« inversion recovery » (Farrar et al., 1971, et § 2.1.3.b) a été développée. En injectant deux pulsations consécutives au lieu d'une seule et en mesurant la réponse RMP après chaque pulsation, il est possible de déduire la constante de relaxation T_1 à partir de la différence de réponse entre FID1 et FID2 (fig. 5), tel que :

$$\frac{e_{o\ FID2}}{e_{o\ FID1}} = 1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{T_1}\right) \quad (3)$$

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

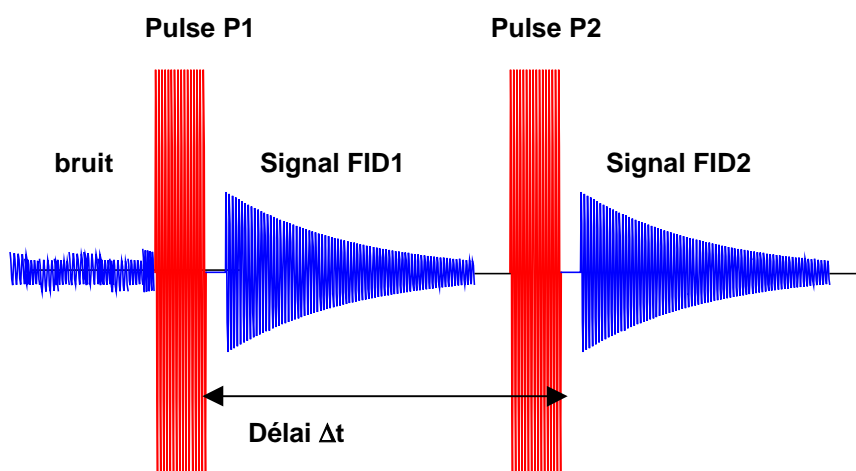


Figure 5 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1 .

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

Les valeurs d'amplitudes peuvent varier de quelques dizaines de nanovolts à quelques microvolts suivant la teneur en eau du milieu considéré ; le seuil de détectabilité de NUMIS se situant à environ 4 nV. Différents facteurs peuvent influencer l'amplitude des

signaux RMP tels que par exemple, la magnitude et l'inclinaison du champ géomagnétique, la conductivité électrique des terrains, la taille et la géométrie de l'antenne utilisée (Legchenko *et al.*, 1997).

Le volume investigué lors d'un sondage est défini comme un cylindre vertical de diamètre égal à environ 1,5 fois le diamètre de la boucle, centré sur celle-ci et de hauteur égale à ce diamètre. La profondeur d'investigation maximale de l'appareil Numis Lite, en l'absence de terrains conducteurs, est de l'ordre de 50 m (Vermeersch *et al.*, 2003). La profondeur d'investigation est sensiblement diminuée lorsque la conductivité des terrains augmente et de manière significative pour des résistivités inférieures à 10 ohm.m. La durée de réalisation d'un sondage RMP est d'environ 2 h, dans des conditions favorables de bruits électromagnétiques parasites d'origine naturelle ou anthropique.

c) **Interprétation des données**

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

- l'inversion des données $e_o(q)$ fournit la profondeur, l'épaisseur et la teneur en eau de chaque couche saturée en eau. La teneur en eau fournie par RMP peut être définie telle que ci-après. Pour un volume d'investigation V , soit V_W le volume rempli d'eau et V_R le volume de roche ($V = V_W + V_R$).

Le volume V_W peut être divisé en deux parties : l'eau soumise à un champ magnétique homogène et appelée eau libre V_{free} et l'eau soumise à un champ magnétique inhomogène, appelée eau liée ; ainsi $V_W = V_{free} + V_{bound}$. Comme les très courts signaux correspondant à l'eau liée ne peuvent pas être mesurés par les équipements RMP disponibles aujourd'hui, la teneur en eau RMP, n est la part du volume investigué occupé par l'eau libre telle que $n = V_{free}/V$. Les deux cas limites sont $n = 0$ pour une roche sèche et $n = 100\%$ pour l'eau d'un lac ;

- les constantes de **temps de relaxation** $T_2^*(q)$ et $T_1(q)$ sont reliées à la distance moyenne entre une molécule d'eau et la phase solide (Shirov *et al.*, 1991 ; Chang *et al.*, 1997 ; Kenyon, 1997). Dans la zone saturée, ces constantes dépendent donc de la taille moyenne des pores des formations aquifères. Dans la zone non saturée, elles sont liées à la saturation ;
- la **phase** $\varphi_o(q)$ est liée à la distribution des conductivités électriques du sous-sol, les harmoniques du pulse, et le décalage en fréquence. Pour une estimation précise des profondeurs des différents aquifères, cette information doit être prise en compte lors de l'étape d'inversion des données RMP, quand les résistivités sont inférieures à 10 ohm.m.

Le problème inverse des sondages RMP est mal conditionné. Il n'a pas de solution unique. La capacité de résolution de la méthode est discutée par Legchenko et Shushakov (1998). Un exemple d'inversion des données théoriques est présenté sur la figure 6.

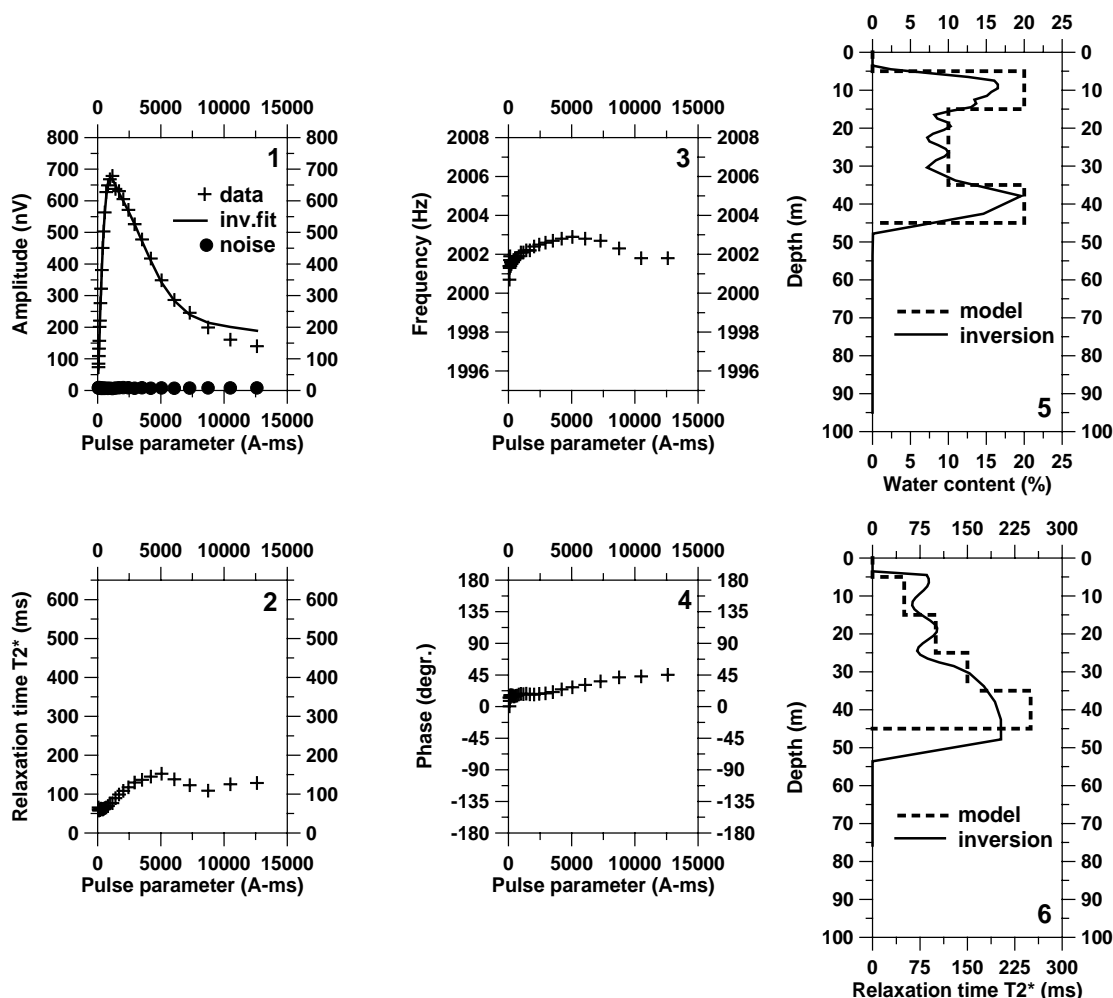


Figure 6 - Résultats d'inversion des données théoriques.

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

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

Tableau 1 - Paramètres du modèle.

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

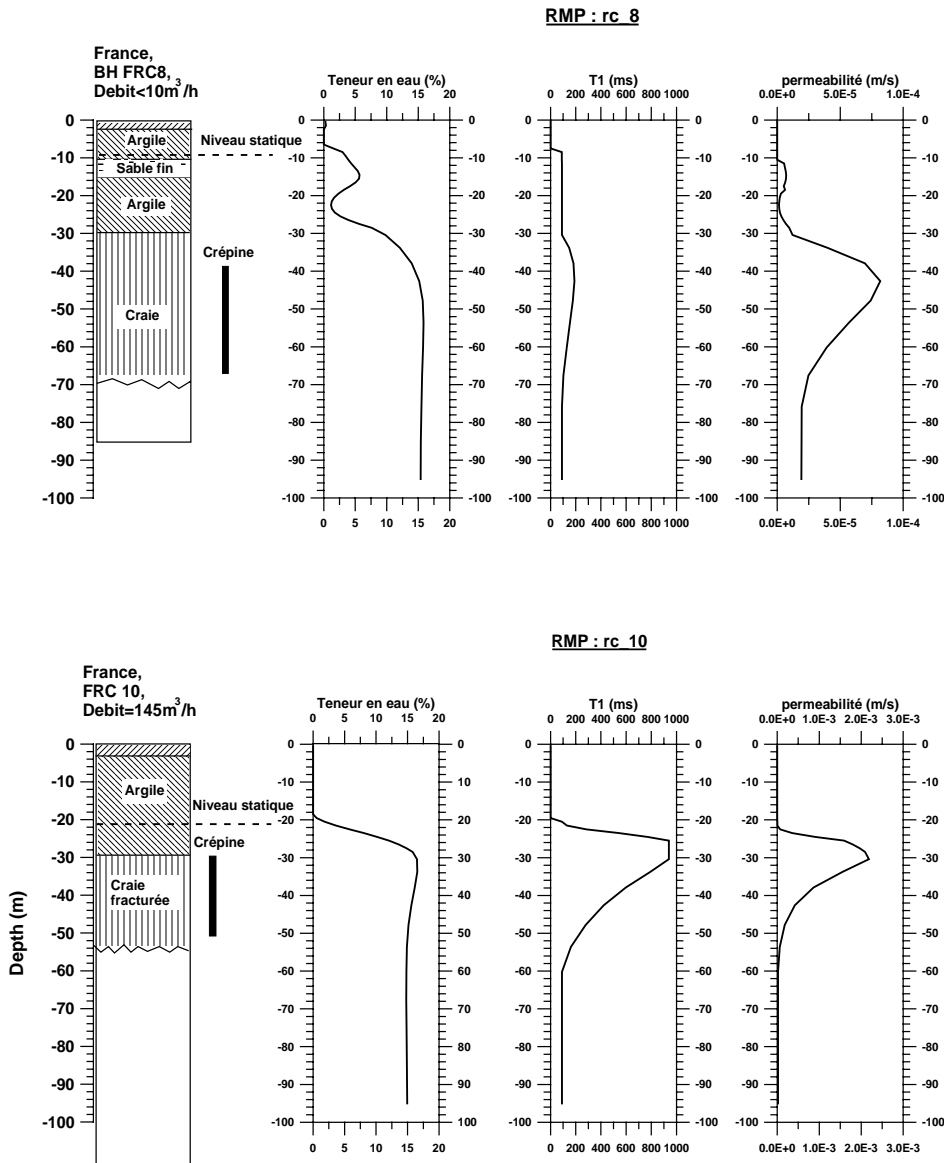


Figure 7 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie.

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

$$k = C_k W^a (T_1^*)^b \quad (4)$$

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

Pour des roches différentes, les constantes empiriques doivent être modifiées et des relations mieux adaptées peuvent être définies. La qualité de la relation empirique dépend alors de la qualité de la calibration.

La définition des paramètres empiriques adaptés aux différents environnements est un travail de longue haleine. Sans calibration, NUMIS peut être utilisé efficacement pour définir les perméabilités des aquifères en valeurs relatives.

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

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

Un exemple de la comparaison des résultats RMP avec des données de forage et d'essais de pompage est présenté sur la figure 7.

2.1.3. RMN en laboratoire

a) Spectromètre

Les mesures RMN ont été effectuées avec un spectromètre Maran Ultra 2 MHz de Resonance Instruments UK (fig. 8). Le dispositif est constitué de trois unités. Dans l'unité de gauche, un aimant permanent crée un champ magnétique de 47 mT. La fréquence de Larmor du noyau d'hydrogène qui correspond à ce champ magnétique est d'environ 2 Mhz. Sur la figure 9, on peut voir l'aimant permanent ainsi que les bobines émettrices et réceptrices.

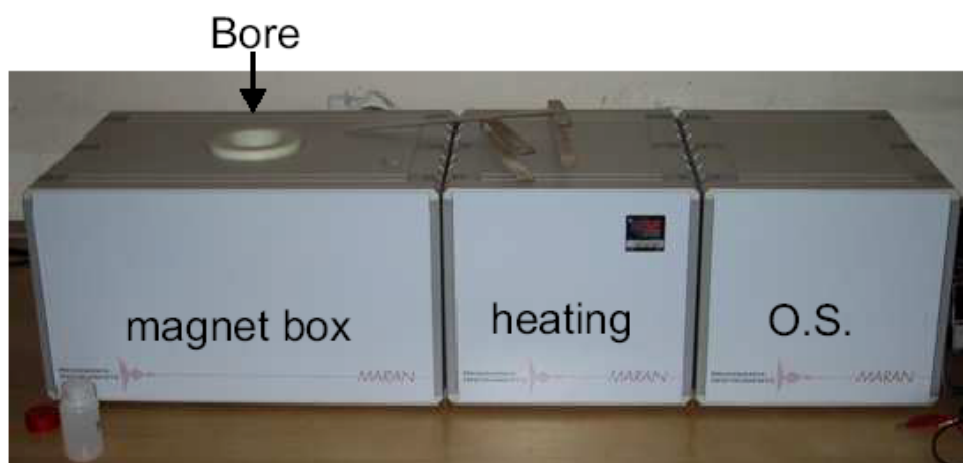


Figure 8 - Spectromètre RMN Maran Ultra 2 Mhz de Resonance Instruments UK (d'après Kooman, 2003).



Figure 9 - Vue à l'intérieur du Maran Ultra 2 MHz. Au milieu la place pour les échantillons (en blanc) avec des deux cotés l'aimant permanent et les bobines émettrices/receptrices (en rouge) (d'après Kooman, 2003).

L'unité du milieu sert à maintenir l'aimant permanent à une température constante de 5 °C supérieure à la température de la pièce qui est elle-même gardée à 19 °C. L'unité de droite contient le système d'exploitation (O.S.).

b) Séquences de mesures

En fonction du paramètre à mesurer plusieurs expériences peuvent être réalisées. Le logiciel d'acquisition des données permet de choisir parmi les différentes séquences de mesure celle appropriée au paramètre recherché.

- **L'expérience « Free Induction Decay » (FID) : mesure de T_2^***

La plus simple et la plus rapide des mesures est celle du temps de relaxation T_2^* réalisée par l'expérience dite « Free Induction Decay » (FID) illustrée sur la figure 10. Un pulse est émis pendant un temps tel que le moment magnétique du noyau d'hydrogène tourne de 90 degrés. Le temps de décroissance de l'enveloppe du signal en réponse est le temps de relaxation T_2^* .

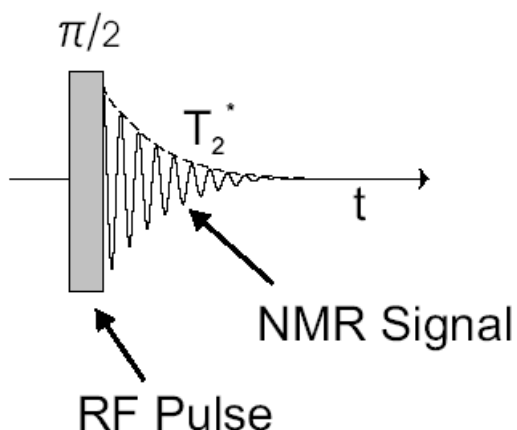


Figure 10 - Séquence de mesure de T_2^* dite FID (d'après Levitt, 2001).

• La séquence de Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) : mesure de T_2

La séquence de Carr-Purcell-Meiboom-Gill, aussi appelée séquence du spin écho, commence comme l'expérience FID par un pulse qui fait tourner le moment magnétique de 90° . Plusieurs pulses à 180° sont ensuite injectés à intervalle régulier. Après chaque pulse à 180° un écho de plus en plus faible est enregistré. Le temps de décroissance de ces échos est le temps de relaxation T_2 (fig. 11). Les pulses sont injectés jusqu'à ce que l'amplitude du signal arrive au niveau du bruit.

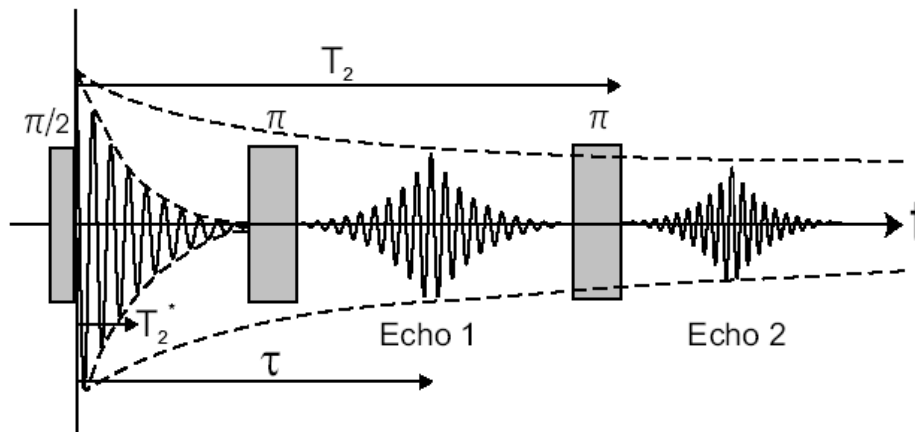


Figure 11 - Séquence du spin écho (CPMG) (d'après Kooman, 2003).

