



HAL
open science

Contribution à l'Hydro-Géophysique : Développements et Applications de la Résonance Magnétique Protonique et des Méthodes Electromagnétiques

Jean-Francois Girard

► **To cite this version:**

Jean-Francois Girard. Contribution à l'Hydro-Géophysique : Développements et Applications de la Résonance Magnétique Protonique et des Méthodes Electromagnétiques. Géophysique [physics.geoph]. Université de Strasbourg, 2010. tel-00472209

HAL Id: tel-00472209

<https://theses.hal.science/tel-00472209>

Submitted on 9 Apr 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Mémoire

Présenté par

Jean-François GIRARD

Pour obtenir l'habilitation à diriger des recherches

de l'**Université de Strasbourg**

Spécialité : Géophysique

**Contribution à l'Hydro-Géophysique :
Développements et Applications de la Résonance Magnétique
Protonique et des Méthodes Electromagnétiques**

Soutenue le 6 Avril 2010 à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg

Devant le jury composé de :

- | | |
|-------------------------------|---|
| M. Alain TABBAGH | professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Rapporteur. |
| M. Dominique GIBERT | professeur à l'Institut de Physique du Globe de Paris, Rapporteur. |
| Mme. Laurence JOUNIAUX | chargé de recherches à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Rapporteur. |
| M. Anatoly LEGTCHENKO | directeur de recherches au Laboratoire d'études des Transferts en Hydrologie et Environnement, Examineur. |
| M. Jacques HINDERER | directeur de recherches à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Examineur. |

Table des matières

I.	CURRICULUM VITAE	9
I.1	Expérience professionnelle	9
I.2	Expérience d'enseignement et d'encadrement scientifique	10
I.3	Principaux projets scientifiques	11
II.	PUBLICATIONS	13
III.	RESONANCE MAGNETIQUE PROTONIQUE (RMP - MRS)	21
III.1	Modélisation	21
III.1.1	Champ géomagnétique et stabilité du signal RMP	22
III.1.2	Focalisation de la réponse RMP	23
III.1.3	Impact de la topographie	25
III.1.4	RMP en milieu électriquement très conducteur	26
III.2	Inversion	27
III.2.1	Imagerie par RMP d'un conduit karstique	27
III.2.2	Tomographie 2D et 3D par RMP	29
III.2.3	Inversion jointe stochastique	30
III.3	Développements méthodologiques	32
III.3.1	Monitoring de la zone non-saturée : cas de la craie	32
III.3.2	Site test de Marcilly	36
III.3.3	Traitement du signal RMP par voies remote	38
III.4	Applications	39
III.4.1	Aquifères en milieu de socle (Hyderabad, Inde)	40
III.4.2	Estimation du volume des sinkholes (Mer morte, Jordanie)	40
III.4.3	Imagerie du conduit karstique de Rocamadour	40
III.4.4	Prospection RMP sur le site vosgien de La Soutte (Alsace)	40
III.4.5	Bassin versant de Montreuil-sur-Epte (Cuisien, France)	41
III.5	Dissémination	42
IV.	METHODES ELECTROMAGNETIQUES	43
IV.1	Monitoring électromagnétique (CSEM)	43
IV.1.1	Développement du dispositif LEMAM pour le monitoring du stockage géologique du CO2	43
IV.1.2	CSEM - Volet expérimental	47
IV.2	Applications des méthodes de résistivité électriques	50
IV.2.1	Ressources hydrologiques et géothermiques	50
IV.2.2	Friches industrielles (ERT – SIP)	54
IV.3	Le Géoradar	55
IV.3.1	Principaux résultats	55
IV.3.2	Applications à la Paléo-sismologie	56
IV.3.3	Application la sédimentologie et les Paléo-climats	57
V.	PROJET DE RECHERCHE ACTUEL ET FUTUR	59

V.1 Collaborations	62
VI. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	63
VII. ANNEXE PROJETS	65
VII.1 Projets avec participation technique ET montage / pilotage	65
VII.1.1 CO2FieldLab (2009-2013)	65
VII.1.2 REMAPRO (2006-2009)	65
VII.1.3 Proton (2005 - 2007)	66
VII.1.4 Waterscan (2005-2007)	67
VII.2 Projets scientifiques avec participation technique uniquement	68
VII.2.1 EMSAPCO2 (2008-2010)	68
VII.2.2 CO2ReMoVe (2006 - 2012)	68
VII.2.3 CO2Geonet (2004 - 2009)	68
VII.2.4 Flood1 (2005 - 2008)	69
VII.2.5 Hygeia (2001-2004)	70
VII.2.6 Cefipra – Inde (2003-2005)	71
VIII. SELECTION DE RESUMES ETENDUS	73
VIII.1.1 Girard J-F. et al., 2D and 3D Magnetic Resonance Tomography: synthetic cases and field applications, MRS2009.	73
VIII.1.2 Girard J-F. et al., Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint stochastic approach, MRS2009.	73
VIII.1.3 Girard, J-F. et al, Contribution of the joint use of MRS and ERT to hydrogeological modelling: case study of the Montreuil-sur-Epte basin (France), MRS2006.	73
VIII.1.4 Baltassat J.M., Krishnamurthy N.S., Girard J.F. et al., , Geophysical characterization of weathered granite aquifers in the Hyderabad region, Andhra Pradesh, India, MRS2006.	73
IX. SELECTION D'ARTICLES	95
IX.1 RMP 95	
IX.1.1 Girard et al., 2005, Stability of MRS signal and estimating data quality, Near Surface Geophysics.	95
IX.1.2 Boucher, Girard et al., 2006, Using 2D inversion of magnetic resonance soundings to locate a water-filled karst conduit, Journal of Hydrology.	95
IX.1.3 Girard, J-F., et al., 2007, 2D magnetic resonance tomography applied to karstic conduit imaging, Journal of Applied Geophysics.	95
IX.1.4 Girard, J-F. et al., 2007, Aquifers imagery and hydrodynamic parameters estimation using proton Magnetic Resonance Soundings, Taylor & Francis.	95
IX.1.5 Legchenko A., M. Ezersky, J-F. Girard, J-M. Baltassat, M. Boucher, C. Camerlynck, A. Al-Zoubi, 2008, Interpretation of magnetic resonance soundings in rocks with high electrical conductivity, Journal of Applied Geophysics	95
IX.1.6 Legchenko A., Ezersky M., Camerlynck C., Al-Zoubi A., Chalikakis K. and Girard J-F., 2008,, Locating water-filled karst caverns and estimating their volume using magnetic resonance soundings, Geophysics.	95
IX.1.7 Girard J-F., Legchenko A., Boucher M., Baltassat J-M., 2008, Numerical study of the variations of magnetic resonance signals caused by surface slope, Journal of Applied Geophysics.	95
	95
IX.2 CSEM	95
IX.2.1 Bourgeois B. and Girard J-F., 2010, First modelling results of the EM response of a CO ₂ storage in the Paris Basin, Oil & Gas Science & Technology.	95
IX.3 GPR 95	
IX.3.1 Bano M., Loeffler O., Girard J-F., 2009, GPR response and FDTD modeling to fuel infiltration in a sand box experiment, Cptes Rendus. Acad. Sc.	95

Les abréviations techniques utilisées sont en anglais car très répandues et prêtant peu à confusion.
Ci-après, les plus courantes :

MRS – Magnetic Resonance Sounding (sondage par Résonance Magnétique des Protons ou RMP)

NMR – Nuclear Magnetic Resonance (Résonance Magnétique Nucléaire ou RMN)

ERT – Electrical Resistivity Tomography (Tomographie de Résistivité Electrique)

SIP – Spectral Induced Polarization (Polarisation provoquée spectrale, ou mesure de la résistivité complexe en domaine fréquentiel)

TDEM – Time Domain Electromagnetism (sondage EM en domaine temporel)

CSEM – Controlled Source EM (mesures électromagnétique à source contrôlée)

GPR - Ground Penetrating Radar (Radar géologique)

Préface

Tout au long des travaux de recherche que j'ai pu réaliser depuis 2003 au BRGM à Orléans, et au préalable durant ma thèse à l'EOST à Strasbourg, j'ai bénéficié d'un cadre motivant, dynamique et varié. J'ai bénéficié des conseils et de l'expérience de nombreux collègues et amis. Cet environnement m'a permis d'apprendre chaque jour, tant en Géophysique que dans les autres domaines des géosciences : Hydrologie, Géologie. Je compte bien continuer à essayer de transmettre la richesse et la complexité du monde souterrain pendant encore longtemps !

Je remercie sincèrement toutes les personnes avec qui j'ai la chance de pouvoir travailler dans un domaine aussi passionnant que les géosciences.

Un grand merci à Sophie, Lucie et Quentin, pour leur soutien et leur patience...

I. Curriculum Vitae

Jean-François GIRARD

Né le 26 Janvier 1977 à Chartres (28), marié, 2 enfants.

Docteur - Ingénieur Géophysicien au Bureau de Recherches Géologiques et Minières depuis le 1^{er} Avril 2003.

- 2002 & 2008, **Qualifié MCF** pour les sections 35 et 36 de la CNU.
- 2002, **Thèse de Doctorat** de l'université de Strasbourg I, Imagerie géoradar et modélisation des diffractions multiples. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00135945/fr/>
- 1999, **Diplôme d'études approfondies (DEA) de Physique et Chimie de la Terre** de l'université de Strasbourg I. Définition d'une méthode pour caractériser les faciès sismiques à l'aide des réseaux de neurones.
- 1999, **Diplôme d'Ingénieur Géophysicien** de l'Ecole de Physique du Globe de Strasbourg.

I.1 Expérience professionnelle

2003...2010 **Chercheur – Ingénieur Géophysicien au BRGM** (Orléans), dans le Service Risques Naturels

- Responsable du programme de recherche sur le développement de la méthode basée sur le phénomène de résonance magnétique protonique (RMP ou MRS) pour l'étude de l'eau souterraine,

- Modélisation et application de méthode CSEM fréquentielle et mise au point d'un dispositif de mesure innovant pour l'imagerie de réservoir profond (suivi du stockage géologique de CO₂)

- Modélisation et application des mesures temporelles et spectrales de polarisation provoquée (résistivité complexe, SIP) pour la caractérisation des friches industrielles et sites pollués, et mise en œuvre de sondages TDEM

- Conduite de projets, recherche de partenariats scientifiques et industriels.

1999...2002 **Thèse sur le géoradar puis attaché temporaire d'enseignement et de recherche (ATER) à l'Université de Strasbourg (EOST)**

- Modélisation d'ondes radar dans des milieux dispersifs en domaine fréquentiel et par différences finies en domaine temporel, acquisition de données, estimation des paramètres diélectriques, traitement du signal, imagerie.

1998 & 1999 Stage de fin d'études (10 mois) au **centre scientifique d'ELF (Pau)**.

- Définition d'une méthode pour caractériser les faciès sismiques à l'aide des réseaux de neurones, développement d'un module sous logiciel SISMAGE.

1997 & 1998 Stage puis projet de recherche en collaboration avec l'**Observatoire Astronomique de Bordeaux** :

- Co-auteur d'une publication de la mesure de l'aplatissement du soleil (constante qui contrôle de nombreux cycles climatiques).

I.2 Expérience d'enseignement et d'encadrement scientifique

2003...2009 Co-encadrement d'une thèse au BRGM

- M. Boucher, 2007, Utilisation de la Résonance Magnétique Protonique et autres méthodes géophysiques pour estimer les paramètres hydrodynamiques dans différents contextes géologiques, sous la direction de A. Legchenko, LTHE - Grenoble)

Encadrement de 6 étudiants au BRGM

- provenant des universités de Paris, Strasbourg et Berlin: 3 stages de Maîtrise et 3 **stages de fin d'études** ingénieur (thème : géophysique appliquée à l'environnement et la détection de pollution).

2005...2009 Enseignements à l'EOST Strasbourg

- Cours annuel en Master 2 de 6h sur la méthode MRS dans le cadre du module d'Hydrogéophysique

Organisation d'une formation professionnelle

- « Sensibilisation aux méthodes géophysiques » (durée 3 jours, dispensée dans le cadre de formation.brgm.fr), en charge des méthodes électriques et de la résonance magnétique

2002-2003 Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER), 6 mois

- continuité des enseignements de monitorat, enseignements en Licence : ondes sismiques, informatique,

- membre fondateur de la SUGS section étudiante française de la SEG : au travers de conférences, de sorties et de visites de sites, l'association à pour objectif de promouvoir les différents domaines de la géophysique auprès des étudiants

1999...2002 Monitorat à l'Université de Strasbourg (EOST) :

- TD de sismique en 1^{ère} et 2^{ème} année de l'EPGS, TD d'astrophysique DEUG 1^{ère} année, méthodologie scientifique, total : 64 h TD / an.

- encadrement de projets de maîtrise, projets informatiques,

- encadrement des stages terrain de géophysique de l'EPGS.

1999...2002 Suivi de la formation à l'enseignement supérieur (CIES) durant 3 ans (10 j/an).

