

DISPOSITIF DE DIAGRAPHIE À RMN DE RÉOLUTION CENTIMÉTRIQUE

M. LOCATELLI

LETI (CEA-Technologies Avancées) DSYS/SCSME¹

Après un bref rappel sur le concept des mesures de RMN, nous décrivons un dispositif de mesure de la porosité en puits présentant une résolution verticale centimétrique. Des tests effectués avec un dispositif de laboratoire en confirment les potentialités, en particulier au niveau de la vitesse de déplacement qui peut atteindre 1800 pieds/heure.

AN NMR LOGGING APPARATUS WITH CENTIMETER RESOLUTION

After a brief review of the concept of NMR measurements, we describe an apparatus, with resolution on a scale of centimeters, for measuring well porosity. Laboratory tests confirm the potential of this apparatus, especially its speed, which can attain 1800 feet/hour.

DISPOSITIVO DE DIAGRAFÍA DE RMN DE RESOLUCIÓN CENTIMÉTRICA

Tras un breve resumen acerca del concepto de las mediciones por RMN, se describe un dispositivo de medición de la porosidad en pozo que presenta una resolución vertical centimétrica. Las pruebas efectuadas con un dispositivo de laboratorio han venido a confirmar las potencialidades, y particularmente, por lo que se refiere a la velocidad de desplazamiento, que puede llegar a alcanzar 1800 pies/hora.

INTRODUCTION

La technologie RMN en puits connaît depuis quelques années un attrait grandissant dans le domaine pétrolier [1, 2, 3, 4]. Elle permet une mesure directe de la porosité et sous certaines conditions la détermination de la perméabilité.

Différents dispositifs ont été développés aux cours de la dernière décennie. Actuellement, seul le dispositif MRIL de la société *Numar* est exploité couramment.

(1) CEA Grenoble
17, rue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex 9 - France

Ce dispositif présente certaines particularités qui limitent son utilisation : résolution verticale de quelques décimètres, vitesse de logging réduite et, d'autre part, il requiert une puissance de fonctionnement élevée.

Nous présentons ici un concept de dispositif développé et validé en laboratoire.

Ce dispositif est particulièrement bien adapté pour une utilisation dans des formations de type bancs minces. Il apparaît comme un complément optimal au dispositif conçu par *Numar*.

Ses principales potentialités sont : une résolution verticale centimétrique, une vitesse de déplacement et une puissance de fonctionnement standard respectivement supérieure à 900 pieds/heure et inférieure à 100 W.

1 CONCEPT

La RMN permet d'observer sélectivement des protons placés dans une induction magnétique B_0 . Cette observation est réalisée à partir de l'interaction résonante des protons avec un signal électromagnétique B_1 de fréquence égale à la fréquence de précession des protons, laquelle est reliée à l'induction B_0 , dite de polarisation, par la relation de Larmor :

$$\omega = \gamma B_0$$

où γ est le facteur gyromagnétique des protons. Dans le cas des huiles, c'est le proton de l'hydrogène qui est observé.

La technique consiste à mesurer l'induction électromagnétique produite par les protons préalablement excités. Le signal observé est proportionnel au moment magnétique lié aux protons, c'est-à-dire à la quantité de fluide.

L'amplitude du signal A , par rapport au bruit b , dépend des paramètres expérimentaux et dans une première approche, elle peut s'exprimer par la relation suivante :

$$A/b = (\gamma B_0)(\chi B_0 / \mu_0) \text{Vol}(B_1 / I_1) / (4kTZ_0 \Delta\omega / (2\pi))^{1/2}$$

avec χ la susceptibilité nucléaire volumique, μ_0 la perméabilité du vide, Vol le volume de liquide, I_1 l'intensité du courant dans l'antenne électromagnétique, T la température, Z_0 l'impédance de l'antenne, $\Delta\omega$ la bande passante.

Cette relation montre que la résolution du système, exprimée par le volume minimum détectable, dépend du carré de l'induction B_0 , de l'efficacité B_1/I_1 et de la bande passante $\Delta\omega$ de l'antenne.