• La séquence « Inversion Recovery » (INVREC) : mesure de T_1

La séquence « Inversion Recovery » est comparable à la séquence CPMG mais avec des pulses inversés : après un premier pulse à 180° , un pulse à 90° est injecté (fig. 12).

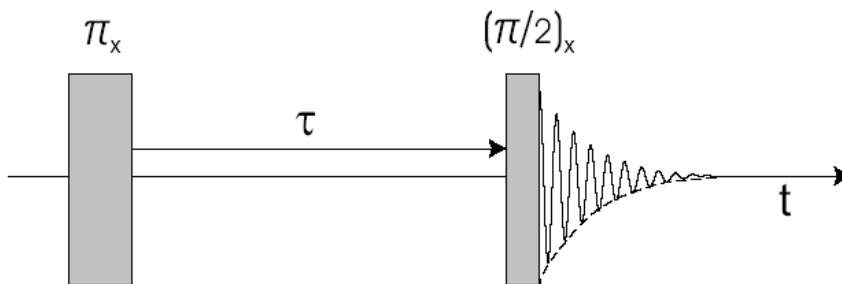


Figure 12 - Séquence de pulse « Inversion-Recovery » (d'après Levitt, 2001).

Le premier pulse inverse la polarisation des spins. Pendant le temps τ les spins retournent progressivement à leur état d'équilibre. Pour connaître l'avancement de la relaxation des spins un second pulse est injecté. Pour évaluer le temps de relaxation T_1 l'amplitude du signal est enregistrée pour différentes valeurs de délais entre les deux pulses (fig. 13).

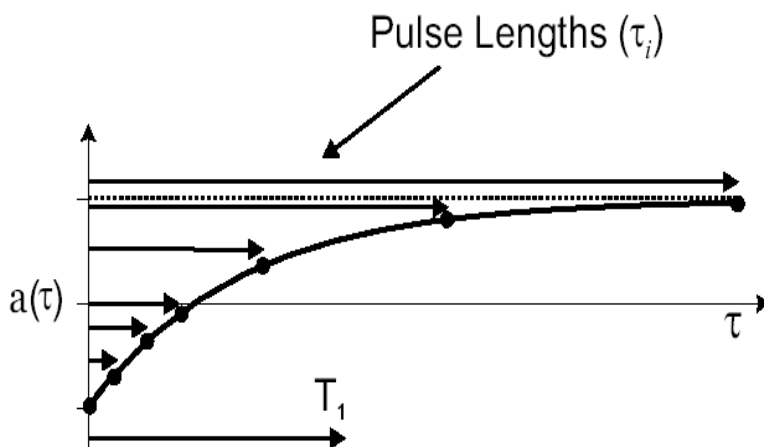


Figure 13 - Mesure de T_1 : amplitude RMN en fonction du délai τ_i (d'après Levitt, 2001).

c) Calibration de l'appareil

Le dispositif de mesure et l'acquisition des données sont contrôlés par un ordinateur à l'aide du logiciel RiNMR. Grâce à ce logiciel, la séquence de pulses (FID, CPMG ou INVREC) choisie en fonction de l'information recherchée (T_2^* , T_2 ou T_1) peut être lancée automatiquement après avoir été sélectionnée. Avant chaque mesure, le Maran doit être calibré avec deux macros du logiciel RiNMR.

Afin d'utiliser la fréquence de Larmor la plus précise possible, la déviation par rapport au champ magnétique nominal (0,047 T) est mesurée avec la macro « .AUTO01 ». La déviation, par rapport à la fréquence de 2 MHz, est automatiquement calculée et est enregistrée pour les mesures suivantes.

L'intensité du champ magnétique n'étant pas constante, la longueur du pulse doit être adaptée. La macro « AUTOP90 » mesure l'amplitude du signal RMN pour différentes valeurs de longueur de pulses afin de déterminer la longueur correspondant à une rotation de 90° du moment magnétique (maximum d'amplitude) et à une rotation de 180° (minimum de signal). Les valeurs de durée de pulses sont enregistrées pour être automatiquement utilisées dans les mesures suivantes.

d) Interprétation des données

Après l'acquisition des données avec RiNMR, les résultats sont interprétés avec les logiciels Winfit et WinDXP. Le logiciel Winfit estime l'amplitude et le temps de relaxation du signal. Si l'inversion avec un seul temps de relaxation ne permet pas de bien ajuster le modèle aux données, il est possible d'utiliser une inversion multi-exponentielle avec au maximum quatre temps de relaxation différents. Le logiciel WinDXP sert à calculer une distribution continue des temps de relaxation (fig. 14).

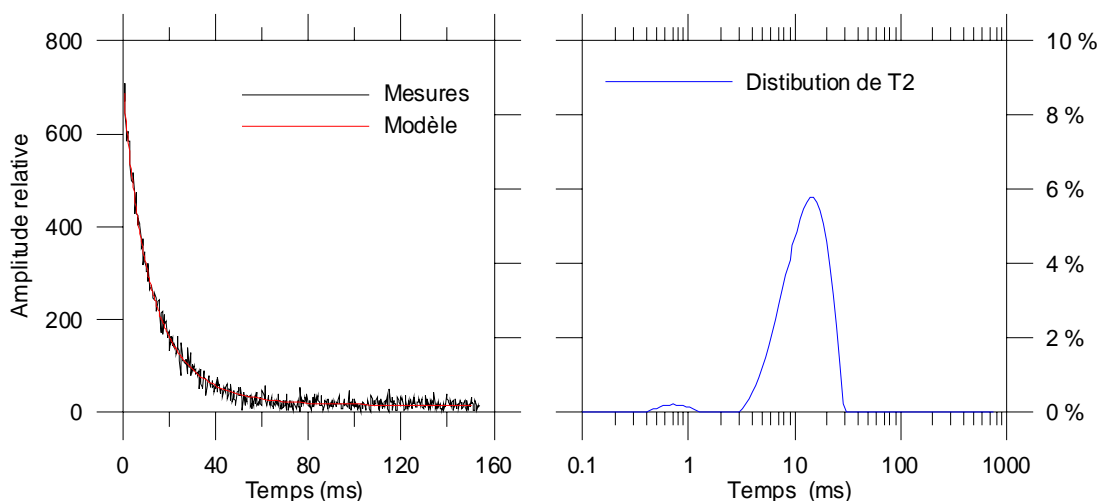


Figure 14 - Exemple de résultats obtenus avec WinDXP sur une séquence CPMG.

2.2. PANNEAUX ÉLECTRIQUES

La méthode de prospection par panneaux électriques est une méthode géophysique dont le but est de décrire les variations de résistivité en profondeur et le long d'un profil. Elle réalise à la fois une investigation en profondeur comme un sondage électrique et une investigation en profil comme un traîné électrique.

Des procédures d'acquisition et des équipements spécifiques (fig. 15) commandés par microprocesseur ont été mis au point pour réduire les difficultés et les coûts de mise en œuvre. L'interprétation des résultats, qui est réellement une interprétation 2D, fait appel à des algorithmes spécifiques de calcul.

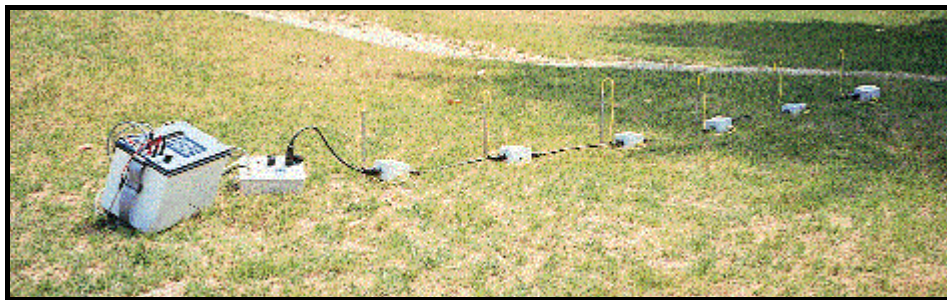


Figure 15 - Système multi-électrodes de IRIS-Instruments qui permet l'automatisation des séquences de mesure de panneaux électriques.

2.2.1. Principes généraux des méthodes électriques par courant continu

Comme pour les autres méthodes électriques par courant continu, un courant I est injecté entre deux électrodes (ou pôles) A et B et une tension V est mesurée entre deux électrodes M et N. Un tel dispositif d'émission et de réception est appelé quadripôle. La résistivité apparente du sol est définie comme la résistivité d'un sol homogène et isotrope qui, alors que le courant I est injecté entre les électrodes A et B, donnerait entre les électrodes M et N la différence de potentiel V , telle que :

$$\rho_a = K \cdot \frac{V}{I} \quad (5)$$

où K (appelé coefficient géométrique) est fonction des distances entre les différentes électrodes A, B, M et N.

La profondeur d'investigation augmente avec les dimensions du dispositif d'électrodes, mais diminue avec la résistivité des terrains. La résolution décroît avec la profondeur. Dans le cas d'un terrain conducteur, il faut augmenter la longueur du dispositif pour obtenir un résultat comparable à celui obtenu sur un terrain plus résistant.

Les résistivités apparentes mesurées pour différents dispositifs d'électrodes sont ensuite interprétées pour approcher la répartition des résistivités vraies dans le sol.

2.2.2. Procédures d'acquisition des mesures de panneau électrique

Un ensemble d'électrodes est régulièrement disposé le long d'un profil rectiligne. Différentes configurations d'électrodes émettrices (ou d'injection) et réceptrices (ou de mesure) peuvent être utilisées. Les plus courantes sont les suivantes :

- configuration pôle-pôle : le pôle d'injection B et le pôle de mesure N sont implantés à grande distance du profil de mesure et sont considérés comme « à l'infini ». Le pôle d'injection A et le pôle de mesure M prennent successivement les différentes positions d'électrodes du profil lors de la réalisation du panneau ;
- configuration pôle-dipôle : le pôle d'injection B est implanté « à l'infini ». Le pôle d'injection A et le dipôle de mesure MN prennent successivement les différentes positions d'électrodes du profil lors de la réalisation du panneau ;

- configuration dipôle-dipôle : le dipôle d'injection AB et le dipôle de mesure MN prennent successivement les différentes positions d'électrodes du profil lors de la réalisation du panneau ;
- configuration Wenner/Schlumberger : comme pour le dipôle-dipôle il n'y a pas de pôle à l'infini mais le dipôle de mesure MN est inclus entre les électrodes d'injection A et B. Le dispositif inverse avec le dipôle AB inclus dans le dipôle MN est équivalent selon le principe de superposition des pôles électriques.

Les grandeurs caractéristiques de ces configurations sont :

- l'espacement a qui correspond à la distance entre les électrodes du profil ;
- et le rang n grandeur entière qui indique la distance (n fois l'espacement a) entre les parties émettrice et réceptrice du dispositif pour la configuration dipôle-dipôle et l'écartement des électrodes d'injection en Wenner/Schlumberger. Ce rang indique la profondeur d'investigation.

Un panneau électrique est établi en mesurant la tension pour différentes combinaisons d'émetteur et de récepteur (fig. 16). Les mesures effectuées avec un écartement entre émetteur-récepteur d'un espacement sont dites de rang 1, celles effectuées avec un écartement de deux espacements sont de rang 2, etc. Les mesures sont présentées sous forme de coupes ou panneaux isovaleurs dont l'axe des abscisses correspond à la position le long du profil, et l'axe des ordonnées correspond au rang qui est une fonction de la profondeur (pseudo-profondeur). Ces coupes sont appelées pseudo-coupes de résistivité apparente. La mesure est généralement représentée au milieu du segment émetteur-récepteur. La profondeur d'investigation augmente avec le rang n .

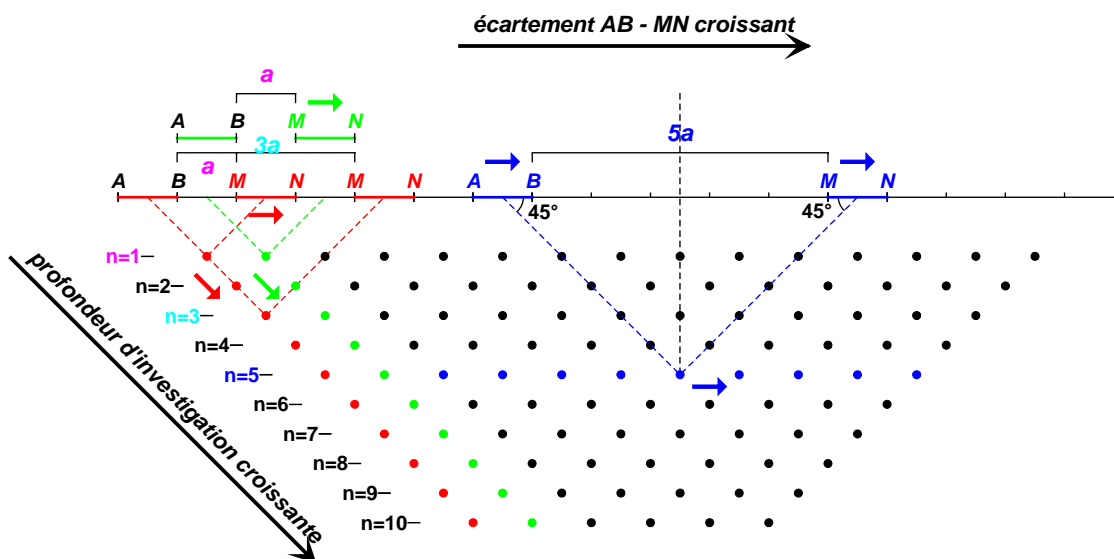


Figure 16 - Schéma de la procédure d'acquisition d'un panneau électrique dipôle-dipôle et de présentation sur une pseudo-coupe : les points sont les lieux de représentation des mesures.

L'inversion de la pseudo-coupe prend en compte l'ensemble des mesures et aboutit à une coupe, distribution continue des résistivités calculées le long du profil et en fonction de la profondeur.

2.2.3. Interprétation

Un traitement préliminaire des données se fait avec le logiciel X2IPI. Ce logiciel permet d'enlever facilement les données aberrantes (avec une RMS élevée) souvent liées à une électrode défailante. Il permet aussi d'atténuer les effets de la variation des résistances de prise.

Les pseudo-coupes sont interprétées par inversion de la résistivité apparente avec le logiciel RES2DINV (M.H. Loke). Ce logiciel est utilisé en configuration éléments finis et comporte des algorithmes de convergence perfectionnés. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme de coupe-profondeur de résistivité vraie.

Cette interprétation par inversion fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : caractéristiques électriques (résistivité vraie), géométrie et profondeur.

Même si la précision et la stabilité des inversions sont optimisées par des algorithmes de convergence très performants, en l'absence d'étalonnage (résistivité mesurée sur échantillons, profondeur des interfaces géoélectriques) les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (*i.e.* plusieurs solutions pour un même jeu de données). Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivité, épaisseur, profondeur) obtenus par d'autres moyens (forages, diagraphies).

2.3. MESURES HYDROGÉOLOGIQUES

2.3.1. Teneur en eau et porosité

La teneur en eau et la porosité des échantillons sont mesurées par pesée. L'échantillon est pesé à son état initial, à saturation et après avoir été séché au four avec une balance haute précision. La porosité (w) et la teneur en eau (θ) des échantillons se calculent selon les équations suivantes, en considérant que la masse volumique de l'eau vaut 1 kg/L :

$$w = \frac{m_s - m_d}{V_{éch.}} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{m_i - m_d}{V_{éch.}} \quad (7)$$

avec : w la porosité,
 θ la teneur en eau,
 m_s la masse de l'échantillon saturé en eau (en gramme),
 m_d la masse de l'échantillon séché (en gramme),
 m_i la masse de l'échantillon à son état initial (en gramme),
 $V_{éch}$ le volume de l'échantillon (en mL).

Le volume de l'échantillon peut facilement être calculé à partir des dimensions du tube cylindrique qui l'entoure.

2.3.2. Perméabilité

La perméabilité des échantillons a été mesurée avec un perméamètre à charge variable (fig. 17b). Le principe du perméamètre à charge variable est illustré sur la figure 17a.

La perméabilité de l'échantillon se calcule de la façon suivante :

$$K = \frac{A_{burette}}{A_{éch.}} \cdot \frac{L}{t_2 - t_1} \cdot \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad (8)$$

avec : K la perméabilité (m/s),
 $A_{burette}$ la section de la burette (m²),
 $A_{éch}$ la section de l'échantillon (m²),
 L la longueur de l'échantillon (m),
 $t_2 - t_1$ le temps (s) requis pour que la charge descende de h_1 à h_2 (m).

En traçant sur un graphique $\ln(h)$ en fonction du temps, on obtient une droite dont la pente est proportionnelle à K .

Il est à noter que pour des perméabilités supérieures à $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, il est préférable d'utiliser un perméamètre à charge constante.

