

République Algérienne populaire et démocratique
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique
Département Génie Minier

Mémoire de Master
Thème :

**Évaluation du Log de Résonance Magnétique Nucléaire pour le
réservoir de Basse Résistivité**

Présenté par :

Mr. KASRI Youcef

Devant le jury :

présidente : Mme. S. CHABOU

Examineur : Mr. L. CHANANE

Encadreur : Mme. N. BOUMBAR

Promotion Juin 2015

Dédicace

Je dédie ce travail à la lumière de mes jours, mes très chers

parents,

A mes frères et sœurs, surtout mon petit frère Younes,

A mes oncles et mes tantes,

À toute la famille KASRI,

A toute la famille REBAHI,

A toute la promotion 2015 de Génie Minier

A tous mes amis,

Et à tous ceux qui m'aiment...

...YOUNES

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord «ALLAH» le tout puissant.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont participé à la réalisation de cette thèse et qui n'a été possible que grâce au soutien de nombreuses personnes, que chacune trouve dans les premières phrases de ce mémoire l'expression de nos profondes et sincères reconnaissances.

Je tiens tout d'abord à exprimer nos remerciements à notre promotrice Mme.N.BOUMBAR, pour son inspiration constante, ses orientations enrichissantes et son encadrement scientifique, ce qui a permis de donner plus de valeur à l'ensemble de ce travail.

Je remercie également, Dr.S. CHABOU et Mr. L.CHANANE du département Génie Minier, d'avoir accepté de juger ce travail. C'est un honneur de les compter parmi le jury de ce mémoire.

Mes plus grands remerciements vont à l'ingénieur Mr CHADOULI Hicham de la société nationale SONATRACH qui nous a aidé énormément pour réaliser ce travail

Je tiens à remercier aussi à Mr. BERRAH, chef de département de géophysique au SONATRACH à Hassi Messaoud pour son accueil chaleureux et son aide précieuse.et tous les ingénieurs de la société, BENDJERAD Khaled, TIJANI Ayoub, Nourredine, Mr. AKLI Said

Mes remerciements sont adressés aussi à tous ceux qui ont participé de près ou de loin et dont leurs noms ne figurent pas sur cette liste....

Youcef

ملخص

هذا العمل الحالي هو إجراء دراسة تسجيل الرنين المغناطيسي النووي، وتقييم مختلف المعلمات بتروفيزيائية للدبابات التي تعاني ظاهرة المقاومة منخفضة. في هذا المشروع، وسوف تبدأ مع الجزء النظري بشرح مفهوم الرنين المغناطيسي النووي. ثم سأدرس المعلمات بتروفيزيائية الرئيسية لتحديد مجالات منخفضة المقاومة.

الكلمات المفتاحية:

الرنين المغناطيسي النووي، المقاومة منخفضة، تسجيل، المعلمات البتر وفيزيائية.

Résumé

Ce présent travail consiste à faire une étude de diagraphie de résonance magnétique nucléaire, et l'évaluation des différents paramètres pétrophysiques pour les réservoirs qui subissent de phénomène de basse résistivité.

Dans ce projet, je vais commencer par une partie théorique qui explique le concept de résonance magnétique nucléaire, puis, je vais étudier les paramètres pétrophysiques principales pour identifier les zones de basse résistivité.

Mots clé :

Résonance magnétique nucléaire, basse résistivité, diagraphie, paramètres pétrophysiques.

Abstract

This present work is to make a logging study of nuclear magnetic resonance, and evaluation of various petrophysical parameters for hydrocarbon reservoir, which enduring low resistivity phenomenon.

In this project, I will start with a theoretical part explains of the concept of nuclear magnetic resonance, and then I will study the main petrophysical parameters to identify areas of low resistivity.

Keywords:

Nuclear magnetic resonance, low resistivity, logging, petrophysical parameters.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I	
I La diagraphie de Résonance magnétique nucléaire.....	2
I.1 Introduction.....	2
I.2 Principe physique :.....	2
I.2.1 La résonance magnétique nucléaire RMN.....	2
I.3 Les mécanismes de relaxation	8
I.3.1 Relaxation à la surface des grains	8
I.3.2 Relaxation par diffusion moléculaire dans des gradients de champ magnétique	9
I.3.3 Relaxation du volume de fluide	9
I.4 CMR (Combinable Magnetic Resonance Tool)	11
Chapitre II	
II Applications pétrophysiques	16
II.1 Distribution de la taille des pores.....	16
II.2 Détermination de la porosité indépendamment de la lithologie	17
II.3 Détermination de l'indice de fluide libre (FFI) (Free Fluide Index).....	18
Chapitre III	
III Évaluation des données pour les réservoirs de basse résistivité.....	19
III.1 Les étapes d'évaluation.....	19
III.1.1 Volume d'argile	20
III.1.2 La saturation en eau irréductible :.....	21
III.1.3 La perméabilité	22
Conclusion Générale	
Conclusion générale et recommandation.....	24
Bibliographie	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Alignement de protons dans le cadre d'influence du champ magnétique permanent B_0 . (Kenyon et al. 1995).....	3
Figure I.2. Niveau d'énergie des protons en l'absence et en présence d'un champ magnétique (Document Schlumberger).....	4
Figure I.3. Précession des protons. (KENYON et al. 1995).....	4
Figure I.4. Les noyaux d'hydrogène sont des dipôles magnétiques. (Document Baker Hughes, 2003).....	5
Figure I.5. Le mécanisme de RMN.....	5
Figure I.6. Type de signal de résonance magnétique nucléaire reçu (HERRICK et al. 1979).....	6
Figure I.7. Les temps de relaxation longitudinale T1 et transversale T2 des protons dans une solution d'ions ferriques de différentes concentrations à la température de la chambre (Document Schlumberger).....	7
Figure I.8. Déplacement de protons dans l'espace poreux (KENYON et al. 1995)....	8
Figure I.9. Influence de la viscosité (en centipoises) sur le temps de relaxation transversal (T2). Les protons d'hydrogène dans un fluide très visqueux (figure du bas) sont moins mobiles et tendent à se relaxer rapidement (KENYON et al. 1995).	10
Figure I.10. Schéma de la sonde CMR (KENYON et al. 1995).....	11
Figure I.11. Configuration de la sonde CMR de Schlumberger et du dispositif de mesure (antenne) montré sur un patin (KENYON et al. 1995).....	11
Figure I.12. Première étape de la séquence de mesure : l'alignement des protons sous l'effet du champ magnétique permanent B_0 . La précession des protons s'effectue autour d'un axe parallèle à la direction du champ B_0 (KENYON et al. 1995).....	12
Figure I.13. Deuxième étape de la séquence : inclinaison des protons de 90° (KENYON et al. 1995).....	13
Figure I.14. Séquence d'impulsion de la sonde CMR (en haut) et déclin des échos de spin conduisant au calcul de T2 (KENYON et al. 1995).....	14
Figure I.15. Amplitude des échos de spin. Chaque point représente l'amplitude d'un écho de spin. Le temps d'enregistrement de cet exemple est inférieur à 0.3 seconde (KENYON et al. 1995).....	15

Chapitre II

Figure II.1. Amplitude (en haut) et distribution (en bas) du signal enregistré par la sonde CMR. La courbe traduit la distribution de la taille des pores. L'aire sous la courbe est proportionnelle à la porosité CMR (KENYON et al. 1995).....	17
Figure II.2. Dans cette dolomie l'interprétation de la distribution de T2 indique de large pores (vacuoles) au-dessus de X405 pieds et au contraire des pores très petits en dessous avec une perméabilité très faible (KENYON et al. 1995).....	17
Figure II.3. Dans les grès un seuil de temps de relaxation de 33 ms permet de séparer le fluide libre retenu par des forces capillaires élevées dans les pores les plus fins (KENYON et al. 1995).....	18

Chapitre III

Figure III.1. Les valeurs qualitatives T1, T2 et D pour les différents types de fluide. (George R. Coates, Lizhi Xiao, and Manfred G. Prammer, 1999)	19
Figure III.2. Distribution de différente porosité en fonction de T2 (Document Schlumberger)	20
Figure III.3. Le CBW, BVI et BVM (Document Baker Hughes, 2003)	21
Figure III.4. Organigramme illustrant les étapes d'évaluation des paramètres pétrophysiques en utilisant le RMN	23

Liste des tables

Tableau I-1. Spin et γ de certains éléments, (O.Serra, 2007)	2
Tableau I-2. Influence de la température sur le temps de relaxation de trois types de pétrole (PRAMMER et al. 1998)	10

Introduction générale

Dans l'évaluation des formations, les logs de résistivité sont les plus utilisés pour identifier les réservoirs potentiels grâce au contraste de résistivité entre la zone des hydrocarbures et la zone aquifère. Si, toutefois, une zone productive montre une basse résistivité, ces logs alors deviennent incapables d'identifier les zones potentielles. À cause de cette limitation plusieurs zones productives sont ignorées.

Ce phénomène est lié principalement à des causes géologiques et minéralogiques et pour résoudre les problèmes de l'interprétation des diagraphies conventionnelles il est préférable d'utiliser les propriétés RMN (Résonance magnétique nucléaire) des hydrocarbures pour les détecter.

Plusieurs outils diagraphiques utilisent cette propriété pour détecter les réservoirs potentiels comme le Combinable Magnetic Resonance (CMR) de Schlumberger, Magnetic Resonance Explorer imaging log (MREX) de Baker Hughes.

Dans ce projet de Master, je commence par une partie théorique où je traite les principes fondamentaux de la résonance magnétique nucléaire, puis une partie concernant le principe fonctionnement de l'outil CMR (Combinable Magnetic Resonance) de Schlumberger, après j'explique les étapes évaluation d'un réservoir subissant au phénomène de basse résistivité et enfin, je termine par une conclusion générale.

Chapitre I
**La diagraphie de Résonance
magnétique nucléaire**

I La diagraphie de Résonance magnétique nucléaire

I.1 Introduction

La résonance magnétique nucléaire a été découverte en 1945 simultanément par le suisse Félix Bloch et l'américain Edward Purcell.

L'application de la résonance magnétique nucléaire (RMN) à la pétrophysique pour étudier les propriétés de l'eau et / ou d'huile contenues dans les roches remonte au début des années 1950. Dans les années 1960, les outils de diagraphie basés sur la résonance magnétique nucléaire ont été construits pour l'exploration pétrolière. Cependant, ces outils n'ont pas gagné une grande popularité en raison de diverses limitations. Il a fallu attendre le début des années 1990 pour que de nouveaux outils plus performants soient introduits dans l'industrie pétrolière.

