





# Mesures par Imagerie de Résonance Magnétique (IRM) sur divers échantillons de sol, réalisées au laboratoire de Résonance Magnétique des Systèmes Biologiques (Bordeaux II).

Rapport final

**BRGM/RP 54405- FR**  
Décembre 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Recherche du BRGM 2004-2005

**JF. Girard, M. Boucher**

**Vérificateur :**

Nom : J.M. Baltassat

Date :

Signature :

**Approbateur :**

Nom : H.Fabriol

Date :

Signature :

Mots clés : résonance magnétique, IRM, sondage RMP, MRS.

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

Mesures par Imagerie de Résonance Magnétique (IRM) sur divers échantillons de sol, réalisées au laboratoire de Résonance Magnétique des Systèmes Biologiques (Bordeaux II). Rapport final. BRGM/RP- 54405-FR, 46 pages, 29 fig., 2 tab., 1 ann.

© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Dans le cadre du développement de la méthode de sondage par résonance magnétique protonique (RMP), des mesures RMN en laboratoire sont aujourd'hui réalisées sur divers matériaux dans un but de comparaison.

De nouvelles séries de mesures ont été réalisées au laboratoire de résonance magnétique de systèmes biologiques (RMSB) de l'Université de Bordeaux 2. Ces mesures ont été rendues possibles grâce à la collaboration de N. Baril et J-M. Franconi qui nous ont mis à disposition un imageur (IRM) dit « bas champ » qui correspond à une fréquence de Larmor de 8.5MHz.

Pour comparaison, la fréquence de Larmor dans le champ terrestre est de l'ordre de 2kHz en France. Les séquences de mesures utilisées en imagerie de résonance magnétique permettent de mesurer les mêmes paramètres qu'avec les sondages MRS.

Dans ce rapport, les séquences sont présentées ainsi que les mesures réalisées et commentées au cours de ces 4 jours.

L'apport de l'utilisation d'IRM de type médical dans l'optique de valider les mesures RMP est ainsi évalué.

Sur les sables argileux de Sologne, à 8.5 MHz,  $T_1 > T_2$  et les propriétés magnétiques de ce sol empêchent de faire de l'imagerie RMN.

Dans la craie, les temps de relaxation ont été estimés.  $T_1$  est compris entre 90 et 140 ms, ce qui est du même ordre de grandeur que ce qui a été mesuré sur le terrain.  $T_2 = 60-75$  ms  $< T_1$ . Dans la craie, il est possible d'utiliser toutes les possibilités de l'imagerie 3D de l'IRM (sur des fissures par exemple). Dans l'avenir des mesures de transfert d'aimantation pourraient permettre d'estimer la réponse de l'eau dite liée.

Sur les échantillons des altérites des Vosges, aucune mesure n'a pu être réalisée par IRM. La présence de particules magnétiques tout à fait normale dans ce type de sol permet d'expliquer ce résultat. L'avantage de mesurer les paramètres RMN dans le champ terrestre est ainsi démontré.



# Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Mise en oeuvre.....</b>	<b>9</b>
2.1. MATRIEL UTILISE.....	9
2.2. ECHANTILLONS .....	10
<b>3. Les séquences de mesure .....</b>	<b>11</b>
3.1. DOCUMENTS DE REFERENCE.....	11
3.2. LA SEQUENCE D'ECHO DE SPIN .....	11
3.2.1. Rôle du temps de répétition TR.....	11
3.2.2. Rôle du choix du temps d'écho TE.....	13
3.3. LA SEQUENCE D'ECHO DE GRADIENT .....	15
3.4. COMPARAISON DES DEUX SEQUENCES .....	15
<b>4. Description chronologique des mesures .....</b>	<b>19</b>
4.1. MARDI 23 NOVEMBRE.....	19
4.1.1. Expérience n°1 .....	19
4.1.2. Expérience n°2.....	23
4.1.3. Expérience n°3.....	25
4.2. EXPERIENCE N°4.....	27

4.2.1. Imagerie en 3 dimensions.....	28
4.3. MERCREDI 24 NOVEMBRE.....	30
4.3.1. Expérience n°1 .....	30
4.3.2. Expérience n°2 .....	30
4.3.3. Expérience n°3 .....	30
4.4. JEUDI 25 NOVEMBRE .....	31
4.4.1. Expérience n°1 .....	31
4.4.2. Expérience n°2 .....	31
4.4.3. Expérience n°3 .....	32
4.4.4. Expérience n°4 .....	34
4.4.5. Expérience n°5 .....	37
4.5. VENDREDI 26 NOVEMBRE .....	38
<b>5. Conclusions .....</b>	<b>39</b>
5.1. CONCLUSIONS DES MESURES SUR LES ECHANTILLONS DU SITE TEST DE ST CYR EN VAL : .....	39
5.2. CONCLUSIONS SUR LES MESURES SUR LES ECHANTILLONS DE CRAIES	39
5.3. CONCLUSIONS SUR LES MESURES SUR LES ECHANTILLONS DES ALTERITES DES VOSGES .....	39
<b>6. Annexes.....</b>	<b>41</b>
<b>7. Bibliographie.....</b>	<b>43</b>

# 1. Introduction

Dans le cadre du développement de la méthode de sondage par résonance magnétique protonique (RMP - MRS), des mesures RMN en laboratoire sont aujourd'hui réalisées sur divers matériaux pour comparaison avec les mesures géophysiques sur le terrain.

Des mesures à 2MHz avaient déjà réalisées à l'aide d'un spectromètre à l'Université de Berlin (TUB) sur des échantillons de sables-argiles recueillis sur le site test de St Cyr-en-Val en 2004 (Rapport BRGM 2005 Boucher et al.).

De nouvelles séries de mesures ont été réalisées au Laboratoire de Résonance Magnétique des Systèmes Biologiques (RMSB) de l'Université de Bordeaux 2. Ces mesures ont été rendues possibles grâce à la collaboration de N. Baril et J-M. Franconi qui nous ont mis à disposition un imageur (IRM) dit « bas champ » qui correspond à une fréquence de Larmor de 8.5MHz.

Pour comparaison, la fréquence de Larmor dans le champ terrestre est de l'ordre de 2kHz en France. Les séquences de mesures utilisées en imagerie de résonance magnétique permettent de mesurer les mêmes paramètres qu'avec les sondages MRS.

Les séquences sont présentées ainsi que les mesures réalisées au cours de ces 4 jours et commentées dans ce rapport,.



## 2. Mise en oeuvre

### 2.1. MATRIEL UTILISE

Il s'agit d'un imageur à bas champ, induction magnétique : 0.2 T (fréquence de Larmor = 8.5 MHz).

Pour comparaison, les mesures réalisées sur certains de ces mêmes échantillons à Berlin en mai 2004 à l'aide d'un spectromètre à 2 MHz correspondent à une induction magnétique de 0.047 T. Soit une fréquence de Larmor 4 fois plus faible qu'avec l'imageur à 0.2 T.

La fréquence de Larmor moyenne dans le champ terrestre est de l'ordre de 2 kHz, les mesures à Berlin sont donc effectuées à une fréquence 1000 fois plus élevée, et les mesures à Bordeaux avec l'imageur à 0.2 T sont effectuées avec une fréquence 4000 fois plus élevée.

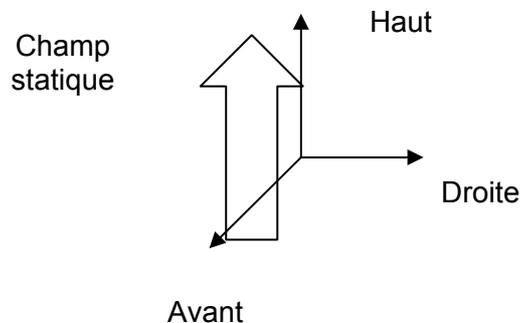


Fig.1. Dispositif de mesure par IRM

Les échantillons baignent dans un champ magnétique statique vertical, et le repère utilisé est décrit sur la Figure 1.

Les données ont été stockées sous format informatique. Pour chaque mesure un fichier image (BMP) et un fichier d'explications (HTML) ont été générés. Les fichiers concernant nos expériences ont l'attribut brgm\_231104 pour les mesures du 23 et 24 novembre 2004 et brgm\_251104 pour les mesures effectuées les 25 et 26 novembre 2004.

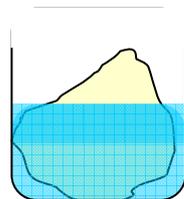
## 2.2. ECHANTILLONS

Les échantillons utilisés au cours de cette étude sont :

- Echantillons de St Cyr en Val / Marcilly : les 8 échantillons analysés à Berlin en mai
- Echantillons de craie :
  - o 2 morceaux de craie de la Somme (80)
  - o 1 morceau de craie à silex des falaises de Dieppe (76)
- Echantillons d'altérite des Vosges (prélevés en Novembre 2004 sur le site dit « la Soutte » dans les Vosges, étudié par ailleurs dans le cadre du programme PNRH FNS sur l'hydrogéophysique : Waterscan).

Remarque :

Les morceaux de craie ont été immergés pendant 3 semaines dans de l'eau initialement déminéralisée. Un des échantillons de la Somme n'était qu'en partie immergé :



***Echantillon « craie80\_mi-sat »***

Fig.2. Echantillon saturé jusqu'à mi-hauteur « craie80\_mi\_sat »

## 3. Les séquences de mesure

### 3.1. DOCUMENTS DE REFERENCE

Voir Chap 5.4 Les séquences de base de l'imagerie par résonance magnétique, « La RMN : Concepts, méthodes et applications », Canet.

<http://www.med.univ-rennes1.fr/cerf/edicerf/BASES/index.html>

### 3.2. LA SEQUENCE D'ÉCHO DE SPIN

Cette séquence que nous prenons pour modèle de description, est définie par deux paramètres de séquence : le temps de répétition (TR), qui sépare deux excitations successives de  $90^\circ$  dans le même plan et le temps d'écho (TE) qui sépare le  $90^\circ$  de l'enregistrement de l'écho (Figure 3). Ce temps d'écho est égal à deux fois le temps qui sépare le  $90^\circ$  du  $180^\circ$ .

