

# Synthèse Technique Complète : Physique de la NMR et Exploration des Réservoirs

*Principes de relaxation de l'hydrogène, hétérogénéités des matrices rocheuses et méthodologie orbitale passive*

## PARTIE I : FONDEMENTS PHYSIQUES ET PROPRIÉTÉS DES ROCHES

### 1. Les Temps de Relaxation Fondamentaux de l'Hydrogène

En physique et en imagerie, les temps de relaxation de l'hydrogène désignent le temps nécessaire aux protons (les noyaux d'atomes d'hydrogène) pour revenir à leur état d'équilibre thermodynamique après avoir été perturbés par une impulsion électromagnétique. Ce phénomène est au cœur de la NMR (Résonance Magnétique Nucléaire) et de l'IRM. On distingue deux constantes de temps principales qui caractérisent le retour de l'aimantation :

- **Le temps de relaxation T1 (Relaxation longitudinale)**  
:
  - **Définition** : C'est le temps caractéristique (exprimé en secondes) nécessaire pour que l'aimantation de l'hydrogène retrouve 63 % de sa valeur d'équilibre initiale après une excitation. Il correspond à la repousse de l'aimantation dans l'axe du champ magnétique principal.
  - **Mécanisme** : Les protons d'hydrogène libèrent l'énergie qu'ils ont absorbée en la transférant à leur

environnement moléculaire immédiat (le réseau).

- En IRM : Le T1 permet de créer le contraste anatomique. Il dépend des tissus : les tissus riches en eau (comme le LCR) ont un T1 long, tandis que les tissus gras ont un T1 court.

- **Le temps de relaxation T2 (Relaxation transversale)**

:

- **Définition** : C'est le temps caractéristique (exprimé en millisecondes) au bout duquel l'aimantation transversale (perpendiculaire au champ magnétique) a disparu à 37 % de sa valeur maximale. Elle représente la perte de cohérence ou le déphasage des protons entre eux.

- **Mécanisme** : Ce phénomène est dû aux interactions des protons entre eux (les interactions spin-spin).

- En IRM : Le T2 est toujours beaucoup plus court que le T1. Il permet d'obtenir des images où les fluides apparaissent très brillants (comme les œdèmes ou le liquide céphalo-rachidien).

## 2. La Distinction Cruciale : T2 versus T2\* (Relaxation Effective)

En pratique, l'aimantation transversale décroît beaucoup plus rapidement que le seul effet des interactions spin-spin (T2). Ce phénomène global est mesuré par la constante de temps T2\*.

$$1 / T2^* = 1 / T2 + 1 / T2_{inhomogène}$$

- **Le mécanisme** : La perte de cohérence des protons est accélérée par les inhomogénéités du champ magnétique principal (B0). Ces dernières peuvent être intrinsèques à l'aimant ou induites par les différences de susceptibilité magnétique aux interfaces du milieu (par exemple, entre la matrice rocheuse solide et les fluides qu'elle contient).
- **La réversibilité** : Contrairement au vrai T2 qui dépend de chocs moléculaires aléatoires et irréversibles, le déphasage lié aux inhomogénéités (T2,inhomogène) est fixe et statique. Il peut être compensé et "annulé" en appliquant des impulsions de recentrage (comme dans une séquence d'Écho de Spin).

### 3. Dynamique des Seuils de Coupure (Cut-off) : Carbonates vs Grès

**Le seuil de coupure (T2 cut-off) est la constante de temps limite qui permet de séparer hydrodynamiquement l'eau liée (située dans la microporosité, non productible) de l'eau libre (située dans la macroporosité, mobile et exploitable). L'écart majeur constaté entre les grès (~33 ms) et les carbonates (~92 ms) découle directement de l'équation fondamentale de la relaxation de surface :**

$$1 / T2 \approx \rho_2 \cdot (S / V)$$

- **La relaxivité de surface (ρ2) plus faible des carbonates** : Les grès contiennent naturellement des minéraux argileux ainsi que des traces d'oxydes de fer

ou de métaux lourds possédant des propriétés paramagnétiques qui accélèrent fortement la relaxation des protons à leur contact. À l'inverse, les carbonates purs (calcite, dolomie) sont beaucoup plus exempts de centres paramagnétiques. Leur relaxivité  $\rho_2$  est 2 à 3 fois plus faible que celle des grès, ce qui ralentit mécaniquement la relaxation transversale et déplace le curseur de coupure vers des temps plus longs (~92 ms).