Depuis lors, de nombreuses applications ont évolué avec des améliorations significatives de l'outil. Les utilisateurs peuvent maintenant extraire des informations, non seulement sur les fluides saturant dans les roches, mais aussi celles relatives à la distribution, la taille des pores et la lithologie.

Les informations que nous obtenons à partir des propriétés RMN du liquide saturé dans les roches sont principalement basées sur la relaxation de spin.

I.2 Principe physique :

I.2.1 La résonance magnétique nucléaire RMN

La résonance magnétique nucléaire fait référence à un principe physique qui est la réaction des noyaux soumis à un champ magnétique. Certains noyaux ayant un nombre impair de protons et / ou de neutrons comme par exemple ^1H , ^{13}C , ^{17}O , ^{19}F , ^{31}P , ^{29}Si se comportent comme de minuscules dipôle magnétiques.

Chaque particule élémentaire se caractérise par son *spin*, I , qui est une propriété fondamentale de la nature comme la charge électrique.

Le moment magnétique nucléaire μ et le spin du noyau S sont reliés par la relation $\mu = \gamma S$ où γ est le rapport gyromagnétique caractéristique pour chaque noyau.

La résonance magnétique s'intéresse aux noyaux dont le spin est différent de zéro.

Tableau I-1. Spin et γ de certains éléments, (O.Serra, 2007)

Élément	Spin	γ (Mhz/Tesla)
^1H	1/2	42.48
^{13}C	1/2	10.71
^{19}F	1/2	40.08
^{31}P	1/2	17.25

Le moment magnétique et de la quantité de mouvement angulaire sont coaxiaux. ^1H étant abondant dans l'huile, le gaz et l'eau, est l'élément mesuré par des outils de diagraphie RMN.

L'existence du moment magnétique permet à l'énergie électromagnétique soit absorbé par le dipôle magnétique, en changeant l'orientation du dipôle magnétique instant par rapport au champ magnétique externe. L'existence de l'angulaire élan le long du même axe tend à résister à tout changement de l'orientation du vecteur de moment angulaire.

Si les noyaux sont d'une part une partie fixe de champ magnétique, et d'autre part sont soumis à un champ électromagnétique périodique, elles ont tendance à s'aligner le long des champs magnétiques produits. Cependant, le moment cinétique des noyaux crée une résistance à l'alignement, la génération d'un mouvement de précession (Figure I.1)

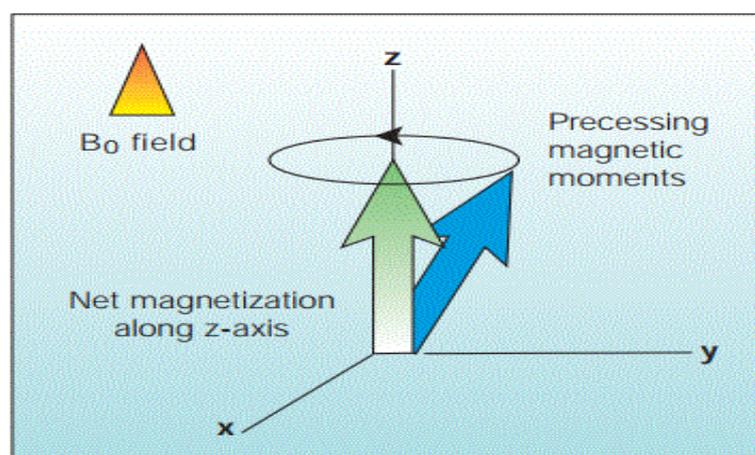


Figure I.1. Alignement de protons dans le cadre d'influence du champ magnétique permanent B_0 . (Kenyon et al. 1995)

Suivant les lois de la mécanique quantique, les protons, possédant un moment magnétique, peuvent prendre $2I+1$ états possibles, I étant le *spin*.

Le *spin* d'une particule d'une particule quantique ne peut prendre que certaines valeurs bien déterminées. Par exemple, si le proton a une valeur de $I = 1/2$, il va prendre deux valeurs opposées. Dans ce cas, avec une population de N protons, n_{up} auront un moment négatif, $-\mu$, et n_{down} un moment positif $+\mu$. En l'absence d'un champ magnétique l'état d'équilibre est atteint quand n_{up} égale à n_{down} , et le moment total est nul. Quand un champ magnétique, H_0 est appliqué, un nouvel état d'équilibre est atteint après un certain temps (Figure I.2)

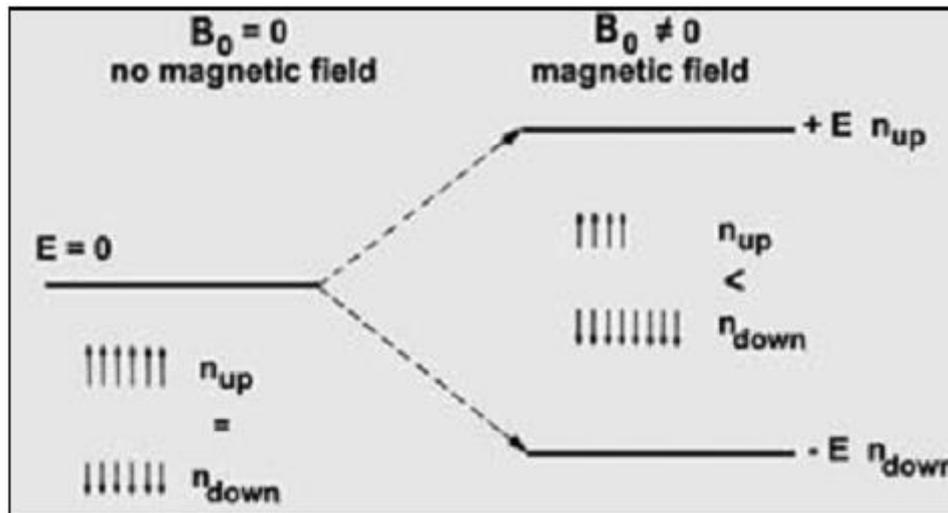


Figure I.2. Niveau d'énergie des protons en l'absence et en présence d'un champ magnétique (Document Schlumberger).

Après certain temps, T_1 , appelé temps de relaxation longitudinale de la maille (*spin – lattice relaxation time*), l'équilibre est atteint, tous les protons d'hydrogène sont alignés. On dit encore qu'ils sont polarisés. Le champ magnétique de polarisation, H_p , est éliminé.

Les protons ne sont plus soumis qu'au champ magnétique terrestre. Leur comportement (Figure I.3) peut être assimilé au mouvement d'un gyroscope dans le champ gravitationnel terrestre à une fréquence proportionnelle à la force du champ, à la fréquence de Larmor $f = \gamma H_E$, dans laquelle γ est le rapport gyromagnétique du proton ($\gamma = 4.2576 \times 10^3 \text{ Hz/G}$)

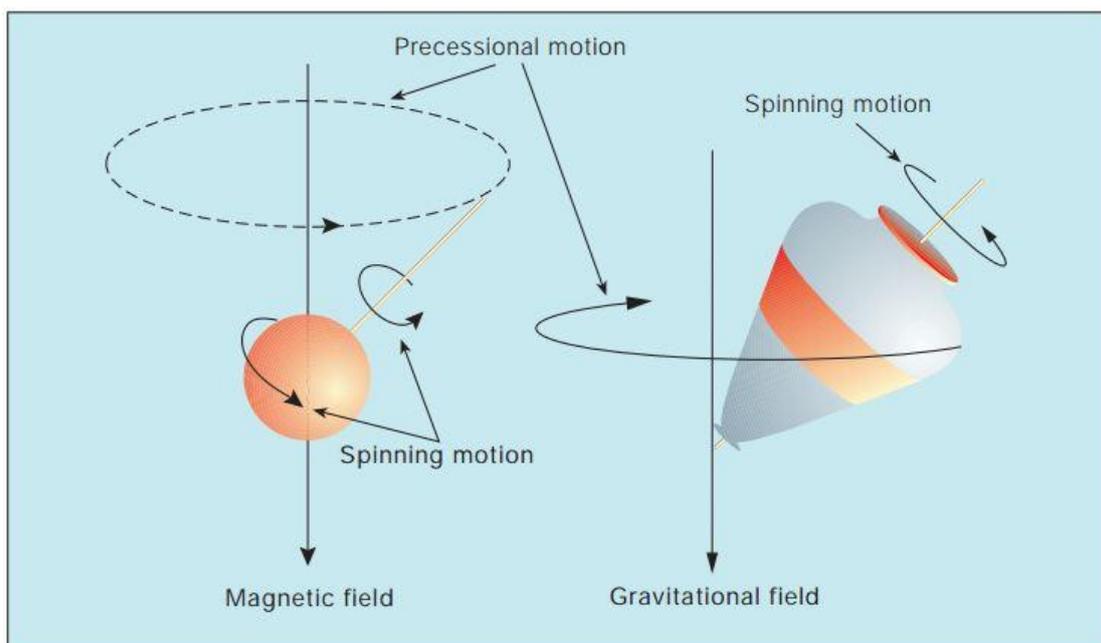


Figure I.3. Précession des protons. (KENYON et al. 1995)

Les noyaux d'hydrogène se comportent comme des petites aiguilles aimantées. À la suite d'une perturbation de leur équilibre, ils ont un mouvement de précession autour du champ magnétique statique semblable au mouvement d'une toupie dans le champ gravitationnel terrestre.

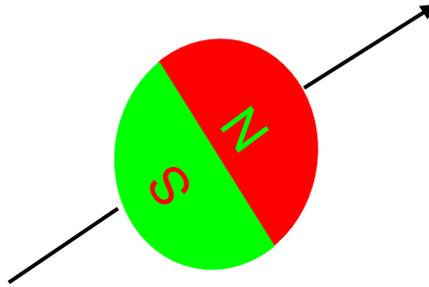


Figure I.4. Les noyaux d'hydrogène sont des dipôles magnétiques. (Document Baker Hughes, 2003)

La précession des protons aboutit à un champ magnétique variable qui induit un courant (à la fréquence de précession) dans le solénoïde de mesure placé perpendiculairement au champ magnétique terrestre.