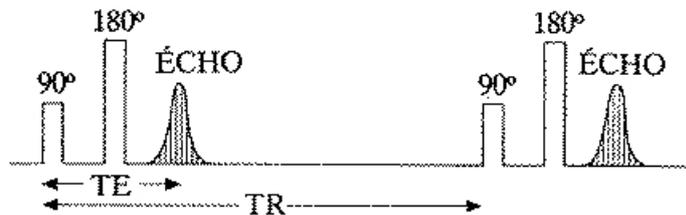


Fig.3. La séquence de SPIN-ECHO est définie par deux paramètres de séquence : le temps de répétition (TR) qui sépare deux excitations à  $90^\circ$  successives, et le temps d'écho (TE) qui sépare l'excitation de la mesure de l'écho.

Ces deux paramètres ont un rôle tout à fait primordial sur le contraste des images, en fonction des caractéristiques intrinsèques du matériau.

#### 3.2.1. Rôle du temps de répétition TR

Le choix du temps de répétition TR détermine la pondération du contraste en T1, en limitant la repousse de la composante longitudinale.

En imagerie médicale, l'objectif est d'obtenir des images qui font apparaître des contrastes entre les différents tissus biologiques des organes étudiés. En sciences du sol, ce sont les contrastes entre les matériaux géologiques qui sont étudiés (et non pas des tissus).

Pour bien comprendre cet effet, il suffit de se référer aux courbes de relaxation longitudinale. Si le temps de répétition qui sépare deux excitations à  $90^\circ$  est long par rapport au temps de relaxation  $T_1$  des tissus, les aimantations longitudinales auront eu le temps de totalement remonter entre chaque impulsion de  $90^\circ$  et ces impulsions rebasculeront effectivement dans le plan transversal une valeur proche de la valeur  $M_0$  de l'aimantation de repos. La lecture par un spin écho à temps d'écho très court de cette valeur ainsi basculée dans le plan transversal permettra d'approcher les valeur de repos  $M_0$  (Fig.4).

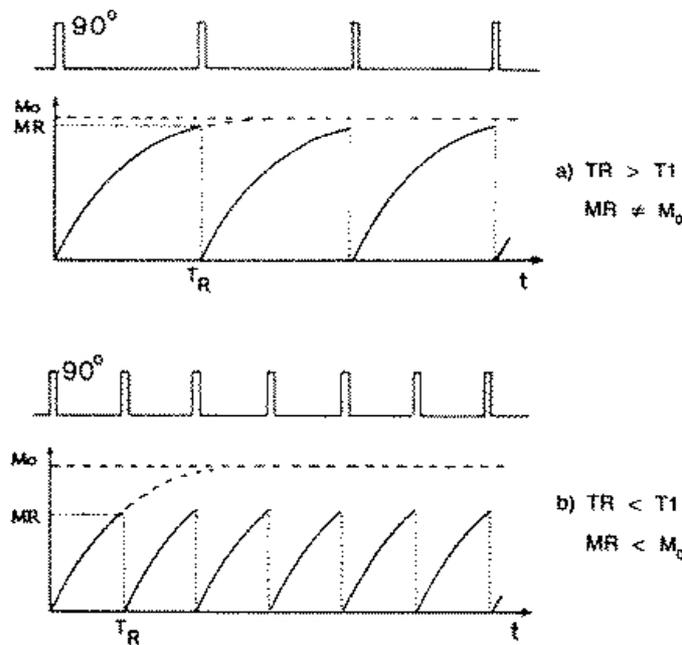


Fig.4. Le choix du TR détermine la pondération en  $T_1$  du signal RMN mesuré. Pour des temps de répétition longs par rapport au  $T_1$  du tissu, la repousse de la composante longitudinale MR est presque totale. Pour des temps de répétition courts ou de l'ordre du  $T_1$  du tissu, la repousse de la composante longitudinale MR est incomplète, et cela d'autant plus que TR est court.

Par contre, si le temps de répétition  $TR$  qui sépare deux excitations à  $90^\circ$  est court par rapport au  $T_1$  des tissus ou de l'ordre de ces  $T_1$ , les aimantations correspondantes n'auront eu le temps de remonter qu'à une valeur intermédiaire (MR sur le schéma) et lors du  $90^\circ$  suivant, l'aimantation effectivement basculée dans le plan transversal et lue avec un TE court, n'est pas la valeur  $M_0$  mais une valeur MR. Cette valeur dépend du TR et du temps de relaxation  $T_1$  du tissu concerné.

Il suffit de regarder alors ce qui se passe pour plusieurs tissus avec des  $T_1$  différents (fig.5), on s'aperçoit que pour des TR longs il y a peu d'effet de  $T_1$  et qu'au contraire, pour des TR relativement courts ou de l'ordre de ces temps de relaxation  $T_1$ , les effets de  $T_1$  sur l'intensité des signaux mesurés sont notables. Le liquide céphalo-rachidien par exemple, qui a le  $T_1$  le plus long et qui remonte le moins vite, donne le plus faible signal, la substance blanche qui a un  $T_1$  plus court et qui remonte donc plus vite, aura,

pour cette même valeur de TR, un signal plus élevé que celui du liquide céphalo-rachidien (LCR).

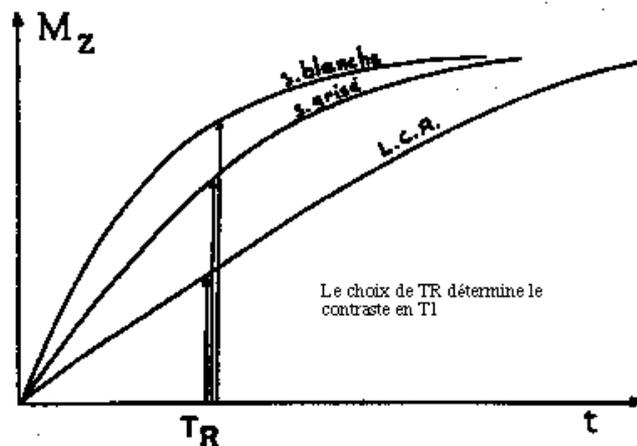


Fig.5. Pondération en T1 du contraste pour différents tissus cérébraux : substance blanche, substance grise et liquide céphalo-rachidien (LCR)

On notera sur ces courbes que :

- l'amplitude des signaux varie dans le sens inverse de celui des T1 de ces tissus,
- le contraste en T1 est d'autant plus fort que le TR est court, mais par contre le rapport signal/bruit est d'autant plus faible que TR est court. Le choix d'un TR voisin des temps de relaxation T1 des tissus constitue un bon compromis entre contraste et rapport signal/bruit.

### 3.2.2. Rôle du choix du temps d'écho TE

Le choix du temps d'écho TE détermine la pondération en T2 du contraste image en exprimant les variations de la composante transversale dont la décroissance se fait en T2 sur la séquence de spin écho.

Si on se réfère cette fois aux courbes de relaxation transversale pour différents tissus, on constate que lorsqu'on choisit un temps d'écho TE très court, cette décroissance en T2 intervient peu et l'amplitude de l'écho lue correspond à peu près à celle de l'aimantation longitudinale basculée dans le plan transversal par le 90°. Par contre, si les temps d'écho sont plus longs, de l'ordre des temps de relaxation T2, voire plus longs que ceux-ci, cette décroissance en T2 est sensible.

Le liquide céphalo-rachidien par exemple, qui a le plus long T2, garde un signal plus élevé que la substance blanche qui a un T2 plus court et une composante transversale qui décroît donc plus vite. On notera sur les courbes (fig.6) de relaxation comparatives de ces différents tissus, que :

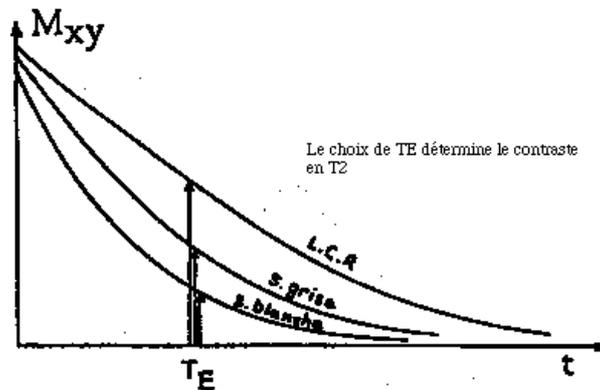


Fig.6. Pondération en T2 du contraste pour différents tissus cérébraux : substance blanche, substance grise et liquide céphalo-rachidien (LCR)

- l'amplitude des signaux varie cette fois dans le même sens que celui des T2 de ces tissus,

- que le contraste en T2 est d'autant plus fort que le temps d'écho est long, mais qu'alors le rapport signal/bruit est d'autant plus faible. Le choix d'un temps d'écho qui correspond à une à deux fois la valeur du T2 constitue un bon compromis.

Il faut donc retenir de l'examen de ces courbes,

- que le choix d'un temps de répétition long (par rapport au temps de relaxation T1) entraîne peu d'effets du temps de relaxation T1 sur la mesure des intensités des signaux,

- que le choix d'un temps d'écho court (par rapport au temps de relaxation T2) entraîne peu d'effet du temps de relaxation T2 sur les intensités mesurées.

A l'inverse,

- un temps de répétition court (par rapport au temps de relaxation T1) entraîne des effets importants de ces temps de relaxation T1 sur les intensités de signaux,

- des temps d'écho longs (par rapport au temps de relaxation T2) entraîne des effets importants des temps de relaxation T2 sur les intensités de signaux.

On en déduit très simplement qu'une séquence avec :

- TE court et TR court sera une image qui sera pondérée en T1 puisque ce seront les effets de T1 qui vont dominer,

- qu'une séquence de TE et TR longs donnera des images pondérées en T2,

- qu'une séquence TE court et TR long donnera un contraste pondéré en densité d'hydrogène puisque la mesure faite de l'écho est assez voisine de l'aimantation  $M_0$  de départ, sans que celle-ci soit entâchée ni par les effets de T1, ni par les effets de T2.

C'est ce qui fera dire dans un raccourci un peu simpliste que les "séquences courtes" sont pondérées en T1 et que les "séquences longues" sont pondérées en T2. En effet, les temps de répétition étant un facteur déterminant dans le temps d'acquisition, comme nous le verrons un peu plus loin, il est clair qu'une séquence à TR court dure moins longtemps qu'une séquence à TR long.