Du point de vue dynamique, la polarisation des protons est régie par les interactions entre les protons et l'induction, interactions caractérisées par le temps de relaxation T_1 .

La polarisation s'effectuant pendant le déplacement des protons dans l'induction de polarisation, la vitesse de déplacement est fonction de la répartition spatiale de l'induction.

Pour observer le signal, le moment magnétique est orienté perpendiculairement à la direction de polarisation, par interaction résonante avec le signal électromagnétique B_1 de direction perpendiculaire à celle de B_0 . L'angle α de rotation du moment est donné par la relation :

$$\alpha = B_1 \delta t$$

avec δt durée d'application du signal électromagnétique.

La décroissance du signal, caractérisée par les temps de relaxation T_1 et T_2 , est liée aux propriétés physicochimiques telles que la dimension des pores, la perméabilité, etc.

2 STRUCTURE MAGNÉTIQUE

Du point de vue conception, Jackson [1] a le premier proposé un système utilisant des aimants permanents pour produire l'induction de polarisation B_0 .

Parmi les matériaux magnétiques durs et performants disponibles commercialement, le samarium cobalt est le meilleur compromis pour l'application dans le domaine pétrolier du fait de sa température de Curie élevée.

L'optimisation de l'ensemble des paramètres a conduit à la solution schématisée figure 1.

Afin d'obtenir la résolution verticale désirée, l'induction est focalisée à partir de pièces polaires en matériau magnétique doux de forte perméabilité. Le contrôle de la focalisation et de l'homogénéité est obtenu en jouant sur la forme des pièces polaires dites en V. Parmi les matériaux disponibles sur le marché, c'est le fer, en raison également de sa température de Curie, qui est utilisé.

Un circuit magnétique en fer doux relie, en minimisant les pertes, les pièces polaires aux aimants permanents placés avec leur direction d'aimantation parallèle à l'axe de l'outil. Cette disposition permet d'optimiser l'efficacité des aimants, laquelle dépend du rapport entre la section de l'aimant perpendiculaire à la direction d'aimantation et la longueur suivant cette direction.

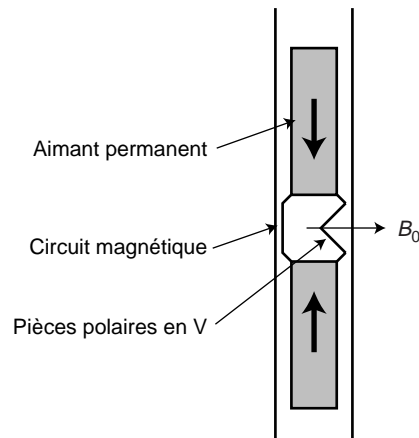


Figure 1

Structure magnétique.

Magnetic structure.

Les résultats de l'optimisation numérique sont représentés sur la figure 2. Ces résultats se résument par les valeurs suivantes, en faisant le choix d'une homogénéité de B_0 de 2 % :

- résolution verticale : 1,5 cm,
- amplitude de l'induction B_0 : 0,1 tesla,
- volume de mesure : portion de tore, diamètres 106 x 130 mm, angle de 160°.

La configuration de l'induction magnétique est telle que lors du déplacement, les protons sont soumis à une induction supérieure à celle du volume de mesure sur une distance de l'ordre de 15 cm (fig. 2). Pour des temps T_1 de l'ordre de 100 ms, la vitesse de logging peut atteindre la vitesse standard de 1800 pieds/heure.

3 STRUCTURE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

La largeur de bande du signal électromagnétique dépend directement de l'homogénéité de l'induction B_0 de part la relation de Larmor.

La décroissance du signal est perturbée par de nombreux phénomènes parasites parmi lesquels la mauvaise homogénéité de l'induction B_0 . L'utilisation de séquences RMN type CPMG permet de minimiser l'effet des perturbations.

Dans une séquence CPMG, des trains d'impulsions sont émis, donnant lieu à des échos dont la décroissance en amplitude dans le temps est régie par les temps de relaxation T_2 .

La porosité est obtenue par extrapolation du signal à l'origine, cette extrapolation est réalisée à partir de l'analyse mathématique de la variation du signal. L'analyse fournit aussi les temps de relaxation, d'où l'on peut déduire l'histogramme de la porosité.