I.3 Principaux projets scientifiques

Les principaux projets scientifiques auxquels j'ai participé depuis 2002 sont présentés brièvement en annexe VII et sont listés ci-après. *Abbréviations utilisées : CdP : Chef de Projet de la partie BRGM.*

Projets avec participation scientifique ET participation au montage et au pilotage :

- **CO2FieldLab** (2009-2013), coordinateur de la partie française et CdP pour le brgm d'un projet européen (France, Norvège, Angleterre). Le budget total du projet est de 10 M€, et la part du BRGM est de 1.5 M€. *CO2 Field Laboratory for Monitoring & Safety Assessment.*
- **REMAPRO** (2006-2009), coordinateur et CdP pour le brgm d'un projet ANR PRECODD 2006. Budget 500 k€, dont 275 k€ pour la part BRGM. *Développement d'une méthodologie de cartographie 3D de la perméabilité des aquifères par REsonance MAgnétique PROtonique pour mieux gérer les sites pollués et prévoir le transfert des polluants.*
- **Proton** (2005 - 2007), CdP pour le brgm, projet cofinancé par le Réseau de recherche et d'innovation technologique, Eau et technologies de l'environnement (Riteau). *Amélioration de la précision et de la fiabilité d'estimation des paramètres hydrodynamiques des aquifères avec la méthode RMP.*
- **Waterscan** (2005-2007), CdP pour le brgm, projet cofinancé par l'Institut National des Sciences de l'Univers, INSU programme ECCO-PNRH : suite des projets précédents HyKar et Metreau. *Prospection et modélisation hydrogéophysique 4D*

Projets scientifiques avec participation technique uniquement :

- **EMSAP CO2** (2008 - 2010), cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche, Développement des méthodes EM et Sismique Active et Passive pour la surveillance de réservoirs de stockage de CO2
- **CO2ReMoVe** (2006 - 2012), Cofinancé par l'UE dans le cadre du FP6 (CSEM appliqué au suivi du stockage de CO2) en lien avec le projet européen **CO2SINK**. (premier pilote européen de stockage de CO2 On-Shore, site de Ketzin, en Allemagne).
- **CO2Geonet** (2004 - 2009), Cofinancé par l'UE dans le cadre du FP5 (mesures géophysiques sur analogue naturel de fuite de CO2, Italie).
- **GeoCarbone Monitoring** (2005 - 2007), cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche, surveillance et monitoring du stockage géologique du CO2, réalisé en collaboration avec l'IFP, INPL Images et l'Ineris.
- **Flood1** (2005 - 2008), Etude des crues de nappes dans la craie (notamment par RMP), en Angleterre et Picardie, avec le BGS et l'Université de Brighton.
- **Hygeia** (2001-2004), Cofinancé par l'UE dans le FP5., *HYbrid Geophysical technology for the Evaluation of Insidious contaminated Areas* (méthodes électriques et mesures de polarisation provoquée (SIP) sur le terrain).
- **Cefipra – Inde** (2003-2005), cofinancé par le BRGM et le centre franco-indien pour la promotion de la recherche avancée, *Geophysical characterisation of weathered granite aquifer within the Hyderabad region, Andhra Pradesh, India*

II. PUBLICATIONS

20 articles, 51 présentations à congrès.

Nombre de publications parues (J. of Appl. Geophys. , Geophysics , J. of Hydrology , Geophys. Res. Lett. , ...)	17, dont 4 en premier auteur, 3 en deuxième auteur,
Nombre de publications acceptées ou in press (Oil & Gas Sc. & Tech.)	1, Dont 1 en deuxième auteur,
Nombre de publications soumises et en préparation (Near Surface Geophysics , J. of Hydrology)	2, Dont 1 en premier auteur,
Nombre de présentations à congrès	51
Rapports BRGM	19

Publications dans des revues internationales à comité de lecture

1. Bois, E. and **Girard, J-F.**, 1999, Impact of the Quadrupole Moment of the Sun on the Dynamics of the Earth-Moon System, **Celest. Mech. Dyn. Astron.**, 73, p. 329-338.
2. Bano, M. and **Girard, J-F.**, 2001, Radar reflections and water content estimation of aeolian sand dunes. **Geophys. Res. Lett.**, 28, No. 16, p. 3207-3210, August 15, 2001.
3. Bano M., Edel J-B., Herquel G., Amalvict M., Blumentritt H., Boulanger D., Frogneux M., **Girard J-F.**, Ledrappier F., Luck B., Munsch M., Sailhac P., Schott J-J., and 2001-2002 EPGS students: Geophysical investigation of a recent shallow fault, **The Leading Edge**; July 2002; v. 21; no. 7; p. 648-650;
4. Ferry M., Meghraoui M., **Girard, J-F.**, Rockwell T. K., Kozaci O., Akyuz S., Barka A., 2004, Ground-penetrating radar investigations along the North Anatolian fault near Izmit, Turkey: Constraints on the right-lateral movement and slip history, **Geology**; January 2004; v. 32; no. 1; p. 85-88.
5. **Girard, J-F.**, Legchenko A., and Boucher M., 2005, Stability of MRS signal and estimating data quality, **Near Surface Geophysics**, 2005, 3, 187-194.
6. Boucher M., **Girard, J-F.**, Legchenko A., Baltassat J-M., Dorfliger N., Chalikakis K., 2006, Using 2D inversion of magnetic resonance soundings to locate a water-filled karst conduit, **Journal of Hydrology**, 330, 413-421.
7. Legchenko A., Desclotres M., Bost A., Ruiz L., Reddy M., **Girard, J-F.**, Sekhar M., Kumar M., and Braun J-J., 2006, Resolution of MRS Applied to the Characterization of Hard-Rock Aquifers, **Ground Water**, July-August 2006, Vol. 44, No. 4 (pages 547-554).
8. **Girard, J-F.**, Boucher M., Legchenko A, Baltassat J-M., 2007a, 2D magnetic resonance tomography applied to karstic conduit imaging, **Journal of Applied Geophysics** 63, 103-116.
9. **Girard, J-F.**, Baltassat J-M., Boucher M., Legchenko A., Vouillamoz J-M., Gutierrez A., Noyer M-L., Lachassagne P., 2007b, Aquifers imagery and hydrodynamic parameters estimation using proton Magnetic Resonance Soundings. *Aquifers systems management: Darcy's legacy in a world of impending water shortage: selected papers from the International Association of Hydrogeologists (IAH) Dijon Symposium, 30th May-1 June 2006, Dijon, France*, Taylor & Francis / Balkema, part I, chap. 6, p71-85.
10. Vouillamoz J-M., Baltassat J-M., **Girard, J-F.**, Plata J. and Legchenko A., Hydrogeological experience in the use of MRS. Experiencia en la utilizacion de los SRM in Hidrogeologia, **Boletín Geológico y Minero**, vol. 118, num. 3, Julio-Septiembre 2007, pp.531-550.

11. Sepulchre P., Schuster M., Ramstein G., Krinner G., **Girard J-F.**, Vignaud P., Brunet M., 2008, Evolution of Lake Chad Basin hydrology during the mid-Holocene: A preliminary approach from lake to climate modelling, **Global Planetary Changes**, 61, p 41 – 48.

12. Legchenko A., Ezersky M., Camerlynck C., Al-Zoubi A., Chalikakis K. and **Girard J-F.**, Locating water-filled karst caverns and estimating their volume using magnetic resonance soundings, **Geophysics**, vol. 73, n°. 5, sept-oct 2008; pp. G51–G61.

13. **J-F. Girard**, A. Legchenko, M. Boucher, J-M. Baltassat, Numerical study of the variations of magnetic resonance signals caused by surface slope, **Journal of Applied Geophysics** 66 (2008) 94–103.

14. A. Legchenko, M. Ezersky, **J-F. Girard**, J-M. Baltassat, M. Boucher, C. Camerlynck, A. Al-Zoubi, Interpretation of magnetic resonance soundings in rocks with high electrical conductivity, **Journal of Applied Geophysics** 66 (2008) 118–127.

15. Guérin R., Baltassat J.M., Boucher M., Chalikakis K., Galibert P.Y., **Girard J.F.**, Plagnes V., Valois R., 2009. Geophysical characterisation of karstic networks - Application to the Ouyse system (Poumeysen, France). **Comptes Rendus Geoscience**.

16. P. Sailhac, M. Bano, M. Behaegel, **J-F. Girard**, E Falgàs, J. Ledo, G. Marquis, J. Ortega-Ramírez, Characterizing vadose zone and perched aquifer near Vosgian ridges in La Soutte experimental site, Obernai, France, **Comptes-rendus de l'académie des sciences, Hydrogeophysics Special Issue**, 2009.

17. M. Bano, Loeffler O., **Girard J-F.**, GPR response and FDTD modeling to fuel infiltration in a sand box experiment, **Comptes-rendus de l'académie des sciences, Hydrogeophysics Special Issue**, 2009.

18. Bourgeois B., **Girard J-F.**, First modelling results of the EM response of a CO₂ storage in the Paris Basin, **Oil & Gas Science & Technology**, 2010 (in press).

Articles soumis ou en préparation

19. Clement R., Legchenko A., Quetu M., Descloitres M. Oxarango L., Guyard L, **Girard J-F.**, Experimental study of a domestic waste material using magnetic resonance measurements, **Near Surface Geophysics**, 2010 (soumis).

20. **Girard, J-F.**, Baltassat J.M., Gutierrez A., Mouvet C., Legchenko A., Mathieu F., Miehé J-M., Baran N., Morvan X., Contribution of the joint use of MRS and ERT to hydrogeological modelling: case study of the Montreuil-sur-Epte basin (France), **Journal of Hydrology** (expected submission in spring 2010).

XX. Compte-rendu du monitoring par méthode CSEM – LEMAM du site pilote d'injection de CO₂ de Ketzin (Allemagne)

Communications à congrès (51)

1. **Girard. J-F.**, Rohmer J., Bourgeois B., Coppo N., Naudet V., Schmidt-Hattenberger C., Time-lapse EM monitoring of CO₂ injection at Ketzin (Germany) using the LEMAM array, in **10th International Conference on Greenhouse Gas Technologies** - Amsterdam - Holland - 19-23/09/2010.

2. B. Bourgeois, J. Rohmer, **J.F. Girard**, The time-lapse EM response of a deep CO₂ plume using metallic casings for the current injection (LEMAM array), **EAGE** - Barcelone, 14-17/06/2010,

3. **Girard J-F.**, Roulle A., Grandjean G., Bitri A., Lalande J-M., Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint stochastic approach, 4th International Workshop on the Magnetic Resonance Soundings - **MRS2009**, Grenoble, oral

4. **Girard J-F.**, Legchenko A., Baltassat J-M., Maury E., Mic L-M., Clement R., 2D and 3D Magnetic Resonance Tomography : synthetic cases and field applications, 4th International Workshop on the Magnetic Resonance Soundings - **MRS2009**, Grenoble, oral