En pratique, les temps de relaxation des tissus étant comme on l'a vu pour le T1 de l'ordre de 0,5 seconde et pour les T2 de l'ordre de 50 millisecondes, une séquence pondérée en T1 sera typiquement une séquence avec un temps de répétition de l'ordre de 0,5 seconde et un temps d'écho le plus court possible (15 à 20 ms), alors qu'une séquence pondérée en T2 sera une séquence avec un TR long de l'ordre de 2 secondes et un temps d'écho supérieur à 50 ms (de l'ordre de 80 à 120 ms).

### **3.3. LA SEQUENCE D'ÉCHO DE GRADIENT**

La technique dite de l'écho de gradient (employée ici) n'utilise pas d'impulsion radiofréquence. Elle ne permet pas de refocaliser les inhomogénéités du champ statique mais fonctionne essentiellement à la manière d'une séquence d'écho de spin. Un gradient  $g_x = -g_0$  est appliqué pendant un temps  $\tau$  provoquant une précession d'angle  $-\gamma g_0 X \tau$  (pour des spins localisés à l'abscisse X). A la fin de cet intervalle  $\tau$ , le gradient est commuté de  $-g_0$  à  $g_0$  : le sens de la précession est ainsi inversé et, après un temps  $\tau' = \tau / k$ , chaque aimantation élémentaire est de retour à sa position initiale, ce qui se traduit par la formation d'un écho dont le maximum se situe à  $\tau'$ . On traite la totalité de l'écho par transformée de Fourier pour obtenir la densité de spin dans la direction X. On utilise un codage de phase dans l'autre direction Y pour obtenir des sections planes (X,Y) de l'objet étudié.

### **3.4. COMPARAISON DES DEUX SEQUENCES**

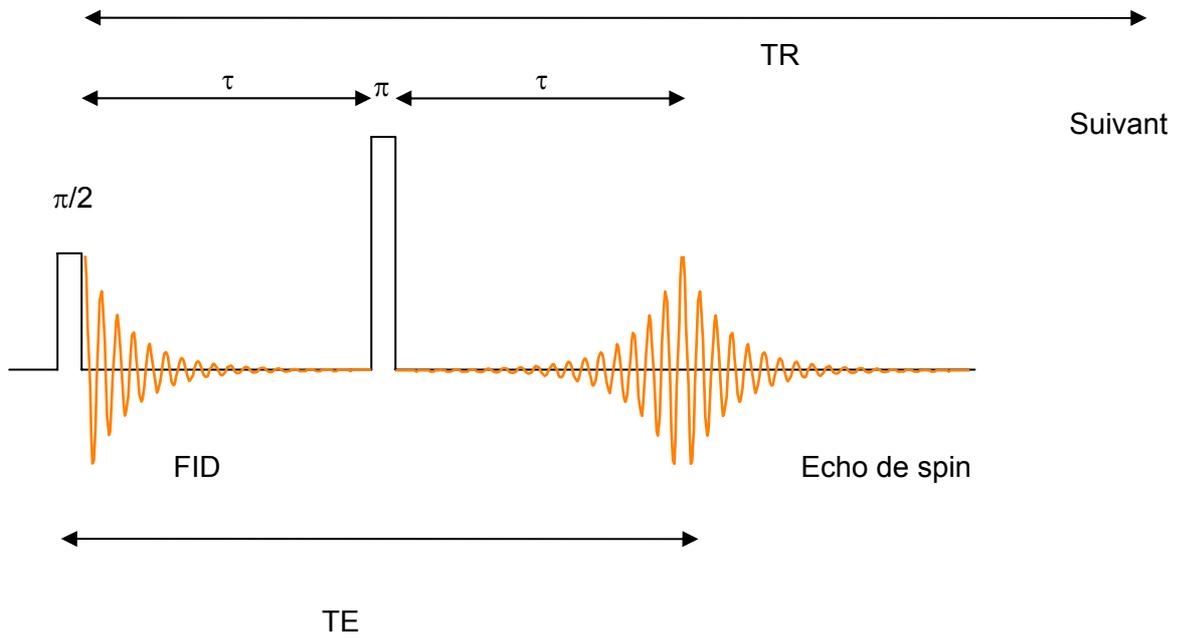
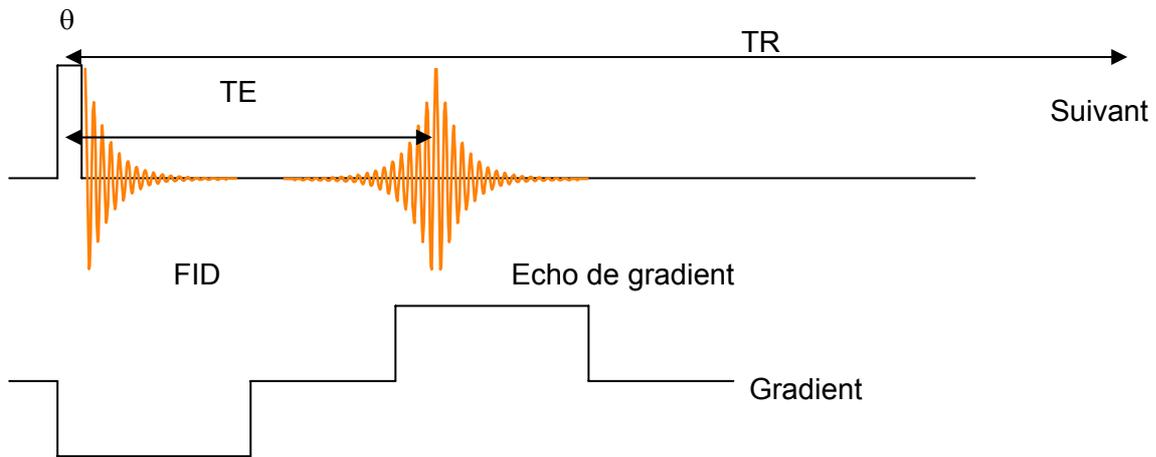


Fig.7.Séquence d'écho de spin (SE)



$\theta$  généralement faible

Fig.8.Séquence d'écho de gradient

TE : Temps d'écho

TR : Temps de répétition

S'il fallait comparer les avantages et les inconvénients respectifs des deux séquences écho de gradient et spin écho, on pourrait dire que :

- la séquence de spin écho permet de s'affranchir des inhomogénéités du champ  $B_0$ , mais elle nécessite deux impulsions sélectives  $90^\circ$  et  $180^\circ$  en présence du gradient de sélection de tranche, ce qui limite la durée minimum du temps d'écho. L'impulsion à  $90^\circ$  dans la séquence de spin écho annule la composante longitudinale ce qui ne permet pas d'utiliser des temps de répétition suffisamment courts. Le contraste est variable en fonction du choix du temps de répétition et du temps d'écho, comme nous l'avons vu.

- la séquence en écho de gradient, par contre, est sensible aux inhomogénéités de champ  $B_0$ . Cette séquence peut poser problème s'il existe au voisinage du plan de coupe du matériel métallique et à fortiori ferromagnétique (pivots dentaires, couronnes...). Cette séquence ne nécessite qu'une impulsion sélective, ce qui permet des temps d'écho plus courts. Elle permet surtout d'utiliser des angles d'excitation petits, qui n'annulent pas la composante longitudinale et autorisent donc des temps de répétition très courts, permettant l'accès à l'imagerie rapide. Le contraste est variable, en fonction du temps de répétition et du temps d'écho, mais aussi en fonction de l'angle de basculement  $\theta$ .



## 4. Description chronologique des mesures

### 4.1. MARDI 23 NOVEMBRE

#### 4.1.1. Expérience n°1

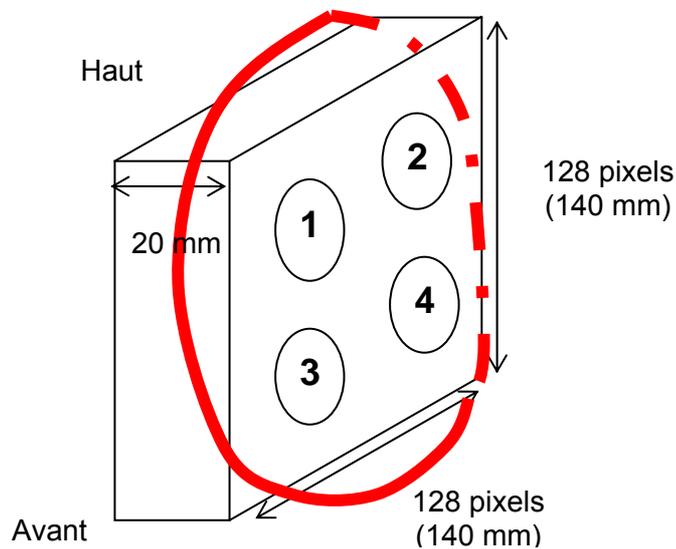


Fig.9. Disposition des échantillons pour l'expérience n°1, en rouge l'antenne de mesure.

Légende de la figure 9 :

- Echantillon n°1 : M01 695-700 (St Cyr en Val) (sans double paroi)
- Echantillon n°2 : M02 195-200 (St Cyr en Val)
- Echantillon n°3 : M02 Top (St Cyr en Val) (sans double paroi)
- Echantillon n°4 : M01 690-695 (St Cyr en Val)

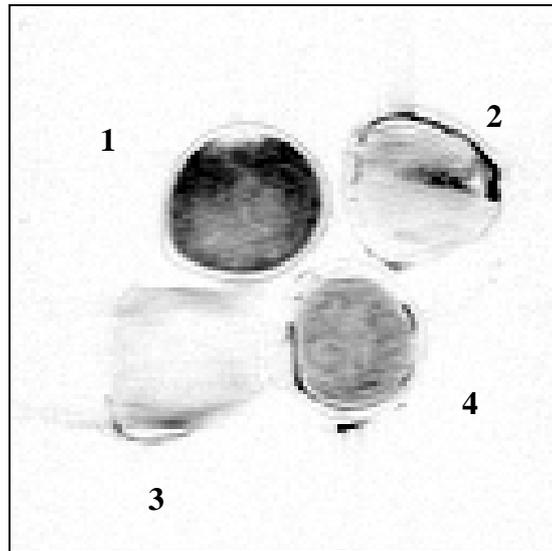


Fig.10. Image obtenue par écho de spin : les cylindres apparaissent déformés sous l'effet de la perturbation des gradients de champs magnétiques par les propriétés magnétiques des échantillons (Série 2\_ Image\_4).

**REMARQUE IMPORTANTE :**

Les images présentées dans ce rapport sont en « inversion video », le signal apparaît ici en foncé alors qu'il apparaît lumineux sur les appareils IRM.