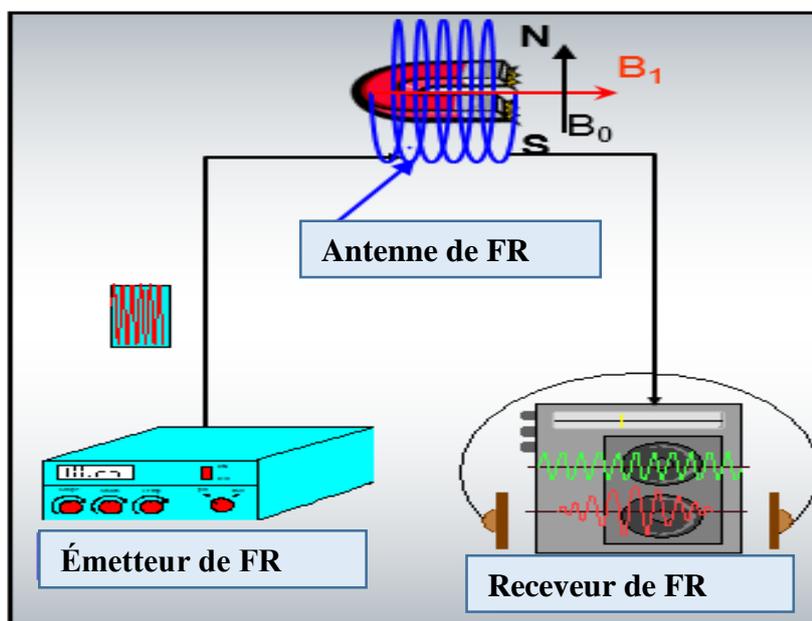


Figure I.5. Le mécanisme de RMN

Il est évident que la bobine de mesure peut être la même que la bobine de polarisation puisque la polarisation et la mesure du signal induit sont réalisées séparément.

Le signal dans la bobine est une onde sinusoïdale s'atténuant de façon exponentielle (figure I.6), il se caractérise par son temps de déclin, ou temps de relaxation transversale (*spin – spin relaxation time*), T_2 , par son amplitude au début de la précession et par sa fréquence. De ces deux premiers paramètres une information valable sur les formations peut être extraite.

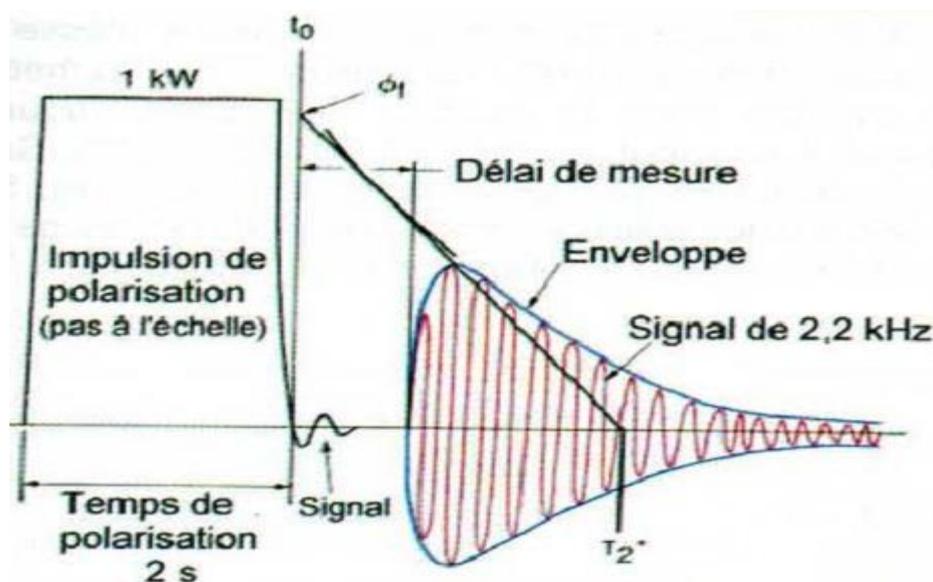


Figure I.6. Type de signal de résonance magnétique nucléaire reçu (HERRICK et al. 1979)

Les transitions d'un état d'équilibre à un autre (quand un champ magnétique externe est appliqué ou enlevé) ne sont pas instantanées. Elles prennent un certain temps qui dépend de la structure du matériau contenant les protons d'hydrogène et de la concentration des impuretés dans le matériau.

T_1 le temps de relaxation longitudinale, caractérise le temps mis par le champ magnétique pour aligner les protons dans la direction du champ.

T_2 le temps de relaxation transversale, caractérise le temps mis par les protons, alignés dans le champ magnétique, pour prendre une orientation aléatoire lorsque l'action de ce champ est supprimée. T_2 est plus court que T_1 .

L'alignement de spins correspond à une perte d'énergie $2 E$. Cette perte de l'énergie doit être communiquée au milieu environnant. La façon dont cette énergie est dissipée commande du taux de relaxation T_1 . La façon dont l'énergie est dissipée commande le temps T_1 , qui est donnée par la relation suivante :

$$T_1 = A.e^{-B/T}$$

Où A et B sont des paramètres dépendant de la viscosité du fluide, T est la température absolue en Kelvin.

De la même manière, la façon dont le système de protons gagne de l'énergie à partir du milieu environnant contrôle le temps T_2 .

Trois cas doivent être considérés.

Solide : dans les solides les noyaux d'hydrogène sont fortement liés au milieu d'environnant. L'énergie peut être facilement dissipée ou gagnée au moyen de vibrations thermiques. Les protons peuvent passer rapidement à un niveau d'énergie différent. De ce fait, les temps de relaxation sont courtes, généralement de quelques centaines de microsecondes.

Liquide : Les molécules dans un liquide sont indépendantes. Ils n'interfèrent pas avec d'autres molécules. Chaque molécule avec ses noyaux d'hydrogène garde ses protons inchangés du fait qu'il existe peu de support pour un transfert d'énergie. Aligner ou désaligner les protons est un processus long. Les temps de relaxation sont longs, de centaines de millisecondes.

Liquide avec des ions paramagnétiques : Le comportement des milieux paramagnétiques en présence d'un champ magnétique externe est plus complexe. Le spin d'un électron n'a lui aussi que deux niveaux d'énergie. Mais parce que le moment magnétique de l'électron est bien plus grand que celui de noyau, l'énergie de séparation des deux niveaux d'énergie de l'électron est bien plus grande. La différence des populations dans les niveaux d'énergie faible et élevée est, de ce fait, également plus grande.

Dans un liquide avec des ions paramagnétiques, on assiste à un groupement du système de spin du noyau et le système de spin de l'électron. Généralement, quand un électron change d'une position de spin à son opposé, le noyau change d'une façon complémentaire.

Une augmentation de la concentration des ions paramagnétiques se traduit par une diminution de temps de relaxation (Figure I.7). C'est pour cette raison que l'addition de matériaux ferromagnétiques était recommandée. En raison de leur grande moment magnétique, les grains de magnétite dispersés dans les fluides en mouvement aléatoire, créé de grands champs magnétiques variables qui capoté les spins des noyaux dans les fluides.

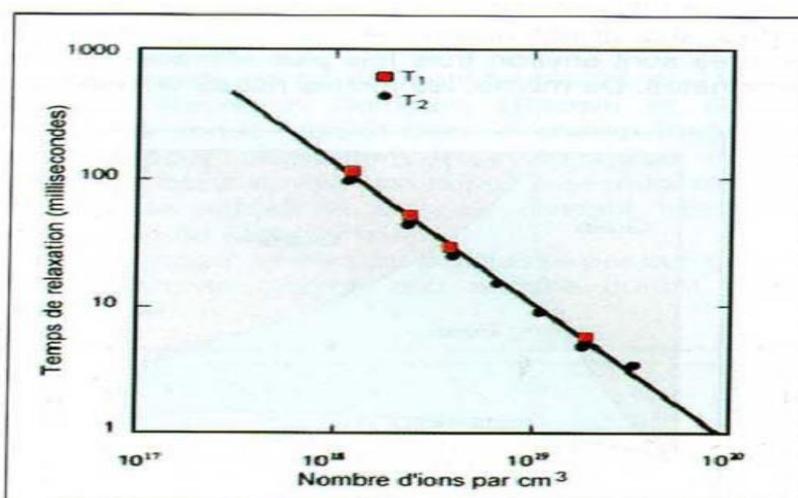


Figure I.7. Les temps de relaxation longitudinale T1 et transversale T2 des protons dans une solution d'ions ferriques de différentes concentrations à la température de la chambre (Document Schlumberger)

Le temps de relaxation est raccourci au temps T_2^* . La différence entre T_2^* et T_2 entraîne des interactions magnétiques microscopiques (entre molécule ou atome) alors que T_2 correspond seulement au champ magnétique macroscopique H_p .

La réciproque de T_2^* est proportionnelle à la concentration de matériau ferromagnétique : $1/T_2^* \approx 1.4 M$ où M étant la concentration de magnétite en $\mu g/cm^3$

I.3 Les mécanismes de relaxation

Il existe trois mécanismes de relaxation qui influencent les temps de relaxation T_1 et T_2 .

I.3.1 Relaxation à la surface des grains

Les molécules dans les fluides sont en mouvement constant - mouvement brownien – et diffusent dans l'espace poreux, heurtant la surface des grains plusieurs fois au cours de mesure. Quand une molécule heurte un grain deux interactions peuvent se produire :

- les protons d'hydrogène peuvent transférer l'énergie du spin nucléaire à la surface du grain permettant un réalignement avec le champ magnétique statique. Ceci contribue à la relaxation longitudinale T_1 .
- les protons d'hydrogène peuvent être déphasés de manière irréversible. Cela contribue de la relaxation transversale T_2 .

On a pu démontrer que dans la plupart des roches, la relaxation à la surface des grains à la plus grande influence sur T_1 et T_2 . La capacité des surfaces de grain à relaxer les protons est appelée *relaxivité* de surface, son symbole est ρ .

Les surfaces des grains ou des cristaux n'ont pas la même efficacité dans la relaxation des protons. La surface des grains augmente avec la rugosité. Ainsi, les grès sont environ trois fois plus efficace que les carbonates. De même, les roches riches en minéraux porteur de fer ou en minéraux magnétiques ont des valeurs de ρ supérieures aux valeurs habituelles, et de ce fait les temps de relaxation sont plus courts.