5. Bourgeois B., Rohmer J., **Girard J-F.**, Numerical Modelling of the Time-Lapse EM Response of a CO₂ Injection in a Deep Saline Aquifer Using Metallic Casings for the Current Injection, **AAPG/SEG/SPE HEDBERG CONFERENCE**, "GEOLOGICAL CARBON SEQUESTRATION: PREDICTION AND VERIFICATION", AUGUST 16-19, 2009 – VANCOUVER, BC, CANADA, poster.
6. **Girard J-F.**, REMAPRO project - 3D mapping of hydraulic permeability using PROtonic MAgnetic REsonance and joint inversion of geophysical methods at a site scale for a better estimation of pollution risks, R&D session Sites et Sols Pollués - **Intersol 2009** (24-27 mars 2009) Paris, oral.
7. **Girard J-F.**, Legchenko A., Baltassat J-M., Maury E., Mic L-M., Clement R., 2D and 3D Magnetic Resonance Tomography : synthetic cases and field applications, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-7175, 2009, **EGU General Assembly 2009**, poster.
8. **Girard J-F.**, Roule A., Grandjean G., Bitri A., Lalande J-M., Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint stochastic approach, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-7223, 2009, **EGU General Assembly 2009**, oral.
9. **Girard J-F.**, Bourgeois B., Rohmer J., Schmidt-Hattenberger C., The LEMAM array for CO₂ injection monitoring: modelling results and baseline at Ketzin in August 2008, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-7478-4, 2009, **EGU General Assembly 2009**, poster.
10. Arts R.J., Baradello L., **Girard J-F.**, Kirby G., Lombardi S., Williamson P. and Zaja A., Results of geophysical monitoring over a "leaking" natural analogue site in Italy, in **9th International Conference on Greenhouse Gas Technologies** - Washington - USA - 16-20/11/2008.
11. Lalande J-M, **Girard J-F.**, Grandjean G, Roule A, Bitri A, Inversion multi-paramètres géophysiques par approche jointe, **Journées AGAP, Géophysique appliquée à la sub-surface : risques, environnement (pollutions et déchets) et nouvelles technologies**. 21 et 22 octobre 2008, Aix-en-Provence.
12. Subash Chandra, Krishnamurthy N.S., Dewashish Kumar, Baltassat J-M., **Girard J-F.**, Dewandel. B., Rao V.A., and Shakeel Ahmed, 2008, Joining Hydrogeological and Geophysical Data in an Integrated Assessment of the Groundwater Potential in Granitic Aquifer, **33rd International Geological Congress**, Oslo-2008, Norway.
13. **Girard J-F.**, Boucher M., Baltassat J-M., Caractérisation géologique, géophysique et hydrogéologique du site argilo-sableux de Marcilly-en-Villette : résultats et discussions. **Atelier de clôture du projet FNS Waterscan Prospection et Modélisation Hydrogéophysique 4D : Bilan et Perspectives**, 10-12 October 2007, Autrans, France.
14. **Girard J-F.**, Baltassat J-M., Boucher M., Characterization of karstic aquifer and localization of conduits using geophysics, **1st Mediterranean-HyMEX Workshop**, January 9-11, 2007, Toulouse, France (poster).
15. Bourgeois, B., **Girard, J.F.**, Premières modélisations de la réponse EM d'un stockage de CO₂ dans le Bassin Parisien, **Séminaire Captage et stockage du CO₂ Pau**, 12-13 décembre 2007.
16. **Girard J-F.**, Legchenko, A., Boucher M., Baltassat, J-M, Topographic effects on MRS results, in **3rd International Workshop on the Magnetic Resonance Sounding method: a reality in applied hydrogeophysics**, October 25-27, 2006, Madrid, Spain.
17. **Girard, J-F.**, Baltassat J.M., Gutierrez A., Mouvet C., Legchenko A., Mathieu F., Miehé J-M., Baran N., Morvan X., Contribution of the joint use of MRS and ERT to hydrogeological modelling: case study of the Montreuil-sur-Epte basin (France), in **3rd International Workshop on the Magnetic Resonance Sounding method: a reality in applied hydrogeophysics**, October 25-27, 2006, Madrid, Spain.
18. Boucher, M., Baltassat, J-M., Legchenko, A., **Girard, J-F.**, Amraoui, N., MRS applied to estimation of the negative pressure of water in chalk above the static water level, in **3rd International Workshop on the Magnetic Resonance Sounding method: a reality in applied hydrogeophysics**, October 25-27, 2006, Madrid, Spain.
19. Baltassat J.M., Krishnamurthy N.S., **Girard J.F.**, Dutta S., Dewandel B., Chandra S., Descloitres M., Legchenko A., Robain H., Ahmed S., Geophysical characterization of weathered granite aquifers in the Hyderabad region, Andhra Pradesh, India, in **3rd International Workshop on the Magnetic Resonance Sounding method: a reality in applied hydrogeophysics**, October 25-27, 2006, Madrid, Spain.

20. Legchenko, A., Ezersky, M., **Girard, J-F.**, and Baltassat, J-M. Interpretation of MRS measurements in rocks with high electrical conductivity, in **3rd International Workshop on the Magnetic Resonance Sounding method: a reality in applied hydrogeophysics**, October 25-27, 2006, Madrid, Spain.
21. **Girard J-F.**, Baltassat J-M., Boucher M., Legchenko A., Vouillamoz J-M, Aquifers imagery and permeability estimation using proton Magnetic Resonance Soundings. **International Symposium Darcy 2006 – Aquifers Systems Management**, in *Darcy / IAH Day*, 30th May 2006, Dijon, France.
22. **Girard J-F.**, Baltassat J-M., Boucher M., Legchenko A., Bernard J., Vouillamoz J-M., Le sondage par résonance magnétique protonique : une méthode non invasive pour caractériser les aquifères, actes du **3ème colloque maghrébin de géophysique appliquée**, Oujda du 11 au 13 mai 2006, Maroc.
23. **Girard J-F.**, Baltassat J-M., Boucher M., Imagerie et caractérisation des aquifères à l'aide de sondages par Résonance Magnétique Protonique : Une méthode directe de détection de l'eau souterraine, **Colloque Eau et Territoire**, 9-10 Janvier 2006, Lyon, France (poster).
24. SAILHAC P., ACKERER P., BALTASSAT J-M., BOUCHER M., FRANGI J-P., GIBERT D., **GIRARD J-F.**, GUÉRIN R., LEGCHENKO A., PESSÉL M., ROUSSET D., ZAMORA M. Prospection et modélisation hydrogéophysique 4D (projet WaterScan) **Actes du Colloque de Restitution Scientifique ECCO**, Toulouse, Décembre 2005, (**exposé oral présenté par JFG**).
25. Guérin R., Baltassat J-M., Legchenko A., **Girard J-F.**, Chalikakis K., Boucher M., Doerfliger N., Plagnes V., Description géophysique de KARST par la méthode de résonance magnétique des protons (RMP) (projet HYKAR) **Actes du Colloque de Restitution Scientifique ECCO**, Toulouse, Décembre 2005, (poster).
26. Legchenko, A., **Girard, J-F.**, Descloitres, M., Reconstitution de la distribution de l'eau dans le proche sous-sol au travers des mesures RMP (projet METREAU). **Actes du Colloque de Restitution Scientifique ECCO**, Toulouse, Décembre 2005, (poster).
27. Gourry J-C., Saada A., DICTOR M-C., Jouliau C., Crouzet C., **Girard J-F.** Influence of hydrocarbon biodegradation on geophysical parameters, in **Conference on Contaminated Soil, ConSoil 2005 - 9th International FZK/TNO - Bordeaux - France - 3-7 October 2005**.
28. Boucher, M., **Girard, J-F.**, Legchenko, A., Baltassat, J-M, Comparaison de mesures RMN sur échantillons et de Sondages par Résonance Magnétique sur le site test de St Cyr en Val (Loiret). **Actes du 5^{ème} colloque GEOFCAN**, 20-21 septembre 2005, Orléans, France, pp. 27-30.
29. **Girard, J-F.**, Boucher, M., Legchenko, A., Baltassat, J-M, Modélisation de Sondages par Résonance Magnétique au-dessus d'une structure 3D et application à la détection d'une cavité karstique. **Actes du 5^{ème} colloque GEOFCAN**, 20-21 septembre 2005, Orléans, France, pp. 31-34.
30. Legchenko, A., Descloitres, M., Bost, A., Ruiz, L., Reddy, M., **Girard, J-F.**, Sekhar, M., Kumar, M.S., and Braun, J-J, Etude de la capacité des sondages RMP à localiser les aquifères de socle, **Actes du 5^{ème} colloque GEOFCAN**, 20-21 septembre 2005, Orléans, France, pp. 103-106.
31. **Girard, J-F.**, Boucher, M., Legchenko, A., Baltassat, J-M., Numerical Modeling of Magnetic Resonance Signal from water-filled Cavities. **Extended abstracts of the 11th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics**, Palermo, Italy, 5 -8 September 2005, paper B037, CD ROM edition.
32. Boucher, M., Chalikakis, K., Baltassat, J-M., Legchenko, A., **Girard, J-F.**, Localization of a karst conduit using Magnetic Resonance Soundings, a case study. **Extended abstracts of the 11th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics**, Palermo, Italy, 5 -8 September 2005, paper A027, CD ROM edition.
33. Legchenko, A., Descloitres, A., Ruiz, L., Reddy, M., **Girard, J-F.**, Sekhar, M., Characterization of fractured rock aquifers by surface geophysical methods, **Extended abstracts of the 11th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics**, Palermo, Italy, 5 -8 September 2005, paper A034, CD ROM edition.
34. Boucher M., and **Girard J-F.**, Numerical study of the potential of magnetic resonance soundings applied to localization of karst aquifers. **Actes de la 16ème Réunion des Sciences de la Terre**, Strasbourg, France, Sept 2004.

35. Béhaegel M., Gourry J-C., **Girard J-F.**, geophysical measurements on an ancient coking plant contaminated by tar, **European Geosciences Union EGU 2004** – Nice - France, Geophysical Research Abstracts, Vol. 6, 01783, 2004.
36. **Girard J-F.**, Baltassat J-M., Legchenko A., Vouillamoz J-M., Sabatier S., Chigot D., Schmidt J.C. Le sondage par résonance magnétique protonique : une méthode non invasive pour caractériser les aquifères, in **Géologie et hydrogéologie du Bassin de paris - Avancées et perspectives, AIH - Paris - France - 16-17/11/2004.**
37. **Girard J-F.**, Gourry J-C., Miehé J-M., Investigation des sites pollués par les méthodes géophysiques, in **Journées AGAP - Qualité - Lyon - France - 27-28/10/2004**
38. **Girard J-F.**, Boucher M., Baltassat J-M., Legchenko A., Chalikakis K., Application de la RMP à la localisation des réseaux karstiques, in **Journées AGAP - Qualité - Lyon - France - 27-28/10/2004.**
39. **Girard J-F.**, Legchenko A., and Boucher M., Stability of MRS measurements and estimating data quality, **2nd International Workshop on the Magnetic Resonance Sounding method applied to non-invasive groundwater investigations**, November 19-21, 2003, Orléans, France (ISBN 2-7159-0936-5), pp. 33-36.
40. Ferry, M. and **Girard, J-F.**, et al., Ground-Penetrating Radar Across the 1999 Gölcük-Düzce Surface Ruptures of the North Anatolian Fault. **1st International Symposium of Istanbul Technical University, the faculty of Mines, Istanbul, Turkey, (poster).**
41. Ferry M., Meghraoui M., Rockwell T. K., Kozaci Ö., Akyuz S., **Girard J-F.** and Barka A., GPR investigations along the North Anatolian fault near Izmit, Turkey: constraints on the right-lateral movement and slip history, **European Geophysical Society 2003**, Vol. 5, 06849, 2003
42. Loeffler, O., **Girard, J-F.**, et Bano, M., et Petitjean, E., Application du radar géophysique à la détection de cavités. Modélisation par différences finies. **Journées AGAP Qualité, Association pour la Qualité en Géophysique Appliquée, actes du colloque, 7-8 Novembre 2002, Nantes, France, (poster)**
43. **Girard, J-F.**, Bano, M., Inversion des paramètres physiques (diélectriques) du sol à partir des signaux radar. **Journées AGAP Qualité, Association pour la Qualité en Géophysique Appliquée, actes du colloque, 7-8 Novembre 2002, Nantes, France.**
44. Bano, M. and **Girard, J-F.**, Modeling of GPR reflections and water content estimation of moist soils. **63th Conference, European Association of Geoscientists & Engineers, EAGE Extended Abstracts, 2001, Amsterdam, Holland, paper P144, (poster).**
45. **Girard, J-F.** and Bano, M., FDTD Modeling of the radar wave using a power law for the electric susceptibility. **7th Meeting, Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, EEGS Proceedings, 2-6 September 2001 Birmingham, England, GPR02**
46. **Girard, J-F.** and Bano, M., Modélisation de l'atténuation des ondes radar par une loi puissance de la susceptibilité électrique. **3^{ème} Colloque, Géophysique des sols et des formations superficielles, GEOFCAN actes du colloque, 25-26 Septembre 2001 Orléans, France, p. 83-86.**
47. **Girard, J-F.** and Bano, M., Discussion of Radar Reflections in the case of Dry Aeolian Sand Dunes. **25th European Geophysical Society Assembly, EGS, 25-29 Avril 2000 Nice, France, SE32, (poster).**
48. Bano, M. and **Girard, J-F.**, *GPR Study of Reflections and Water Content in Aeolian sand Dunes. AGU 2000 American Geophysical Union, San Francisco, USA, GP61B-01, (poster).*
49. **Girard, J-F.** and Bano, M., Finite Difference Time Domain and Fourier Domain Modeling of GPR Data. **AGU 2000 American Geophysical Union, 15-19 décembre 2000, San Francisco, USA, GP61B-03, (poster).**
50. Bano, M. and **Girard, J-F.**, Modeling of radar reflections in the case of dry aeolian sand dunes. **6th Meeting, Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, EEGS Proceedings, Bochum, Germany, P-GR03, (poster). 3-6 septembre 2000.**
51. Bano, M., Marquis G., Gibert D., **Girard J-F.**, Imagerie géoradar et modélisation des diffractions multiples, **Colloque Bilan et Perspective du GdR FORPRO, La Grande Motte, 20-21 septembre 1999.**