Les images sont stockées dans des fichiers dont les noms sont indiqués au fur et à mesure de leur présentation dans ce rapport, même si toutes les images ne sont pas présentées ici.

Les échantillons ont été prélevés lors des forages de mai 2004 sur le site test de St Cyr en val. Ils sont constitués de sables/argiles en diverses proportions. Les échantillons ont été saturés en eau pour cette expérience.

Les échantillons sont enfermés dans des tubes en plexiglas de 40 (mm) de diamètre pour une longueur variant entre 6 et 8 cm. Certains de ces tubes sont enfermés dans un deuxième tube en plexiglas également, qui laisse un peu d'espace entre les 2 parois. Cette double paroi est quasiment remplie d'eau suite à la saturation des échantillons.

La mesure commence par le « shim », ajustement des aimants correctifs. La tolérance de l'inhomogénéité du champ statique obtenue est de 0.003 mT/m.

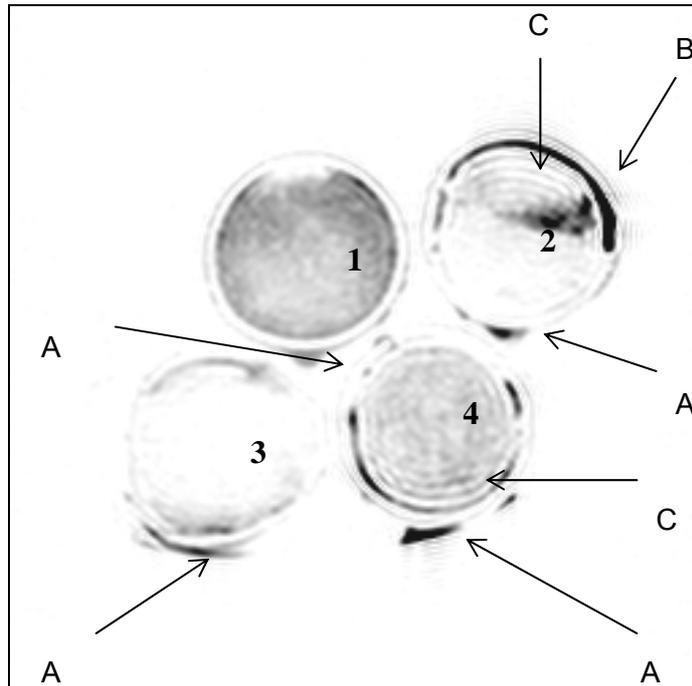


Fig.11. Image obtenue par écho de gradient, après réajustement des gradients magnétiques (shim)

Légende de la figure 11:

- A. forte teneur en eau = accumulation sous effet gravitaire au bas des tubes,
- B. signal très fort de l'eau dans la double paroi des tubes (bien plus fort que le signal de l'échantillon)
- C. artefacts dus au signal très fort en périphérie des échantillons. (Série 3\_ Image\_5)

### **Résultats de l'expérience n°1**

Images : série 3, images 5 à 20.

L'eau dans la double paroi apparaît nettement, et génère un signal long et beaucoup plus fort que l'eau dans les échantillons.

Echantillons	T2 (ms) mesure manuelle	T2 (ms) automatique
Ech. n°1 : M01 695-700 (St Cyr en Val) (sans double paroi)	67	73
Ech. n°2 : M02 195-200 (St Cyr en Val)	50	60
Ech. n°3 : M02 Top (St Cyr en Val) (sans double paroi)	<20	-
Ech. n°4 : M01 690-695 (St Cyr en Val)	90	125

Tab 1- Estimation de T2 pour 4 échantillons prélevés sur le site test de St Cyr en Val en 2004.

Le rapport signal sur bruit est environ  $S/N = 2$  (très faible comparé à l'utilisation normale,  $S/N$  de l'ordre de 10 ou plus).

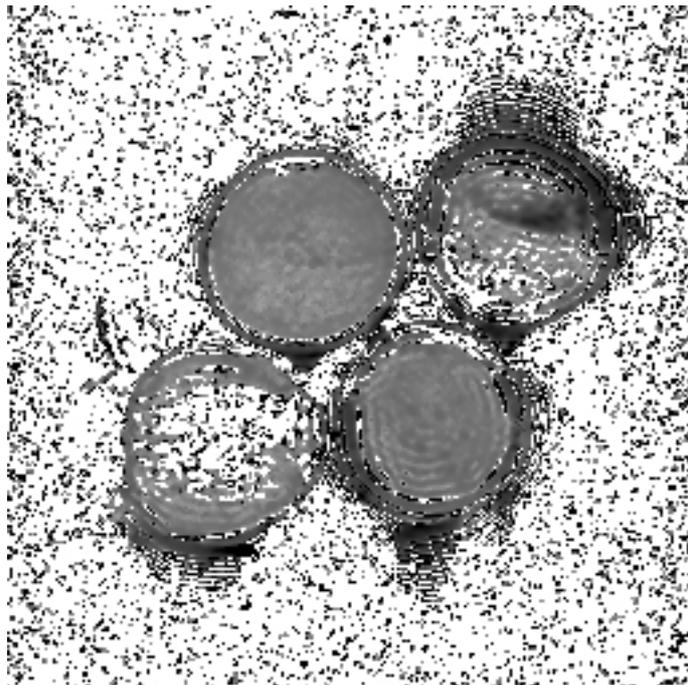


Fig.12. Estimation de T2 par traitement automatique des images 5 à 20 de la série 3 qui correspondent à des TE de 22.5 à 360 ms pour un TR constant de 2000 ms. (Série 4 image n°23). Les valeurs des estimations de T2 sont reportées dans le tableau 1.

#### 4.1.2. Expérience n°2

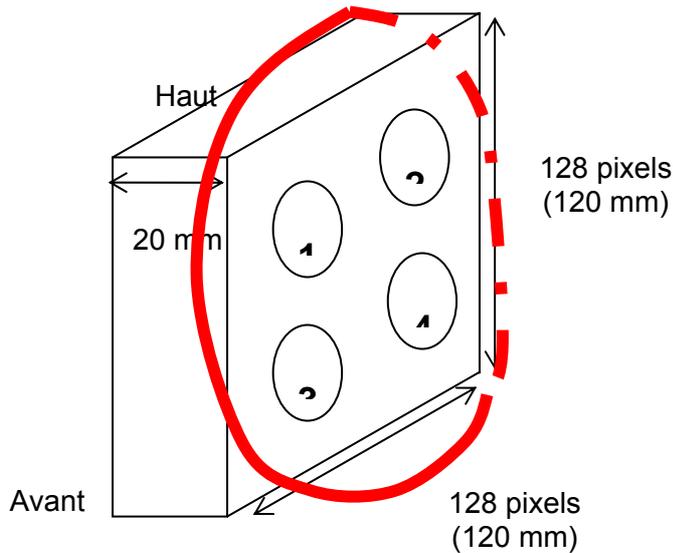


Fig.13. Disposition des échantillons pour l'expérience n°2

Légende de la figure 13 :

- Echantillon n°1 : M01 595-600 (St Cyr en Val) (sans double paroi)
- Echantillon n°2 : M01 95-100 (St Cyr en Val) (sans double paroi)
- Echantillon n°3 : M02 95-100 (St Cyr en Val) (sans double paroi)
- Echantillon n°4 : M01 195-200 (St Cyr en Val) (sans double paroi)

La résolution des images est de 128x128 pixels, soit dans ce cas un Field of View, Fov = 120x120 mm.

La première séquence utilisée est appelée SCOUT, il s'agit de 3 coupes dans les 3 directions (par écho de gradient) pour positionner le Fov sur les échantillons. Le

volume d'eau total des échantillons étant très faible, on ajoute 4 tubes remplis d'eau pour augmenter le volume total.

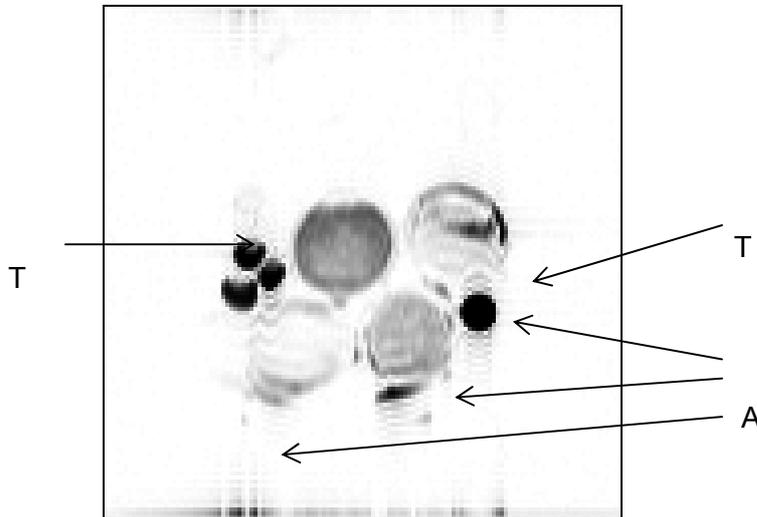


Fig.14. Série 8 Image 29, 4 tubes (T) remplis d'eau ont été ajoutés pour augmenter le volume d'eau dans la zone étudiée afin de faciliter l'initialisation de la séquence. On voit apparaître des artefacts (A) (étalement du signal des tubes sur la zone des échantillons).

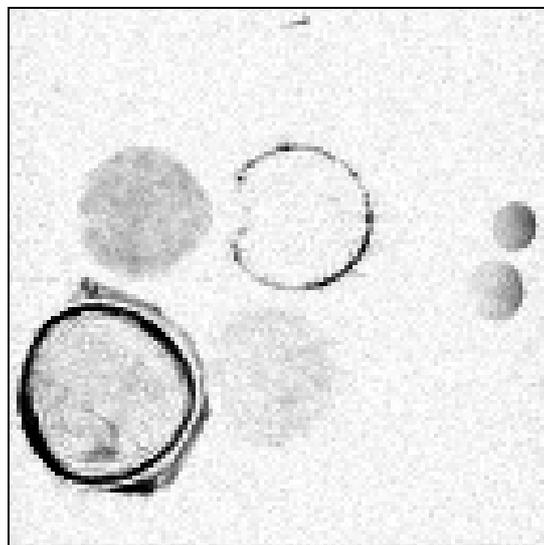


Fig.15. Série 10 – Image 33, 2 tubes (T) remplis d'eau permettent d'améliorer le rapport signal/ bruit pendant l'initialisation de la séquence et sont suffisamment écartés des échantillons pour éviter les artefacts. Les temps de relaxation sont très courts (pour cette image, on a utilisé TR 400ms, TE 12ms). Le rapport signal/ bruit est très mauvais et ne permet pas une estimation de  $T_2$ .