La précision sur les résultats implique un grand nombre d'échos, donc, un taux de répétition des impulsions élevé.

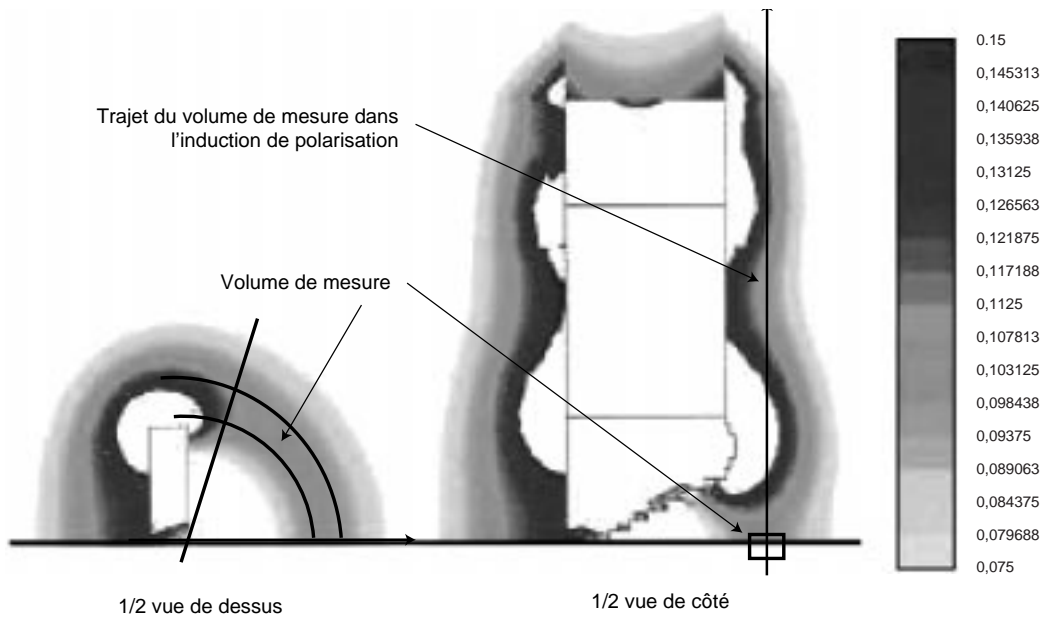


Figure 2
Optimisation numérique.
Numerical optimization.

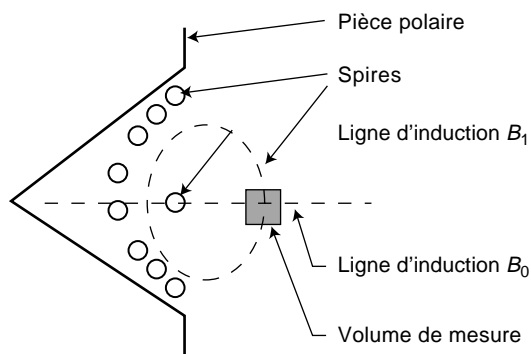


Figure 3
Structure électromagnétique.
Electromagnetic structure.



La valeur maximale de ce taux est dépendante de la puissance moyenne disponible et de la durée des impulsions, laquelle dépend de la puissance maximale d'émission, par conséquent, de l'efficacité de l'antenne.

L'antenne est réalisée à partir de spires en fil de cuivre et couplée à l'électronique de mesure par une boucle d'adaptation d'impédance, son facteur de surtension est de l'ordre de 50. Elle est insérée entre les pièces polaires en V (fig.3).

Les paramètres caractéristiques des séquences sont les suivants :

- durée d'impulsions de 10 à 30 μs ;
- taux de répétition par seconde de 1000 à 5000, (1 ms à 200 μs) ;
- puissance crête des impulsions à l'émission 500 W ;
- puissance moyenne maximale 100 W.

Le dispositif de laboratoire est représenté figure 4.