La taille des pores joue également un rôle important dans la relaxation de surface. La vitesse de relaxation dépend en effet de la fréquence des heurts des protons avec la surface des grains laquelle dépend à son tour du rapport surface / volume (S/V).

Dans les grands pores (vacuoles par exemple), le rapport S/V est faible et les collisions sont moins fréquentes, ce qui allonge les temps de relaxation.

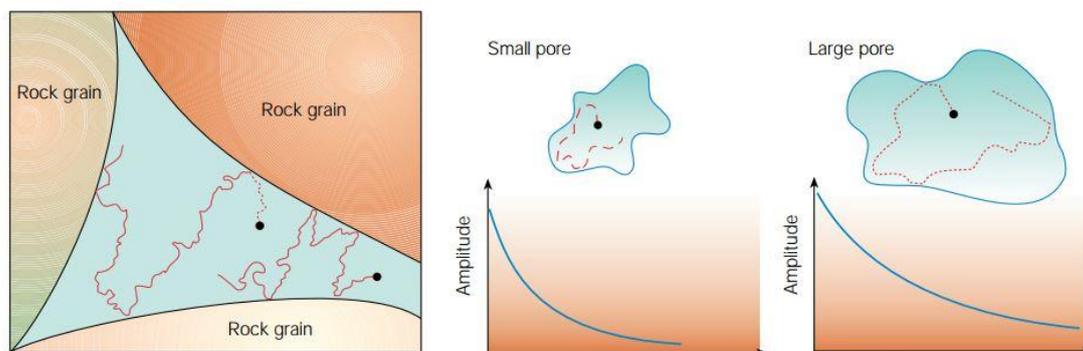


Figure I.8. Déplacement de protons dans l'espace poreux (KENYON et al. 1995)

Les protons se déplacent dans l'espace poreux en heurtant d'autres protons ou la surface des grains. Chaque fois qu'un proton heurte une surface de grain il peut se produire une interaction de relaxation. Plus les pores sont petits plus les probabilités de chocs avec les grains, et donc de relaxation, sont grandes et plus le temps de relaxation est court. À noter que la surface des grains est rarement lisse.

À l'inverse, dans les petits pores (intergranulaires des grès par exemple ou intragranulaires des carbonates), S/V est grand et les temps de relaxation sont courts.

Pour un pore unique, la magnétisation du spin décline de façon exponentielle, de ce fait l'amplitude du signal en fonction du temps dans une expérience T_2 décline avec une constante de temps caractéristique : $[\rho_2(S/V)]^{-1}$. Par conséquent :

$$1/T_2 = \rho_2(S/V)_{pore}$$

Et de façon identique : $1/T_1 = \rho_1(S/V)$

Dans une roche, la taille des pores varie, chaque pore ayant sa propre valeur S/V . La magnétisation totale est la somme du signal provenant de chaque pore. La somme des volumes de ces pores est égale au volume de fluide dans la roche, donc à la porosité.

Ainsi, Le signal total est proportionnel à la porosité, et Le déclin de l'ensemble est la somme des déclins individuels, qui reflète la distribution de la taille des pores.

I.3.2 Relaxation par diffusion moléculaire dans des gradients de champ magnétique

Quand il existe des gradients dans le champ magnétique statique, le mouvement moléculaire peut provoquer des déphasages d'où une relaxation transversale. La relaxation longitudinale n'est pas affectée. En l'absence de gradients, la diffusion moléculaire ne provoque pas de relaxation.

Un gradient du champ magnétique H_p peut avoir deux origines :

- La configuration de l'aimant de la sonde ;
- Le contraste de susceptibilité magnétique entre les minéraux composant les grains et les fluides remplissant l'espace poreux

I.3.3 Relaxation du volume de fluide

Même si les surfaces de grains et les gradients internes du champ sont absents, une relaxation se produit dans le volume de fluide Elle peut souvent être négligée, mais elle devient importante quand l'eau remplie de très grands pores (par exemple le cas de vacuoles dans des carbonates), car, dans ce cas, les protons d'hydrogène heurtent rarement une surface.

Elle est également importante quand il y a des hydrocarbures. La phase non mouillante n'entre pas en contact avec les surfaces des pores et ne peut donc pas engendrer une relaxation par le mécanisme de relaxation de surface.

Par ailleurs, lorsque la viscosité du fluide augmente, les temps de relaxation de volume diminuent (Figure I.9). Enfin, la température joue également sur les temps de relaxation (Tableau I-2).

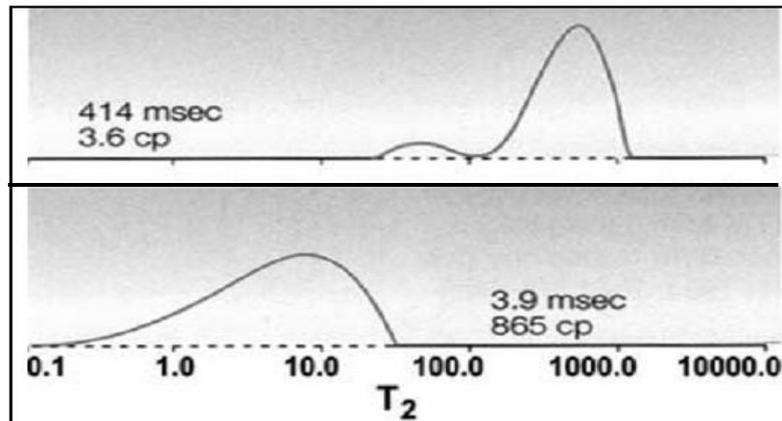


Figure I.9. Influence de la viscosité (en centipoises) sur le temps de relaxation transversal (T_2). Les protons d'hydrogène dans un fluide très visqueux (figure du bas) sont moins mobiles et tendent à se relaxer rapidement (KENYON et al. 1995).

Tableau I-2. Influence de la température sur le temps de relaxation de trois types de pétrole (PRAMMER et al. 1998)

Température (°C)	Pétrole 1 $T_1 = t T_2$ (sec)	Pétrole 2 $T_1 = T_2$ (sec)	Pétrole 3 $T_1 = T_2$ (sec)
30	0.41	0.46	0.82
50	0.62	0.91	1.04
70	0.91	1.24	1.39
90	1.24	1.57	1.79
110	2.14	1.83	2.23
130	3.42	4.5	5.44
150	5.04	5.88	7.14

Si la boue contient des ions de chrome, de manganèses, de fer, de nickel ou de tout autre corps paramagnétique, une correction de relaxation de volume est nécessaire. Une mesure faite sur un échantillon de boue permet de calculer la correction.

Les processus de relaxation agissent en parallèle, de ce fait leurs taux s'additionnent :

$$(1/T_2)_{total} = (1/T_2)_s + (1/T_2)_D + (1/T_2)_v$$

Dans lequel $(1/T_2)_s$ est la contribution de la surface, $(1/T_2)_D$ celle de la diffusion et $(1/T_2)_v$ celle du volume de fluide.

L'équation correspondante pour T_1 est : $(1/T_1)_{total} = (1/T_1)_s + (1/T_2)_v$

T_1 étant insensible à la relaxation par diffusion en absence de déphasage.

I.4 CMR (Combinable Magnetic Resonance Tool)

La sonde SCHLUMBERGER, Magnetic Resonance tool (CMR), fut commercialisée en 1995. Sa configuration est représentée par la Figure I.10 et le schéma de la sonde et du dispositif de mesure par la Figure I.11.

Le CMR procure une source d'information pétrophysique plus riche que n'importe quelle diagraphie, de par son processus de mesure original, qui regarde directement les fluides de l'espace poreux, d'une manière totalement indépendante de la minéralogie de la matrice.

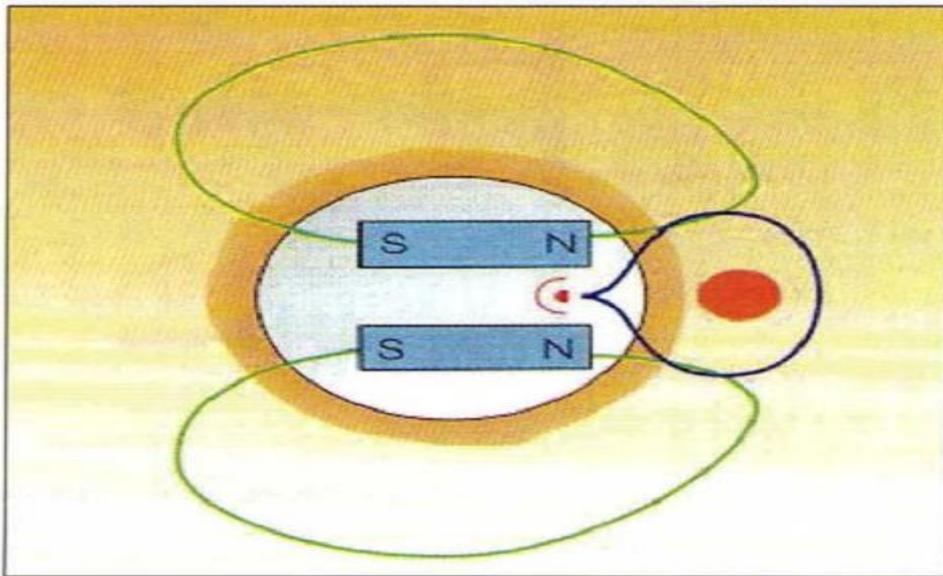


Figure I.10. Schéma de la sonde CMR (KENYON et al. 1995)

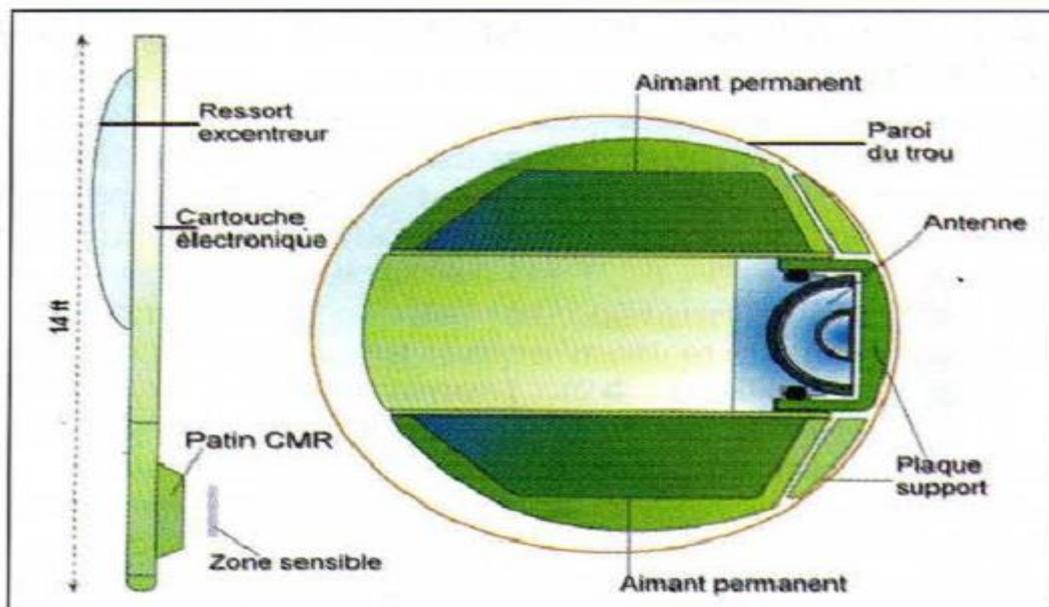


Figure I.11. Configuration de la sonde CMR de Schlumberger et du dispositif de mesure (antenne) montré sur un patin (KENYON et al. 1995)

Ces schémas permettent de saisir les différences de mesure et de volume investigué par les sondes. Mais le principe reste le même, de même que l'interprétation des données.