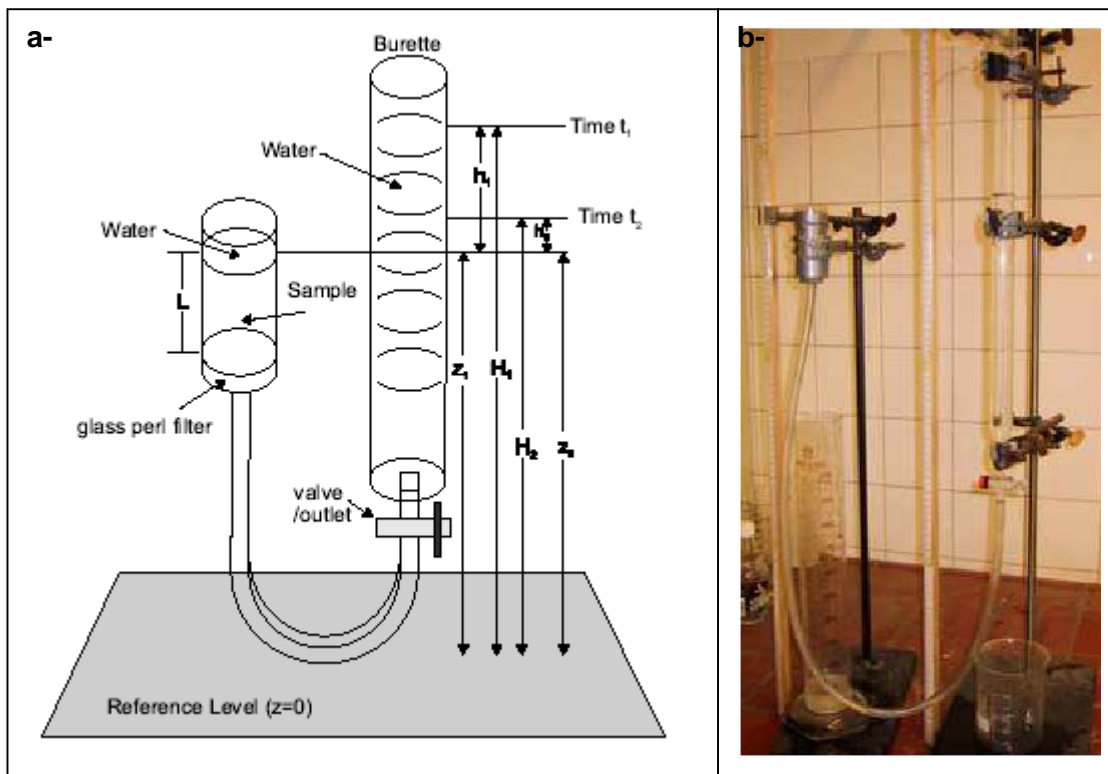


Figure 17 - Perméamètre à charge variable. a- Principe. b- Appareil (d'après Kooman, 2003).

2.4. MOYENS MIS EN ŒUVRE

2.4.1. Calendrier et personnel

Les travaux ont été effectués durant plusieurs campagnes de mesures, dont le déroulement est récapitulé dans le tableau 2.

Campagne	Mesures effectuées	Equipes
Mai 2003	Répétitivité des mesures RMP : 15 sondages (Girard <i>et al.</i> , 2003)	BRGM
Octobre 2003	Deux profils électriques (DC2 et DC7) Mesures RMP avec boucles séparées (Hertrich <i>et al.</i> , 2004)	BRGM, IRD, TU-Berlin, et ITC
Décembre 03	Deux profils électriques (DC1 et DC3)	BRGM
Mars 2004	Trois profils électriques (DC4, DC5, et DC6) Mesure de T1 par sondages RMP	BRGM et TU-Berlin
Mai 2004	Deux forages	ANTEA
	Deux sondages RMP	BRGM et TU-Berlin
	Mesures RMN et hydrologiques en laboratoire	

Tableau 2 - Calendrier des travaux.

Les personnes qui ont participé à ces travaux sont les suivantes :

- Jean-François Girard (BRGM/ARN),
- Anatoly Legchenko (IRD),
- Marian Hertrich (TU-Berlin),
- Martina Braun (TU-Berlin),
- Jean Roy (ITC),
- Marie Boucher (BRGM/ARN),
- Alexis Gutierrez (BRGM/EAU),
- Jean-Michel Baltassat (BRGM/ARN),
- Martin Müller (TU-Berlin).

2.4.2. Équipement

Pour les sondages RMP :

- un système RMP IRIS-instrument Numis Plus pour les campagnes de 2003 et Numis Lite pour les campagnes de 2004 ;
- un magnétomètre à proton ;
- 1 200 m de câble d'injection et de mesure ;
- un « switch box » pour l'antenne de compensation ;
- un capteur de bruit électromagnétique ;
- 3 batteries 12 V ;
- 2 ordinateurs portables ;
- une chenillette ;
- un véhicule.

Pour les panneaux électriques :

- un résistivimètre SYSCAL R2 ;
- 4 multinodes de 16 canaux ;
- des électrodes en acier inoxydable ;
- un ordinateur portable ;
- un véhicule.

Pour les forages :

- une foreuse « géoprobe » (fig. 18a) ;
- 14 tubes en plastiques (fig. 18b) de 3,5 cm de diamètre extérieur avec un système de retenu (fig. 18c) ;
- des capsules hermétiques pour fermer les tubes.

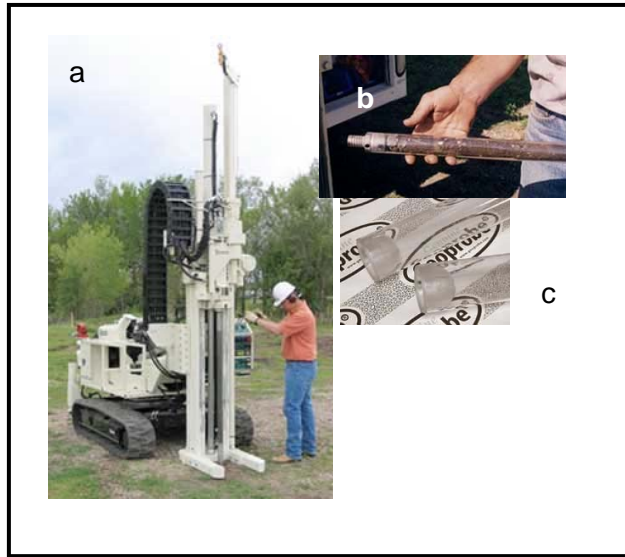


Figure 18 - Matériel de forage « géoprobe ».

3. Travaux réalisés

3.1. LOCALISATION

Le site test de Saint-Cyr-en-Val se situe au sud d'Orléans, au lieu-dit Mon Idée (fig. 19).

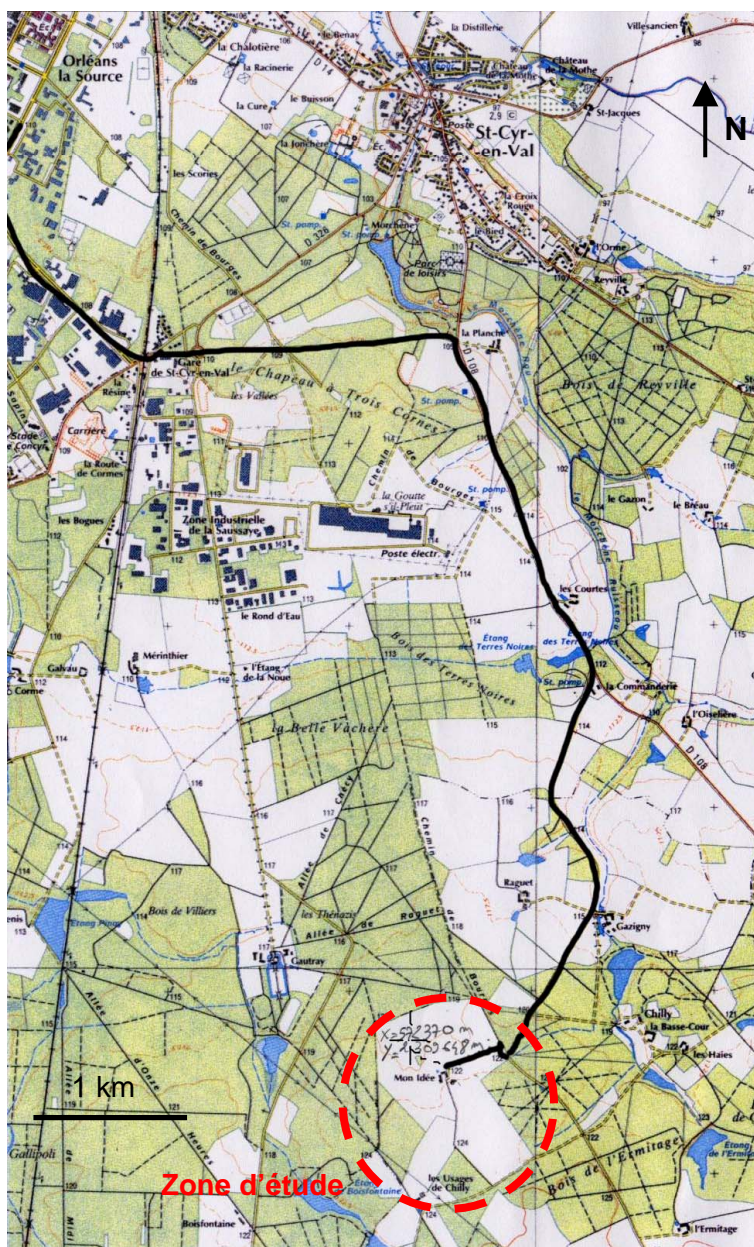


Figure 19 - Localisation du site.

3.2. PANNEAUX ÉLECTRIQUES

Six panneaux électriques ont été réalisés, afin de connaître la structure électrique du site test (fig. 20). Le premier profil (DC2) a été fait de façon à traverser le site de part en part sur la plus grande diagonale. Ce panneau ayant montré une anomalie conductrice au nord-est, deux sondages parallèles (DC1 et DC3) et un perpendiculaire (DC5) ont été effectués pour connaître l'extension de cette anomalie.

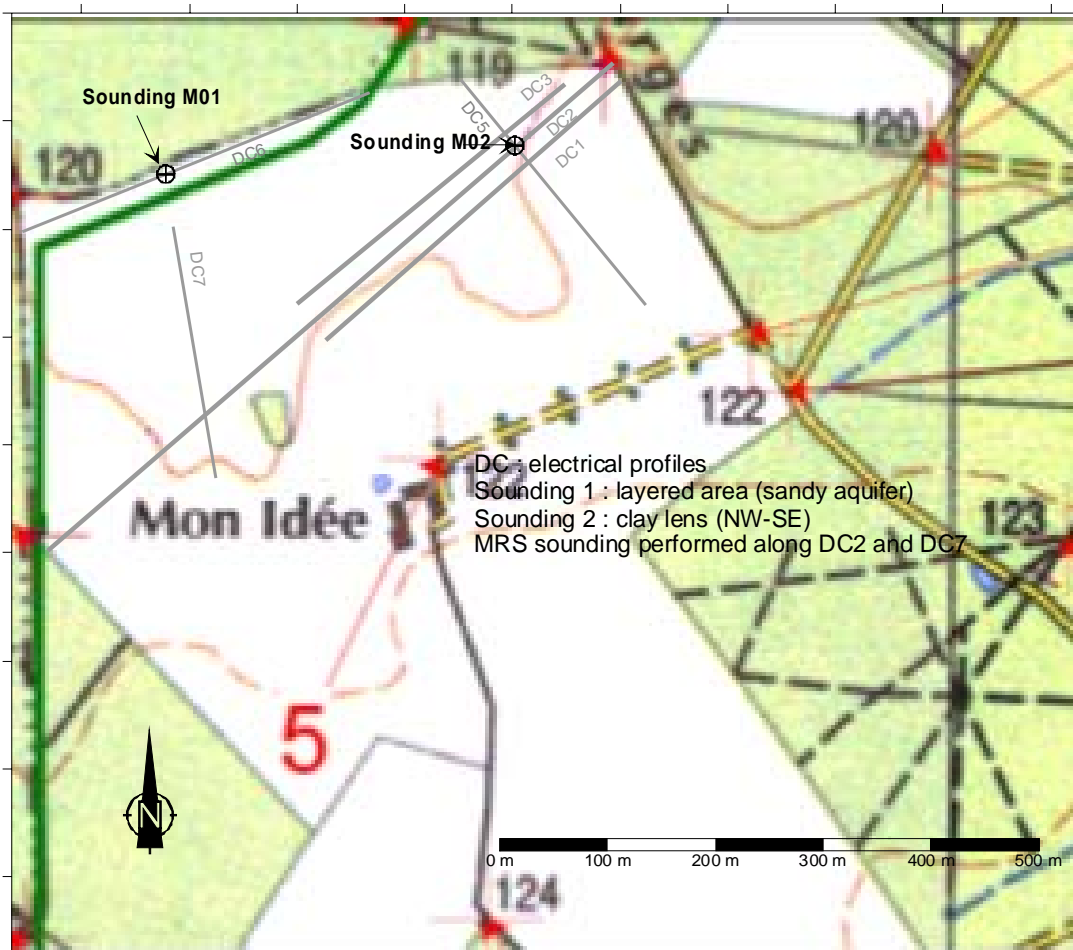


Figure 20 - Localisation des mesures.

Au sud-ouest, le profil DC2 indiquait une structure électrique tabulaire 1D. Les panneaux DC6 et DC7 ont été implantés, afin de vérifier que le terrain était tabulaire à l'ouest. L'emplacement du profil DC6 a aussi été choisi en vue du forage qui devait se faire préférentiellement en limite de propriété, donc à l'orée du bois.

Les principales caractéristiques de ces panneaux électriques sont résumées dans le tableau 3.

Profil	Date	Nbre d'électrodes	Dispositifs	PP	Nbre de pts	Qualité
DC1	dec. 03	64	Dipôle-dipôle 5 m 10 m	-	835	Bonne
DC2	oct. 03	112	Dipôle-dipôle 10 m	PP	329	Bonne
		112	Dipôle-dipôle 5 m	-	1045	
		64	Dipôle-dipôle 10 m	PP	110	
		64	Wenner-Schlumberger	-	600	
DC3	dec. 03	64	Dipôle-dipôle 5 m 10 m	-	835	Bonne
DC5	mars 04	64	Dipôle-dipôle 5 m 10 m	-	835	Ininter-prétable
		32	Dipôle-dipôle 5 m 10 m	-	323	
		32	Wenner-Schlumberger	-	218	
DC6	mars 04	64	Dipôle-dipôle 5 m 10 m	-	835	1 électrode défailante
DC7	oct. 03	48	Dipôle-dipôle 5 m 10 m	PP	579	
		48	Wenner-Schlumberger	-	448	

Tableau 3 - Caractéristiques des panneaux électriques.

3.3. PRÉLÈVEMENTS

Deux sondages ont été réalisés sur le site test de Saint-Cyr-en-Val le 10 mai 2004 avec une sondeuse Géoprobe, afin d'extraire des carottes avec le minimum de perturbation de la teneur en eau. La sondeuse Géoprobe est un carottier par battage conduisant à prélever des échantillons de sol meuble dans des tubes transparents en PETG de diamètre extérieur 3,5 cm. Les forages avaient pour objectif une reconnaissance géologique du terrain et l'expérimentation en laboratoire.

La localisation de ces forages est indiquée sur la figure 20. L'emplacement des forages a été choisi en fonction de la structure électrique des terrains, du bruit électromagnétique ambiant et pour leurs conditions d'accès.

Ainsi, le forage M01 a été effectué sur une structure tabulaire 1D dans un environnement avec peu de bruit électromagnétique, favorable aux sondages RMP. L'implantation d'un piézomètre permanent étant prévu au même endroit, la position du forage a été choisie de manière à être la moins gênante pour le propriétaire du champ c'est-à-dire en bordure de champ à la limite de la forêt.

Le forage M02 a été réalisé à l'aplomb d'une anomalie électrique conductrice quasi 2D.

Initialement, il était prévu d'extraire des échantillons jusqu'à 20 m de profondeur sur les deux forages. Mais les forages ont été arrêtés à 15 et 4 m, car l'appareil géoprobe n'est pas adapté à l'extraction de matériau non consolidé dans la nappe. Pour la même raison, la foration a été réalisée de manière destructive entre 8 et 13,5 m sur le forage M01.

In fine, ce sont 13 tubes de 1 m de long avec un diamètre intérieur de 3,1 cm qui ont été récupérés. De part la compaction, les deux tubes provenant du premier mètre de sol n'étaient remplis que sur 55 cm.

3.4. SONDAGES RMP

De nombreux sondages RMP avaient d'ores et déjà été effectués sur le site test de Saint-Cyr-en-Val au cours d'études précédentes (*i.e.* Girard *et al.*, 2003 ; Hertrich *et al.*, 2004). Dans le cadre de cette étude, des mesures complémentaires ont été réalisées afin d'avoir, d'une part, une bonne connaissance du temps de relaxation T_1 (paramètre jusqu'alors peu étudié sur ce site) et d'autre part, un sondage au moment du forage qui pourra être directement comparé aux mesures en laboratoire.

Une campagne de mesures a donc été organisée en mars 2004 pendant laquelle 12 sondages ont été réalisés à l'emplacement du forage M01 avec l'appareil Numis Lite. Mais suite à une défaillance technique de l'appareil, les résultats obtenus ne sont pas interprétables. Les sondages présentés dans ce rapport sont issus des études précédentes.

3.5. MESURES EN LABORATOIRES

Les échantillons ont été envoyés au laboratoire de géophysique appliquée de l'université technique de Berlin juste après leur extraction afin d'être analysés dans des conditions les plus proches possibles des conditions *in situ*. Deux types de mesures y ont été faites : des mesures « en continu » à intervalle régulier et des mesures sur quelques échantillons sélectionnés.

3.5.1. Mesures « en continu »

Les mesures « en continu » ont été faites sur les échantillons de 1 m de long pour obtenir un log des propriétés hydrogéophysiques du sous-sol. Ce log sera à comparer avec les résultats des sondages RMP effectués sur le terrain.

La teneur en eau (RMN) et le temps de relaxation T_2 ont été mesurés tous les 10 cm sur les deux forages. Les mesures du temps de relaxation T_1 , demandant plus de temps, ont été faites avec un intervalle de 50 cm sur le forage M01. Les valeurs obtenues étant très proches des valeurs de T_2 , il n'a pas été jugé nécessaire de multiplier les mesures de T_1 .

3.5.2. Mesures sur échantillons

Une étude sur des petits échantillons a été réalisée, afin de comparer les mesures RMN avec les mesures hydrologiques usuelles. Sept échantillons de 5 cm de haut ont été découpés dans les tubes de 1 m : quatre proviennent de M01 et trois de M02. Sur ces échantillons ont été mesurés à l'état initial et à l'état saturé : la masse, la teneur en eau RMN, les temps de relaxation T_1 et T_2 . Les échantillons ont ensuite été séchés au four pendant 3 semaines puis pesés.