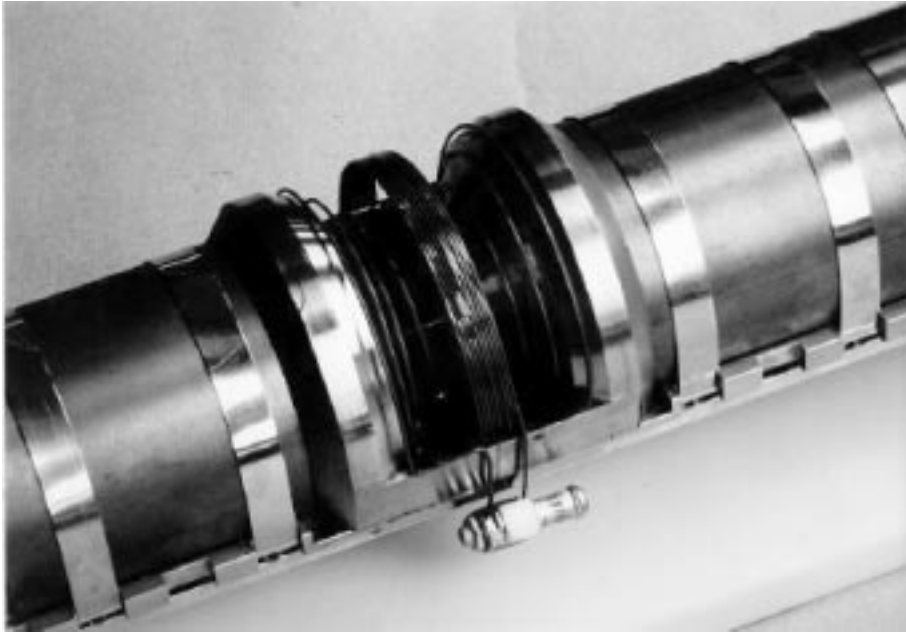


Figure 4
Dispositif de laboratoire.
Laboratory apparatus.

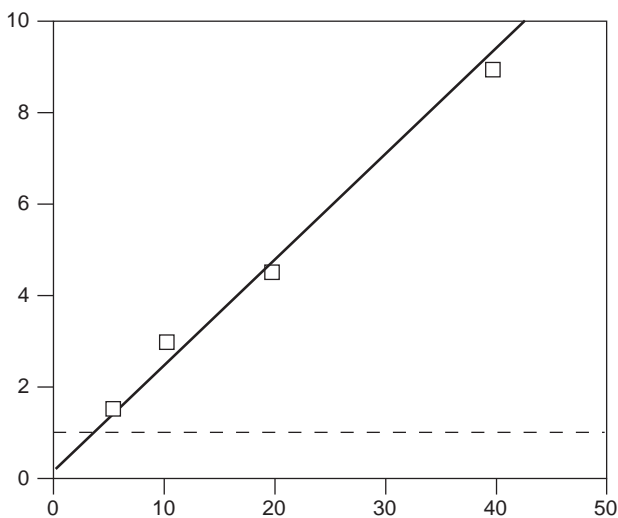


Figure 5
Réponse en fonction de la porosité.
Response as a function of porosity.

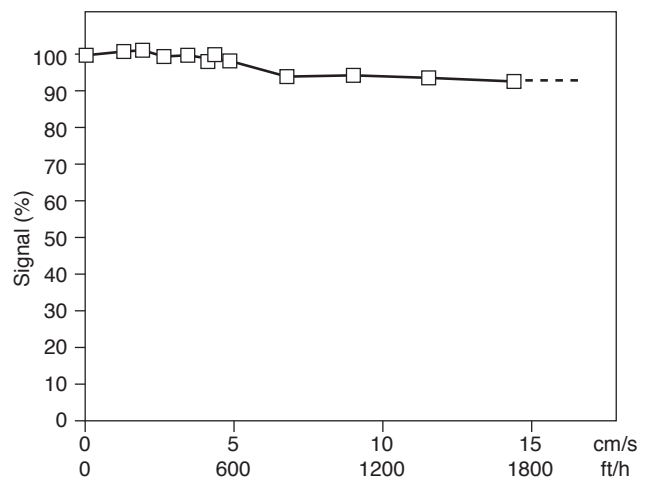


Figure 6
Signal en fonction de la vitesse.
Signal as a function of speed.