Rapports BRGM

1. Coppo N., **Girard J.F.**, Richalet G., Prospection géoélectrique du Puy de la Nugère, Volvic, France, **BRGM/RCXXX-FR**, 2009.
2. **Girard J.F.**, Test of aquifer characterization by Magnetic Resonance Soundings and Electrical Resistivity Tomography at Jelesnia site, Poland, **BRGM/RP56744-FR**, 2008.
3. Sanjuan B., Baltassat J.M., Bezelgues S., Brach M., Debeglia N., Dupont F., Francois B., **Girard J.F.**, Mathieu F., Miehé J.M., Pajot G., Traineau H., Estimation du potentiel géothermique de Mayotte : Phase 2 - Etape 2. Investigations géologiques, géochimiques et géophysiques complémentaires et synthèse des résultats. rapport BRGM/RP-56802-FR - 2008,
4. **Girard J.F.**, Beaubien S., Bitri A., Feasibility of Geophysical Methods as a Tool to Detect Migration Pathways of CO2 in the shallow Subsurface, Field surveys at Latera, October 2007., BRGM/RP-56299-FR - JRAP 17, 2008.
5. Baltassat J.M., **Girard J.F.**, Boucher M., Mathieu F., Dupont F., Legchenko A., Laurent J.P., Projet INTERREG III A, FLOOD1 : Rôle des eaux souterraines dans le déclenchement des crues - Faisabilité du suivi géophysique des caractéristiques hydriques de la zone non saturée sur le site expérimental de Warloy-Baillon, **BRGM/RP-55258-FR**, 2008.
6. Legchenko A., Baltassat J.M., Bernard J., Boucher M., **Girard J.F.**, Tabbagh A., Texier B., Vouillamoz J.M., Projet PROTON (2005-2007) : Amélioration de la précision et de la fiabilité d'estimation des paramètres hydrodynamiques des aquifères avec la méthode RMP, **BRGM/RP-56181-FR**, 2008.
7. **Girard J.F.**, Bitri A., Beaubien S., JRAP 17 : Feasibility of Geophysical Methods as a Tool to Detect Migration Pathways of CO2 in the shallow Subsurface, Field surveys at Latera, October 2007, **BRGM/RP-56299-FR**, 2008.
8. **Girard J.F.**, Aunay B., Coppo N., Miehé J.M., Méthodologie d'imagerie électrique haute résolution des aquifères côtiers en milieu volcanique à la Réunion, **BRGM/RP-56612-FR**, 2008.
9. **Girard J.F.**, Baltassat J.M. – INTERREG III A, FLOOD1, The role of groundwater in flooding event : Characterization by Magnetic Resonance Sounding of East-Isley and Beche Park Wood experimental sites, Pang Catchment, West Berkshire, England **BRGM Report RP-55257-FR**, 79 p., 20 fig., 5 tabl., 8 ann., 2007.
10. **Girard J-F.**, Mathieu F., Baltassat J-M., Caractérisation de la structure du bassin versant de Montreuil-sur-Epte par panneaux électriques, **BRGM/RP-52936-FR**, 2006.
11. **Girard J-F.**, Wuillemier A., Boucher M., Compte-rendu des travaux de forages sur le site de Marcilly-en-Villette, **BRGM/RP-55345-FR**, 2007.
12. Baltassat J.M., Krishnamurthy N.S., **Girard J.F.**, Dutta S., Dewandel B., Chandra S., Descloitres M., Legchenko A. Robain H., Geophysical characterisation of weathered granite aquifer within the Hyderabad region, Andra Pradesh, India, Final Report, **BRGM/RP-54538-FR**, March, 2006.
13. **Girard J-F.**, Gouez J-M., with the collaboration of Krishnamurthy N.S., Dutta S., Chandra S., Kumar D., Dewandel B., Gandolfi J-M., Vouillamoz J-M., Proton Magnetic Resonance technique in weathered-fractured aquifer : Complementary geophysical survey near Hyderabad (India), IFCPAR PROJECT N°2700-W1, Intermediary Report, **BRGM/RP 54068-FR**, December, 2005.
14. **Girard J-F.**, Boucher M., 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**, 2005, 46 pages, 29 fig., 2 tab., 1 ann.
15. **Girard J-F.**, Prospection par sondages de résonance magnétique protonique sur le site test de la Soutte Alsace (67). Rapport final. **BRGM/RP- 54406-FR**, 2005, 30 pages, 2 fig., 4 tab., 9 ann.
16. **Girard J-F.**, 3-D electrical imagery: modelling above arbitrarily shaped structures of complex resistivity. **Report of European project HYGEIA**, 2005, workpackage 6.8. contract EVK4-CT-2001-00046.
17. Boucher M., **Girard J-F.**, Legchenko A., Baltassat J-M., Eléments de méthodologie pour l'étalonnage de mesures de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) avec des données hydrodynamiques. Rapport final. **BRGM/RP-53666-FR**, 2005, 69 p., 34 fig., 4 tabl., 2 ann.

18. Baltassat J-M., **Girard J-F.**, Projet INTERREG III A, FLOOD1 : Rôle des eaux souterraines dans le déclenchement des crues. Contribution géophysique du choix d'un site expérimental dans le bassin de la Somme. Rapport **BRGM/RP-53544-FR, 2005.**

19. Bitri A., Fabriol H., **Girard J-F.**, Miehé J-M., Richalet G., Application des méthodes SASW et RMP sur le site de l'Acheneau : rapport **BRGM/RP-53347-FR, 2004.**

III. Résonance Magnétique Protonique (RMP - MRS)

Le BRGM est pionnier dans le domaine de la prospection par résonance magnétique protonique depuis 1994. Recruté au BRGM en Avril 2003, comme chercheur-ingénieur pour travailler sur les méthodes électromagnétiques, j'ai pris la suite des travaux de M. Legchenko (aujourd'hui directeur de recherche à l'IRD, LTHE – Grenoble). Au sein d'une convention de collaboration scientifique et technique entre le BRGM, l'IRD et IRIS Instruments (fabricant d'appareils géophysiques), mes travaux de recherche s'inscrivent dans le développement de la méthode MRS à plusieurs niveaux :

- développements théoriques (modélisation, traitement du signal) et pratiques (tests de prototypes)
- méthodologie (combinaison avec les méthodes de résistivité électriques, assimilation de données géophysiques dans les modèles géologiques et hydrogéologiques)
- ingénierie de l'environnement (application de la MRS à des études portant sur l'implantation de forages, la protection de la ressource)
- dissémination (participation à des workshops et congrès de géophysique et d'hydrogéologie, participation à la formation d'étudiants en géophysique).

Les enjeux majeurs d'une meilleure connaissance des propriétés hydrodynamiques et de la teneur en eau dans le sous-sol, et les limites des méthodes directes (les réseaux piézométriques et l'instrumentation en forages sont souvent limités par leur coût et les difficultés de réalisation, le nombre de forage étant de plus un facteur de risque de contamination des aquifères, et malgré l'apport d'une information directe celle-ci est une information ponctuelle) et des mesures indirectes (comme la mesure de la résistivité électrique...) génèrent une attente forte des méthodes directement liées à la présence d'eau comme la résonance magnétique.

La relation directe entre le signal mesuré et la présence d'eau en fait un outil très utile dans les zones peu urbanisées pour l'implantation de captages. Mais il est possible d'exploiter ces mesures non invasives de manière beaucoup plus sophistiquée. Ce qui est possible en laboratoire et aujourd'hui avec les diagraphies RMN (cf. sociétés de service pétrolières) sont une illustration bien connue des possibilités de cette méthode : estimation de la porosité, de la perméabilité...

Pour une introduction à la théorie RMP, je renvoie aux nombreux articles de présentation de la méthode, publiés depuis 1995 dans des revues scientifiques. Je conseille particulièrement la lecture de l'article de Legchenko et Valla (2002) qui bien que s'appuyant sur une version simplifiée de la théorie, présente dans le formalisme mathématique employé par les géophysiciens en électromagnétisme, les équations physiques qui régissent le signal de RMN (équations de Bloch) et leur résolution dans le cadre de la RMP. Je renvoie pour une description plus poussée à l'article de Weichman et al. (2000).

Les applications de la RMP comme outil géophysique pour caractériser les aquifères sont décrites dans Legchenko et al. (2002a, 2004), Vouillamoz (2003, et al. 2007) ou Girard et al. (2007).

Ces dernières années ont vu se développer l'utilisation de la RMP utilisant des boucles émettrices et réceptrices séparées, et l'inversion simultanée de plusieurs sondages, ce qui permet d'estimer la distribution des paramètres RMP dans un plan vertical (section 2D) ou en 3D. Le terme Magnetic Resonance Tomography (MRT) est aujourd'hui communément utilisé pour s'y référer. On pourra se référer à mes travaux sur l'imagerie en 2D d'un conduit karstique proche de Rocamadour (Boucher et al. 2006, Girard et al. 2007), ou à un article de synthèse de Hertrich (2008) sur la tomographie RMP et très récemment à Girard et al. (Proceeding du workshop MRS2009) mis en annexe.

III.1 Modélisation

Une partie des développements réalisés au cours de ces dernières années a été intégrée au logiciel Samovar (cf. Legchenko) largement distribué et utilisé par la communauté des géophysiciens utilisant la méthode RMP.

III.1.1 Champ géomagnétique et stabilité du signal RMP

Après qu'un pulse, dit "d'excitation", ait été généré par un courant électrique de forte intensité (jusqu'à plusieurs centaines d'Ampères) et oscillant à la fréquence dite de Larmor (fréquence proportionnelle à l'intensité du champ magnétique terrestre sur le lieu de mesure) circulant dans une boucle posée sur le sol pendant une durée de l'ordre de 40 ms, on mesure aux bornes de cette boucle, ou d'une boucle posée à proximité, le signal de résonance magnétique protonique.

Ce signal oscille à la fréquence (f) de Larmor, a une amplitude initiale (E_0) proportionnelle à la teneur en eau du volume investigué et est modulé par une exponentielle décroissante dont la constante de relaxation (T_2^*) est liée aux propriétés magnétiques du milieu et à la taille des pores.

$$E(t) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2^*}\right) \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \varphi)$$

On définit la phase du signal par rapport à la phase du pulse d'excitation. Dans le cas d'une boucle coïncidente (la même boucle sert à émettre le pulse et à enregistrer le signal RMP), la phase est liée à la conductivité électrique du sol (retard du champ EM lié aux courants induits) et au décalage entre la fréquence émise et la fréquence de Larmor. On cherchera toujours à minimiser cet écart de fréquence dans les limites de l'instrumentation de la stabilité du champ magnétique local. On notera que dans le cas de boucles d'émission et réception séparées, la phase est aussi contrôlée par la géométrie des boucles (position, taille, etc..).

Il s'agit là du premier aspect sur lequel ont porté mes travaux en 2003. La prise en compte dans la modélisation, du décalage entre la fréquence du signal émis et la fréquence de Larmor réelle. La variation diurne du champ magnétique terrestre et le choix des paramètres d'acquisition de l'opérateur engendrent des variations du signal qui ne doivent pas être interprétées comme une instabilité de la mesure mais doivent être pris en compte au travers des équations de base raffinées (Girard et al., 2005).

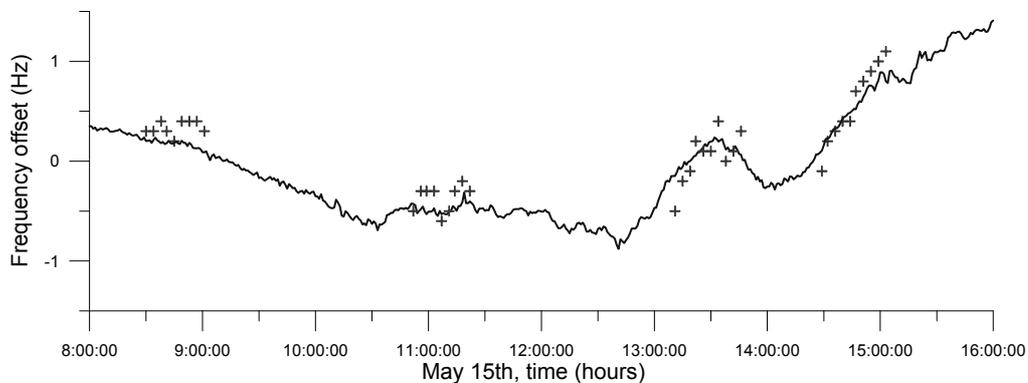


Figure 1 Variation temporelle de la fréquence de Larmor mesurée par RMP et calculée d'après un enregistrement géomagnétique à l'observatoire de Chambon-la-Forêt.

La ligne en trait plein est la fréquence de Larmor calculée à partir d'un enregistrement toutes les minutes du champ géomagnétique à l'observatoire de Chambon-la-forêt proche du site. On retrouve la corrélation attendue entre la variation de la fréquence de Larmor et l'intensité du champ magnétique (il s'agit du principe du magnétomètre à protons). On observe donc que la fréquence de Larmor varie de 1Hz dans une région où les variations diurnes du champ magnétique terrestre ne sont pas très marquées. Dans d'autres régions du globe, ces variations sont beaucoup plus marquées et entraînent des variations de plusieurs Hz au cours du sondage.

Nous avons donc étudié l'impact de ces variations sur le signal RMP tant numériquement que par des mesures sur le terrain. La Figure suivante montre l'impact de variations de -1.7 Hz à +0.7 Hz sur l'amplitude et la phase du signal RMP. On voit que l'impact sur l'amplitude est faible, mais particulièrement qu'il est particulièrement significatif pour les mesures de phase. Nous avons donc proposé plusieurs approches dont tenir compte de cet effet dans l'inversion des données (Girard et al.,

2005, Trushkin et al. 1993). On notera que l'impact de cette variation devient particulièrement pertinent dans le cas de mesures répétées (monitoring) et peut être un facteur de précision très limitant s'il est négligé.