La Sonde SCHLUMBERGER comprend un patin, monte sur le côté de la sonde et une cartouche électronique. Ce patin contient deux aimants permanents puissants engendrant un champ magnétique d'environ 540 gauss, soit à peu près mille fois supérieur au champ magnétique terrestre. Ces aimants sont disposés de telle sorte que le champ magnétique converge pour former une zone de force constante à environ un pouce à l'intérieur de la formation.

Le patin contient aussi une antenne servant d'émetteur et de récepteur. Une lame de ressort applique fortement le patin contre la paroi du trou, réduisant considérablement l'effet de la boue.

L'Ouverture de l'antenne est de 6 pouces.

La séquence de mesure, appelée CPMG débute par un temps d'attente de 1,3 seconde pour permettre la polarisation complète des protons d'hydrogène, ou leur alignement, dans la formation sur la longueur du patin.

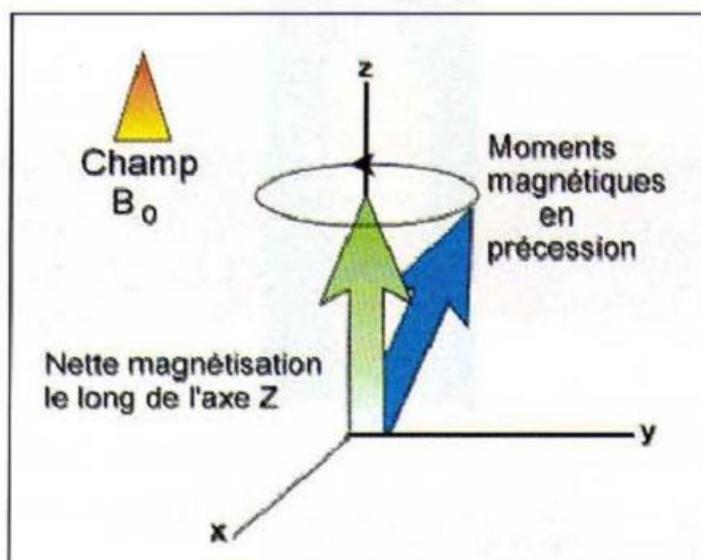


Figure I.12. Première étape de la séquence de mesure : l'alignement des protons sous l'effet du champ magnétique permanent B_0 . La précession des protons s'effectue autour d'un axe parallèle à la direction du champ B_0 (KENYON et al. 1995)

L'étape suivante (inclinaison des protons) consiste à incliner les protons alignés en émettant un champ magnétique oscillant, B_1 , perpendiculaire à la direction B_0 , avec une fréquence, f_0 , proche de 2,3 MHz - qui correspond à la fréquence de Larmor pour un champ magnétique du 540 gauss et des protons d'hydrogène -. Pour incliner à 90° les protons un champ de 4 gauss émis pendant 16 ms suffit. Quand les protons sont inclinés de 90° par rapport à la direction B_0 (Figure I.13), leur précession se fait dans un plan perpendiculaire à B_0 . Au début ils agissent à l'unisson.

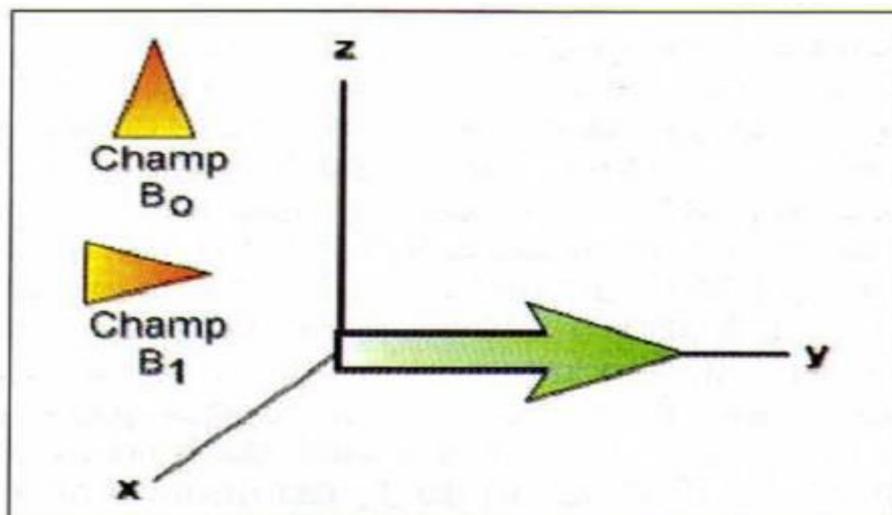


Figure I.13. Deuxième étape de la séquence : inclinaison des protons de 90° (KENYON et al. 1995).

Ce faisant ils engendrent un faible champ magnétique à la fréquence de Larmor, qui est détecté par l'antenne et forme la base des mesures. Mais le champ magnétique permanent B_0 n'étant pas parfaitement homogène, la précession des protons se fait à des fréquences légèrement différentes, engendrant une perte de synchronisation d'où un déphasage et un déclin du signal capté par l'antenne. Ce déclin est appelé déclin d'induction libre (Free Induction Decay ou FID), et le temps de déclin est T_2^* .

De la même manière les protons peuvent être remis en phase quand une impulsion à 180° est appliquée avec la fréquence de résonance f_0 . C'est la troisième étape de la séquence de mesure CPMG.

L'impulsion 180° dure environ 2 fois celle de 90° . Elle ne retourne pas la direction de précession mais change la phase de chaque spin. Quand ils sont de nouveau en phase ils engendrent un signal capté par l'antenne. Ce signal est appelé écho de spin. Naturellement cet écho disparaît rapidement. Mais on peut répéter les impulsions à 180° . En fait, l'antenne de la sonde CMR transmet un train de 599 impulsions magnétiques à 180° à 320 microsecondes d'intervalle.

Chaque impulsion induit un signal (écho de spin) dont l'amplitude est reçue par l'antenne qui joue aussi le rôle de récepteur. Mais les échos de spin déclinent également. La distribution de T_2 est déduite du déclin de la courbe d'échos de spin ou de relaxation (Figure I.14).

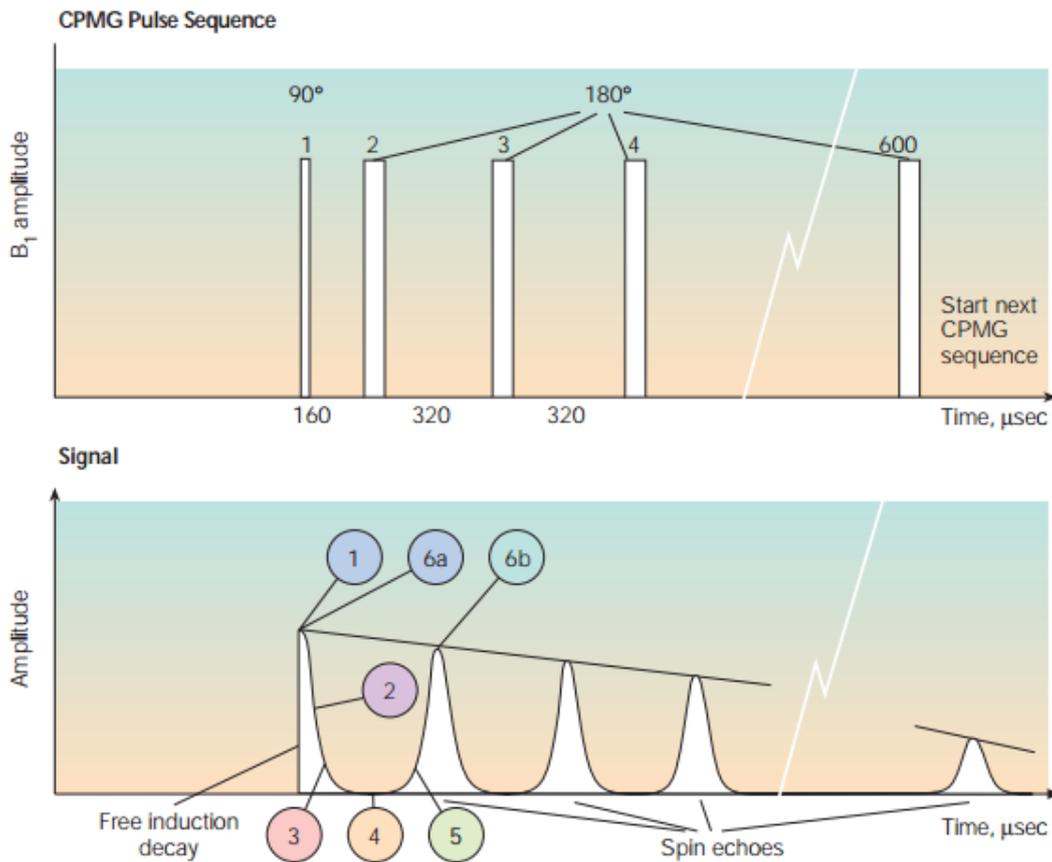


Figure I.14. Séquence d'impulsion de la sonde CMR (en haut) et déclin des échos de spin conduisant au calcul de T₂ (KENYON et al. 1995)

La séquence de mesure élimine le déphasage dû aux imperfections du champ permanent, mais elle ne peut pas éliminer celui dû aux interactions moléculaires responsables du déclin.