Le diamètre des tubes ne correspondant pas à celui du perméamètre, il n'a pas été fait de mesure de conductivité hydraulique sur ces échantillons. Cependant, un échantillon de sable (appelé par la suite 695-700) a été extrait pour être mis dans un tube du bon

diamètre (c'est-à-dire de diamètre extérieur 4 cm). Sur cet échantillon remanié, la teneur en eau RMN, les temps T_1 et T_2 , ainsi que la perméabilité, ont été mesurés à saturation.

4. Résultats et discussion

4.1. PROFILS ÉLECTRIQUES

Les panneaux électriques DC1, DC2 et DC3 (fig. 21 et 22) ont mis en évidence une anomalie conductrice quasi 2D orientée NW-SE. Le profil DC3 montre que cette anomalie sans doute caractéristique d'une lentille argileuse s'estompe au nord-ouest. Les panneaux DC6 et DC7 (fig. 21 et 23) montrent que le terrain situé sur la partie ouest du site test est tabulaire.

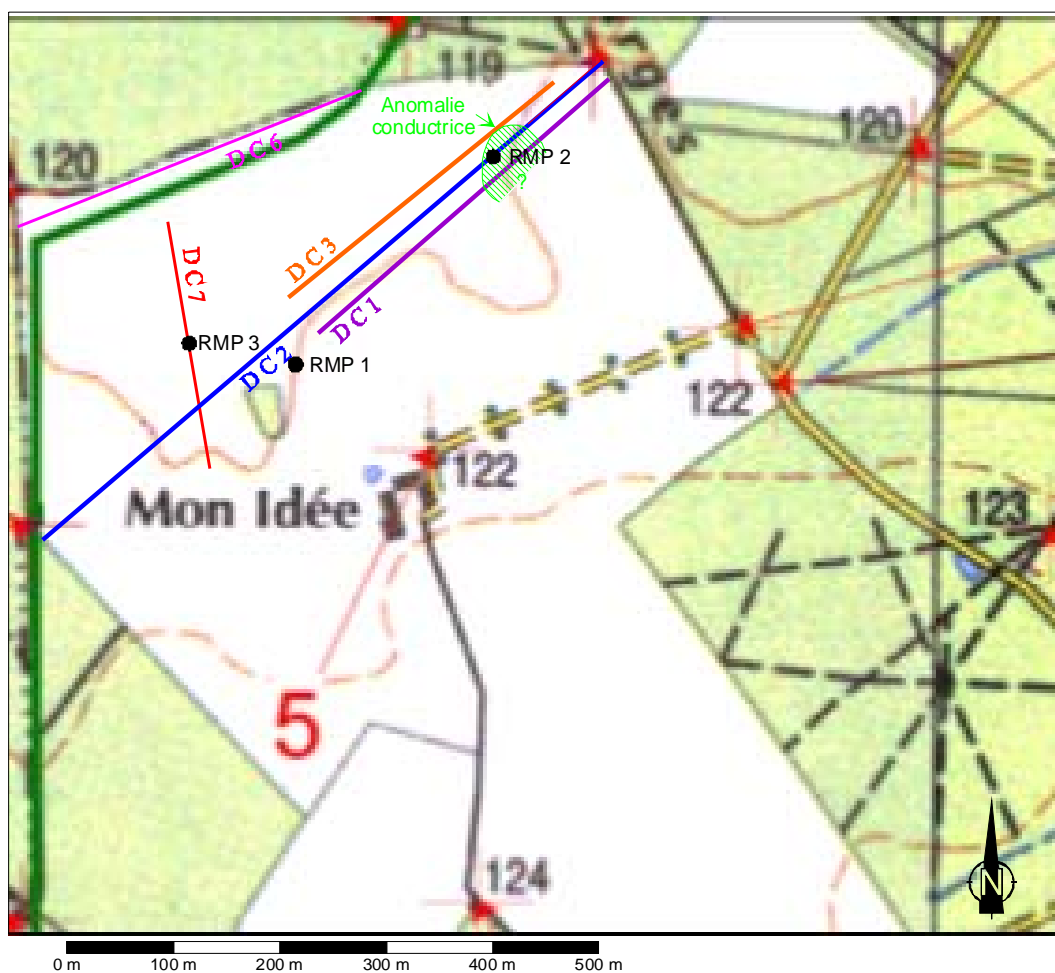


Figure 21 - Positions des profils électriques.

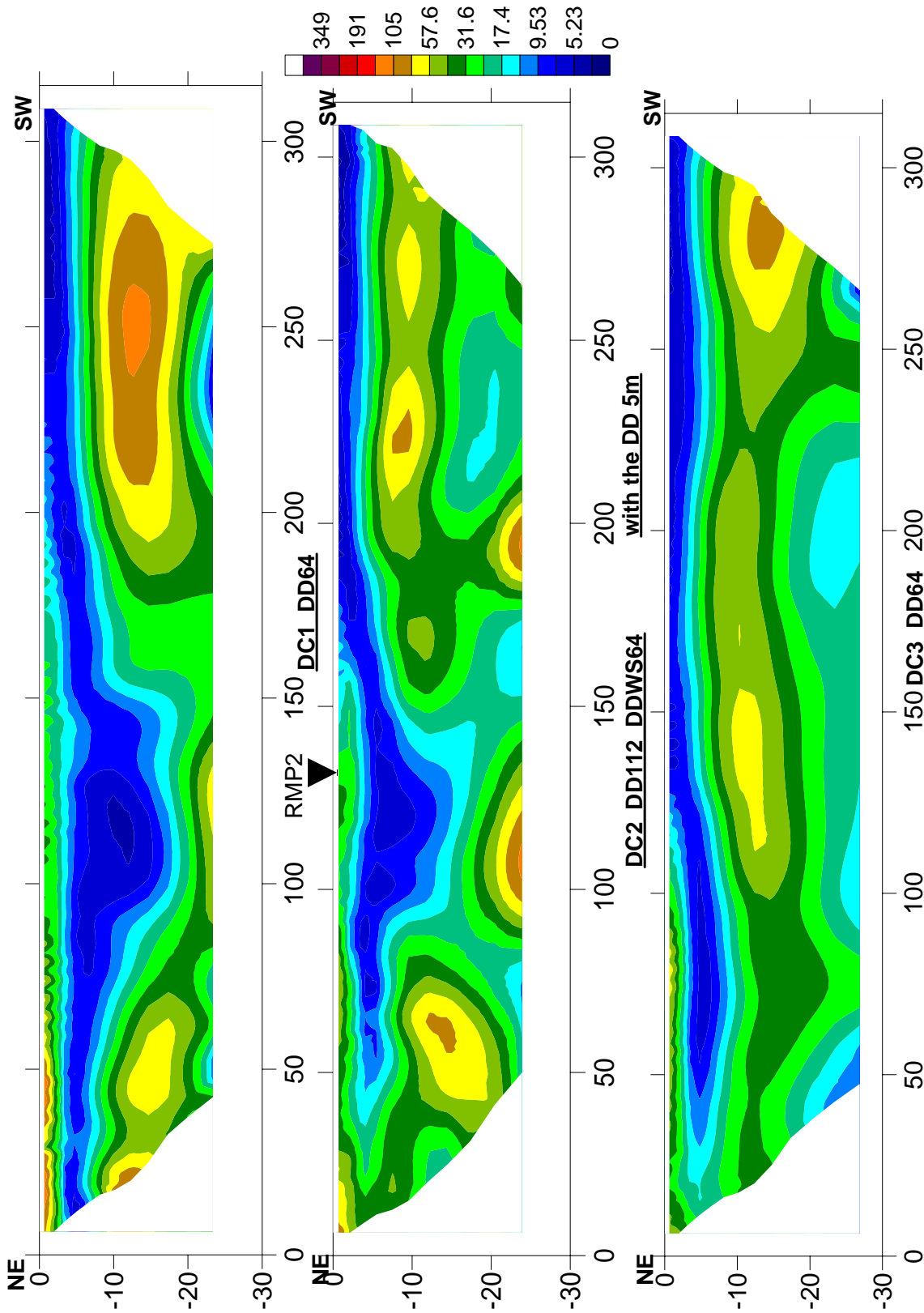


Figure 22 - Panneaux électriques DC1, DC2 et DC3.

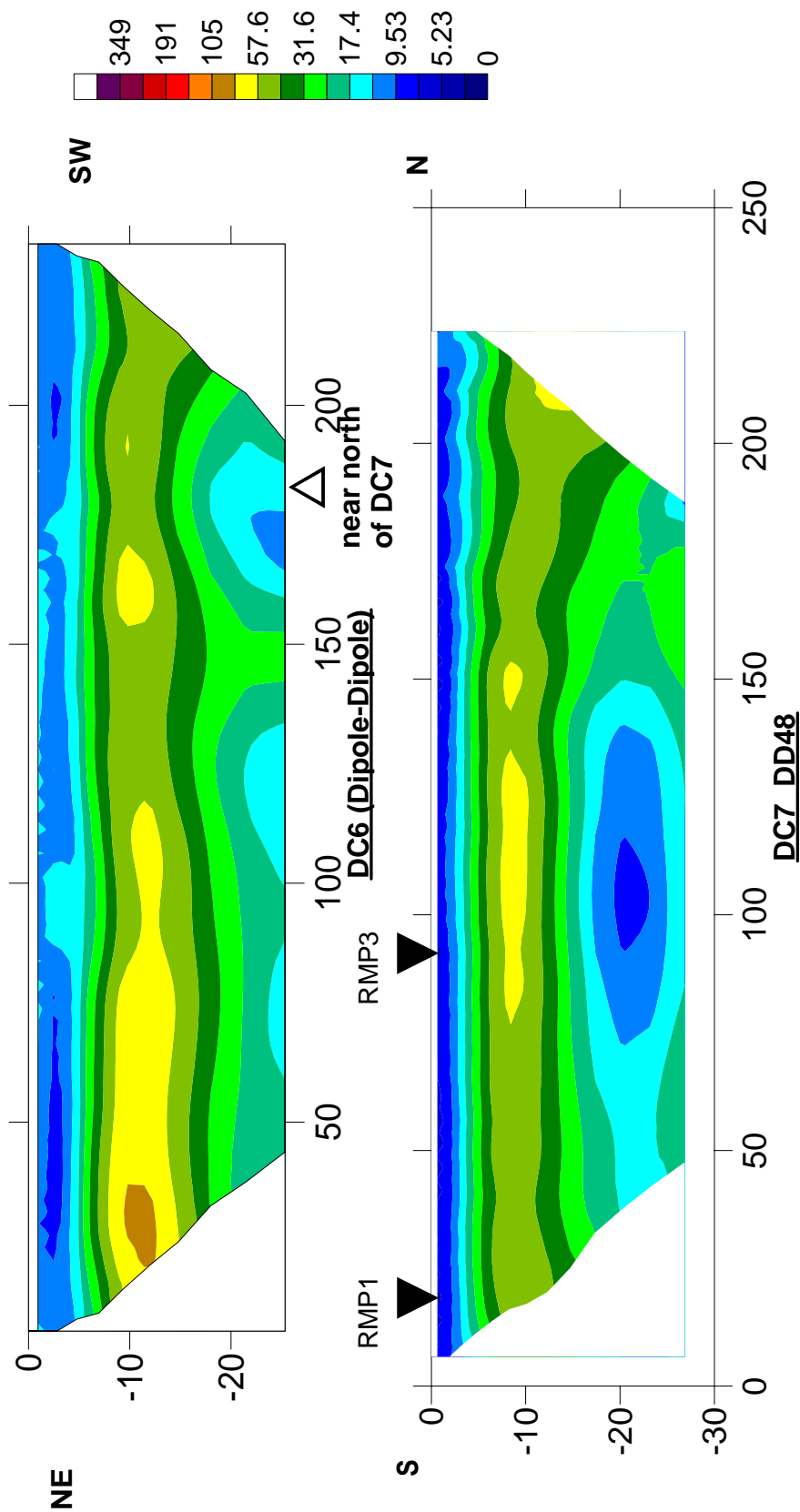


Figure 23 - Panneaux électriques DC6 et DC7.

4.2. LOG GÉOLOGIQUE

Les données régionales montrent que le terrain se situe sur les formations des sables et argiles de Sologne. Ces formations sont constituées d'alternance de sables souvent grossiers, d'argiles et d'argiles sableuses. Les niveaux sableux de ces alternances constituent les aquifères.

Les logs géologiques (fig. 24 et 25) ont été levés à partir des échantillons des forages. Les niveaux piézométriques mesurés juste après la réalisation des forages sont représentés sur les logs géologiques. Le niveau mesuré à 1,5 m sur M01 est difficile à interpréter car le forage traverse deux niveaux sableux aquifères. Lors de la prochaine campagne de foration, il faudra isoler le deuxième aquifère, afin de mieux comprendre le fonctionnement de ce système et afin de savoir si les niveaux sableux sont en équilibre hydraulique ou sont indépendants.

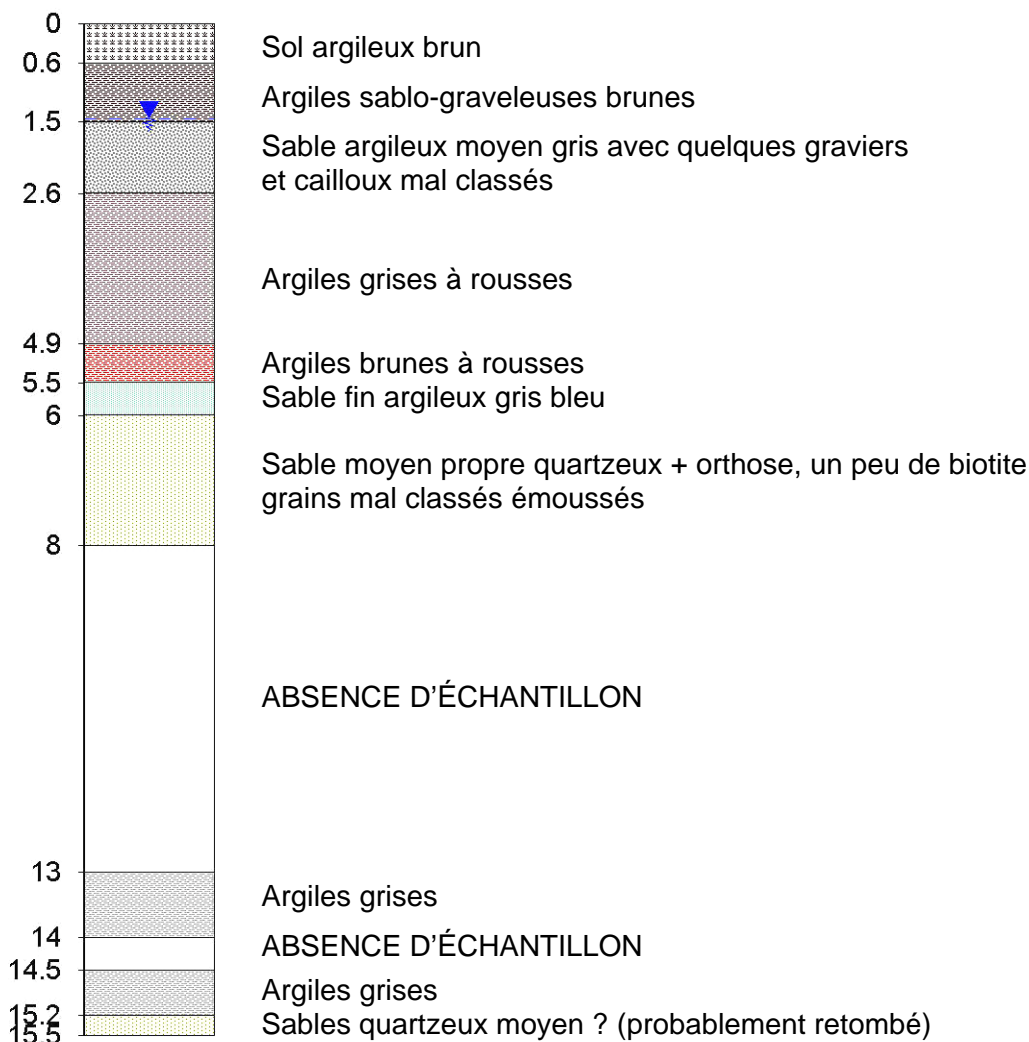


Figure 24 - Géologie du forage M01.

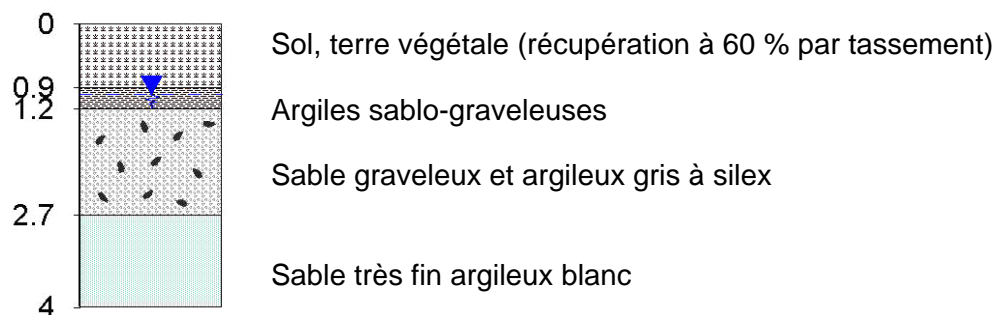


Figure 25 - Géologie du forage M02.

4.3. SONDAGES RMP

Sur la figure 26, trois sondages réalisés au cours d'études RMP (Girard *et al.*, 2003 ; Hertrich *et al.*, 2004) à différents endroits du site sont mis en rappel pour avoir un ordre de grandeur de la réponse RMP sur l'ensemble du site. Les positions de ces sondages sont indiquées sur la figure 21.