4 RÉSULTATS

Différents tests de validation ont été menés :

– Réponse en fonction de la porosité (fig. 5) :

- la réponse est parfaitement linéaire sur toute la gamme 0/100 %. Le niveau de bruit avant filtrage est de l'ordre de 2 à 3 %.

– Réponse en fonction de la vitesse (fig. 6 et 7) :

- l'amplitude du signal ne varie pratiquement pas avec la vitesse. Par contre, les trains diminuent en nombre pour disparaître au-delà de 15 cm/s.
- Réponse en dynamique à 7,5 cm/s en présence d'un bloc de grès caractérisé par tomographie X (*IFP*) et système d'imagerie RMN (*IEF*) [5], figure 8.

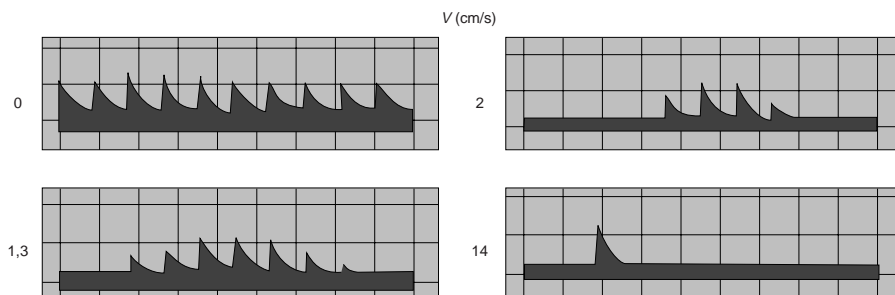


Figure 7

Nombre de trains en fonction de la vitesse
Number of wave bursts as a function of speed.

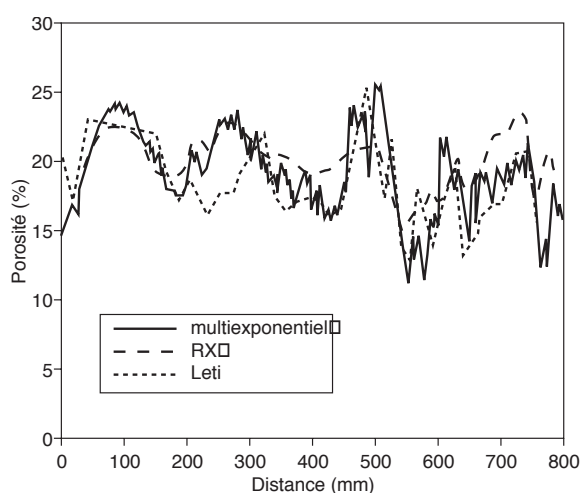


Figure 8

Diagraphie d'un bloc de grès.

Diagraph of a block of sandstone.

Quelques disparités sont observées, dues au fait que les mesures effectuées par l'IFP et l'IEF correspondent à la carotte prélevée au moment du forage du bloc et non au bloc, lequel présente une hétérogénéité transverse.

CONCLUSION

Ces résultats confirment les potentialités de notre dispositif, brevet 5 610 522, résolution verticale centimétrique, vitesse de « logging » standard (1800 pieds/heure).

Le développement d'un dispositif 5 pouces est en cours d'étude avec la société *Geo Energy*.

RÉFÉRENCES

- 1 Cooper R.K. et Jackson J.A. (1980) *J. Magn. Reson.*, 41, 400.
- 2 Burnett L.J. et Jackson J.A. (1980) *J. Magn. Reson.*, 41, 406.
- 3 Jackson J.A. et Burnett L.J. (1980) *J. Magn. Reson.*, 41, 411.
- 4 Kleinberg R.L., Sezginer A. et Griffin D.D. (1992) *J. Magn. Reson.*, 97, 466-485
- 5 Locatelli M., Mathieu H., Bobroff S., Guillot G. et Zinsner B. (1997) 4th International Meeting Recent Advances in: *MR Applications to Porous Media*, 31 août-3 septembre 1997, Trondheim, Norvège, à paraître.

Manuscrit définitif reçu en mai 1998