L'amplitude de la magnétisation transverse, $M(t)$, est donnée par la relation suivante :

$$M(t) = M_0 e^{-t/T_2}$$

Où M_0 est la magnétisation transverse au temps zéro, t est le temps et T_2 est la constante de temps de la relaxation transverse.

La magnétisation transverse, $M(t)$ décline de façon multi-exponentielle du fait de la nature multi- exponentielle de la relaxation (Figure I.15).

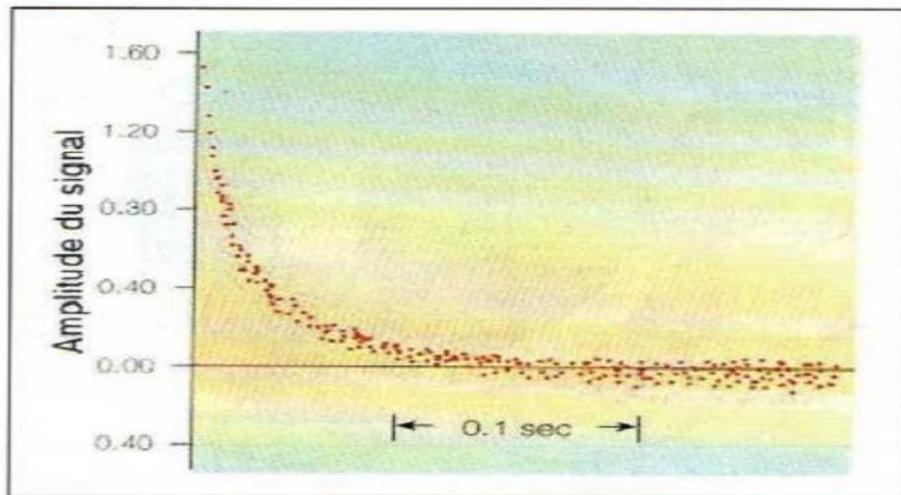


Figure I.15. Amplitude des échos de spin. Chaque point représente l'amplitude d'un écho de spin. Le temps d'enregistrement de cet exemple est inférieur à 0.3 seconde (KENYON et al. 1995)

Chapitre II

Applications pétrophysiques

II Applications pétrophysiques

Les mesures réalisées à l'aide de cette technique suscitent un grand intérêt du fait des informations obtenues touchant les propriétés pétrophysiques des roches.

II.1 Distribution de la taille des pores

Dans beaucoup de cas les relaxations de volume et de diffusion peuvent être négligées, la relaxation de surface étant dominante. Dans ce cas T_2 (relaxation transversale) est proportionnel à la taille des pores.

Pour un pore isolé, la magnétisation décline de façon exponentielle :

$$M(t) = M_0 e^{-\rho(S/V)t}$$

Dans les roches, cohabitent généralement différentes tailles de pores. Chaque pore a sa propre valeur S/V . De plus la surface des grains est plus ou moins rugueuse accroissant la surface entre fluide et grain pour un même volume de grain. La magnétisation totale, correspondant à la superposition des signaux provenant de chaque pore individuel, est de ce fait la somme de chaque déclin exponentiel :

$$M(t) = \sum M_i e^{-\rho_2(S/V)_i t} = \sum M_i e^{(-\frac{t}{T_{2i}})}$$

T_{2i} est la constante de déclin du pore i . M_i est la magnétisation initiale due au pore i et est proportionnelle à son volume.

La sonde CMR mesure l'amplitude du signal déclinant qui est la somme de tous signaux déclinant T_2 engendrés par les protons dans le volume analysé. Par une inversion mathématique, on extrait les gammes des valeurs de T_2 . Cette courbe représente la distribution de la taille des pores.

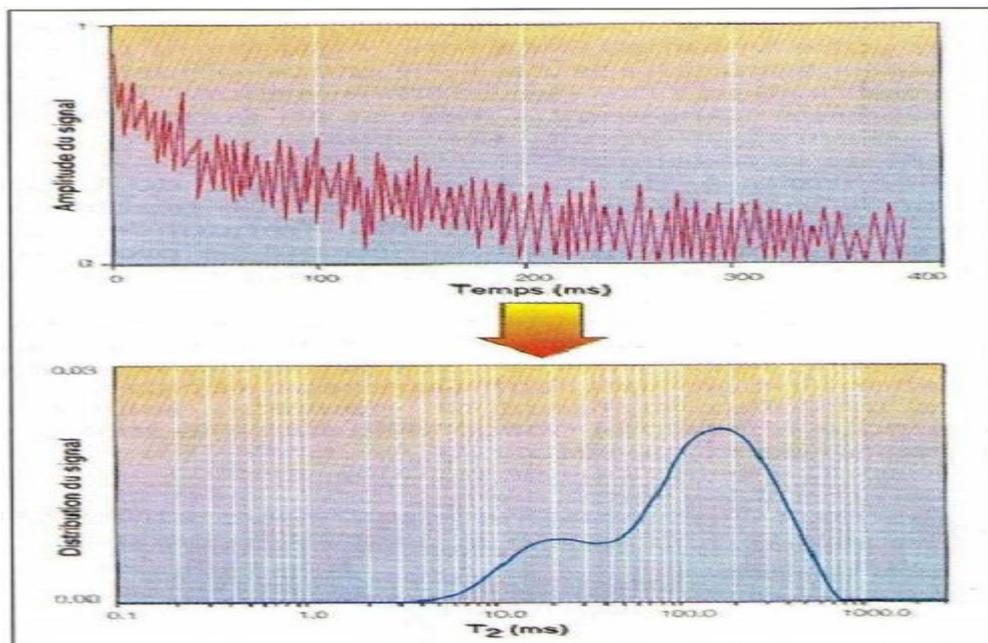


Figure II.1. Amplitude (en haut) et distribution (en bas) du signal enregistré par la sonde CMR. La courbe traduit la distribution de la taille des pores. L'aire sous la courbe est proportionnelle à la porosité CMR (KENYON et al. 1995)

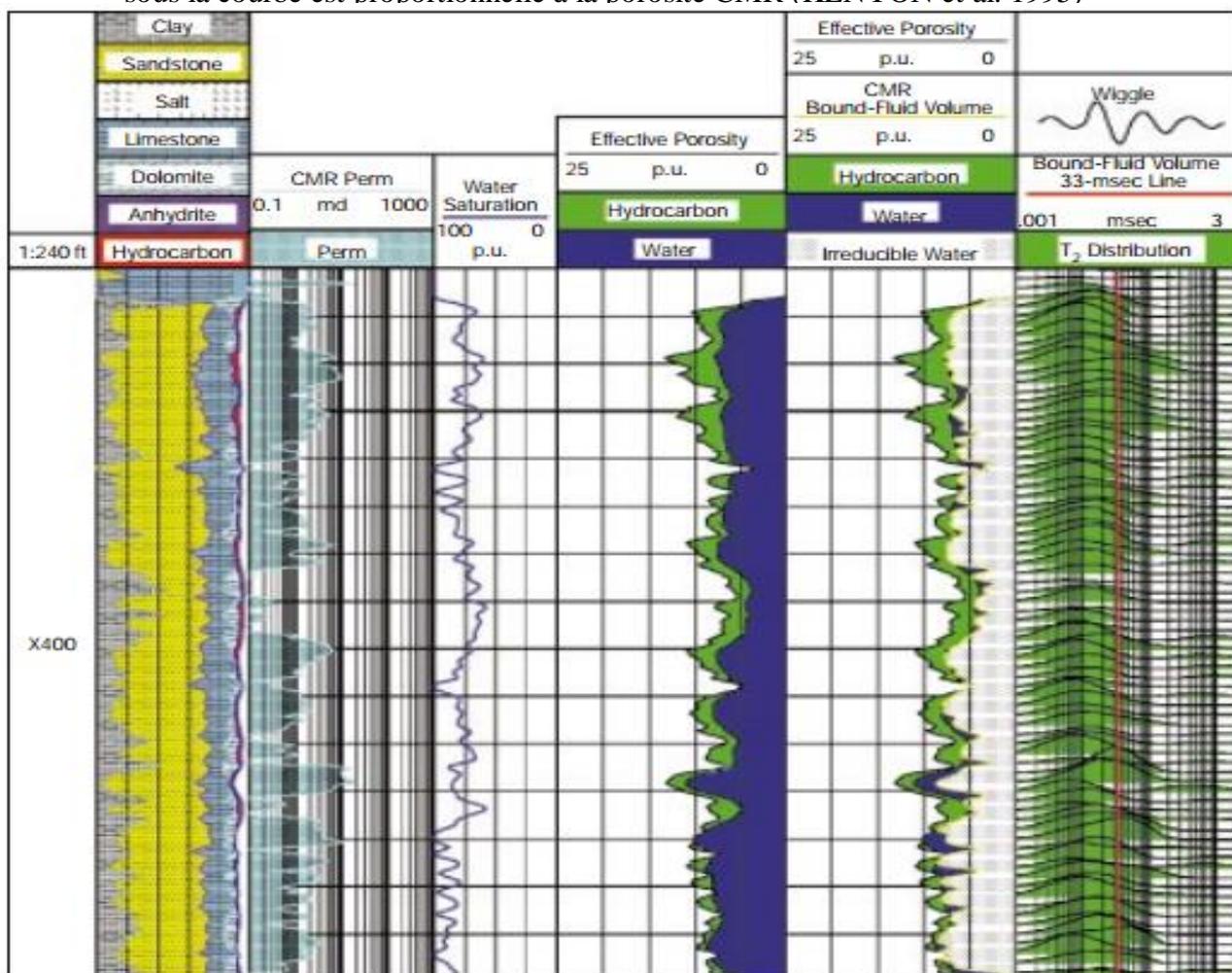


Figure II.2 donne un exemple d'enregistrement de la distribution T_2 et de son interprétation en termes de porosité, de perméabilité et de taille des pores.