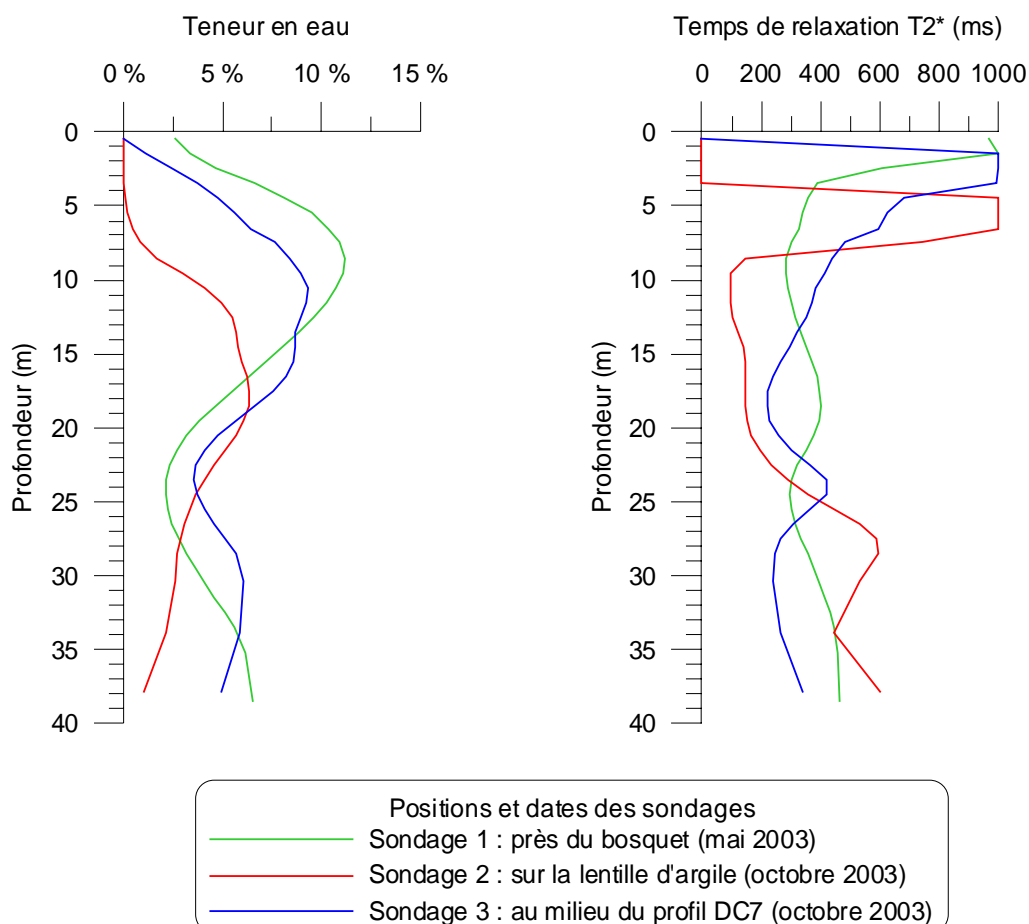


Figure 26 - Résultats d'interprétation de sondages antérieurs à l'étude.

Les sondages n° 1 et 3 indiquent un aquifère entre 0 et 20 m, une zone perméable jusqu'à 25-30 m, puis un deuxième aquifère. L'augmentation des teneurs en eau avec la profondeur dans le premier aquifère est progressive. Les sondages RMP ne permettent donc pas de dissocier les 2 aquifères sableux mis en évidence par le forage M01, soit car le niveau argileux intermédiaire n'est pas suffisamment épais, soit car ce niveau d'argile n'est pas continu. Dans le second cas, les résultats issus des sondages RMP représentent des caractéristiques moyennées.

Si par contre, il s'avère que le niveau d'argile est continu, il faudra essayer de distinguer les deux aquifères en utilisant par exemple une antenne de mesure plus petite.

Le sondage n° 2 indique une absence d'eau libre jusqu'à 5 m de profondeur et très peu d'eau jusqu'à 10 m. Ceci est en accord avec la présence d'une lentille d'argile observée sur les panneaux électriques. L'aquifère entre 1,2 et 2,7 m repéré sur le forage M02 n'est pas visible sur le sondage RMP. Comme ce sondage a été effectué en octobre, c'est-à-dire à la fin de l'étiage, il est probable que la quantité d'eau présente dans cet aquifère ait été insuffisante au moment du sondage pour être détectée.

4.4. LOG RMN

La teneur en eau RMN et le temps de relaxation T_2 ont été mesurés avec un intervalle de 10 cm le long des deux forages. De plus, le temps de relaxation de T_1 a été mesuré tous les 50 cm sur le forage M01. Les résultats de ces mesures sont mis en comparaison avec la géologie des terrains dans les figures 27 et 28.

Les résultats montrent que les paramètres RMN mesurés présentent une bonne corrélation avec la géologie. En effet, les variations importantes de teneur en eau et de temps de relaxation ont lieu en correspondance avec les changements géologiques.

Dans la partie superficielle des logs, les teneurs en eau d'environ 25 % et les temps de relaxation T_2 relativement élevés peuvent s'expliquer par les précipitations pendant les quelques jours qui ont précédé le forage. La diminution rapide de ces teneurs en eau et des temps de décroissance illustrerait dans ce cas un profil d'infiltration.

Les temps de relaxation très courts du forage M02 pourraient expliquer l'absence de signal RMP à l'aplomb de la lentille d'argile (sondage 2 de la figure 26). Mais, les valeurs de temps de relaxation du sondage M01 sont d'un ordre de grandeur inférieures à celles mesurées sur les sondages RMP (fig. 26). Plusieurs hypothèses sont émises pour expliquer ces temps de relaxation mesurés en laboratoire très court :

- il est possible que lors de leur extraction, les échantillons aient perdu leur eau mobile visible en RMP. Dans ce cas, la teneur en eau mesurée en laboratoire correspond à l'eau liée et l'eau capillaire avec une constante de temps courte, alors que sur le terrain, les sondages RMP détectent l'eau gravifique avec une constante de temps longue. Cette hypothèse pourra être vérifiée avec les échantillons qui ont été saturés ultérieurement (§ 4.5.) ;

- la différence de temps de relaxation peut aussi être liée à la compaction lors du forage ;
- les expériences de relaxométrie (Kimmich *et al.*, 2004) montrent que le temps de relaxation T_1 dans des milieux poreux dépend de l'intensité du champ statique, et donc de la fréquence de Larmor. Cependant, les résultats obtenus sur des échantillons calcaires (Godefroy *et al.*, 2001 ; Korb *et al.*, 2003) indiquent que le temps de relaxation augmente avec la fréquence ;
- les espèces paramagnétiques ont une influence sur les temps de relaxation (Foley *et al.*, 1996 ; Bryar *et al.*, 2000). Cette influence est plus ou moins importante selon le champ statique utilisé, mais n'est pas liée de manière simple à la fréquence de Larmor (Kenyon *et al.*, 1995). Une étude complémentaire sur la susceptibilité des échantillons et sur son influence sur le temps de relaxation est donc nécessaire.

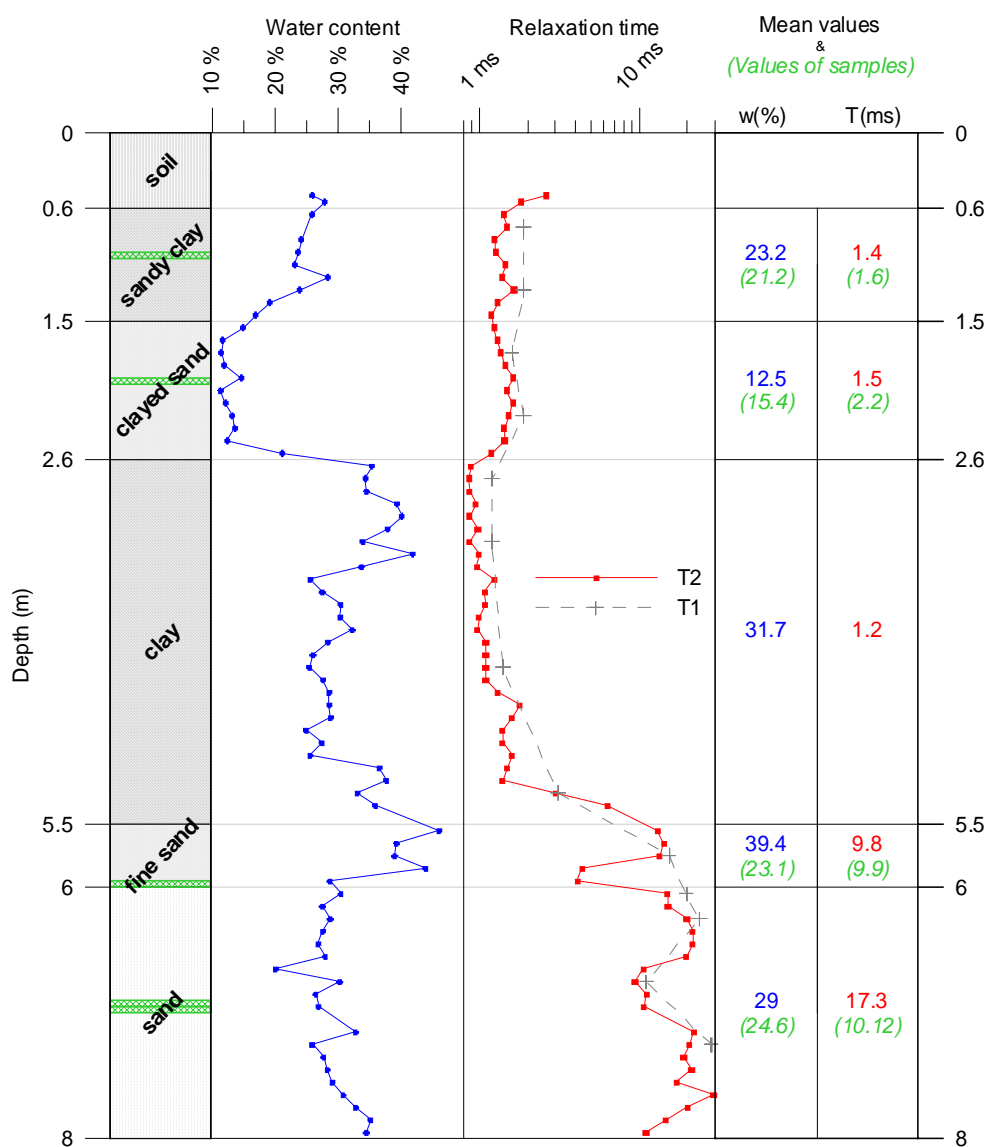


Figure 27 - Teneur en eau, temps de décroissance et géologie simplifiée du forage M01.

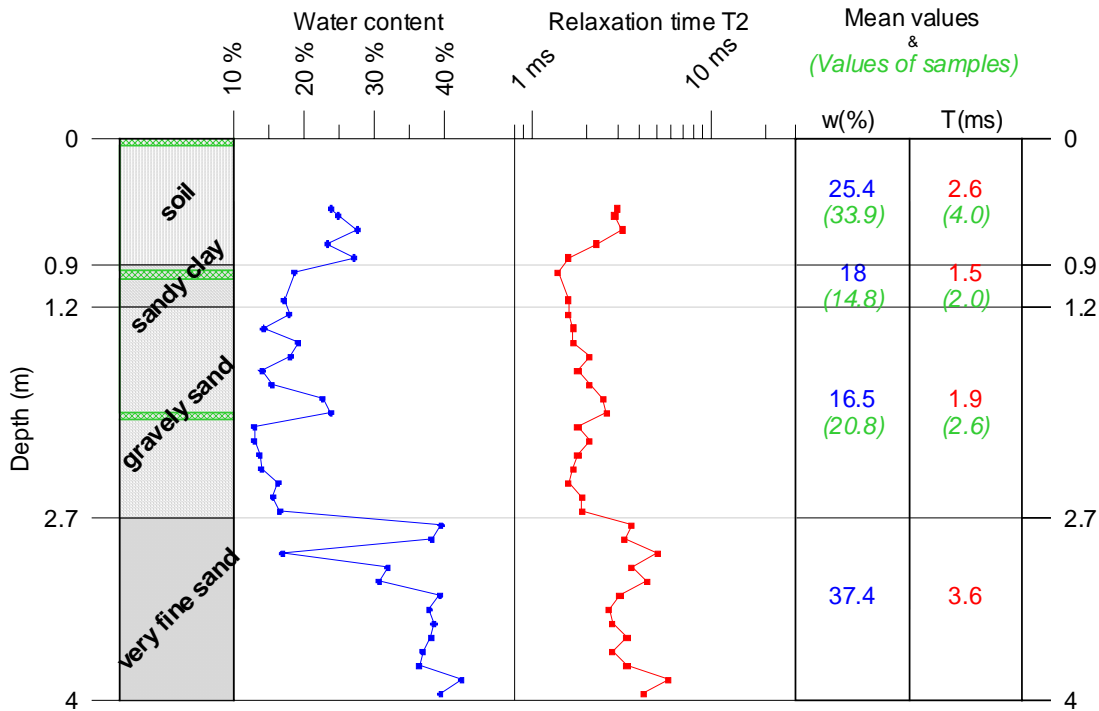


Figure 28 - Teneur en eau, temps de décroissance et géologie simplifiée du forage M02.

4.5. MESURES SUR ÉCHANTILLONS

Huit échantillons ont été prélevés dans différents faciès géologiques, afin d'établir une méthodologie d'étude des mesures RMN en comparaison avec des mesures hydrologiques « classiques ». La provenance des échantillons est indiquée en vert sur les logs géologiques simplifiés des figures 27 et 28.

Aucun échantillon n'a été pris dans les formations très argileuses car saturer des argiles en eau peut demander plusieurs jours, mais reste réalisable s'il est prévu suffisamment de temps pour le faire.

4.5.1. Teneur en eau et porosité

Les teneurs en eau des échantillons ont été mesurées par RMN à l'état initial et à saturation. La teneur en eau à saturation correspond à la porosité. Les valeurs obtenues sont comparées aux résultats des pesées dans la figure 29. Le paramètre RMS entre les teneurs en eau mesurées par RMN et celles mesurées par pesées (équation 9) est de 3,4 %.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_{RMN} - w_{pesée})^2}{N}} \quad (9)$$

Il est à noter que, dans le cas des échantillons saturés avec une porosité élevée, les valeurs obtenues par RMN sont sous-estimées par rapport aux mesures obtenues par la méthode des pesées (fig. 29). Il est possible que cette sous-estimation soit liée à une fenêtre de mesure trop courte (cf. ann. 1).

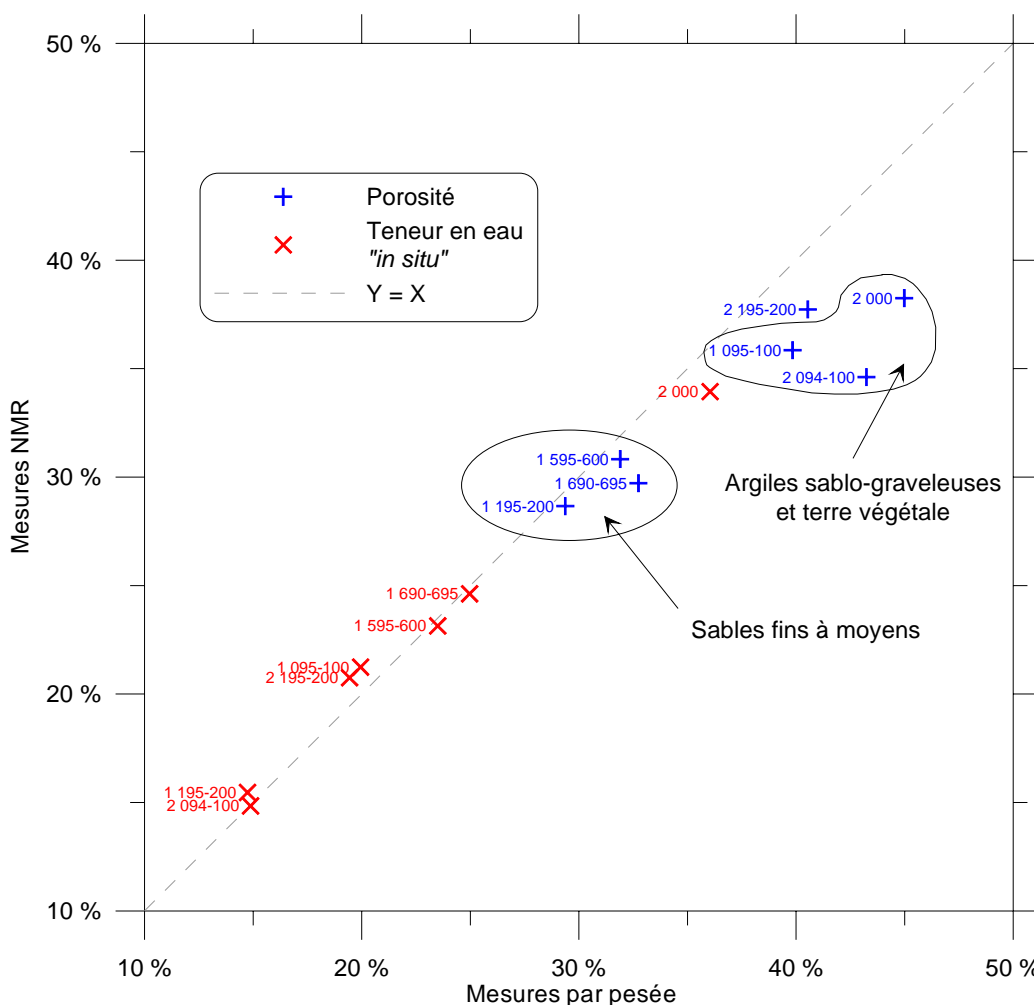


Figure 29 - Teneurs en eau et porosités mesurées par RMN et par pesée sur échantillons.

4.5.2. Temps de relaxation T_1 et T_2

Les temps de relaxation T_1 et T_2 ont été mesurés avant et après saturation. En général, il n'est pas possible d'interpréter le signal RMN avec une seule valeur de temps de relaxation. Dans ce cas, deux méthodes d'inversion sont utilisées (fig. 30) : une distribution continue des temps de relaxation et une distribution discrète donnant un nombre limité de temps de relaxation (entre 2 et 4).