Malgré de nombreux essais avec TR=2000 ms les seuls paramètres d'acquisition qui ont permis d'obtenir une image sont TR 40ms et TE 16 ms. Néanmoins, le rapport signal sur bruit et la faible gamme de variation de TE ne sont pas suffisants pour pouvoir estimer  $T_2$ .

On observe uniquement l'eau à la périphérie des échantillons et on peut détecter la présence d'hétérogénéités aux extrémités des tubes.

### **Résultats**

Impossible de mesurer  $T_2$ , le rapport S/N reste trop faible.

#### **4.1.3. Expérience n°3**

Utilisation d'une autre antenne plus petite (conçue pour étudier les têtes de souris). Les échantillons sont reconditionnés dans une ampoule de 30x20 mm environ. Avec cette antenne, l'échantillon remplit totalement le volume dans l'antenne. Le rapport S/N devrait être augmenté.

L'échantillon choisi est le M01 695-700.

Deux coupes sont réalisées à chaque série écartées de 25mm. Les paramètres utilisés pour les différentes série de mesures sont résumés dans le tableau 2.

Série	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
TR (ms)	400	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
TE (ms)	12	12	18	24	30	40	50	60	70	80

Tab.2. séquence de variation de TE pour mesurer  $T_2$

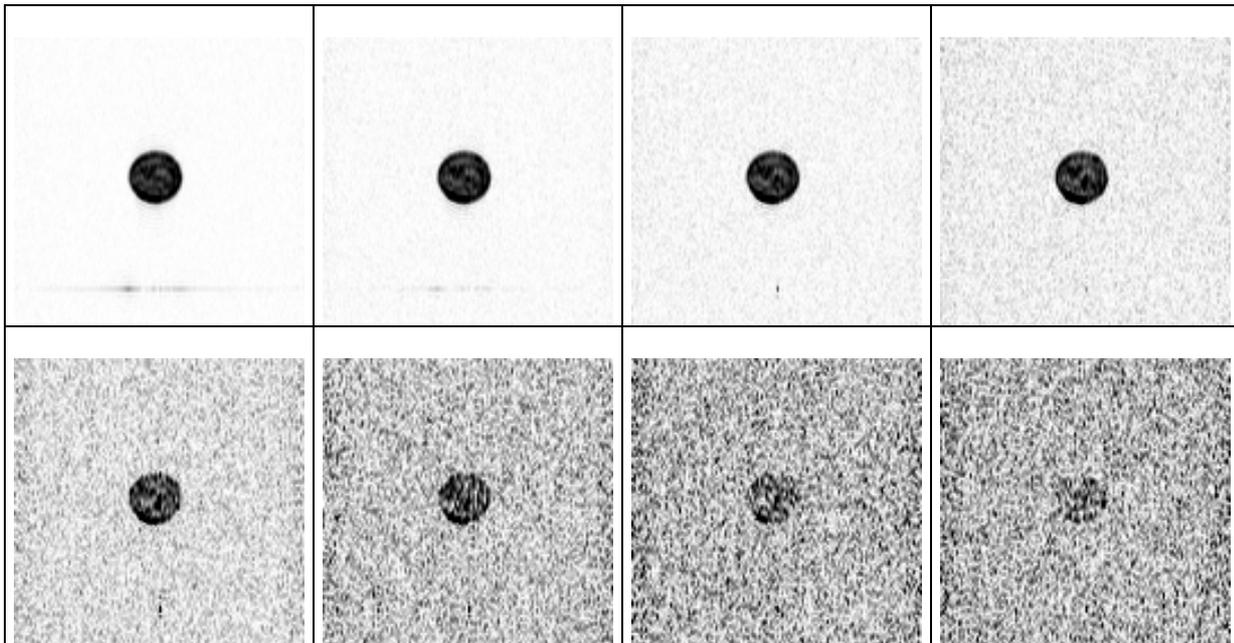


Fig.16. Séries 20 à 27, pour TR=2000 ms, TE varie de 12 à 70 ms. On voit le rapport signal/ bruit diminuer avec l'augmentation de TE.

L'estimation manuelle de  $T_2$  repose sur l'hypothèse suivante : lorsque l'amplitude du signal vaut 37.5 % du maximum du signal, alors  $TE = T_2$ .

### **Résultats**

On trouve  $T_2 \approx 20$  ms. Il est notable que cette valeur est comparable aux mesures effectuées à 2 MHz sur le même échantillon saturé.

Avec une séquence INVREC (« inversion recovery »), on mesure  $T_1 \approx 80-90$  ms.

### **Conséquences**

- à 8,5 MHz,  $T_2 \approx 20$  ms et  $T_1 \approx 85$  ms.
- à 2 MHz,  $T_2 \approx T_1 \approx 20$  ms
- sur le terrain à 2 kHz,  $T_1 \approx 200$  ms.

## 4.2. EXPERIENCE N°4

Echantillon de craie de la Somme complètement immergé depuis 3 semaines

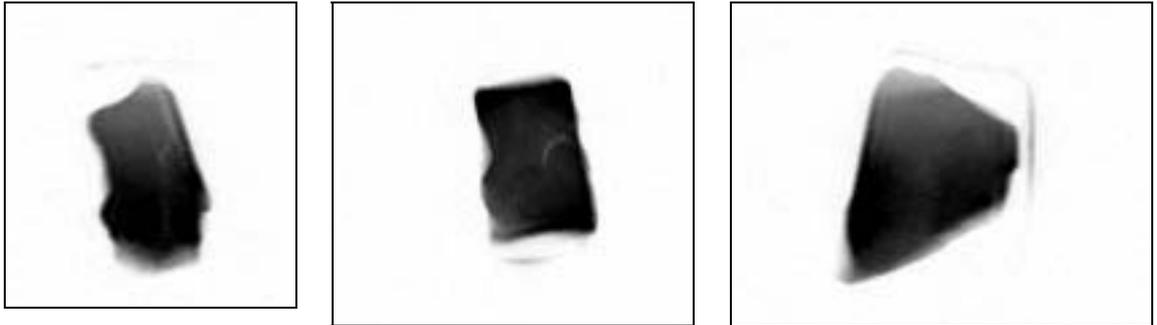


Fig.17. Série 36 - Séquence d'initialisation (Scout) TR = 40 et TE = 10 ms. Les trois images représentent 3 coupes de 280x280 mm dans les trois directions de l'espace (cor, tra et sag) qui sont en fait des tranches de 15mm d'épaisseur.

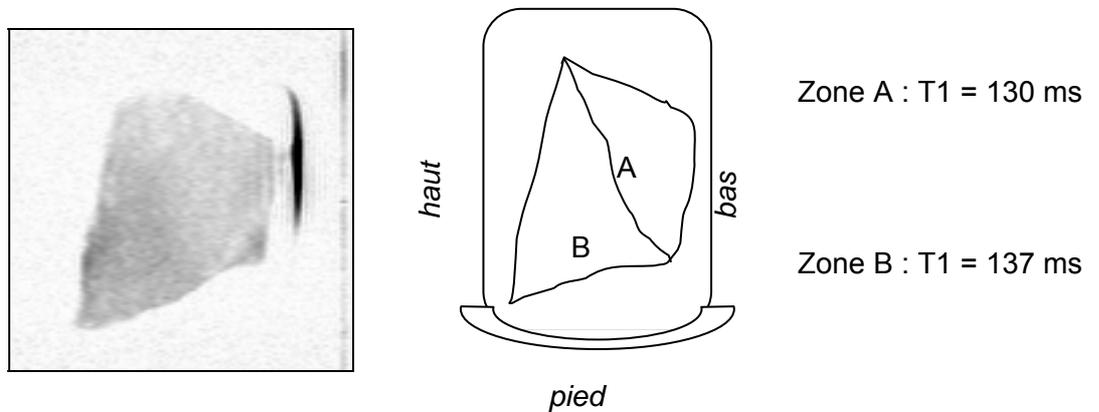


Fig.18. Image extraite de la série n°40 Invrec (120x120 mm) et représentation schématique de l'échantillon : on observe une légère différence de T1 entre les deux zones A et B.

La mesure de T1 donne approximativement 130 ms.