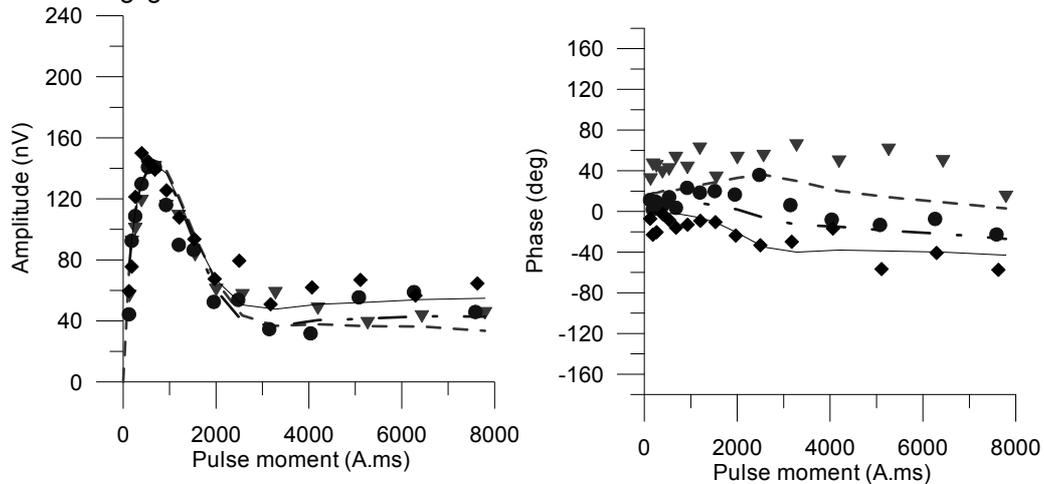


Figure 2 Amplitude et phase du signal RMP mesuré le même jour sur le site de St Cyr en Val (Loiret) et la réponse modélisée tenant compte des variations diurnes de fréquence (-1.7 Hz pour les triangles, -0.7 Hz pour les cercles, et +0.7 Hz pour les carrés).

Parmi les résultats de cette étude visant à séparer stabilité du signal et précision de mesure, nous avons également réalisé une étude de sensibilité sur les 4 paramètres inversés simultanément d'après une série temporelle du signal RMP. Un exemple ci-dessous illustre la précision attendue pour chaque paramètre.

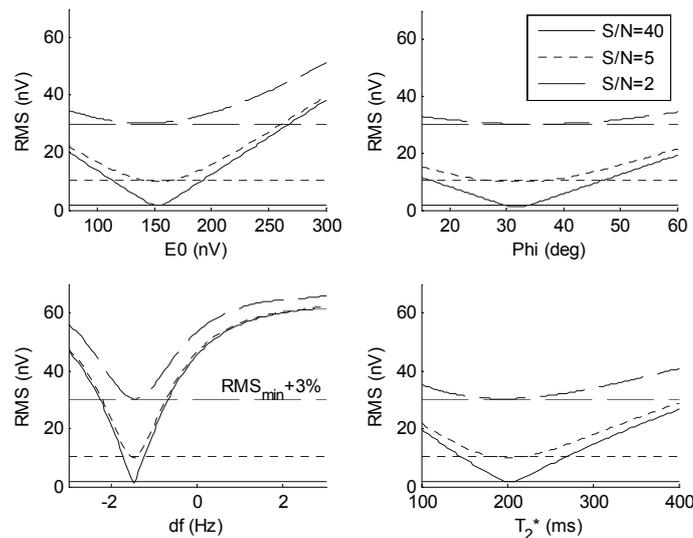


Figure 3 Incertitude sur l'estimation des 4 paramètres RMP sur des données synthétiques, pour un rapport signal / bruit de 40, 5 et 2.

On voit que la précision de l'estimation de la fréquence est de l'ordre du dixième de Hz, tandis que la constante de temps de relaxation est estimée avec une précision de l'ordre de quelques dizaines de ms. Cette incertitude est évidemment dépendante du rapport signal sur bruit et doit être prise en compte dans les algorithmes d'inversion.

III.1.2 Focalisation de la réponse RMP

Considérons la réponse d'un sondage RMP pour des conditions de mesures typiques en France, avec une boucle circulaire de 50m diamètre, pour une fréquence de Larmor de 2 kHz, une inclinaison géomagnétique de 60°, et la résistivité électrique du sol 100 Ω .m.

Le volume investigué par un sondage RMP est généralement décrit comme un cylindre dont le diamètre et la hauteur sont 1.5 fois la taille de la boucle posée en surface. Comme le montre la Figure 4, cette approximation est bonne dans le cas d'un aquifère superficiel.

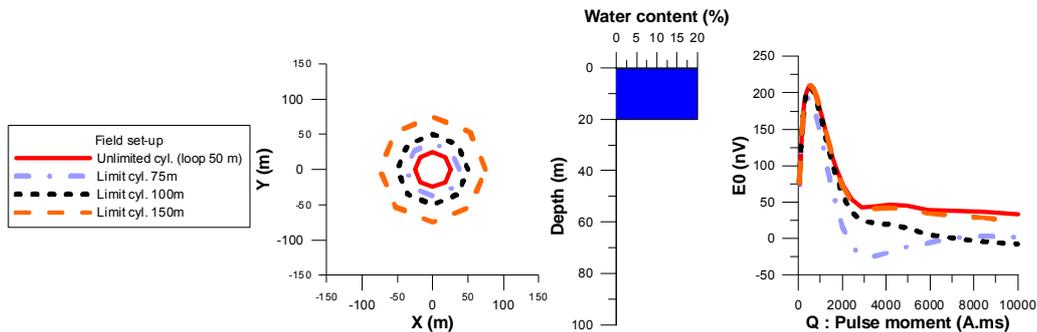


Figure 4 Contribution du sous-sol à la réponse d'un sondage RMP en fonction de la distance à l'axe du sondage, cas d'un aquifère superficiel.

En réalité, le diamètre investigué par le sondage est plus proche d'un cône qui s'élargit en profondeur. Comme le montre la Figure 5 (gauche), dans le cas d'une couche aquifère à une profondeur égale au diamètre de la boucle, la zone d'influence s'élargit jusqu'à un diamètre de 3 fois celui de la boucle. La réponse d'un demi-espace homogène (Figure 5 droite) est l'addition de ces réponses (signaux complexes).

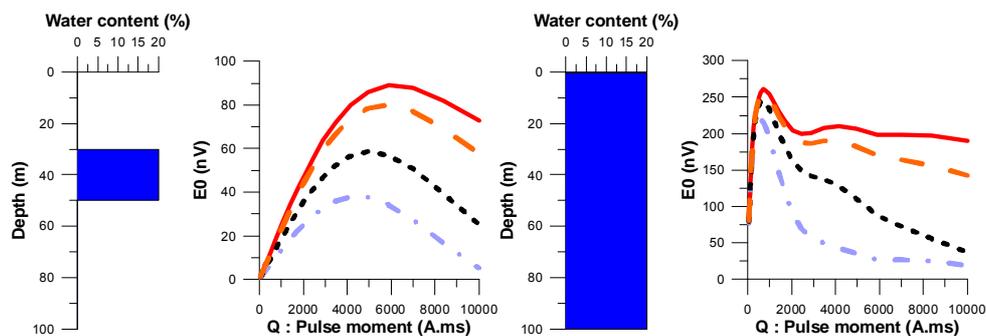


Figure 5 Contribution du sous-sol à la réponse d'un sondage RMP en fonction de la distance à l'axe du sondage dans le cas d'un aquifère en profondeur (à gauche) ou « infini » (à droite).

Lorsqu'on inverse en 1D une courbe de sondage RMP, l'hypothèse d'un milieu tabulaire varie donc en fonction de la profondeur. On verra plus loin que cet élargissement de la zone de sensibilité est un atout que l'on peut exploiter en inversant plusieurs sondages proches en 2D ou 3D.

Si l'on pousse plus avant cette analyse, on se retrouve à calculer la réponse unitaire (appelée kernel 1D ou filtre suivant les auteurs) d'une succession de couches pour une géométrie de boucle et des conditions de mesure donnée dont on va chercher à déterminer les paramètres RMP (teneur en eau et temps de relaxation). On peut se référer à l'analyse de sensibilité et l'algorithme d'inversion le plus utilisé par la communauté des utilisateurs de la RMP (Legchenko et Shushakov, 1998).

Le comportement intrinsèque de « sondage » du dispositif RMP est illustré par la Figure 6a puisque plus les pulses sont forts, plus l'eau profonde répond (voir la flèche en pointillé souligne la réponse dominante).

Mais cette simplicité apparente de la réponse RMP en fonction de la profondeur ne doit pas faire oublier que la réponse d'une couche supposée homogène est en fait l'intégrale d'une fonction complexe qui varie dans l'espace (Figure 6b). En effet, seule la composante du champ magnétique généré par le pulse d'excitation perpendiculaire au champ magnétique terrestre contribue à générer le signal RMP. Donc, hormis à l'équateur ou aux pôles magnétique, la focalisation est non seulement complexe mais dissymétrique. Dans cet exemple, on voit que l'extension latérale de la zone qui répond est environ 1.5 fois le diamètre de la boucle, et que la réponse est plus forte sous la partie Sud de la boucle.

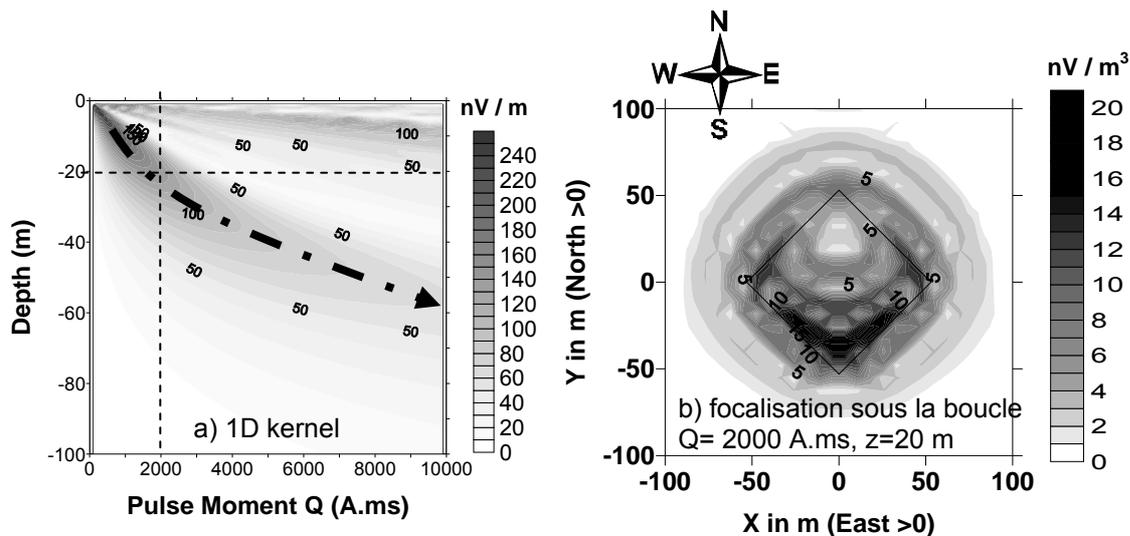


Figure 6 a) kernel 1D pour une boucle carrée de 75m (60° inclinaison geomagnétique). b) focalisation du signal RMP sous la boucle à 20 m de profondeur pour un pulse $Q = 2000$ A.ms.

Donc, la réponse RMP dépend bien sûr de l'intensité locale du champ géomagnétique (Legchenko et al. 1997) mais la focalisation de la réponse sous la boucle de mesure est aussi fonction de la position géographique (Girard et al 2007a).

III.1.3 Impact de la topographie

Un corollaire à l'étude précédente est l'impact de la topographie sur le résultat du sondage RMP. Nous nous sommes intéressés tout particulièrement à l'influence du pendage de la boucle (que l'on peut mesurer sur le terrain) par rapport aux couches tabulaires du sous-sol.