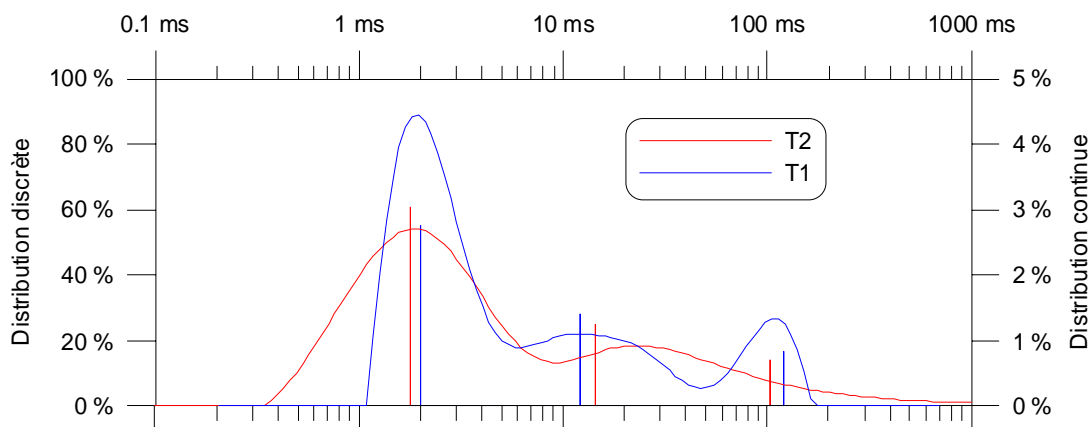


Figure 30 - Exemple de distribution continue et discrète des temps de relaxation sur un échantillon saturé.

Pour des raisons pratiques, il a été choisi d'utiliser une distribution discrète des temps de relaxation pour interpréter les données. Tous les résultats d'inversion sont donnés en annexe.

Les résultats pour les temps de relaxation T_2 sont présentés sur les figures 32 et 33. On remarque que la saturation des échantillons provoque l'apparition d'une nouvelle porosité avec un temps de relaxation élevé (entre 100 et 300 ms). Ce temps de relaxation est sans doute mal estimé à cause d'une fenêtre de mesure trop courte (cf. ann. 2). Cependant, la quantité d'eau à fort temps de relaxation (3 à 4 %) correspond à peu près à la quantité d'eau mesurée par sondage RMP sur les huit premiers mètres. Il est donc possible que cette eau à fort temps de relaxation qui apparaît lorsqu'on sature l'échantillon correspond à de l'eau présente sur le terrain mais perdue lors de l'extraction. Dans ce cas, l'eau visible en RMP serait l'eau perdue lors de l'extraction.

Mais, il est probable qu'au moins une partie de cette eau à fort temps de relaxation soit de l'eau située entre l'échantillon et la paroi du tube qui l'entoure, notamment pour les échantillons plus argileux et donc plus compactés. Par ailleurs, pour des raisons techniques, l'échantillon et le tube qui le maintient ont été mis dans un tube de diamètre supérieur (fig. 31). Il est donc aussi vraisemblable qu'une partie de l'eau à fort temps provienne de l'eau située entre les deux parois. Or ce volume n'est pas négligeable puisqu'il représente 3 mL. Le volume de l'échantillon étant de 41 mL, si l'espace entre les deux parois était rempli d'eau, la teneur en eau à saturation de l'échantillon serait augmentée de 7 %.

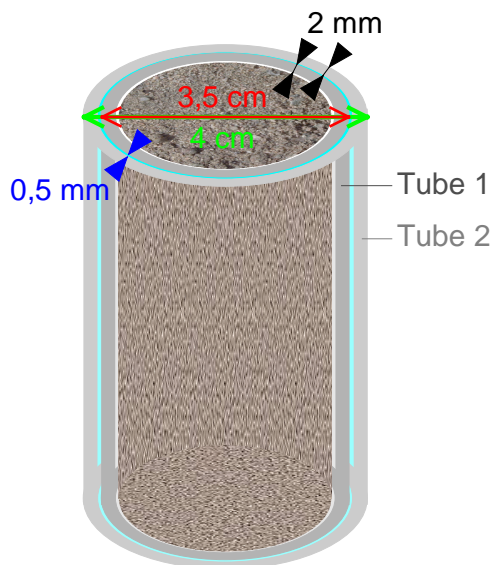


Figure 31 - Schéma d'un échantillon.

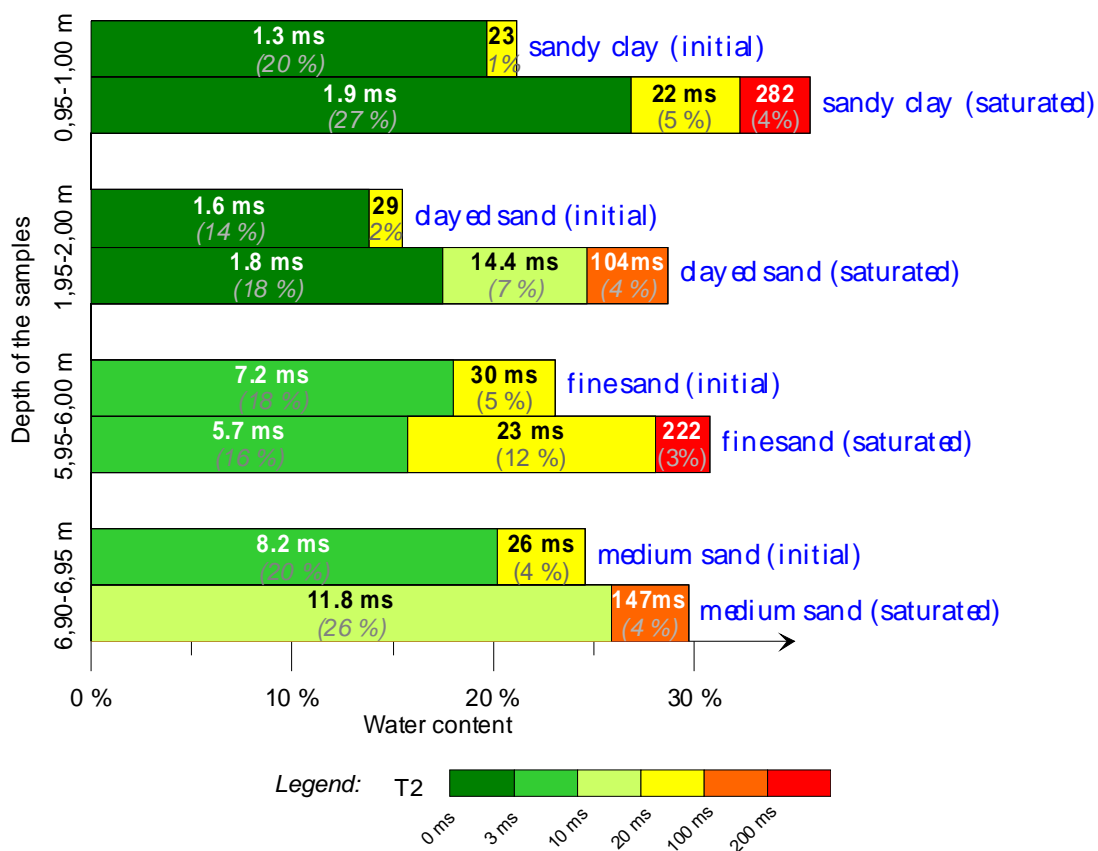


Figure 32 - Temps de décroissance T_2 dans le forage M01.

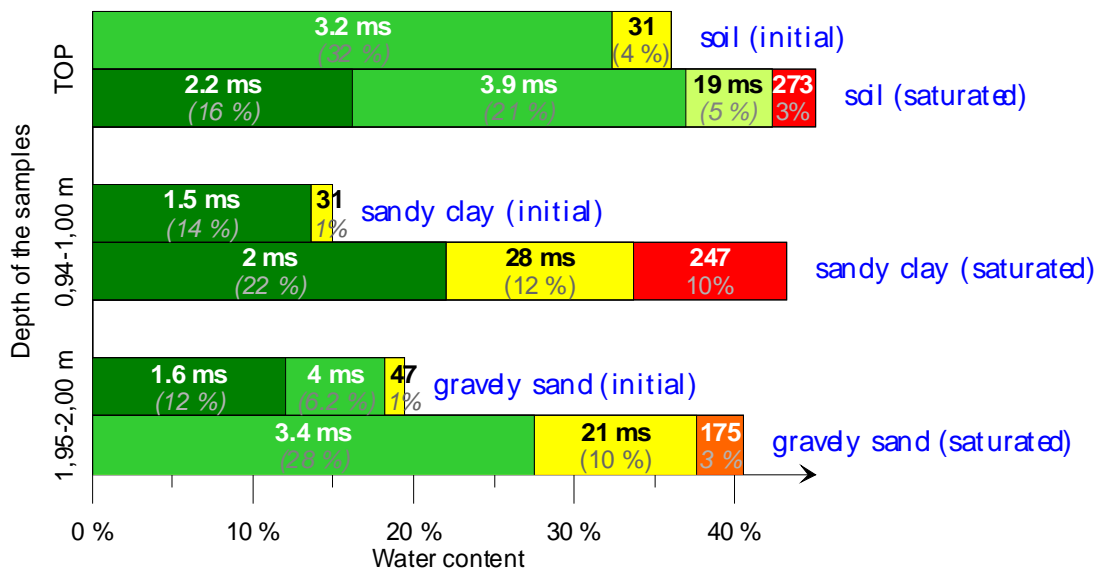


Figure 33 - Temps de décroissance T_2 dans le forage M02.

Les mesures systématiques des temps de relaxation T_1 et T_2 sur les échantillons initiaux et saturés peuvent être utilisées pour vérifier l'hypothèse $T_1 \approx T_2$. Si cette hypothèse est vérifiée, il sera possible de comparer directement les mesures de T_2 en laboratoire (plus rapides que celles de T_1) avec les mesures de terrain de T_1 .

Les résultats des mesures RMN présentés sous la forme de spectre de temps de relaxation ont été moyennés de telle sorte que chaque échantillon soit caractérisé par un seul T_1 et un seul T_2 . Par analogie avec des milieux à perméabilités multiples (de Marsily, 1981), il a été choisi d'attribuer aux échantillons la moyenne géométrique pondérée des temps de relaxation.

Le coefficient de corrélation entre T_1 et T_2 est de 99,85 %, ce qui signifie que T_1 est bien proportionnel à T_2 . La relation entre T_1 et T_2 ne dépend pas ici de la géologie. Cependant, on peut voir sur la figure 34 que T_1 est toujours légèrement supérieur à T_2 ce qui est en accord avec la théorie. Il a donc été calculé le rapport entre T_1 et T_2 :

$$r = \frac{1}{N} \sum_i \frac{T_{1i}}{T_{2i}} = 1,147 \quad (10)$$

avec T_{1i} et T_{2i} les temps de relaxation T_1 et T_2 de l'échantillon i et N le nombre d'échantillons. La relation $T_1 = 1,147.T_2$ est représentée par la pente de la droite continue sur la figure 34. Cette relation ne peut être généralisée facilement car elle dépend du champ magnétique utilisé et des caractéristiques paramagnétiques des échantillons (Müller et al., 2005).

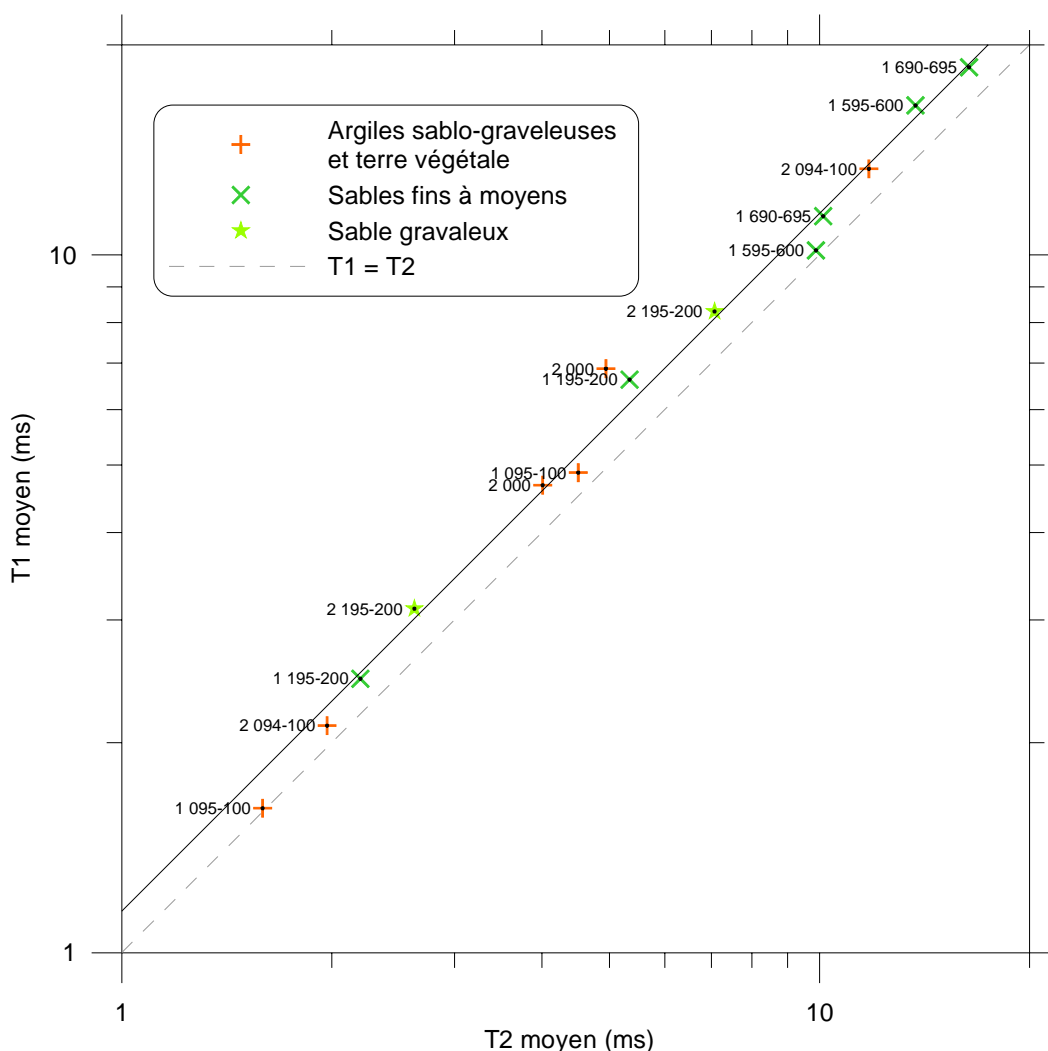


Figure 34 - Relation entre T1 et T2 sur les échantillons initiaux et saturés.

4.5.3. Perméabilité

Pour des raisons techniques, un seul échantillon a été soumis à des mesures de perméabilité. Il est donc impossible d'établir une corrélation entre les paramètres RMN (en particulier les temps de relaxation) et la perméabilité. Cependant, cette mesure a permis de tirer certains enseignements quant à l'utilisation d'un perméamètre à charge variable :

- la mesure du temps doit être précise (il est recommandé d'utiliser un chronomètre) ;
- il est préférable de mesurer la charge à différents temps pour tracer une courbe plutôt que d'utiliser un seul couple de valeurs ;
- il vaut mieux éviter de recommencer plusieurs fois la mesure sur le même échantillon, car cela introduit un granoclassement qui fait diminuer la perméabilité initiale ;

- le perméamètre de l'université de Berlin nécessite des échantillons de diamètre extérieur de 4,0 cm.

Par ailleurs, si des mesures de teneur en eau et/ou de porosité par la méthode des pesées doivent être faites sur les mêmes échantillons, il faut commencer par faire toutes les pesées (même à sec) avant de mesurer la perméabilité car une partie de l'échantillon est toujours perdue pendant la manipulation.

À titre indicatif, la perméabilité de l'échantillon 695-700 a été estimée à environ $9.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Il aurait donc été préférable d'utiliser un perméamètre à charge constante (cf. § 2.3.2.). Les valeurs des temps de relaxation mesurés à saturation sur ce même échantillon sont données dans le tableau 4 et la porosité « RMN » est de 24 %.

	Temps (ms)	Pourcentage de la porosité	Temps moyen
T_2	11,7	70 %	22 ms
	100	30 %	
T_1	19,2	58 %	24 ms
	107	27 %	
	4,3	15 %	

Tableau 4 - Temps de relaxation de l'échantillon 695-700.

5. Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de mieux connaître la structure du site de Saint-Cyr-en-Val et de recenser les difficultés techniques, ainsi que les points à améliorer pour analyser les mesures RMN. La quantité de données n'était pas suffisante pour faire une comparaison entre les données RMN et hydrologiques, mais ce premier jeu de données sera à compléter sur ce site et par d'autres mesures dans différents contextes géologiques.

5.1. CONNAISSANCE DU SITE EXPÉRIMENTAL DE SAINT-CYR-EN-VAL

Les panneaux électriques ont montré l'existence d'une structure conductrice quasi 2D (sans doute une lentille d'argile) dans la zone est du site. La zone ouest est au contraire tabulaire. La partie superficielle du terrain, explorée par les deux forages, est caractérisée par une alternance argilo-sableuse.

Il est prévu de réaliser quatre autres forages à proximité de M01 pour obtenir un log complet à travers la zone saturée et pour laisser deux piézomètres sur le site. Ces piézomètres serviront entre autres à faire un essai de pompage afin de définir les caractéristiques hydrodynamiques du terrain à plus grande échelle.

5.2. MÉTHODOLOGIE RMN

La principale difficulté rencontrée lors de l'expérimentation RMN est liée à l'échantillonnage. En ce qui concerne le forage, le géoprobe n'est pas un outil adapté à l'extraction de matériau non consolidé en milieu saturé. Dans la zone non saturée, l'extraction est possible, mais les teneurs en eau ne sont vraisemblablement pas préservées.

D'autre part, l'utilisation de tube d'un mètre de long est pratique pour réaliser des logs RMN mais ne l'est pas pour les mesures hydrologiques. Pour comparer les données RMN avec des données hydrologiques, il est préférable d'utiliser des échantillons plus courts et de choisir le diamètre en fonction du perméamètre. Une solution consiste à prélever des petits échantillons de diamètre adapté dans une carotte plus large.

Par ailleurs, les mesures de perméabilité peuvent être largement améliorées en mesurant le temps avec plus de précision et en utilisant un perméamètre à charge constante pour mesurer les fortes perméabilités.