#### 4. Impact Minéralogique Crise : Présence de la Pyrite (FeS<sub>2</sub>)

La pyrite est un sulfure de fer métallique conducteur et hautement paramagnétique. Sous l'application du champ B<sub>0</sub> de l'outil, la forte disparité de susceptibilité magnétique entre ces grains métalliques et les fluides génère d'importants gradients de champ locaux (Ginterne). Ces micro-gradients accélèrent drastiquement la dépolarisation par diffusion moléculaire, écourtant artificiellement le temps T<sub>2</sub> mesuré :

$$1 / T_{2,\text{mesuré}} = 1 / T_{2,\text{surface}} + 1 / T_{2,\text{volume}} + (\gamma^2 \cdot G_{\text{interne}}^2 \cdot TE^2 \cdot D) / 12$$

Conséquences directes sur l'interprétation :

- Sous-estimation de la taille des pores : Les pics du spectre T<sub>2</sub> migrent vers la gauche (temps courts), classant par erreur de grands pores mobiles en micropores.

- Surestimation de l'eau liée (BVI) : Le volume d'eau irréductible est surévalué au détriment des hydrocarbures mobiles.

- Atténuation de signal : Si le déphasage est plus rapide que le temps d'écho minimal (TE) de la sonde, le signal NMR peut être totalement masqué.

## **PARTIE II : QUANTIFICATION DE LA PERMÉABILITÉ ET STRATÉGIE ORBITALE PASSIVE**

### **1. Modélisation de la Perméabilité Intrinsèque par NMR**

**La NMR calcule une perméabilité continue à partir de la distribution complète de la taille des pores via deux modèles de référence :**

• **Le modèle de Coates (Free Fluid Model) : Adapté aux grès et pores simples, fondé sur le ratio fluides**

**mobiles/liés :  $K_{Coates} = (\phi / C)^4 \cdot (FFI / BVI)^2$**

• **Le modèle SDR (Schlumberger Doll Research) :**

**Fondé sur la moyenne géométrique du spectre :  $K_{SDR} = a \cdot \phi^4 \cdot (T2,log)^2$**

**Limites dans les structures complexes : Dans les carbonates hétérogènes (pores géants isolés ou 'vugs'), le fluide affiche un T2 très long. Le modèle SDR calcule alors une perméabilité immense totalement erronée. L'interprétation moderne utilise donc des seuils de coupure variables (Variable T2 cut-**

off) et des cartes NMR 2D (D-T2 ou T1-T2) pour isoler la connectivité réelle.

## 2. Télédétection Globale Orbitale (Sondage Passif RSS-NMR)

En observation passive à grande échelle, la combinaison de la recherche en profondeur et de la relaxation de l'hydrogène permet de marquer les gisements à distance (jusqu'à 7 km). Le calage en profondeur s'effectue par variation de la fréquence de Larmor ( $\omega_0 = \gamma \cdot B_0$ ). Une fois l'impulsion coupée, la signature spectrale du signal radiofréquence de retour sert de descripteur physique direct :

- Méthodologie opérationnelle de « L'Étape Zéro » :
  1. Balayage Orbital Global : Cartographie passive par satellite d'une grande superficie sans aucune présence physique au sol.
  2. Filtrage des Anomalies : Élimination immédiate des zones à T2 court (matrices denses ou argileuses sans intérêt).
  3. Marquage des Fluides : Isolation des signatures à T2 long (fluides mobiles) et caractérisation (pétrole via  $T1/T2 \approx 1-2$  ; gaz via T1 long/T2 court par diffusion).
  4. Focus Chirurgical (Sweet Spots) : Délimitation précise des zones cibles. Les campagnes de sismique lourde ou de forage sont ainsi concentrées exclusivement là où la présence et la mobilité des hydrocarbures sont confirmées.

**Cette approche élimine le besoin d'acquisition sismique systématique à l'aveugle, réduit drastiquement les coûts, présente un impact environnemental nul (mode discret/invisible) et permet la réévaluation rapide des champs matures sans interruption de la production.**