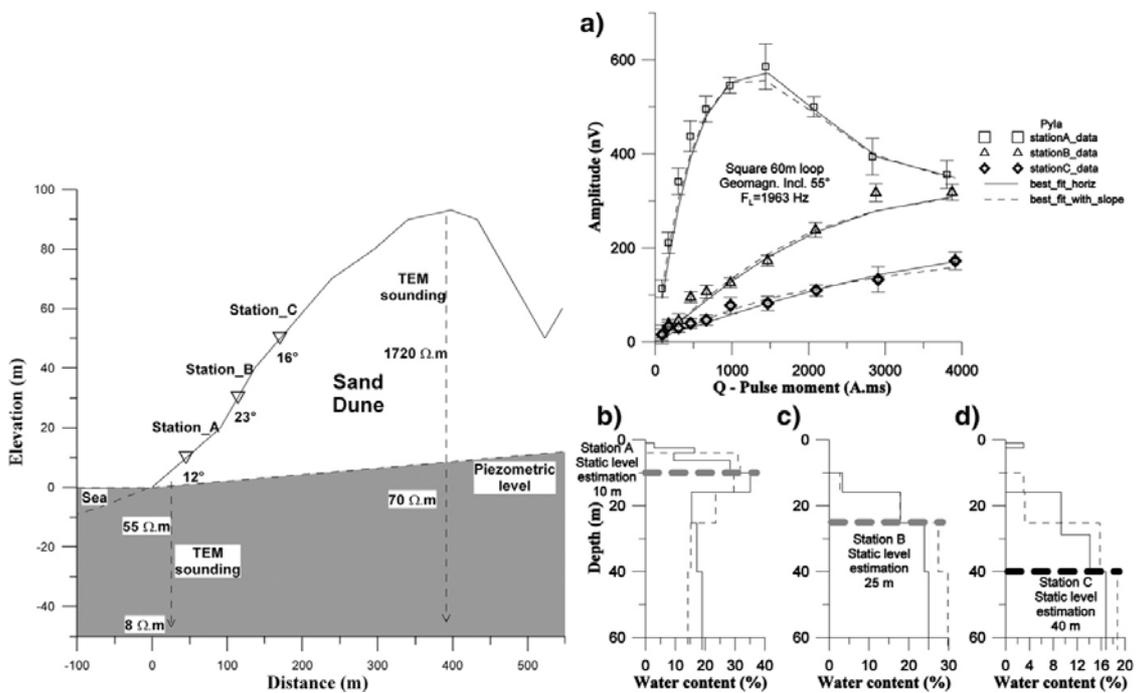


Figure 7 Etude d'impact de la topographie sur les données RMP, cas de la dune du Pyla

Le développement d'un logiciel permettant de prendre cet effet en compte a permis de valider une étude systématique (Girard et al., 2008) en l'illustrant sur le cas de la dune du Pyla. Trois sondages RMP ont été réalisés avec une boucle carrée de 60 m (Figure 7a). Ils ont été mesurés à des altitudes et des pentes différentes et inversés avec et sans prise en compte du pendage et de la direction du

plan de la boucle (Figure 7 b,c,d). Cet exemple montre que malgré des pentes avoisinant 20°, l'influence sur le résultat d'inversion est négligeable. Mais il faut bien noter que la situation est différente pour les mesures RMP avec des boucles émettrices et réceptrices séparées puisqu'il apparaît alors un terme supplémentaire dans les équations, qui se traduit par un déphasage du signal lié à la géométrie des boucles.

L'application pratique de cette étude est les mesures RMP avec des boucles coïncidentes montrent une grande robustesse des résultats d'inversion vis-à-vis de la topographie : seule l'altitude du centre de la boucle importe vraiment.

III.1.4 RMP en milieu électriquement très conducteur

Nous nous sommes intéressés à l'utilisation de mesure RMP dans des milieux conducteurs (de 0.5 $\Omega.m$ à 10 $\Omega.m$). Quand la conductivité électrique augmente, on observe une diminution du signal RMP et de forts déphasages (Braun et al. 2005). Dans les algorithmes utilisés pour calculer le signal RMP, il nous faut calculer le champ magnétique généré par une boucle posée en surface sur un milieu dont la résistivité électrique peut varier.

Cependant, les spins des protons des molécules d'eau ne sont pas sensibles à un champ magnétique oscillant, mais à un champ magnétique « tournant ». Seule la composante du champ d'excitation « tournant dans le même sens que la magnétisation des spins » produit un signal de résonance magnétique. Cela nous amène à séparer le champ magnétique généré par la boucle en une partie « co-rotating » et une composante « counter-rotating ». Si le champ est polarisé linéairement, alors ces composantes sont égales. Mais dans un milieu conducteur, le champ est polarisé elliptiquement et ces composantes ne sont pas égales (Weichman et al., 2000, Valla et Legchenko, 2002).

Pour tenir compte de cet effet, les mesures RMP sont toujours accompagnées de mesures de résistivités électriques via un sondage TDEM ou sondage électrique. La connaissance de la résistivité électrique est doublement utile tant pour modéliser le signal RMP que pour interpréter ensemble les résultats de RMP (teneur en eau, temps de relaxation) et la variation de résistivité électrique. Cette approche est particulièrement pertinente dans le cas de mesures en milieu côtier (Vouillamoz et al, 2007).

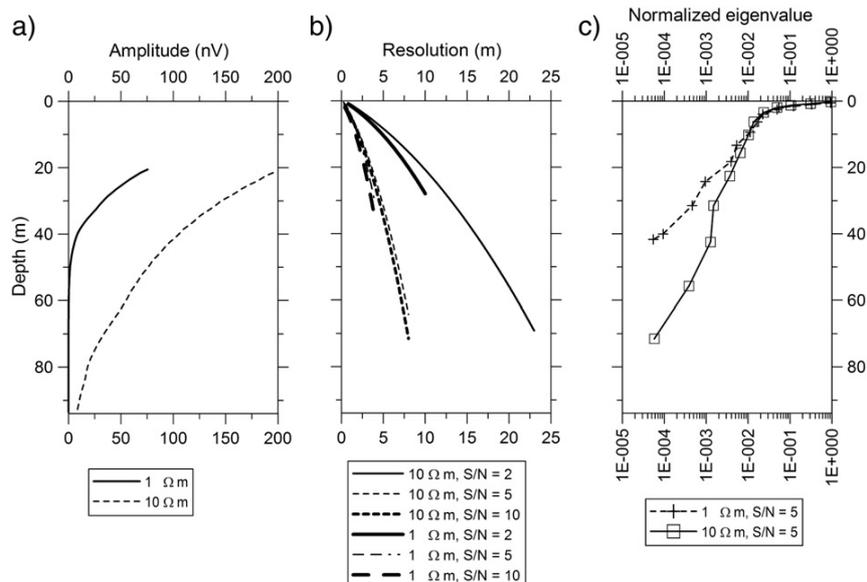


Figure 8 Cas d'un milieu à 1 $\Omega.m$ ou 10 $\Omega.m$, en fonction de la profondeur : réponse d'une couche mince à 100% d'eau (a), résolution verticale (b) et valeurs propres de la matrice de résolution associée (c)

Les mesures de résistivité électriques étant elles-mêmes sujettes à une incertitude, nous nous sommes donc intéressés également à l'impact de cette incertitude sur le résultat d'inversion des données RMP en milieu électriquement très conducteur (Legchenko, Ezersky, Girard et al., 2008).

Le graphe de la Figure 8a est un choix arbitraire qui nous permet de définir la profondeur d'investigation en fonction du niveau de bruit ambiant (la limite instrumentale est de l'ordre de 5 nV). On voit que pour une valeur seuil de 25 nV, on passe de 80 m (à 10 $\Omega.m$) à 30 m d'investigation dans un milieu à 1 $\Omega.m$.

La résolution verticale (Figure 8b) est définie par la demi-épaisseur des couches. Cette épaisseur, qui augmente avec la profondeur avec la diminution du gradient du champ magnétique généré par la boucle, est régie par une loi polynomiale d'ordre 2 et doit respecter un critère d'amplification d'erreur qui tient compte du rapport signal sur bruit. On voit que la résolution est de l'ordre de +/- 2 m à 10 m de profondeur, +/- 3 m à 20 m et +/- 4 à 30 m dans un milieu à 1 $\Omega.m$.

On notera qu'une amélioration du rapport signal sur bruit de 5 à 10 (en pratique, par une diminution du bruit) améliore à peine la résolution, et qu'on atteint donc pour un rapport S/N de 5 la limite de résolution intrinsèque au dispositif.

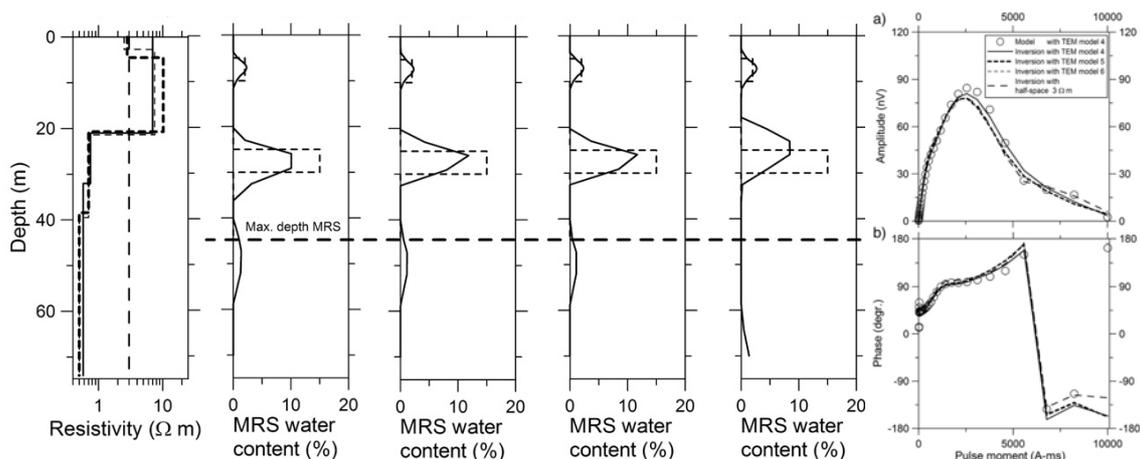


Figure 9 Pour 4 distributions de résistivité électrique tirées des données TDEM, résultat d'inversion et meilleurs ajustements en module (a) et phase (b) du signal RMP complexe

Comme l'illustre la Figure 9, si l'information de résistivité électrique est primordiale pour interpréter le signal RMP complexe (module et phase), l'incertitude liée sur la distribution des interfaces n'affecte pas la performance du sondage RMP.

Les outils numériques développés dans cette étude et leurs conclusions ont ensuite été utilisées dans le cadre d'une campagne de prospection des sinkholes sur le bord de la Mer Morte (Jordanie).

III.2 Inversion

III.2.1 Imagerie par RMP d'un conduit karstique

J'ai rapidement été intéressé par la modélisation de la réponse RMP d'une structure 2D ou 3D. Les activités de recherche au brgm, en géophysique appliquée à l'imagerie des cavités m'ont amené à m'intéresser tout d'abord au cas des conduits karstiques. Les enjeux de la détection et le positionnement des conduits karstiques pour l'approvisionnement en eau sont importants et ont motivé de nombreuses recherches au fil des décennies malgré l'évidente complexité du problème. Il s'agit d'une cible anisotrope, présentant souvent peu de contraste en termes de paramètre géophysique par rapport à l'encaissant. De plus, en raison de l'histoire géologique, les conduits karstiques sur le pourtour méditerranéen sont souvent profonds (plusieurs centaines de mètres) et remontent vers la surface (avec des exutoires parfois en mer) suivant des pentes raides.

Nous avons réalisé une étude de sensibilité des paramètres qui permettent de définir une cavité remplie d'eau (section, profondeur, orientation) et mis au point un algorithme d'inversion spécifique à la situation d'un conduit rectiligne et sub-horizontale.

Plusieurs présentations en congrès et deux publications rassemblent les résultats de ces travaux : (Boucher, Girard et al., 2006, J. of Hydrology, Girard, Boucher et al., 2007, J. of Applied Geophysics).

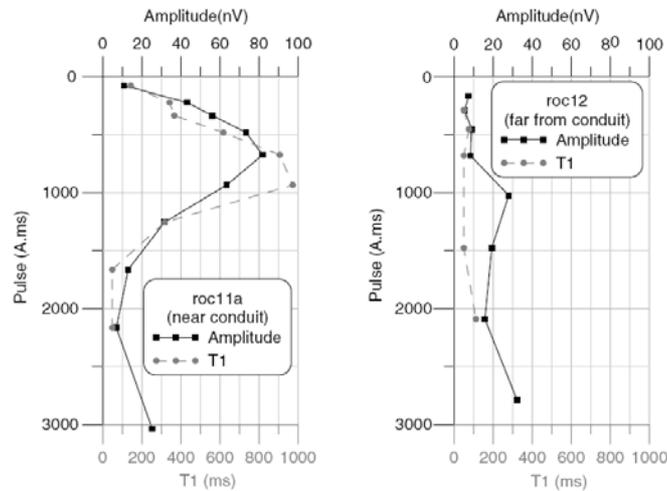


Figure 10 Signature RMP caractéristique d'une cavité remplie d'eau (gauche) par rapport à l'encaissant calcaire (droite).

Comme souligné par une étude préalable de Vouillamoz et al. (2003) l'eau libre qui circule à l'intérieur d'un conduit karstique présente généralement un contraste d'amplitude RMP lié à l'augmentation de la teneur en eau, mais surtout elle crée un contraste très important de temps de relaxation (de 150 – 200 ms jusqu'à 600-800 ms) parfaitement univoque.

