

Connaissance des eaux souterraines: le SRM (Sondage par Résonance Magnétique) au Québec

Jean Roy, Anatoly Legchenko, Alain Rouleau, Michel Bureau, Michel Chouteau, Julie Menier, Daniel Chabot, Yves Leblanc, Denis Richard, Erwan Gloaguen, Yamina Benhouhou

Correspondance: jeanroy_igp@videotron.ca

Avertissement: cette présentation est livrée dans un état plus préliminaire que celles qui l'accompagnent; elle constitue un rapport de mi-parcours auquel viendront s'ajouter d'autres informations lors des étapes ultérieures de ce développement.

Les Figures 2, 3, 4, 6 proviennent de Roy et al. (2008) ou en sont inspirées.

Introduction

Une introduction au SRM (Sondage par Résonance Magnétique) [MRS en anglais] est incluse dans la présentation précédente. Nous utilisons les SRM (sondage par résonance magnétique) depuis 1996 et nous avons fait des levés dans des conditions difficiles (e.g. champ terrestre de moins de 29000 nT et orages tropicaux en Afrique Australe) mais nous avons toujours livré la marchandise. Après une série de discussions en 2002, nous avons effectué une série de levés SRM au Québec en 2003 imaginant des levés faciles (e.g. champ terrestre de plus de 54000 nT, absence d'orage tropicaux etc.). En fait nous n'avons pas pu faire de levés SRM normaux en 2003. Nous avons cependant pu diagnostiquer la cause du problème et apporter des correctifs durant les missions subséquentes (2008 et 2010).

Survol méthodologique: en 2003, nous avons utilisé l'équipement (NUMIS^{PLUS}) et la procédure standard pour les levés SRM. Suite aux résultats obtenus en 2003, la procédure a été modifiée. Une première mission en 2008 avec un appareil léger (NUMIS^{LITE}) a permis de vérifier la pertinence de la solution proposée (écho de spin - ES) mais uniquement sur des aquifères sub-affleurants i.e. profondeur de 0 à ~ 5 m. Une deuxième mission en mode ES à l'été 2010 avec un appareil standard (NUMIS^{PLUS}) a permis de s'affranchir de cette contrainte et de vérifier que la solution proposée (ES) était efficace même en l'absence d'eau près de la surface.

Contexte: Le travail en SRM est perturbé par des gradients de champ magnétique importants, les taux de relaxation correspondent aux relations:

$$\begin{aligned} 1/T_1 &= 1/T_{1B} + \rho_1(S/V) \\ 1/T_2 &= 1/T_{2B} + \rho_2(S/V) + 1/T_{2D} \\ 1/T_2^* &= 1/T_2 + \gamma \Delta B_0 \end{aligned}$$

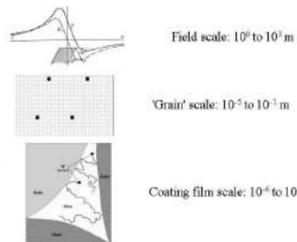


Figure 1: gradient du champ magnétique à différentes échelles

où T_i est une constante de temps de relaxation RMN, ρ_i est une relaxivité, γ est la constante gyromagnétique (ici pour l'hydrogène), S et V sont respectivement la surface et le volume du pore qui contient l'eau et B_0 est le champ magnétique statique. Au-dessus d'un certain seuil de la valeur de $\gamma \Delta B_0$, T_2^* sera trop court pour être mesuré avec l'équipement SRM actuel e.g. NUMIS. On observe ces gradients à différentes échelles (Figure 1): à titre illustratif, ce qu'on observe dans le Grenville se situe au niveau des grains tandis que ce qu'on observe dans les données SRM provenant de l'Inde est au niveau de la structure (dyke).