5.3. PERSPECTIVES

Afin de compléter cette étude, des mesures de susceptibilité magnétique sur les échantillons sont prévues. Les paramètres RMN, notamment les temps de relaxation seront mesurés à d'autres fréquences de Larmor (c'est-à-dire avec différentes intensité

du champ statique). L'analyse de ces données éventuellement basée sur des connaissances théoriques (Korb *et al.*, 2003 ; Bryar *et al.*, 1999 ; Foley *et al.*, 1996) permettra de caractériser quantitativement l'effet conjoint des changements de fréquence et de susceptibilité magnétique. Dans ce cadre, il sera nécessaire d'évaluer le rapport (S_p/V_p) surface des pores sur volumes des pores.

Ensuite, il faudra comparer les mesures effectuées sur le terrain à très basse fréquence et avec un temps mort avec les mesures à plus haute fréquence effectuées en laboratoire. Pour cela, des mesures du temps de relaxation sur le terrain doivent être effectuées en utilisant plusieurs valeurs de délai, afin d'avoir des données de bonne qualité.

Une fois que le lien entre les mesures RMP sur le terrain et les mesures RMN en laboratoire sera bien établi, il sera possible de déterminer à partir de mesures en laboratoire quel type d'eau sera visible en RMP en considérant un temps mort instrumental. Pour cela, il faudra réaliser des courbes de rétention en saturant les échantillons petit à petit et en contrôlant parallèlement : la teneur en eau, la pression, et les paramètres RMN.

Par ailleurs, les corrélations entre perméabilité et mesures RMN établies dans le domaine pétrolier (Fleury *et al.*, 2001) devront être vérifiées dans des contextes géologiques plus variés. Il s'agira ensuite de faire un lien entre les mesures de perméabilité en laboratoire et les mesures par essai de pompage puis, en fonction des différents résultats obtenus établir des relations avec les résultats des sondages RMP.

6. Bibliographie

Archie G.E. (1942) - The electrical conductivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transaction of the Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 146, p. 54-62.

Bryar T.R., Daughney C.J., Knight R.J. (2000) - Paramagnetic effects of iron (III) Species on Nuclear Magnetic Relaxation of fluid Protons in porous media. *Journal of magnetic resonance*. 142, p. 74-85.

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

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

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

Fleury M., Deflandre F., Godefroy S. (2001) - Validity of permeability prediction from NMR measurements. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Chimie*. Chemistry 4, p. 869-872.

Foley I., Farooqui S.A., Kleinberg R.L. (1996) - Effect of paramagnetic ions on NMR Relaxation of fluids at solid surfaces. *Journal of Magnetic Resonance, Series A*. 123, p. 95-104.

Girard, J.F., Legchenko A., Boucher M. (2003) - Stability of MRS measurements and estimation of the data quality. *In: proceedings of the 2nd International Workshop on the Magnetic Resonance Sounding method applied to non-invasive groundwater investigations*, November 2003, Orleans, France.

Godefroy S., Korb J.P., Fleury M. (2001) - Dynamics of water and oil at the solid-liquid interface in macroporous media and reservoir rocks. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Chimie*. Chemistry 4, p. 857-862.

Hertrich M., Braun M., Girard J.F., et al. (2004) - MRS measurements with separated loops - Preliminary results. *In proceeding of EGU 2004*.

Kenyon W.E., Kolleny J.A. (1995) - NMR Surface Relaxivity of Calcite with Adsorbed Mn^{2+} . *Journal of colloid and interface science*, 170, p. 502-514.

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

Kimmich R., Anardo E. (2004) - Field-cycling NMR relaxometry. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 44, p. 257-320.

Kooman S. (2003) - Saturated hydraulic conductivity derived from (hydro)geophysical measurements. MSc Thesis, Wageningen University and Research Centre, Wageningen, the Netherlands.

Korb J.P., Godefroy S., Fleury, M. (2003) - Surface nuclear magnetic relaxation and dynamics of water and oil in granular packings and rocks. *Magnetic Resonance Imaging*, 21, p. 193-199.

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

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

Levitt M.H. (2001) - Spin Dynamics Basics of Nuclear Magnetic Resonance. John Wiley and Sons, LTD, Chichester.

Müller M., Kooman S., Yaramanci U. (2005) - Nuclear Magnetic Resonance (NMR) properties of unconsolidated sediments in field and laboratory. *Near Surface Geophysics*. In press.

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

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

Vermeersch F., Texier B., Bernard J. (2003) - Comparison of various loop geometries in magnetic resonance soundings on the Pyla sand dune (France). *In: proceedings of the 2nd International Workshop on the Magnetic Resonance Sounding method applied to non-invasive groundwater investigations, November 2003, Orleans, France.*

Annexe 1

Résultats des mesures sur échantillons

Sample : 095-100
M01

Volume (mL) 40.75745

Weight (g)
initial 116.548
saturated 124.652
dry 108.415

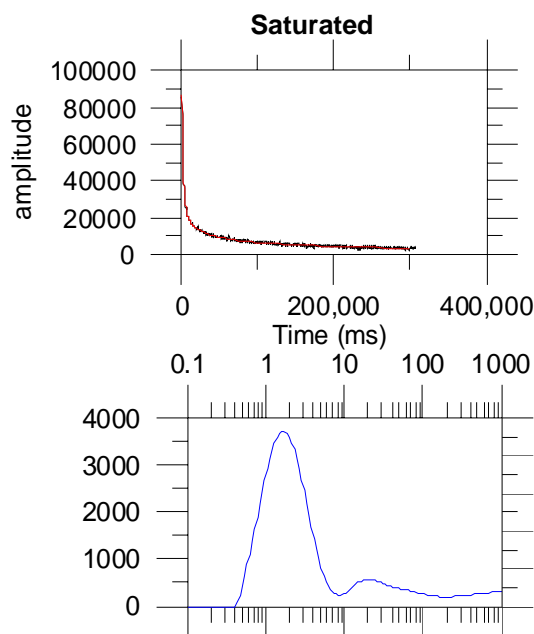
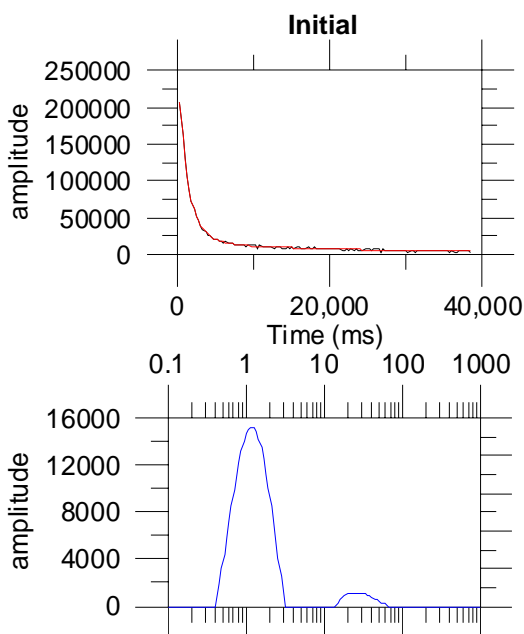
porosity	39.8 %
saturation	50 %
water content	20.0 %

	Date	Amplitude	SCANS	AMPL/SCANS	Water Cont [gr]	Water Cont. [%]
initial	18/05/2004	204490	1024	199.6973	8.656349	21.2
saturated	19/05/2004	85076	256	332.3281	14.61052	35.8

	Date	weight			
Calibration	18/05/2004	61.304	22628	16	1414.25
	19/05/2004	61.286	22304	16	1394

	1st T2	%	2nd T2	%	3rd T2	%
initial	1.3	93	23.4	7		
saturated	1.9	75	21.6	15	282	10

	1st T1	%	2nd T1	%	3rd T1	%
initial	1.3	92	19.0	8		
saturated	1.7	65	11.8	22	212	13



Sample M01 195-200

Volume (mL) 40.75745

Weight (g) initial 126.206
saturated 132.169
dry 120.2

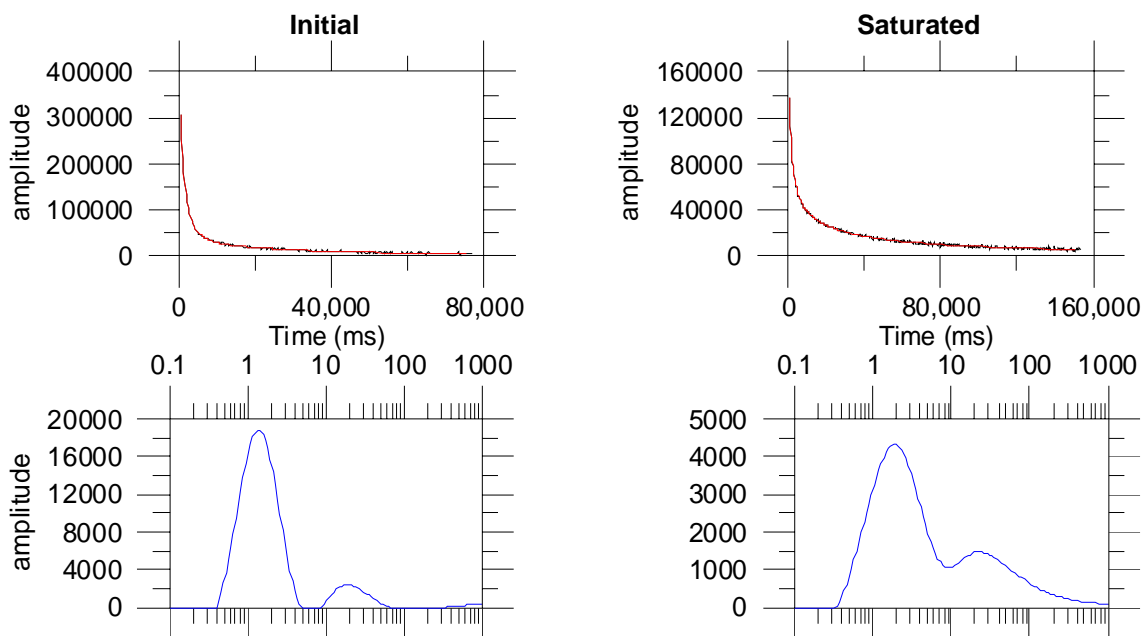
porosity	29.4 %
saturation	50 %
water content	14.7 %

	Date		Amplitude	SCANS	AMPL/SCANS	Water Cont [gr]	Water Cont. [%]
initial	18/05/2004		297713	2048	145.4	6.3	15.5
saturated	19/05/2004		136052	512	265.7	11.7	28.7

		weight			
Calibration	18/05/2004	61.304	22628	16	1414
	19/05/2004	61.286	22304	16	1394

	1st T2	%	2nd T2	%	3rd T2	%
initial	1.6	89	28.7	11		
saturated	1.8	61	14.4	25	104	14

	1st T1	%	2nd T1	%	3rd T1	%
initial	1.7	85	20.5	15		
saturated	2	55	12	28	120	17



Sample M01 595-600

Volume (mL) 40.75745

Weight (g) initial 130.550
saturated 133.974
dry 120.971

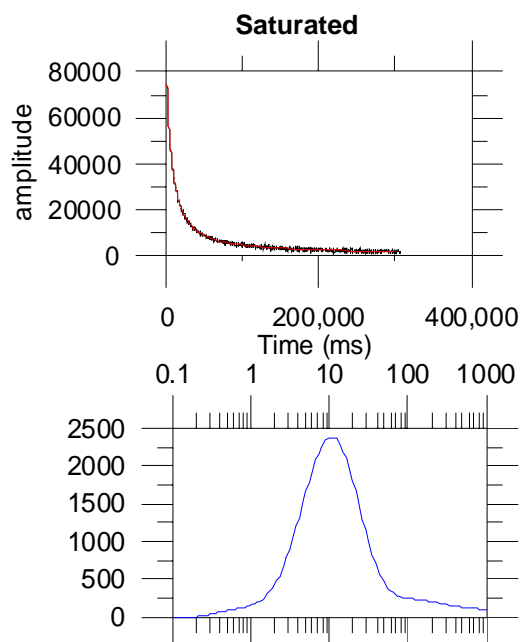
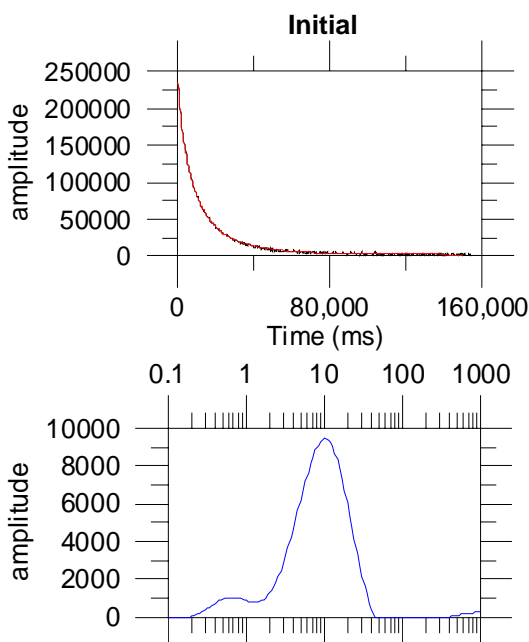
porosity	31.9 %
saturation	74 %
water content	23.5 %

	Date	Amplitude	SCANS	AMPL/SCANS	Water Cont [gr]	Water Cont. [%]
initial	18/05/2004	222787	1024	217.5654	9.430886	23.1
saturated	19/05/2004	73173	256	285.832	12.56636	30.8

		weight			
Calibration	18/05/2004	61.304	22628	16	1414.25
	19/05/2004	61.286	22304	16	1394

	1st T2	%	2nd T2	%	3rd T2	%
initial	7.2	78	30.4	22		
saturated	5.7	51	22.5	40	222	9

	1st T1	%	2nd T1	%	3rd T1	%
initial	17.0	65	3.9	35		
saturated	13	69	164	18	2.3	13



Sample M01 690-695

Volume (mL) 40.75745

Weight (g) initial 134.507
saturated 137.675
dry 124.329

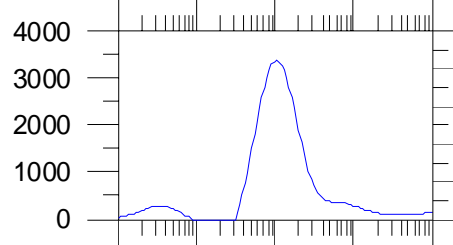
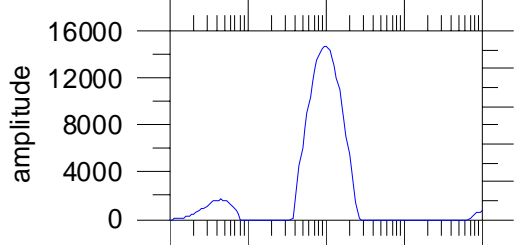
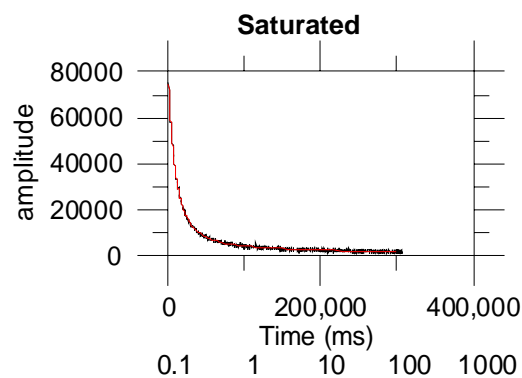
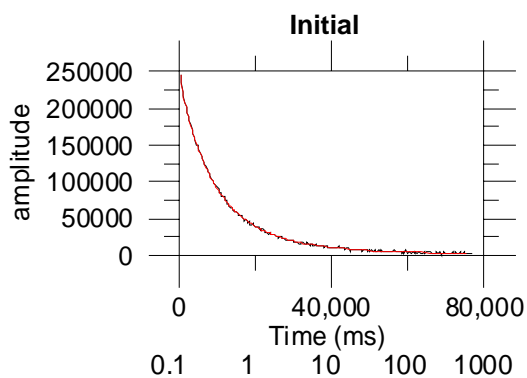
porosity	32.7 %
saturation	76 %
water content	25.0 %

	Date		Amplitude	SCANS	AMPL/SCANS	Water Cont [gr]	Water Cont. [%]
initial	18/05/2004		237022	1024	231.4668	10.03347	24.6
saturated	19/05/2004		70537	256	275.5352	12.11366	29.7

		weight			
Calibration	18/05/2004	61.304	22628	16	1414.25
	19/05/2004	61.286	22304	16	1394

	1st T2	%	2nd T2	%	3rd T2	%
initial	8.2	82	26.4	18		
saturated	11.8	87	147	13		

	1st T1	%	2nd T1	%	3rd T1	%
initial	11.3	89	80.8	6	1.2	5
saturated	15	74	232	15	2.5	11



Sample M02 TOP

Volume (mL) 40.75745

Weight (g) initial 110.683
saturated 114.328
dry 95.996

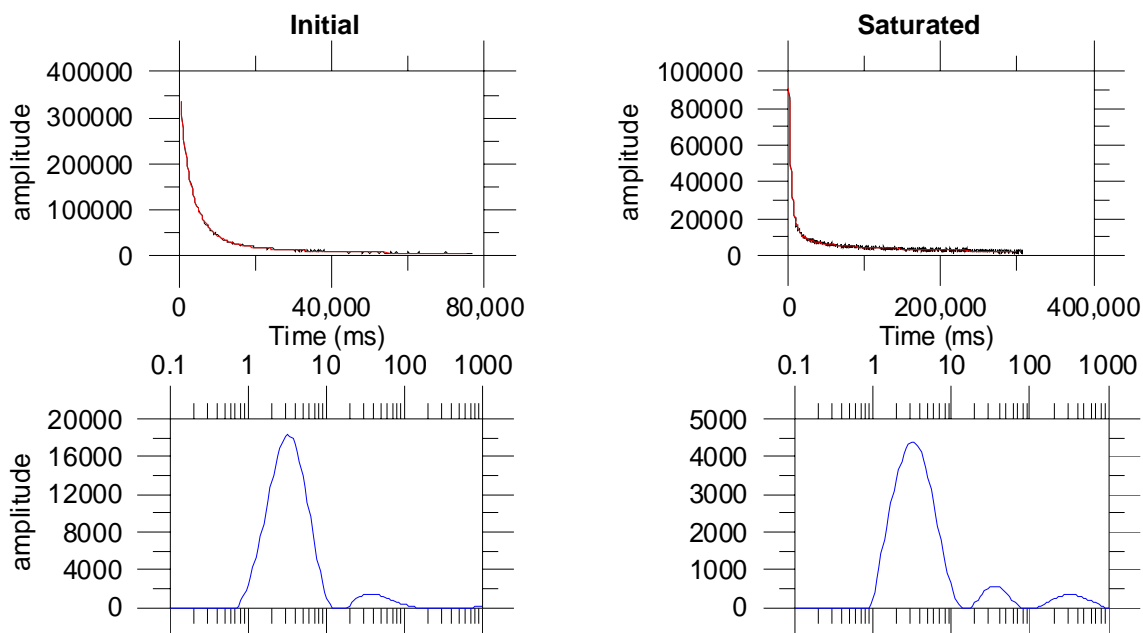
porosity	45.0 %
saturation	80 %
water content	36.0 %