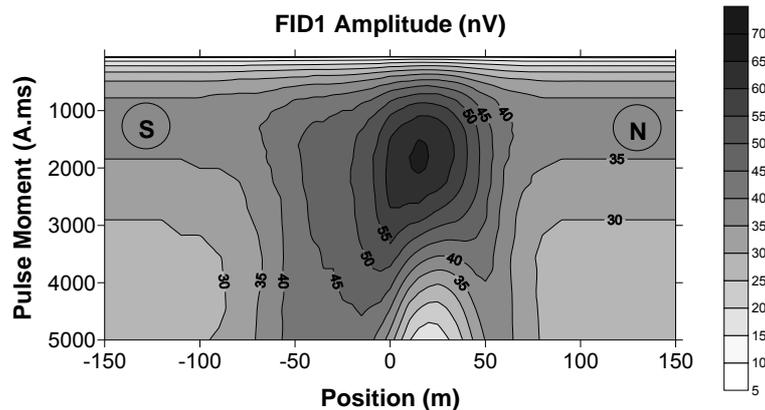


Figure 11 Profil du Sud vers le Nord de sondages RMP (carrés 75 m) au dessus d'un conduit de 2.5 x 10 m à 27.5 m de profondeur.

Comme le montre la Figure 11, la présence du conduit crée une anomalie dans les mesures. Dans cet exemple, le conduit est unique et rempli d'eau, et perpendiculaire au profil RMP. On suppose une teneur en eau de 1 % dans la matrice calcaire environnante. La dissymétrie observée est liée à l'inclinaison de 60° du champ géomagnétique sur cet exemple dans l'hémisphère Nord. On observe une amplitude maximale > 65 nV.

Notre étude de sensibilité a permis de démontrer que les mesures RMP au-dessus d'un conduit sont particulièrement sensibles à la section et la position du conduit mais pas à sa forme. Plutôt que de considérer un conduit perpendiculaire au profil de mesures RMP (cas 2D), nous avons considéré le cas d'un conduit rectiligne mais dont l'orientation par rapport au profil peut être quelconque mais supposée connue a priori. Cette hypothèse qui peut sembler forte est en fait bien souvent réalisée sur le terrain où les connaissances hydrogéologiques nous permettent de connaître cette orientation.

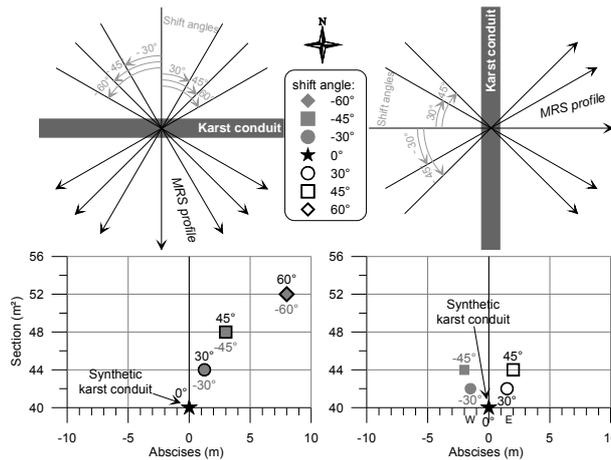


Figure 12 Erreur introduite par une mauvaise orientation a priori du conduit : erreur de 0 à 45° pour un conduit S-N et de 0 à 60° pour un conduit W-E.

Nous avons testé l'influence d'une erreur sur cette orientation a priori sur le résultat d'inversion et montré qu'une erreur jusqu'à 45° se traduit par une erreur de l'ordre de 4m sur le positionnement du croisement entre le profil et le conduit, et de surévaluer de 8 m² (sur 44 m²) la section du conduit (voir la Figure 12).

III.2.2 Tomographie 2D et 3D par RMP

Le signal de résonance magnétique présente la particularité que la réponse de chaque molécule d'eau s'additionne à celles de ses voisines. Nous sommes dans le cadre d'une théorie linéaire du point de vue de la teneur en eau. Cela donne accès aux nombreux outils mathématiques pour résoudre un problème inverse sous-déterminé.

J'ai développé en 2008-2009 un programme sous Matlab (Mathworks) pour modéliser la réponse RMP d'une distribution en 2D et 3D de la teneur en eau et des temps de relaxation. Il s'agit en fait de construire le kernel complexe qui permet d'écrire le problème sous forme matricielle. J'ai pu ensuite appliquer la méthode de résolution par les moindres carrés suivant la théorie développée par Tarantola (Inverse problem theory, SIAM).

J'invite le lecteur à lire le document (6 pages) paragraphe VIII.1.1 *Girard J-F. et al., 2D and 3D Magnetic Resonance Tomography: synthetic cases and field applications, MRS2009.* qui présente le cadre théorique et deux cas d'application sur des données de terrain (présenté à l'occasion du Workshop MRS2009 à Grenoble).

La Figure 13 présente la variation de la teneur en eau sur une section de 900 m de long jusqu'à 60 m de profondeur. Ce résultat est obtenu par l'inversion simultanée et en 2D de 11 sondages RMP. Ces sondages utilisent des boucles carrées de 75 m de coté, et sont posées bord à bord.

Le brgm étudie ce bassin versant dans le cadre du projet européen Aquaterra. L'aquifère étudié est celui des sables du Cuisien dont le niveau piézométrique est vers 30 m de profondeur (cote altitude <100m) et s'étend à l'Ouest du profil. La base des sables du Cuisien devient plus argileuse et est posée sur les argiles du Sparnacien qui correspond au niveau conducteur visible à la base du profil électrique (Figure 13 bas). Ce site illustre la situation où la zone saturée ne présente pas de contraste électrique avec la zone non saturée.

A l'Est du profil, la craie affleure et présente une gamme de résistivité de 50 à 100 Ω.m. Un niveau résistant bien délimité vers 10-20 m de profondeur correspond vraisemblablement à un niveau de silix comme on peut en observer sur les falaises aux alentours.

Au milieu du profil passe une faille régionale, sans signature visible en surface, mais connue par des affleurements au Nord et au Sud de la zone. Cette faille apparaît clairement entre les abscisses 500 et 650 m tant sur le profil électrique (les faibles valeurs de résistivité conduisent à suspecter cette zone remplie d'argile) que sur le résultat de tomographie RMP (absence d'eau). Ces mesures géophysique

permettent de trancher clairement et de positionner une barrière « étanche » sur ce côté du bassin versant. Cet exemple illustre parfaitement la complémentarité de l'information apportée par la résistivité électrique et la RMP et l'intérêt de réaliser en parallèle ces deux méthodes. Il est à noter, que d'un point de vue pratique, il n'y a pas d'interférence entre les eux types de mesures et qu'il est possible de réaliser les mesures électriques durant l'acquisition des données RMP.

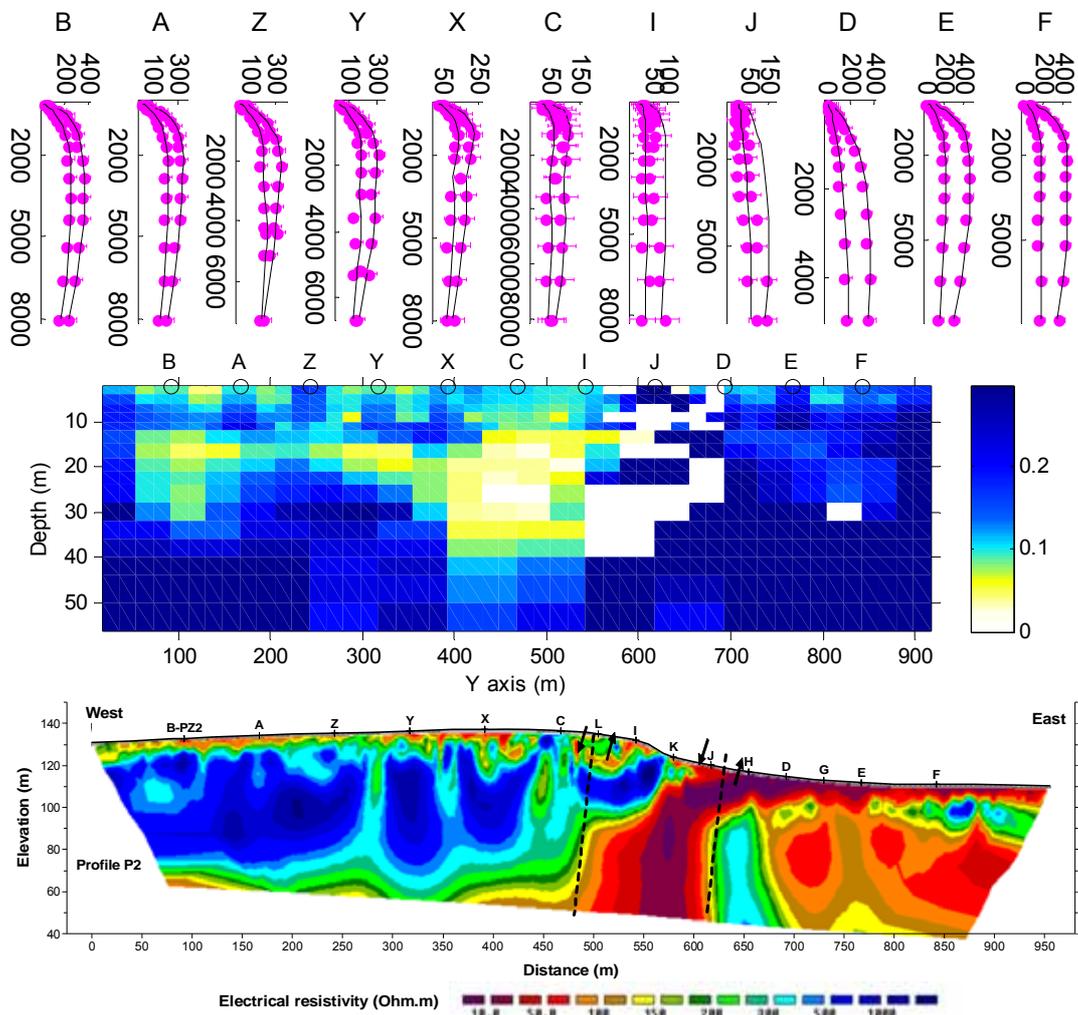


Figure 13 Profil de 11 sondages RMP (boucles de 75m) en haut, teneur en eau à partir de l'inversion 2D de ces données (au milieu) et résultat de tomographie 2D de résistivité électrique le long du même profil.

III.2.3 Inversion jointe stochastique

Comme illustré précédemment, il est souvent indispensable d'avoir accès à plusieurs paramètres physiques pour discriminer les différents milieux et répondre à la problématique posée. Je pratique les mesures de résistivité électrique (VES, TDEM) et côtoie des collègues qui estiment la vitesse des ondes S à partir de la dispersion des ondes de surface.

L'objectif est de combiner plusieurs paramètres pertinents, tout en utilisant une estimation de l'incertitude de chacun, pour fournir une réponse quantifiée à la question posée (par ex. séparer l'encaissant avec des vitesses sismiques élevées, résistivité électrique élevée et teneur en eau faible d'un niveau de marnes saturées en eau, ou encore molasses...). Il s'agit de faire dans un cadre mathématique bien établi une partie du travail de synthèse d'informations et d'interprétation réalisé habituellement qualitativement par le géophysicien après l'inversion des données. J'invite le lecteur à lire le document (6 pages) présenté à l'occasion du Workshop MRS2009 à Grenoble, paragraphe VIII.1.2 Girard J-F. et al., *Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint stochastic approach, MRS2009.*

Puisque le problème direct pour la RMP peut s'écrire sous forme matricielle, on a donc un problème direct dont le temps de calcul est très rapide. C'est également le cas pour plusieurs méthodes de sondage (TDEM, VES) et dans une certaine mesure pour la MASW (Multi-Component Analysis of Surface Waves) où le temps de calcul atteint varie de la seconde à plusieurs dizaines de secondes en fonction du nombre de modes calculés. J'ai donc choisi d'aborder le problème de l'inversion jointe par une méthode stochastique de type Metropolis.

Je présente ici le cas de l'inversion jointe de V_s (par MASW) et des paramètres RMP (teneur en eau, Temps de relaxation). Dans le formalisme choisi, je défini des faciès au sein desquels chaque paramètre est caractérisés par une fonction de densité de probabilité (Figure 14). Il s'agit d'apporter une information a priori, qui s'appuie sur une connaissance préalable de la géologie du site (mesures sur échantillons, diagraphies, hypothèses de travail). La démarche développée a été appliquée sur des données synthétiques et de terrain, en contexte tabulaire d'alternances argilo-sableuses, typiques de la Sologne au voisinage d'Orléans.