Tableau 1: Missions SRM dans le Grenville:

Année	Instrument	Largeur impulsion Q_I	Boucles	Séquence d'impulsions
2003	NUMISPLUS	40 ms	SQ-8: 37.5 m 1 t, SQ: 75 m 1 t	$(q), (q, -q)$
2008	NUMISLITE	10, 15, 20 ms	SQ-8: 18.75 m 2 t, SQ-8: 37.5 m 1 t	$(q, -q), (q, 2q), (q, -2q)$
2010	NUMISPLUS	10, 15, 20 ms	2 CA: 37.5 m, CA-8: 37.5 m, CA: 75 m	$(q, 2q), (q, -2q)$

(1) 2003:

Essais 2003:

localisation des sites : Figure 6
exemples de résultats: Figure 2
constatation: pas de signaux RMN observés

Relevés additionnels, diagnostiques et recommandations 2003-2005:

- levés magnétiques additionnels
- mesures de susceptibilités magnétiques (k): Figure 3
- diagnostiques de gradients magnétiques
- essai en labo: édition de diffusion (D vs T_2) Hirasaki (2004): Figure 4
- confirmation du problème de gradients magnétiques
- recommandations: mesurer T_2 plutôt que T_2^* ce qui suppose le mode echo de spin (ES)

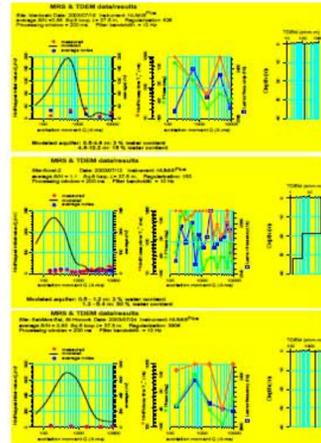


Figure 2: Exemples de résultats: pas de signaux RMN

Nous avons pu observer que la susceptibilité magnétique des matériaux granulaires était toujours supérieure à 1×10^{-3} SI aux sites investigués alors qu'elle est de 10 à 100 fois inférieure à cela en Europe. Nous avons observé la présence de grains de magnétite dans tous les matériaux granulaires dans ou à proximité du Grenville. C'est dans la sablière de St-Honoré qu'on a compris 'ce qui se passait': l'un des murs de la sablière contenait de fins lits de magnétite clairement visibles à l'œil nu. Nous avons documentés ces travaux dans un article de JAG (2008). Nous avons donc modifié la procédure de mesure SRM pour tenir compte des gradients magnétiques élevés dans l'aquifère lui-même. En 2008, en utilisant une technique d'écho de spin (SE), nous avons pu observer une réponse SRM dans la région de Chicoutimi (St-Honoré et St-Fulgence) là où les effets perturbateurs de la magnétite ont d'abord été clairement identifiés. En 2010, nous avons pu confirmer ces résultats sur des aquifères plus profonds. Le traitement complet et l'interprétation des levés SE doit cependant être complété cet hiver.



Figure 3: mesures k

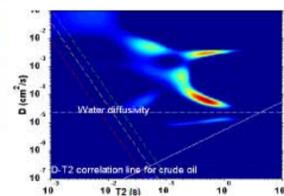


Figure 4: édition de diffusion: D vs T_2 (Hirasaki, 2004)

(2) 2008:

Nous avons utilisé le même équipement mais avec un programme de contrôle différent pour implémenter le mode écho de spin (ES, Figure 6).

Essais 2008: surtout sur les mêmes sites qu'en 2003 pour vérifier:

- absence de précession libre (PL)
- si le mode ES permet la détection de signaux RMN
- si un sondage peut être fait
- quel est le mode d'excitation le plus approprié
- si la largeur de bande est suffisante
- si nous pouvons détecter la plus grande partie de l'eau en place
- si le T_2 mesuré est compatible avec la lithologie

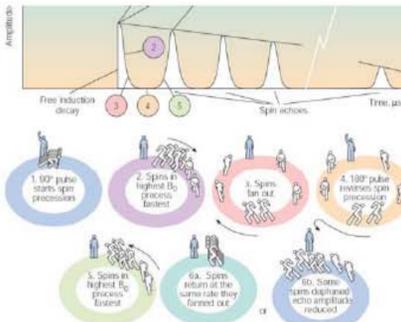


Figure 5: SRM en mode ES: croquis de Schlumberger: Oilfield Review Autumn 1995 p. 23)

Exemple 1: St-Honoré: 1^{ère} observation d'écho de spin dans le Grenville:

Exemple 2: St-Fulgence: 1^{er} sondage

Exemple 3: Maniwaki: nappe à ~ 5 m

Exemple 4: Ste-Marthe: réponse mixte PL & ES

Observations:

- le mode ES est encore au stade de vérification
- une durée d'impulsion courte (mission 2008 et