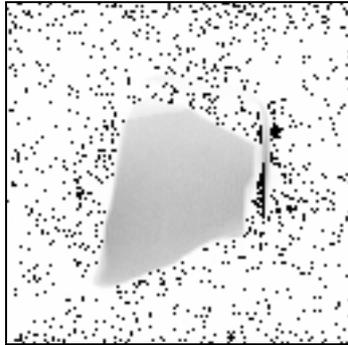


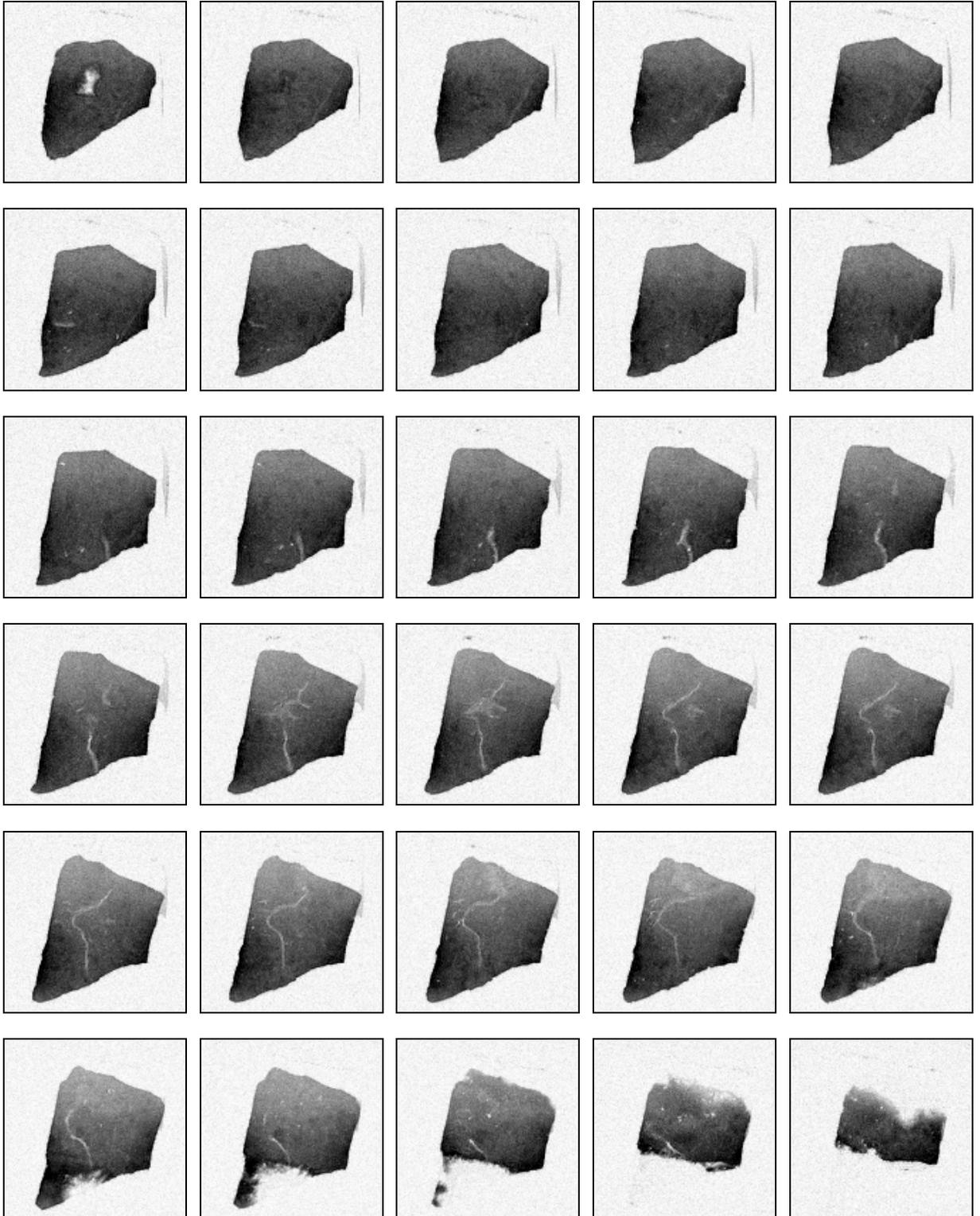
Fig.19. Image extraite de la série n° 44, image n° (160x160 mm), calcul de T2 à partir d'une série d'écho de spin avec TR=2000 et TE variant de 22.5 ms à 360 ms : **T2= 70 ms.**

#### **4.2.1. Imagerie en 3 dimensions**

On voit sur la fig.20 les images extraites de la série n°47, séquence d'écho de gradient « fl3d 40 », TE= 34 ms et TR=12 ms (128x128 pixels = 110x110 mm, épaisseur = 1mm).

On voit sur les premières et dernières images que l'intersection entre la tranche imagée et l'échantillon varie à cause de la forme 3D de l'échantillon. L'intérieur de l'échantillon apparaît très homogène et fait clairement ressortir une fissure vide d'eau, certainement une fissure cimentée plutôt qu'ouverte car elle est invisible à l'œil nu malgré sa largeur millimétrique.

Fig.20. Imagerie en 3 dimensions : plans successifs à travers un échantillon de craie.



### 4.3. MERCREDI 24 NOVEMBRE

#### 4.3.1. Expérience n°1

Mesures sur l'eau dans laquelle la craie a trempée pendant 3 semaines

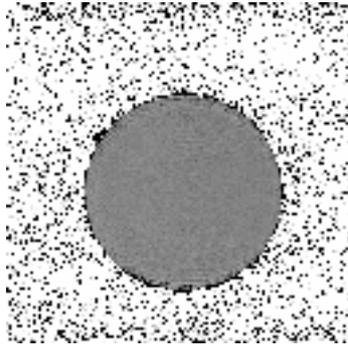


Fig.20. série n°53 image 293, calcul de T2 à partir de séquences d'écho de spin avec TR=2413 ms et TE variant de 300 à 2400 ms (150x150 mm).

#### **Résultats**

$$T2_{\text{eau}} = 1900 \pm 100 \text{ ms}$$

$$T1_{\text{eau}} = 2400 \text{ ms}$$

#### 4.3.2. Expérience n°2

Mesure de T1 avec la séquence *tomrop* (mesures automatiquement avec plusieurs délais) sur la craie de la veille

#### **Résultats**

T1 = 125 ms → cohérent avec les mesures par séquence INVREC

#### 4.3.3. Expérience n°3

Test de transfert d'aimantation sur différents échantillons (craie et eau) et avec différentes séquences, mais aucun résultat satisfaisant n'a été obtenu.

#### 4.4. JEUDI 25 NOVEMBRE

##### 4.4.1. Expérience n°1

Nouveaux essais sur les échantillons de St Cyr en mettant 5 échantillons + 1 tube d'eau dans l'antenne « bras » (utilisée jusqu'ici) puis en mettant les échantillons dans des tubes plus petits dans l'antenne « souris » (spires de l'antenne s'ajustant au diamètre des tubes des échantillons).

Aucun résultat : le signal est trop faible ( $T_2 < 15\text{ms}$ ) sur 5 échantillons → abandon

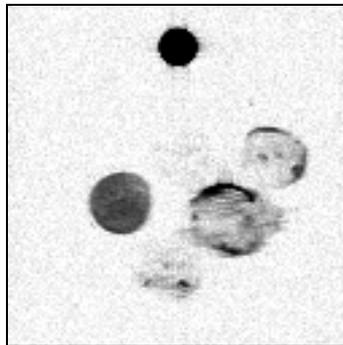


Fig.21. série 7 img 19, séquence d'écho de spin « se1 90 » ( $TR=300\text{ ms}$  et  $TE= 15\text{ ms}$ ,  $120 \times 120\text{ mm}$ )

##### 4.4.2. Expérience n°2

Les nouveaux tests de transfert d'aimantation sur la craie avec différents *flip angle* et *TR* ne permettent pas d'obtenir des résultats interprétables.

### 4.4.3. Expérience n°3

Mesures sur la craie à moitié immergée

#### **Résultats**

Sur l'image scout (standard, non présentée ici): on n'observe pas de différence notable de teneur en eau entre la partie immergée et la partie émergée.

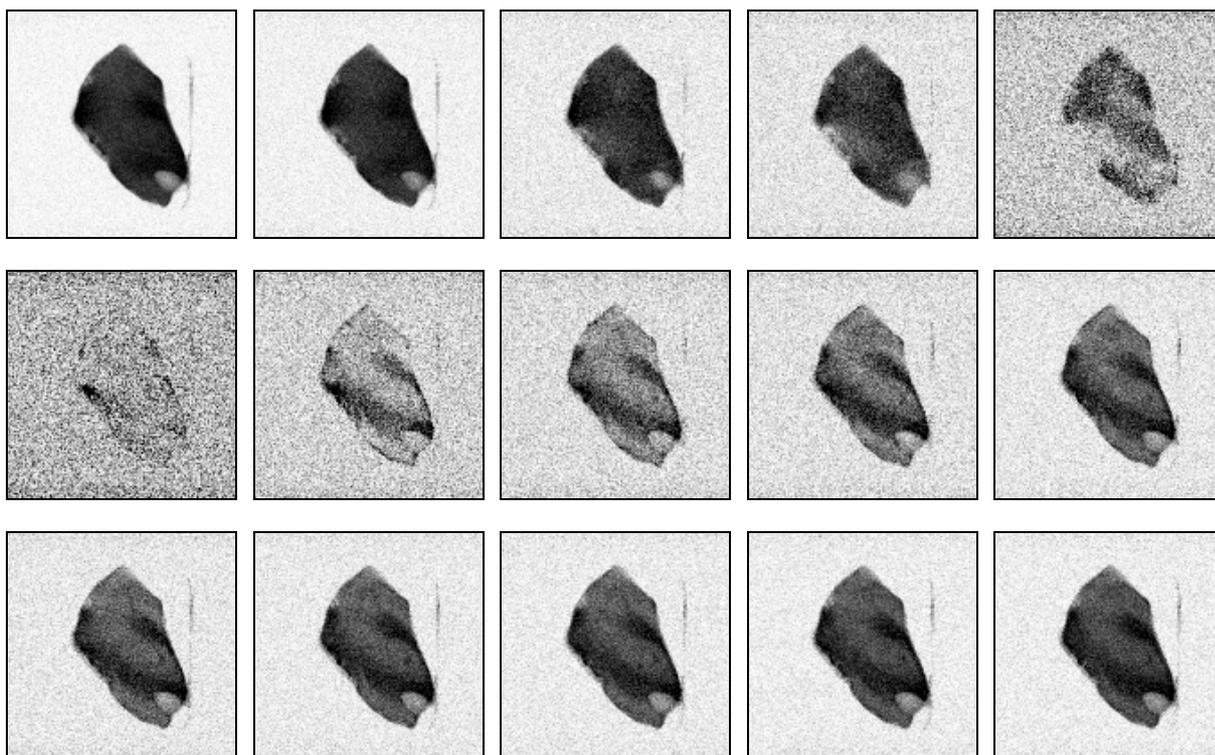


Fig.22. Série 36, séquence Invrec « TomRop » pour la mesure de T1 (FoV= 150x150 mm, TR= 400 ms et TE variant de 12 ms à 200 ms).

On voit clairement deux zones qui ne s'éteignent pas pour le même délai (Fig. 22).