	Date	Amplitude	SCANS	AMPL/SCANS	Water Cont [gr]	Water Cont. [%]
initial	18/05/2004	326737	1024	319.0791	13.83124	33.9
saturated	19/05/2004	90781	256	354.6133	15.59027	38.3

		weight			
Calibration	18/05/2004	61.304	22628	16	1414.25
	19/05/2004	61.286	22304	16	1394

	1st T2	%	2nd T2	%	3rd T2	%	4th T2	%
initial	3.2	90	30.7	10				
saturated	3.9	46	2.2	36	18.7	12	273	6

	1st T1	%	2nd T1	%	3rd T1	%
initial	3.3	80	18.9	20		
saturated	6.6	61	2.0	28	199	11



Sample M02 094-100

Volume (mL) 48.30513

Weight (g) initial 120.757
saturated 134.457
dry 113.568

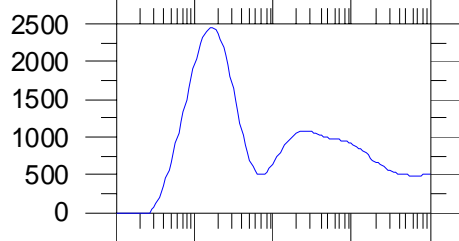
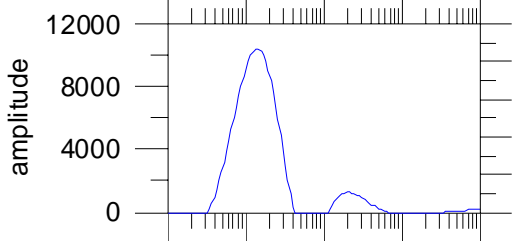
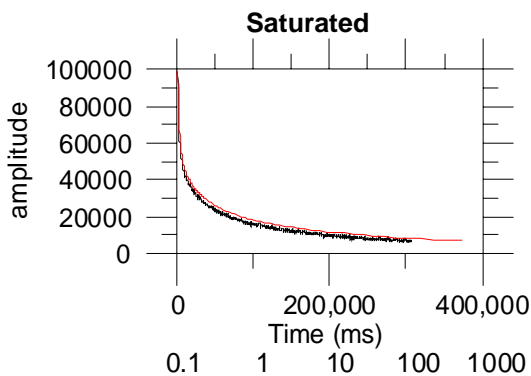
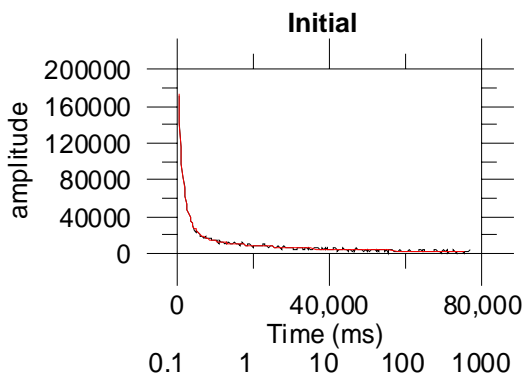
porosity	43.2 %
saturation	34 %
water content	14.9 %

	Date		Amplitude	SCANS	AMPL/SCANS	Water Cont [gr]	Water Cont. [%]
initial	18/05/2004		169313	1024	165.3447	7.167257	14.8
saturated	19/05/2004		97344	256	380.25	16.71736	34.6

		weight			
Calibration	18/05/2004	61.304	22628	16	1414.25
	19/05/2004	61.286	22304	16	1394

	1st T2	%	2nd T2	%	3rd T2	%
initial	1.5	91	30.9	9		
saturated	2.0	51	28.0	27	247	22

	1st T1	%	2nd T1	%	3rd T1	%
initial	1.4	79	10.0	21		
saturated	1.9	43	19.1	29	181	28



Sample M02 195-200

Volume (mL) 40.75745

Weight (g) initial 113.011
saturated 121.609
dry 105.087

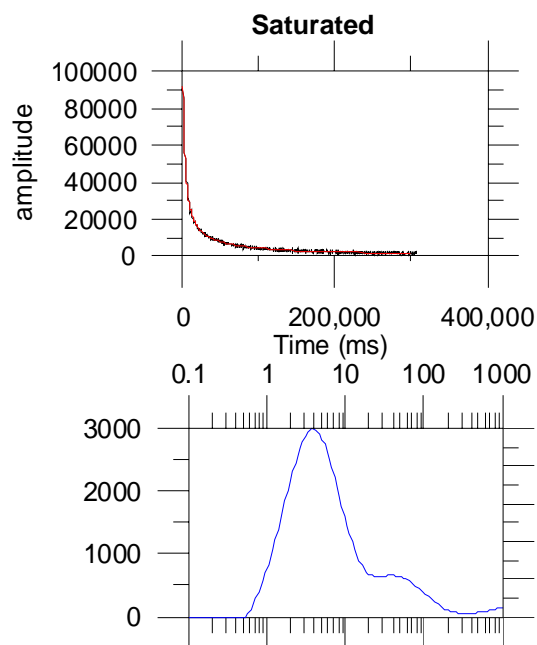
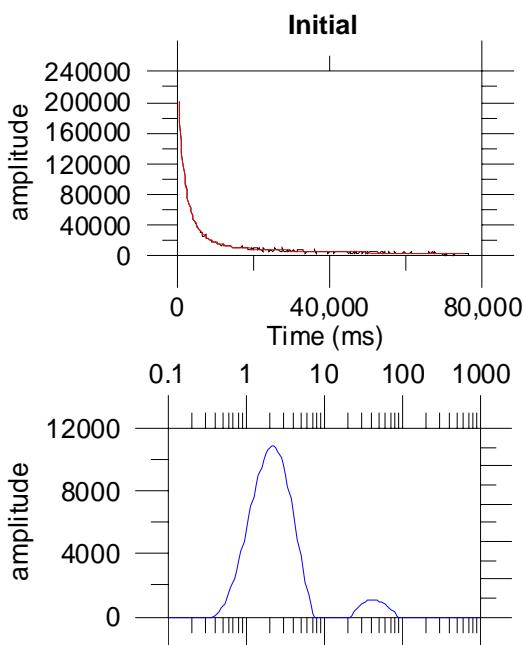
porosity	40.5 %
saturation	48.0 %
water content	19.4 %

	Date	Amplitude	SCANS	AMPL/SCANS	Water Cont [gr]	Water Cont. [%]
initial	18/05/2004	199772	1024	195.0898	8.456629	20.7
saturated	19/05/2004	89547	256	349.793	15.37834	37.7

		weight			
Calibration	18/05/2004	61.304	22628	16	1414.25
	19/05/2004	61.286	22304	16	1394

	1st T2	%	2nd T2	%	3rd T2	%
initial	1.6	62	4	32	46.5	6
saturated	3.4	68	21.1	25	175	7

	1st T1	%	2nd T1	%	3rd T1	%
initial	2.4	88	20.9	12		
saturated	2.8	52	13.3	33	127	15



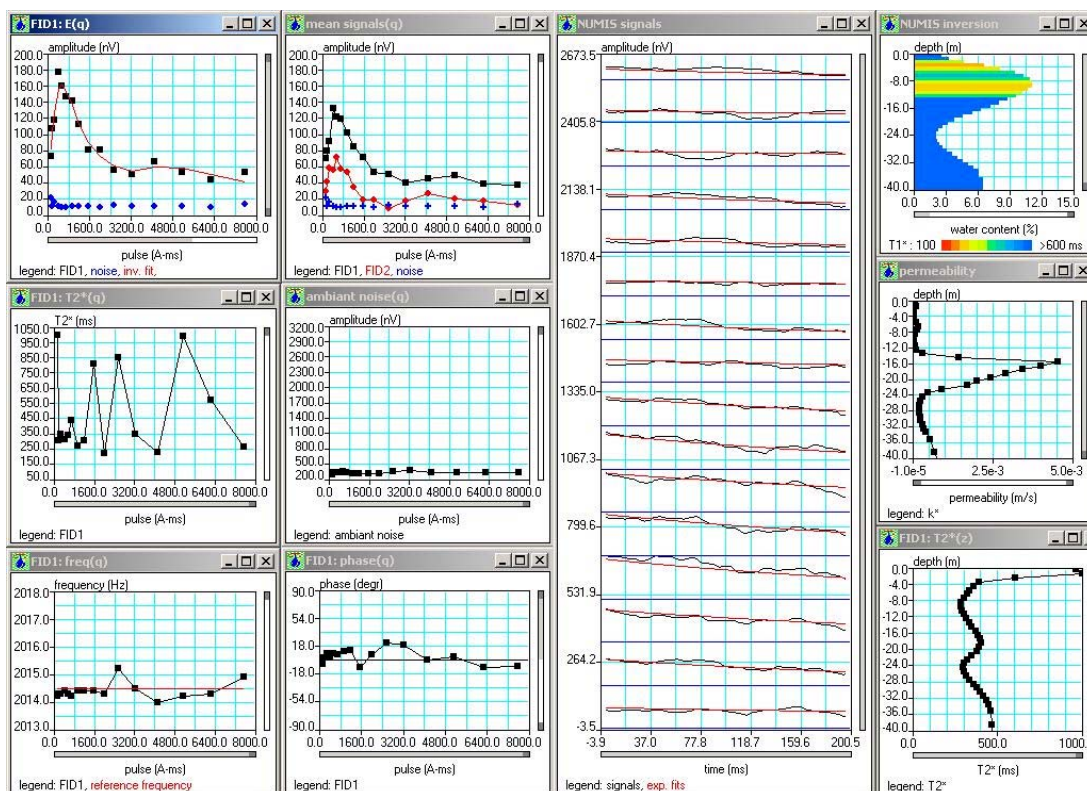
Annexe 2

Résultats des sondages RMP

Site: STCYR , NUMIS syst 2 (ctrl 2, dc 45)
 Loop: 4 - 37.5 Date: 15.05.2003 Time: 10:19

NUMIS data set: D:\StCyr\Mesures\Stcyr2b\STCYR2B.inp
 matrix: D:\StCyr\Mesures\STCYR838.MRM
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 65 degr, magnitude= 47288.73 nT

filtering window = 198.6 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 6.15; EN/IN = 2.42
 fitting error: FID1 = 8.26 % ; FID2 = 14.07 %
 param. of regular.: E, T2* = 564.6 ; T1* = 0.715
 permeability constant Cp = 7.00e-09

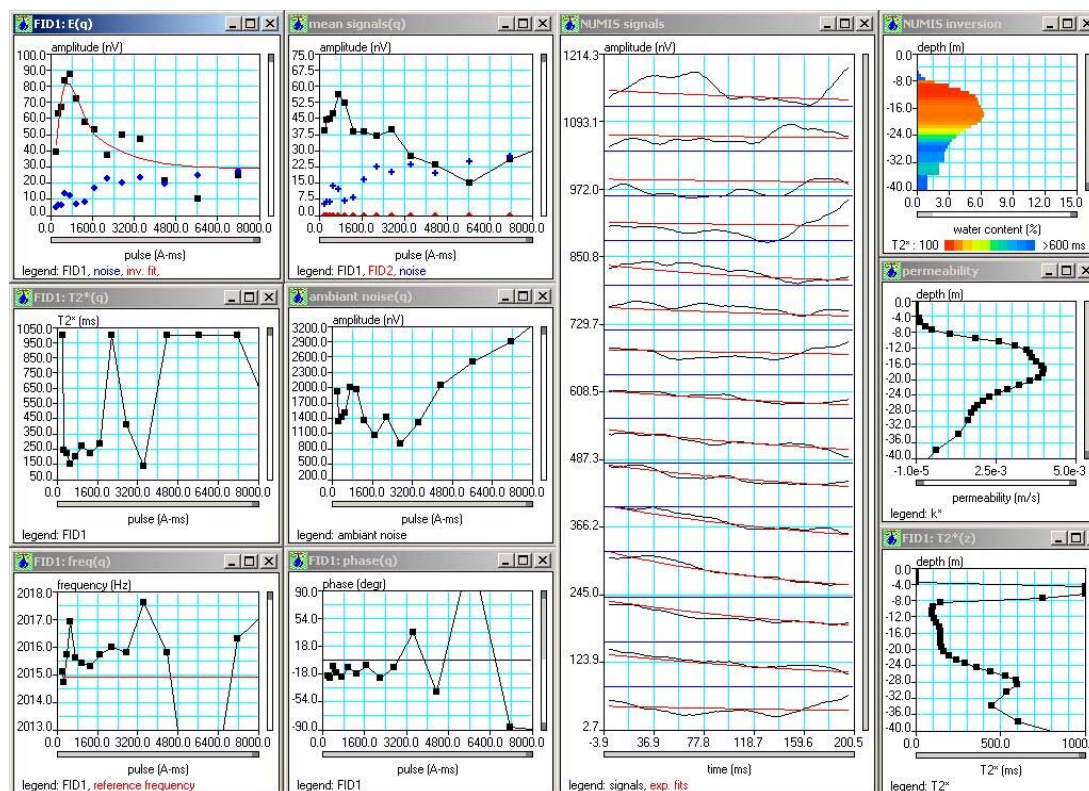


Sondage n° 1 (mai 2003)

Site: StCyr clay lens Tx24x2 Rx24x1 long eight sep 00 coincident
 Loop: 1 - 48.0 Date: 16.10.2003 Time: 17:52

NUMIS data set: D:\data_Marie\NMRIlab_StCyr\oct03\CL03\CL_03.inp
 matrix: D:\common\RMP\LOGICIEL2001\Inter2001-1\SCYR2X48.MRM
 loop: circular, diameter = 48.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 60 degr, magnitude= 47298.12 nT

filtering window = 198.5 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 2.45 ; EN/IN = 3.06
 fitting error: FID1 = 16.92 % ; FID2 = 166270.27 %
 param. of regular.: E, T2* = 500.0 ; T1* = 500000.000
 permeability constant Cp = 7.00e-09

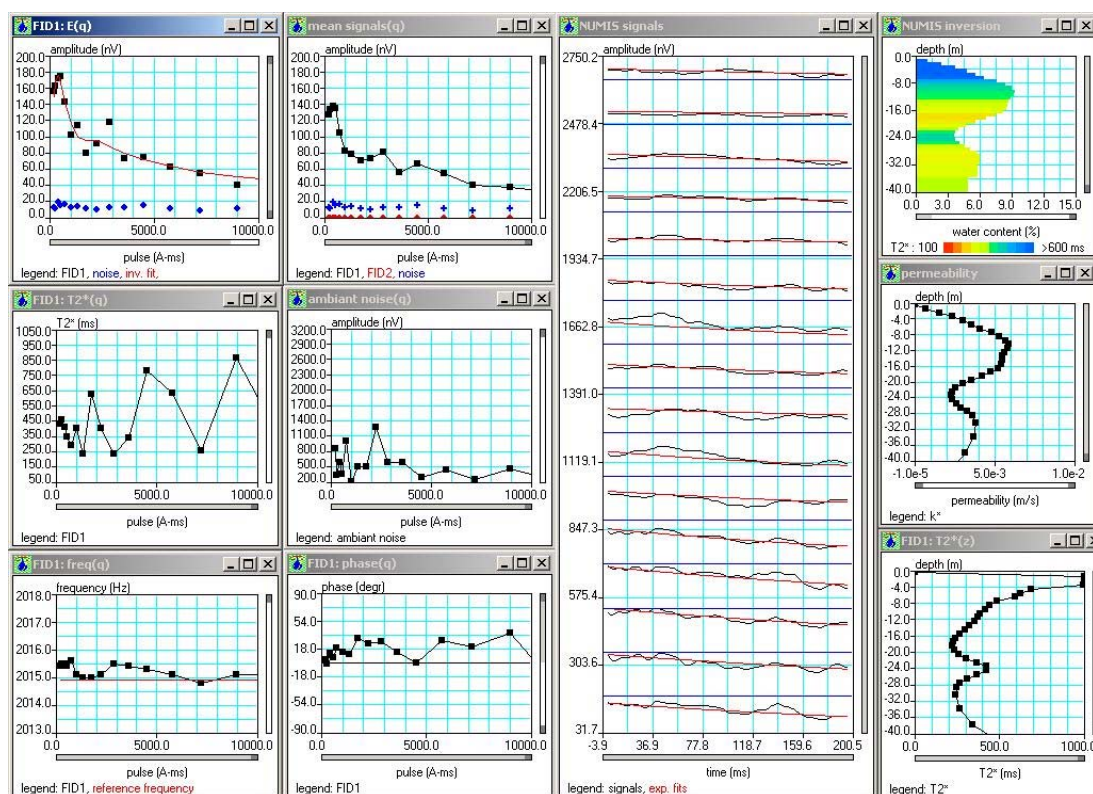


Sondage n° 2 (octobre 2003)

Site: StCyr 2D profile Tx24x2 Rx24x2 sep00 coincident
 Loop: 1 - 48.0 Date: 16.10.2003 Time: 00:08

NUMIS data set: D:\data_Marie\NMRIlab_StCyr\oct03\StCyr_Rx001\SC2D_9.inp
 matrix: D:\common\RMP\LOGICIEL2001\Inter2001-1\SCYR2X48.MRM
 loop: circular, diameter = 48.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 60 degr, magnitude= 47298.12 nT

filtering window = 198.5 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 6.52 ; EN/IN = 2.50
 fitting error: FID1 = 9.67 % ; FID2 = 295747.29 %
 param. of regular.: E, T2* = 500.0 ; T1* = 500000.000
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Sondage n° 3 (octobre 2003)



Centre scientifique et technique
Service aménagement et risques naturels
3, avenue Claude-Guillemin

BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34