Figure II.2. Dans cette dolomie l'interprétation de la distribution de T_2 indique de large pores (vacuoles) au-dessus de X405 pieds et au contraire des pores très petits en dessous avec une perméabilité très faible (KENYON et al. 1995)

II.2 Détermination de la porosité indépendamment de la lithologie

La mesure dépend des protons d'hydrogène, lesquels sont essentiellement liés à l'eau libre et aux hydrocarbures. Ceux liés aux minéraux ou à l'argile ayant un temps de relaxation T_2 suffisamment court apparaissent de ce fait durant le temps mort de la sonde et ne sont pas détectés. La mesure dépend essentiellement de la porosité effective quel que soit la lithologie. Ceci constitue un avantage indéniable par rapport aux mesures de porosité traditionnelles s'appuyant sur la densité et l'indice d'hydrogène qui sont-elles sensibles à la lithologie.

Cette porosité est proportionnelle à l'aire sous la courbe de distribution de la taille des pores Elle est donnée par la relation suivante :

$$\phi = K_{sonde} * M_0$$

Dans laquelle K_{sonde} est un facteur spécifique à la sonde incluant différentes calibrations et des corrections d'environnement.

II.3 Détermination de l'indice de fluide libre (FFI) (Free Fluid Index)

Elle réalisée en appliquant un seuil (*cutoff*) à la courbe de distribution du temps de relaxation T2.

Pour les grès ce seuil est fixé vers 33 ms, pour les carbonates il est pris généralement à 100 ms ces valeurs de seuil se découlent de nombreuses mesures réalisées en laboratoire.

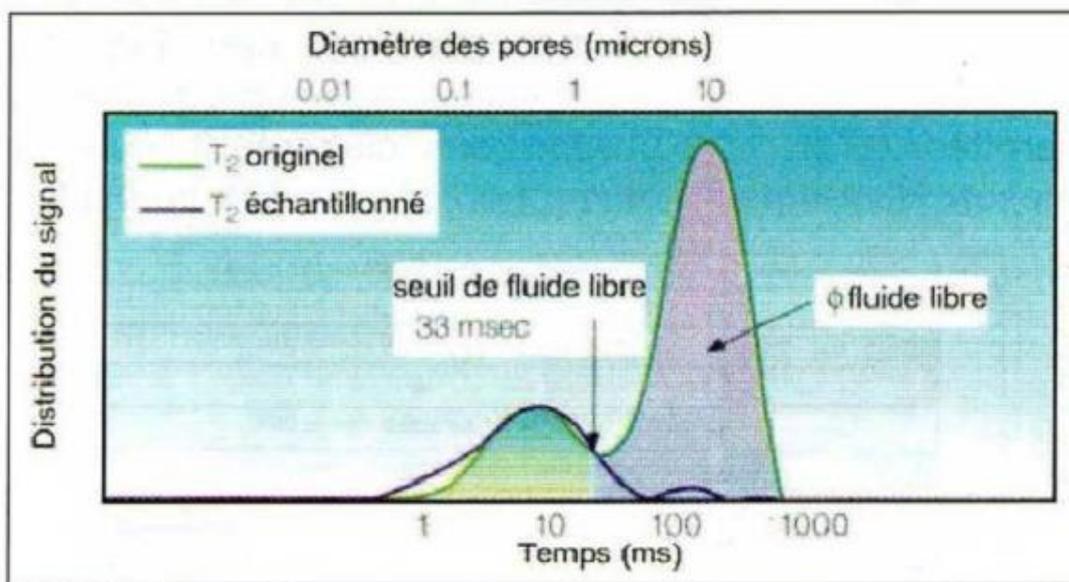


Figure II.3. Dans les grès un seuil de temps de relaxation de 33 ms permet de séparer le fluide libre retenu par des forces capillaires élevées dans les pores les plus fins (KENYON et al. 1995)

Chapitre III

Évaluation des données pour les réservoirs de basse résistivité

III Évaluation des données pour les réservoirs de basse résistivité

Les outils de diagraphies qui utilisent cette technologie (RMN) nous donnent des informations pétrophysiques plus riches que n'importe quelle diagraphie, par ses processus de mesure original, qui regardent directement les fluides de l'espace poreux d'une manière totalement indépendante de la minéralogie de la matrice. C'est tout à fait différent des logs de porosité conventionnels qui sont beaucoup plus sensible à la fraction solide de la formation et qui ne peuvent pas être utilisés seuls de façon fiable pour déterminer la porosité de la formation.

Pour les réservoirs qui subissent de phénomène de basse résistivité ces outils donnent des informations plus claires de la saturation en eau libre, la saturation en eau irréductible et la perméabilité. Toutes ces informations sont très importantes pour évaluer ces réservoirs qui subissent de phénomène de basse résistivité.

La saturation en eau irréductible $S_{w,irr}$ est la portion de l'eau dans les formations poreuses qui ne peut pas être produit sous l'effet de forces capillaires.

La saturation en eau irréductible peut être très haute, la cause de ce phénomène est due à l'enveloppement de grains de sable par des minéraux comme le chlorite.

III.1 Les étapes d'évaluation

Les figures suivantes montrent le modèle de porosité typique des outils de RMN

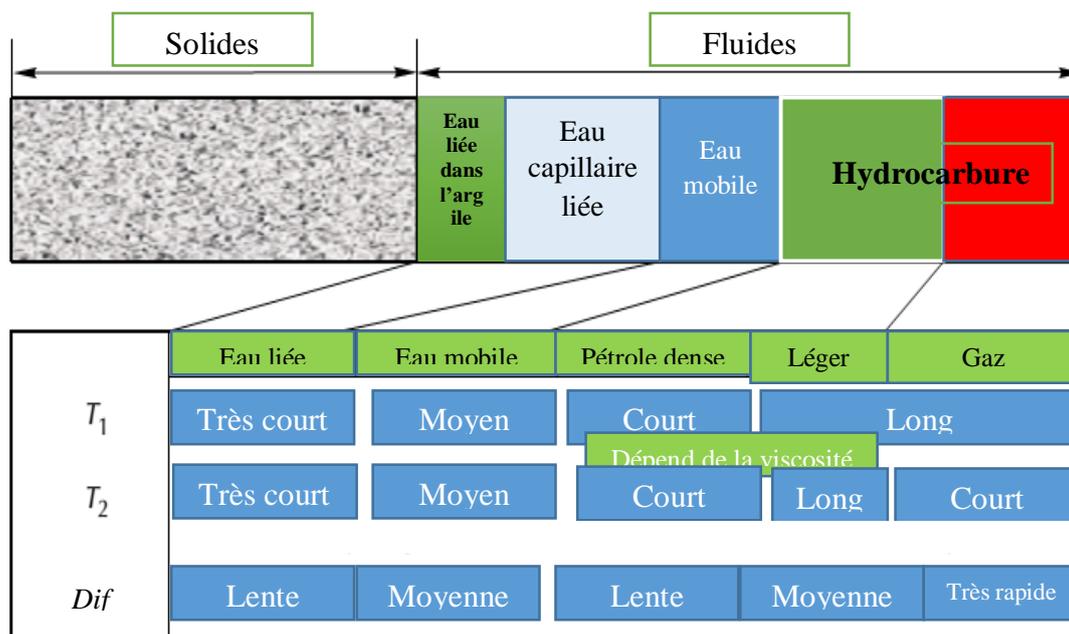


Figure III.1. Les valeurs qualitatives T_1 , T_2 et D pour les différents types de fluide. (George R. Coates, Lizhi Xiao, and Manfred G. Prammer, 1999)

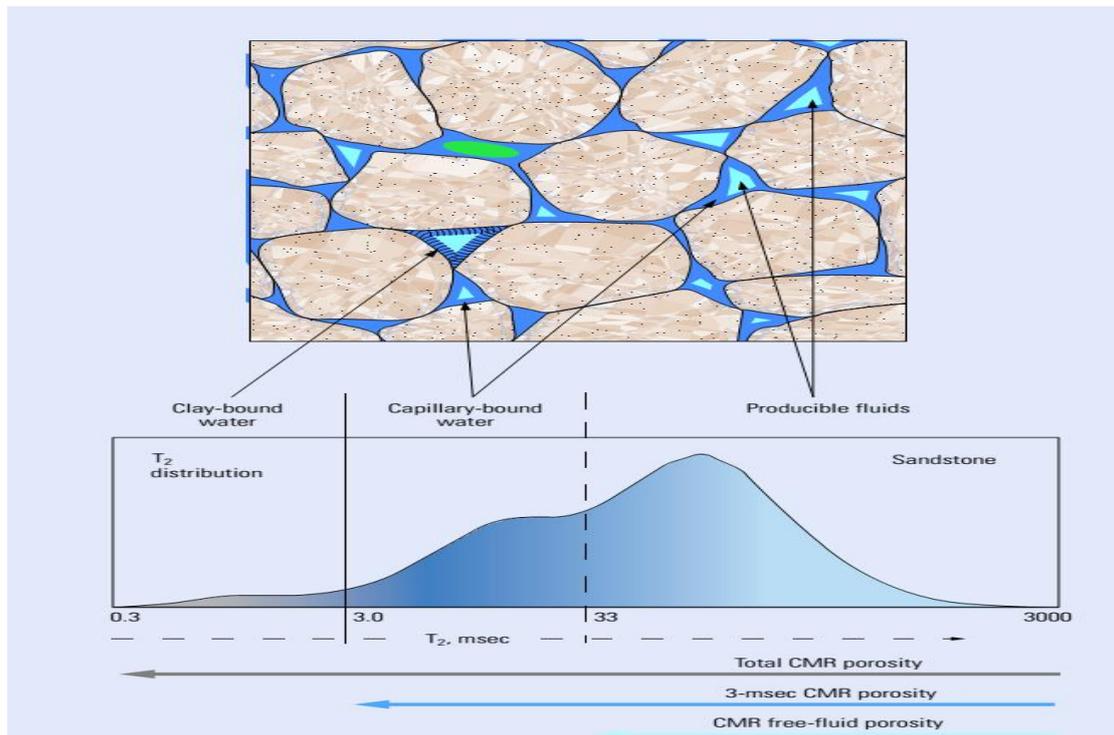


Figure III.2. Distribution de différentes porosités en fonction de T2 (Document Schlumberger)

Tel que :

Eau liée (*bound water*) : est l'eau qui n'est pas productible ou l'eau qui ne peut pas être déplacée par les hydrocarbures.