- 2010) aide à détecter l'eau
- le programme de contrôle permet une bonne flexibilité PL & ES

sur 9 sites il y a eu détection d'eau sur 7 et sondage sur 5 (2: bruit trop élevé) des effets de gradients magnétiques ont été observés sur les 7 sites mesurables l'ES a un rôle critique dans la détection d'eau par RMN dans le Grenville une partie de l'eau en place n'est pas détectée plus de travaux sont nécessaires concernant la bande passante et le mode d'excitation i.e. par exemple $q, 2q$ vs. $q, -2q$ tous les sites dans le Grenville et en particulier Saguenay ont de sérieux effets de gradients magnétiques sans détection de PL des échantillons de sédiments ont été prélevés pour analyse de granulométrie, porosité, contenu magnétique, susceptibilité etc.

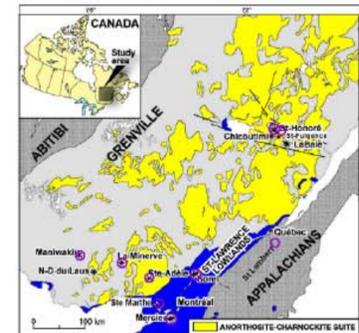


Figure 6: localisation sites: 2003: astérisque, 2008: cercle

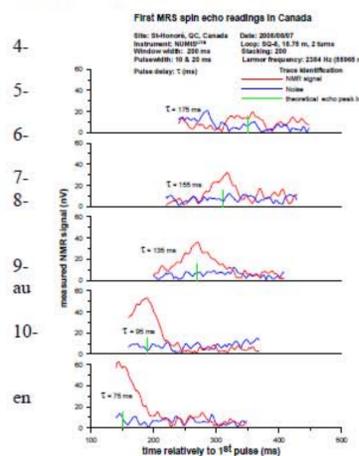


Figure 7: St-Honoré, réponse RMN en mode ES

First MRS spin echo sounding

Site: St-Fulgence, QC, Canada Date: 2008/08/08
Instrument: NUMIS^{LITE} Loop: SQ-8, 18.75 m, 2 turns
Window width: 200 ms Stacking: 80
Pulsewidth: 10 & 20 ms Larmor frequency: 2348 Hz (55155 nT)
Pulse delay: 71 ms

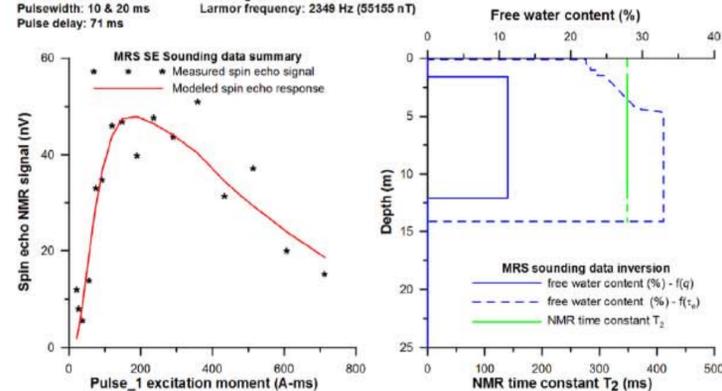


Figure 8: St-Fulgence: 1^{er} sondage en mode écho de spin

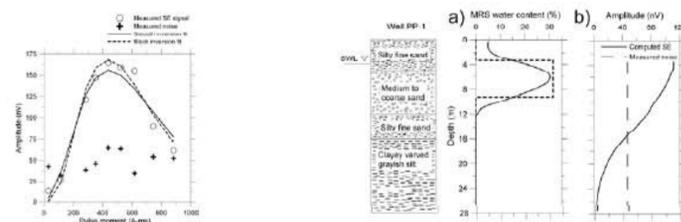


Figure 9: Maniwaki, inversion: Legtchenko et al. 2009

Les grains de magnétite de Ste-Marthe (Figure 12, à droite) apparaissent moins rugueux que ceux de St-Fulgence (à gauche) ce qui est compatible avec le concept de distance de transport. Un grain plus rugueux provoque des gradients magnétiques plus élevés.