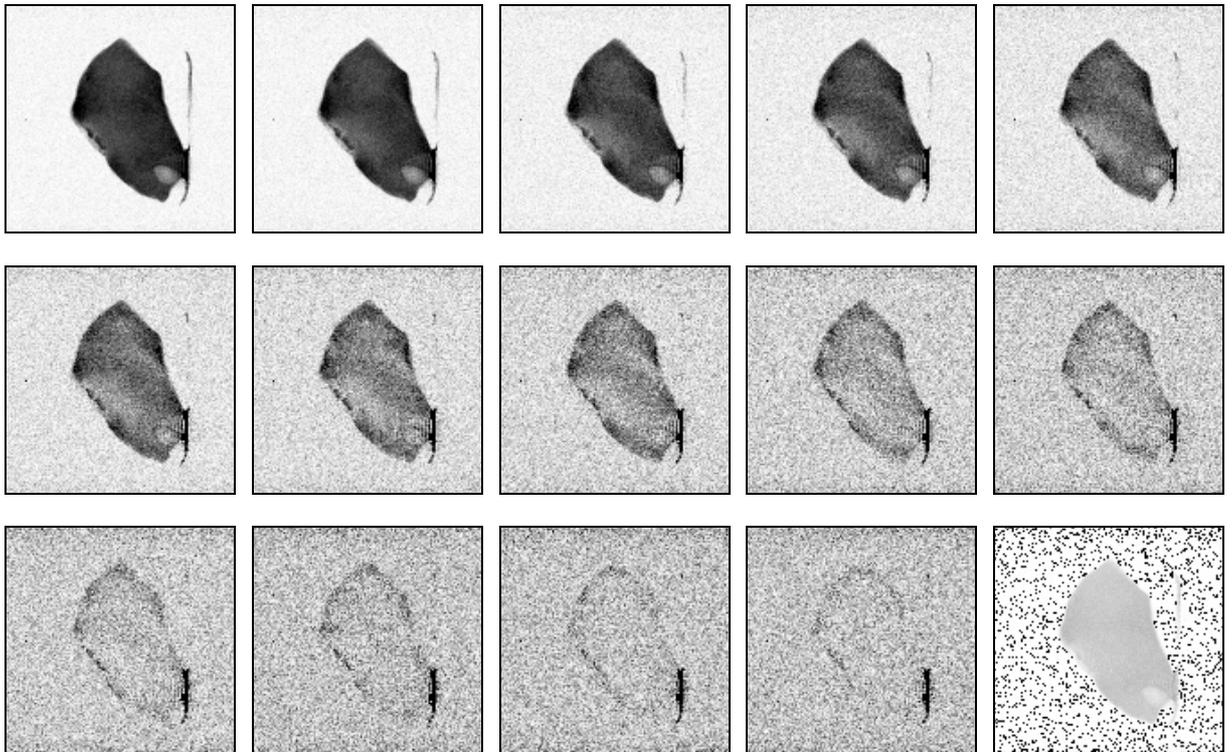


Fig.23. Série n°41, séquence d'écho de spin avec délai variable pour la mesure de T2 (FoV= 150x150 mm, TR=2000 ms et TE variant de 22.5 ms à 360 ms) et densité de T2 (dernière image).

Comme pour T1, on observe que 2 zones se distinguent qui ne s'éteignent pas pour le même délai (Fig. 23).

### Résultats

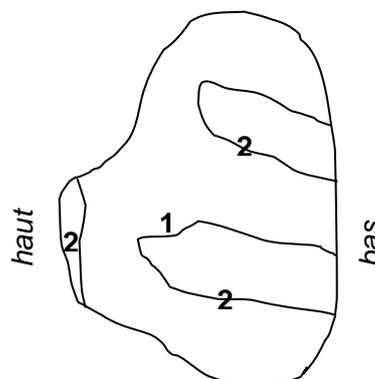


Fig.24. Deux zones apparaissent : Zone 1, T1 = 107 ms et T2 = 75±5ms, Zone 2 T1 = 90 ms et T2 = 66±8 ms

#### 4.4.4. Expérience n°4

Mesures sur la craie de Normandie

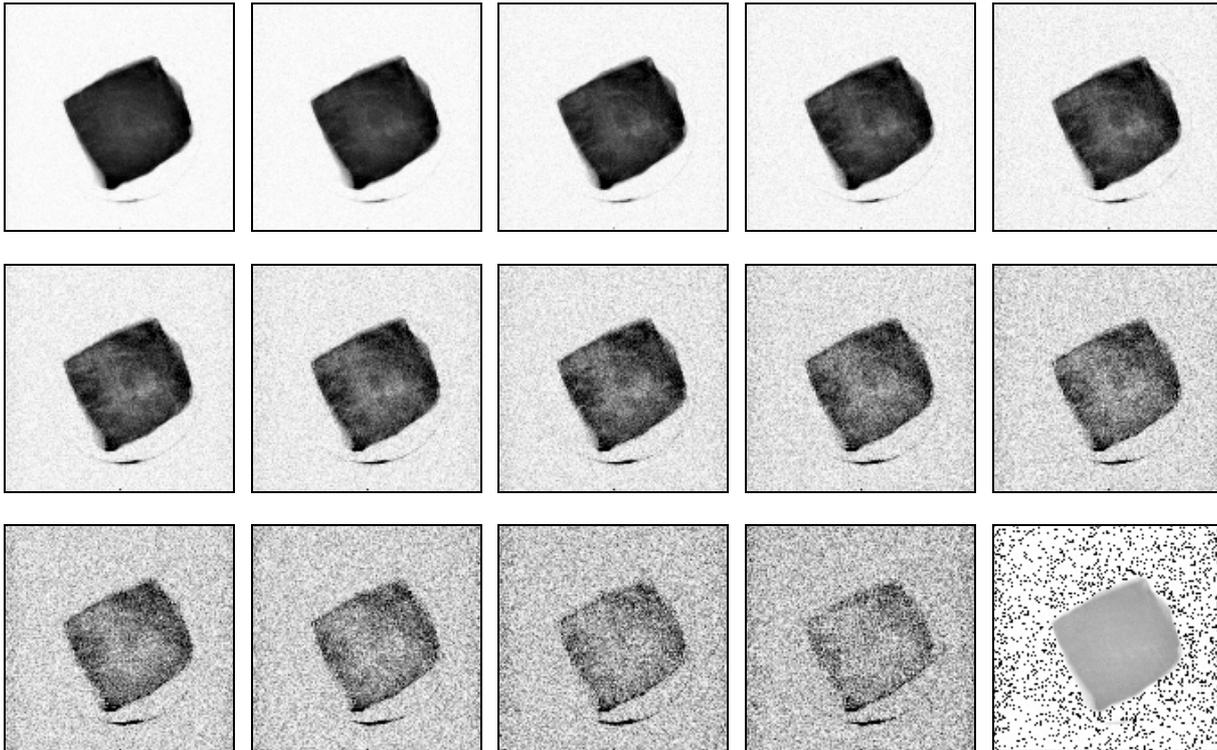


Fig.25. Série n°44, séquence d'écho de spin avec délai variable pour la mesure de T2 (Fov 140x140 mm, TR=2000 ms et TE variant de 22.5 ms à 360 ms) et densité de T2 (dernière image).

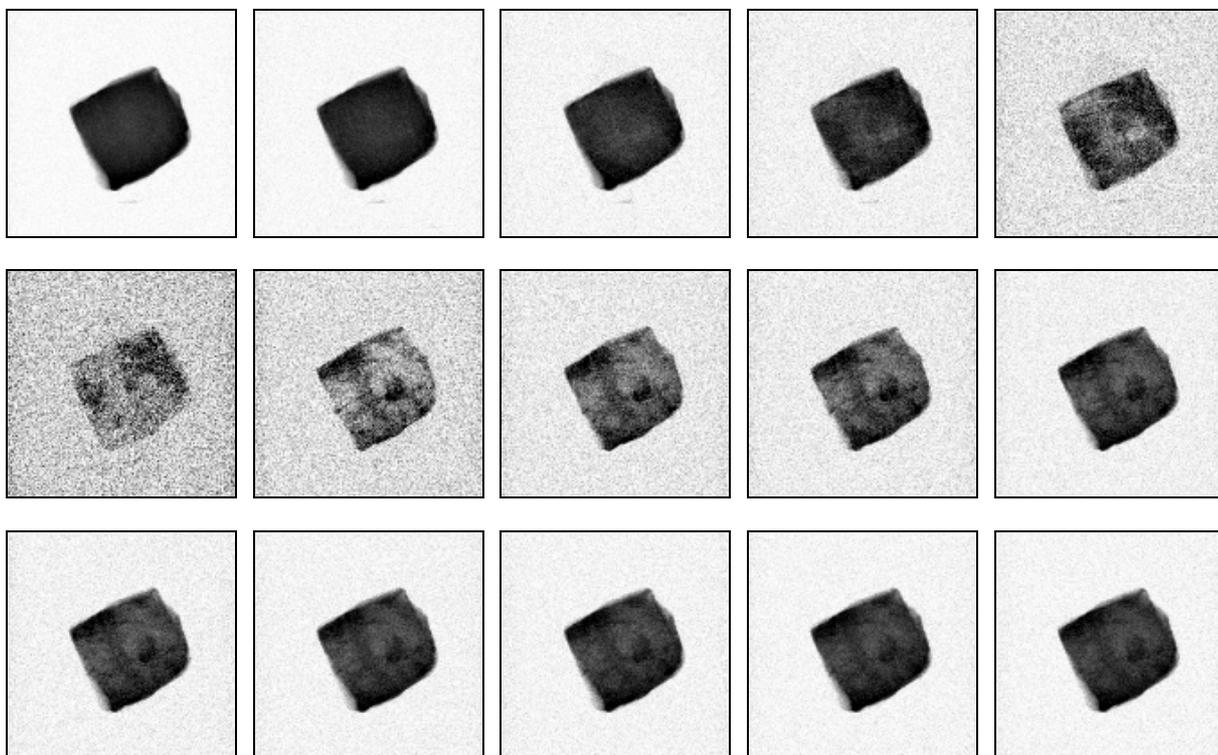


Fig.26. Série 46, séquence Invrec « TomRop » pour la mesure de T1 (FoV= 150x150 mm, TR= 400 ms et TE variant de 12 ms à 200 ms).