Eau mobile (*movable water*) : l'eau mobile qui peut se déplacer et couler dans le puits pendant la production.

Eau liée dans l'argile (*clay - bound water*) : c'est l'eau attachée et structurellement immobile sur la surface de minéraux d'argile.

Eau capillaire liée (*capillary - bound water*) : eau liée par des forces capillaires.

Si la saturation en eau S_w égale la saturation en eau irréductible $S_{w,irr}$ on doit également étudier la perméabilité de la formation, pour celle on utilise la diagraphie RMN pour calculer la saturation en eau irréductible.

III.1.1 Volume d'argile

Pour le calcul du volume d'argile contenu dans le réservoir, on utilise la relation suivante :

$$V_{sh} = MCBW / MCBW_{sh}$$

Telle que :

MCBW (*clay bound water*) : la mesure RMN de volume d'eau liée à l'argile

$MCBW_{sh}$ (*Clay Bound water shale*) : la mesure de RMN de volume d'eau liée déterminée pour 100% d'argile. (Eric Murphy, 2003)

III.1.2 La saturation en eau irréductible :

La détermination de cette saturation est cruciale pour évaluer le réservoir qui subit un phénomène de basse résistivité, elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{w,irr} = BVI + CBW/\phi_t$$

Ou par la relation : $S_{w,irr} = (\phi_e - \phi_f)/\phi_e$

Telle que :

BVI (Bulk volume irreducible) : est la fraction du volume de formation occupée par eau immobile, capillaire liée.

CBW : L'eau attachée et structurellement immobile sur la surface de minéraux d'argile

ϕ_t : La porosité totale de la formation.

ϕ_e : La porosité effective.

ϕ_f : La porosité du fluide libre.

Pour une formation propre la saturation en eau irréductible peut se combiner avec la saturation en eau d'Archie par la relation : $\phi_e - \phi_f = \sqrt{R_w/R_t}$

Avec :

R_w : La résistivité de l'eau de formation.

R_t : La résistivité de formation.

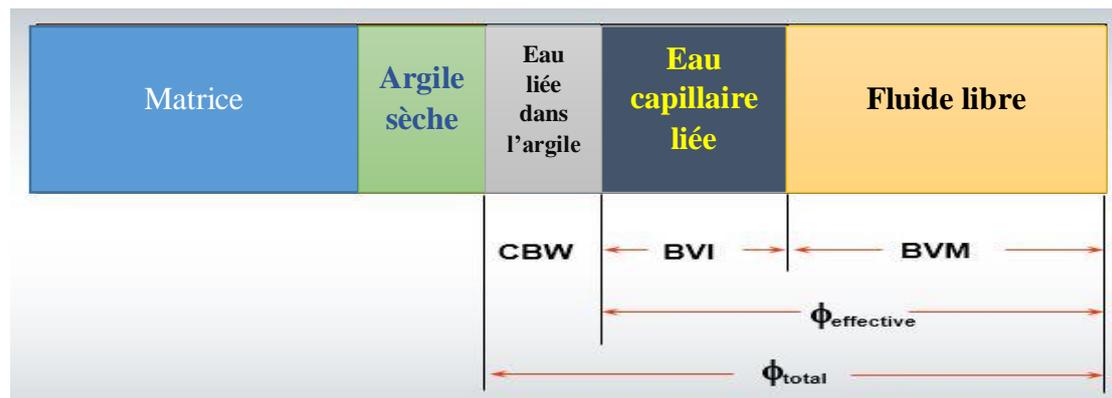


Figure III.3. Le CBW, BVI et BVM (Document Baker Hughes, 2003)

La saturation en eau irréductible $S_{w,irr}$ et la saturation en eau S_w , indique si la zone va produire de l'eau, lorsque $S_w = S_{w,irr}$ l'eau libre sera produite.

III.1.3 La perméabilité

Si la saturation en eau irréductible n'est pas la saturation en eau, alors, il faut calculer la perméabilité pour confirmer si les hydrocarbures seront produits ou non :

La perméabilité est donnée par la relation de Coates – Timur :

$$K_{nmr} = (MPHE/C)^m * (MBVM/MBVI)^n$$

Ou par la relation : $k = A\varphi^B(S_{w,irr})^c$

Tel que :

K_{nmr} : La perméabilité en milli Darcy (md)

MPHE : la porosité effective

MBVM : la fraction du volume de formation occupée par fluide mobile.

MBVI : est le fractionnaire part de volume de formation occupé par eau immobile, capillaire liée

M : facteur de cimentation

C = 10, n = 2., m = 4

A, B et C sont des constantes empiriques qui sont déterminés pour spécifique zone de formation.

φ : La porosité.

Pour illustrer ces étapes d'évaluation d'un réservoir qui subit le phénomène de basse résistivité par les outils diagaphiques de RMN, j'ai établi cet organigramme suivant :

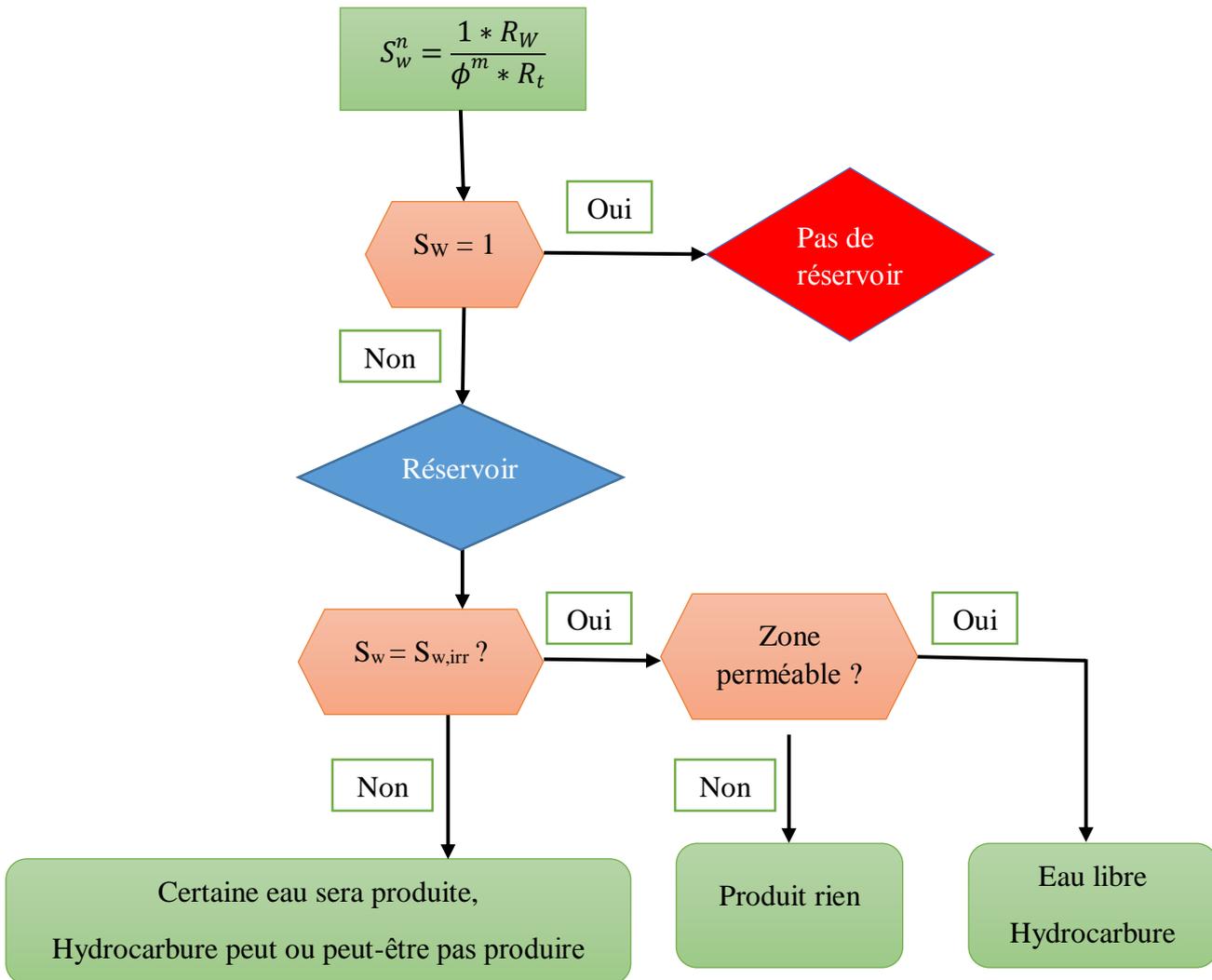


Figure III.4. Organigramme illustrant les étapes d'évaluation des paramètres pétrophysiques en utilisant le RMN

Conclusion générale

Conclusion générale et recommandation

Les enregistrements diagraphiques qui utilisent les propriétés de la résonance magnétique nucléaire des hydrocarbures est la capacité d'estimer la saturation en eau indépendamment de la résistivité, de ce fait, elles sont très utiles pour nous aider à identifier les réservoirs qui subissent le phénomène de basse résistivité.

La résonance magnétique nucléaire (RMN) peut nous fournir des informations détaillées sur la porosité de formation ainsi, elle peut remplacer les logs de porosité conventionnels.

Elle nous donne également une information quantitative concernant les pores, des fluides (eau liée dans l'argile, eau capillaire liée, l'eau libre, pétrole et gaz).

À partir de cette étude sur la RMN, les paramètres pétrophysiques extraite à partir du log RMN comme la porosité et la saturation sont plus précis que les logs conventionnels, donc l'utilisation de ce log nous permet éviter les erreurs d'interprétation diagraphiques surtout en présence du phénomène de basse résistivité.

BIBLIOGRAPHIE :

- Baker Hughes. (2003). NMR Logging Workshop
- DUNN K.-J. (2002). Handbook of geophysical exploration; volume 32.
Nuclear Magnetic Resonance, Petrophysical and Logging Applications.
- George R. Coates, Lizhi Xiao, and Manfred G. Prammer. (1999). NMR Logging, Principles and Applications.
- Schlumberger. Documents.
- SERRA O. (2008). Well Logging Handbook. Éditions Technip, 25 rue Ginoux, 75015 Paris, France.
- SERRA O. (2007). Well Logging and Reservoir Evaluation.
EditionsTechnip - 27,rue Ginoux - 75737 Paris Cedex 15 - France