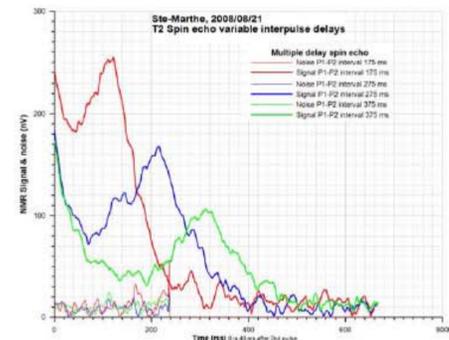


Figure 10: Ste-Marthe, réponse mixte: précession libre et ES

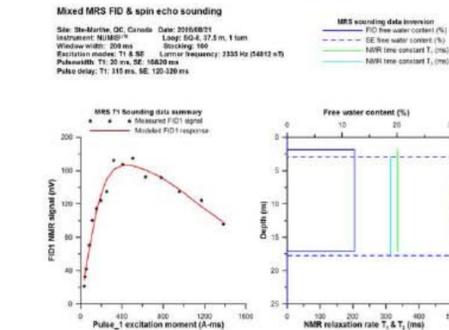


Figure 11: Ste-Marthe: inversion



Figure 12: microphotographies des grains de magnétite - à gauche: St-Fulgence, à droite: Ste-Marthe (Menier, 2009)

(3) 2010:

En 2010, l'IRD & BRGM ont prêté un NUMIS^{PLUS} pour les essais ce qui a permis d'étudier la réponse SRM en mode ES sur des sites sans eau à proximité de la surface et des aquifères à plus de 10 m de profondeur de la surface. 5 sites ont été étudiés (St-André, Maniwaki (vérification des données de 2008), Lac Aqueuduc, Labrecque et Cap de la Madeleine). De plus 2 sites avaient une fréquence de Larmor qui était une harmonique de la fréquence du courant électrique au Québec (60 Hz) et il a quand même été possible de faire le levé grâce à une modification dans la procédure habituelle.



Figure 13: acquisition SRM 2010: présence de ligne d'alimentation à proximité

Conclusions 2010: Les levés SRM en mode ES constituent une solution pour les problèmes rencontrés dans le Grenville. Des modifications ont été apportées à la procédure habituelle et les programmes de traitement de données seront modifiés en conséquence à la fin de la saison de terrain (fin d'automne 2010). Les résultats devraient normalement être disponibles durant l'hiver 2010-2011. Le SRM en mode ES opère en présence de magnétite disséminée, tant à faible profondeur (2008) qu'à profondeur moyenne (2010). De plus il est maintenant possible de faire des levés SRM même aux endroits où la fréquence de Larmor est une harmonique de la fréquence du secteur (60 Hz au Québec). Des recommandations sont faites pour améliorer l'aspect pratique du mode ES: • optimiser le matériel (hardware) pour le mode ES, • études supplémentaires concernant le mode d'excitation, • étude avec variation systématique de la fréquence d'excitation. Nous croyons que la poursuite du développement du mode ES est pleinement justifié.

La technologie SRM est maintenant fonctionnelle au Québec. Cette présentation encourage les thésards et autre chercheurs à utiliser cette technologie pour la connaissance des eaux souterraines du Québec. L'IRD est disposé à prêter de l'équipement SRM pour fin de recherches en milieu magnétique perturbé.

Reconnaissance: Nous avons vivement apprécié le support financier d'ITC en 2003 et la collaboration des institutions suivantes et de leur personnel: AGEOS, BRGM, École Polytechnique, INRS-ETE, IRD, IRIS, MBG, QUALITAS, Rice University UQAC, UQAT.

Merci à tous ceux/celles qui ont permis ces études et à tous ceux/celles qui ont contribué à leur réalisation. Soulignons le projet de fin d'études de Julie Menier consacré entièrement à cette question.

Références:

- Hirasaki, G., 2004, Communication personnelle, Rice University, Houston.
- Menier J., 2009, Sondage par résonance magnétique dans des dépôts granulaires du Grenville; Mémoire de Projet de fin d'études, Unité d'enseignement en Sciences de la Terre, UQAC, 38p.
- Roy, J., Rouleau, A., Chouteau, M. et Bureau, M., 2008, Widespread occurrence of aquifers currently undetectable with the MRS technique in the Grenville geological province, Canada; Journal of Applied Geophysics, 66, 82-93.