### **Résultats**

**T2 (craie normande) = 90-100 ms**

**T1 (craie normande) = 105-125 ms**

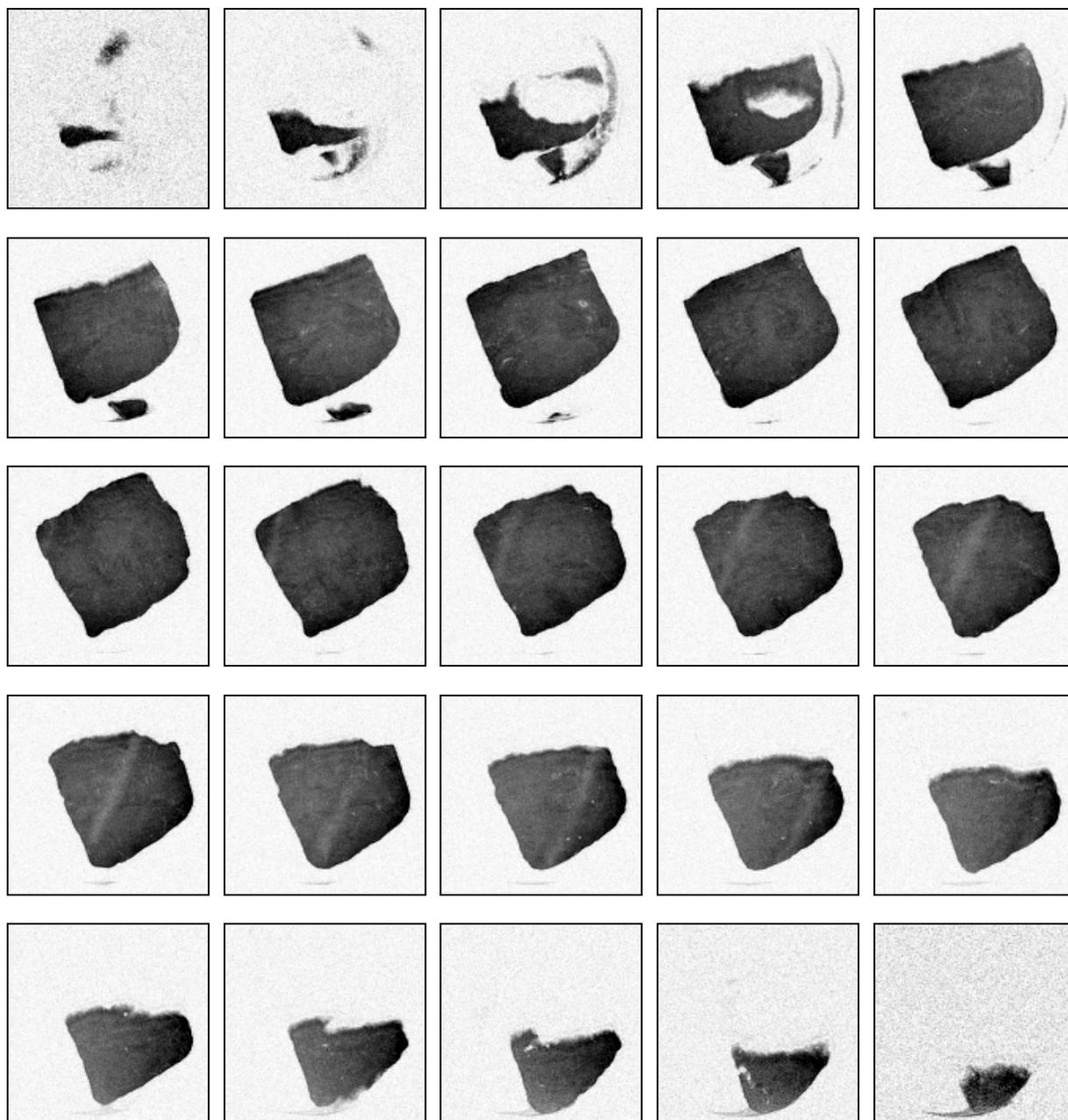


Fig.27. Séquence d'écho de gradient (tranches de 100x100x1.5 mm, TR= 34 ms et TE=12 ms, écart entre 2 tranches = 3 mm).

On observe un plan sans eau de 1-2 mm d'épaisseur et qui traverse tout l'échantillon. Cela peut être un plan de fracture rempli ou recalifié. Vraisemblablement, ce n'est pas de l'air sinon l'échantillon serait coupé en deux.

Quelques essais de transfert d'aimantation ont été réalisés, à nouveau sans succès.

#### 4.4.5. Expérience n°5

Altérites des Vosges (fines et grossières).

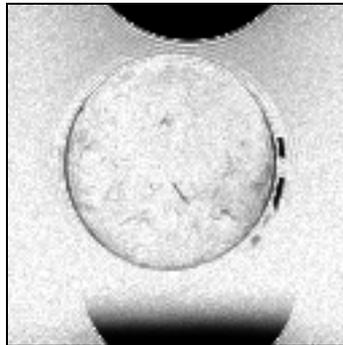


Fig.28. Série n°67, séquence d'écho de spin (FoV=140x140 mm, TR=300ms et TE=15ms). Pour augmenter le signal lors de la calibration de l'appareil, une bouteille d'eau a été ajoutée (en haut de l'image). Cela crée une image « reflet » liée à l'intensité du signal de la bouteille par rapport à l'échantillon et au repliement du spectre (Fourier).

*Résultats :*

On ne peut pas mesurer le signal RMN à 0.2T sur cet échantillon. Les propriétés magnétiques de l'altération du granite et des roches volcaniques peuvent l'expliquer. A confirmer à partir des autres mesures sur échantillons réalisées à l'IPG Strasbourg.

#### 4.5. VENDREDI 26 NOVEMBRE

Expérience de transfert d'aimantation avec un œuf dur.

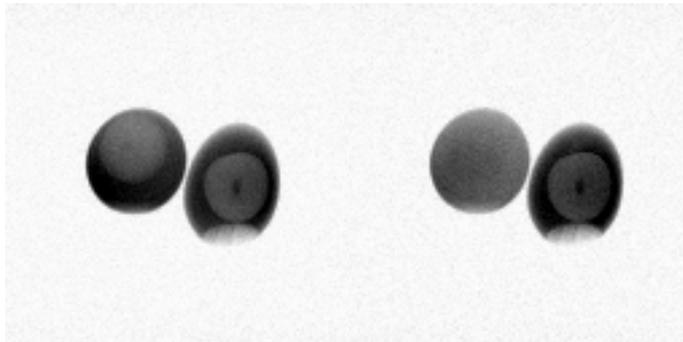


Fig.29. A gauche, imagerie d'un œuf dur et d'un œuf cru sans transfert d'aimantation ; à droite, le transfert d'aimantation a permis de faire disparaître le jaune d'œuf cru.

Cette technique permet de faire apparaître uniquement les zones avec des T2 très courts.

## 5. Conclusions

### 5.1. CONCLUSIONS DES MESURES SUR LES ECHANTILLONS DU SITE TEST DE ST CYR EN VAL :

- La déformation très forte des images indique clairement un effet de la susceptibilité magnétique, qui peut expliquer l'extrême difficulté à mesurer T2 à 0.2T sur ce sol, et les temps beaucoup plus faibles observés à 2 MHz qu'en champ terrestre.
- L'eau dans la double paroi génère un signal très fort, qui peut masquer/ fausser la mesure de temps de relaxation, même à 2 MHz (prendre des précautions pour interpréter les mesures à 2MHz sur les échantillons à double paroi).
- A 2 MHz (mesures à Berlin),  $T1=T2$  et la teneur en eau RMN est très cohérente avec la teneur en eau par pesée, mais les temps sont très courts (<30 ms).

A 8.5 MHz,  $T1>T2$  et les propriétés magnétiques de ce sol empêchent de faire de l'imagerie RMN.

### 5.2. CONCLUSIONS SUR LES MESURES SUR LES ECHANTILLONS DE CRAIES

Dans la craie, les temps de relaxation ont été estimés. T1 est compris entre 90 et 140 ms, ce qui est du même ordre de grandeur que ce qui a été mesuré sur le terrain.  $T2 = 60-75 \text{ ms} < T1$ . Dans la craie, il est possible d'utiliser toutes les possibilités de l'imagerie 3D de l'IRM (sur des fissures par exemple). Dans l'avenir des mesures de transfert d'aimantation pourraient permettre d'estimer la réponse de l'eau dite liée.

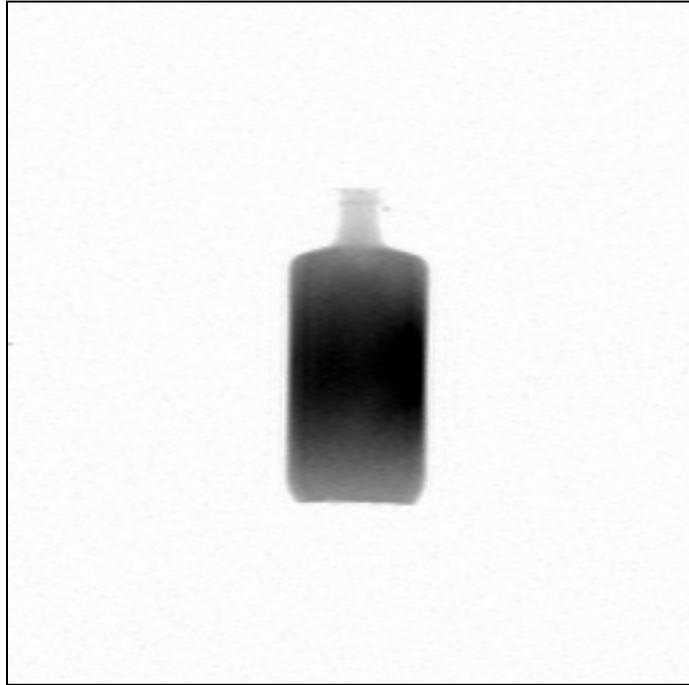
### 5.3. CONCLUSIONS SUR LES MESURES SUR LES ECHANTILLONS DES ALTERITES DES VOSGES

Aucune mesure n'a pu être réalisée par IRM. La présence de particules magnétiques tout à fait normale dans ce type de sol permet d'expliquer ce résultat.

L'avantage de mesurer les paramètres RMN dans le champ terrestre est ainsi souligné.



## 6. Annexes



série 84 img 402 (TR=40 ms et TE=10 ms, 280x280 mm).

Image d'une bouteille d'eau par IRM : les variations d'intensité correspondent à la variation de la forme du récipient. Dans la zone centrale, le signal est très stable.



## 7. Bibliographie

Cours de résonance magnétique, spectroscopie et imagerie J Vion-Dury (Ellipses).

Canet, Boubel, Soulas, « LA RMN, concepts, méthodes et applications », Ed Dunod.

Site web Université de Rennes :

<http://www.med.univ-rennes1.fr/cerf/edicerf/BASES/index.html>

BOUCHER.M., GIRARD.J.F., LEGCHENKO.A., BALTASSAT.J.M. (2005) - Eléments de méthodologie pour l'étalonnage de mesures de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) avec des données hydrodynamiques. Etude réalisée sur le site départemental de Saint-Cyr-en-Val. Rapport BRGM/RP-53666-FR.



**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