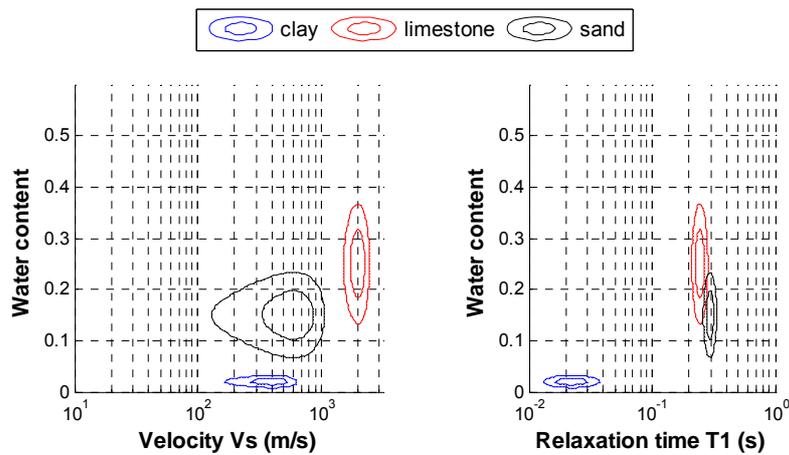


Figure 14 Fonction de densité de probabilité pour les paramètres V_s , teneur en eau et temps de relaxation pour l'argile, le calcaire et le sable tels que rencontrés dans la zone d'étude.

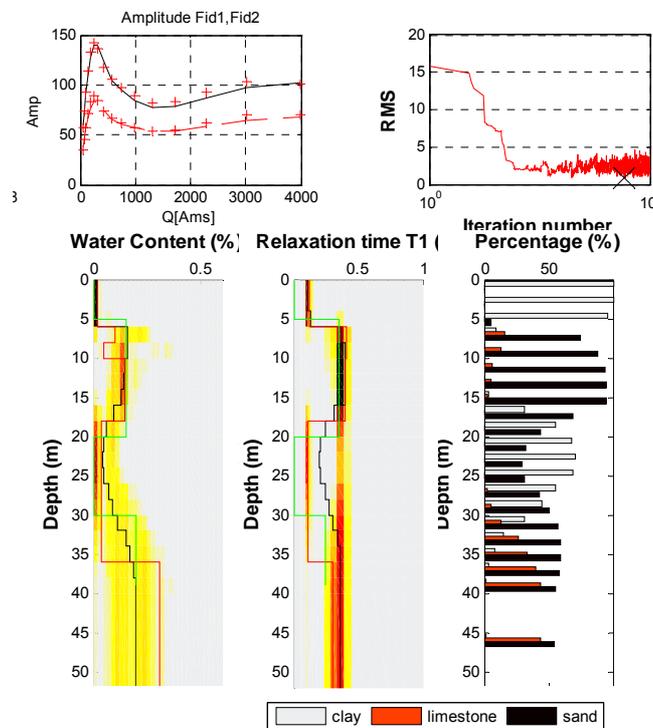


Figure 15 Inversion stochastique d'un sondage RMP : meilleur fit, exploration Montecarlo, résultat d'inversion sur la teneur en eau, le temps de relaxation T_1 et en termes de probabilité de faciès

L'algorithme peut être appliqué à une seule méthode, par exemple la RMP (Figure 15). Dans ce cas précis, on a considéré des données synthétiques avec un faible niveau de bruit. Comme la RMP permet de discriminer les faciès grâce à deux paramètres (teneur en eau et temps de relaxation), on retrouve bien le modèle recherché (aquifère sableux entre deux bancs argileux, le tout au dessus de l'aquifère calcaire). On notera néanmoins qu'en raison de la perte de sensibilité avec la profondeur et la présence d'un aquifère intermédiaire, il y a une incertitude sur la nature de l'aquifère profond (sable ou calcaire équiprobables).

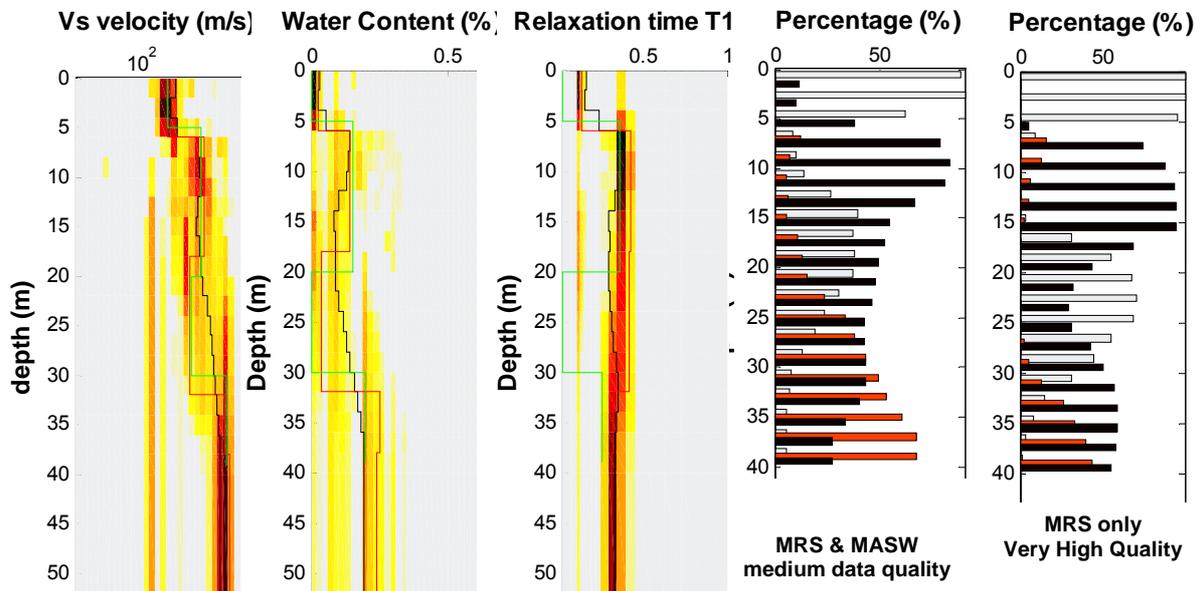


Figure 16 Inversion jointe stochastique d'un sondage RMP et SASW : résultat d'inversion sur la vitesse Vs, la teneur en eau, le temps de relaxation T1 et en termes de probabilité de faciès

J'ai choisi de montrer l'intérêt de coupler l'inversion de données RMP et MASW dans le cas de cette géologie car ces méthodes présentent une complémentarité au niveau de leur capacité à discriminer les milieux en présence : le paramètre Vs seul ne permet pas de distinguer les sables des argiles, le contraste RMP entre les sables et le calcaire ne sont pas très tranchés (et surtout le « signal » du calcaire est en partie masqué par celui des sables sus-jacents).

La Figure 16 montre que cette combinaison de méthode permet de bien distinguer les deux aquifères, mais en plus en considérant un niveau de bruit de 10% (qualité généralement atteinte sur le terrain). Les argiles intermédiaires (entre 20 et 30 m) sont moins bien discriminées mais néanmoins la courbe de probabilité des argiles la fait clairement apparaître.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR-REMAPRO, et présentés à l'EGU 2009 et au workshop MRS2009. Ces travaux ont donné lieu à l'encadrement d'un stage de fin d'études de l'EOST en 2008 (JM Lalande).

III.3 Développements méthodologiques

III.3.1 Monitoring de la zone non-saturée : cas de la craie

Durant la période 2000-2001, des crues importantes ont eu lieu sur le Nord de la France, en Belgique et dans la partie Sud de l'Angleterre, particulièrement dans les vallées crayeuses. Dans beaucoup de ces régions, la remontée rapide du niveau des nappes souterraines a été enregistrée juste avant les crues. Une autre caractéristique commune à ces inondations fut leur durée particulièrement longue, allant de quelques semaines à quelques mois.

Aujourd'hui, l'hypothèse est émise que la clé de l'énigme se trouve dans la zone non-saturée (la zone comprise entre la surface de la nappe et la surface du sol) qui ne fait jamais partie intégrante des réseaux de surveillance des crues. En effet, toutes les observations disponibles et les mesures réalisées suggèrent que la zone non saturée joue un rôle fondamental dans la genèse de ce type de crues, notamment en stockant de l'eau durant les périodes de fortes précipitations et en la libérant à partir d'un certain seuil de saturation. Les modèles préliminaires et les investigations géochimiques des différents types d'eau (sources, rivières, eau souterraine) menés par le BRGM dans la Somme ont clairement montré qu'il y avait une contribution importante de l'eau souterraine dans le déclenchement et la persistance de ces crues.

Le BRGM a piloté le projet européen FLOOD1 (VII.2.4 Flood1 (2005 - 2008)) qui fut l'une des premières tentatives au monde d'instrumentation et de suivi de la zone non saturée dans le but d'identifier les mécanismes d'inondation par remontée de nappe. Nous avons donc réalisé la toute première application de la RMP à l'étude de la zone non saturée (ZNS) dans la craie. Il s'agit de lever un verrou technique pour mesurer la teneur en eau dans la ZNS à une échelle représentative (plusieurs centaines de m³) et pas uniquement au niveau d'un capteur ponctuel (sonde). Les méthodes géophysiques ont également permis le choix du site d'étude en termes de représentativité dans le bassin versant (vérification de l'homogénéité).

Une part importante des travaux réalisés dans ce cadre a été publiée dans des rapports publics, accessibles sur www.brgm.fr ou présentés lors de colloques scientifiques. De plus, ces travaux ont constitué une part importante des travaux de thèse de M. Boucher (Boucher 2007).

La complexité de la tâche est tout d'abord au niveau de la mesure RMP, car les temps de relaxation dans la craie sont très courts (40 – 80 ms) et nous avons donc collaboré avec la société IRIS Instruments et l'IRD pour tester un prototype dédié à la mesure de signaux RMP aux temps courts. Les résultats sur le terrain, utilisant un temps mort très court (il est normalement de l'ordre de 40 ms entre la fin du pulse et le début d'enregistrement du signal RMP), n'ont pas permis un gain suffisant pour s'absoudre de cette difficulté. Nous avons donc quantifié l'amplitude perdue sur le signal dans toutes nos analyses. Comme le montre la Figure 17, à cause du temps mort instrumental, une partie de l'eau n'est pas détectée par RMP. Cette quantité d'eau manquée (liée à l'amplitude du signal) diminue avec la profondeur lorsque le temps de relaxation T2* augmente.

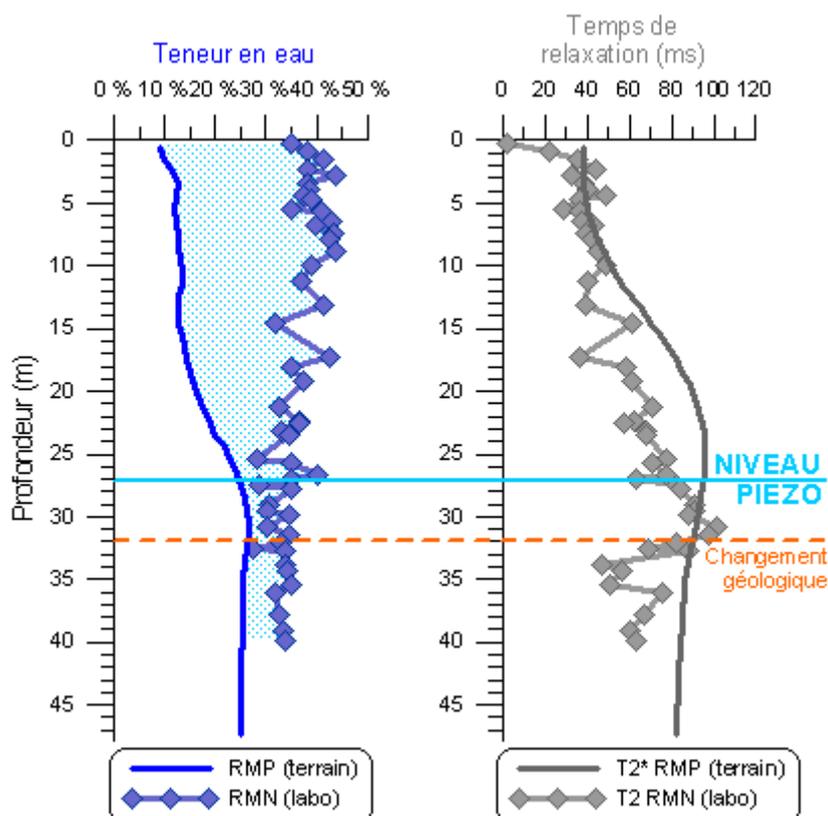


Figure 17 Profil de teneur en eau RMP et de temps de relaxation à Warloy-Bailion

Bien entendu, l'estimation des temps de relaxation $T2^*$ courts est plus affectée par le temps mort instrumental que les $T2^*$ longs. Cependant, comme le montre la Figure 17 les mesures de temps de relaxation RMN réalisées sur carottes ($\sim 500 \text{ cm}^3$) montrent une bonne adéquation avec la tendance observée en sondage depuis la surface ($> 1000 \text{ m}^3$). On observe clairement que les temps de relaxation qui augmentent avec la profondeur expliquent l'augmentation de l'eau détectée par RMP. La modélisation numérique de la réponse RMP d'un profil de teneur en eau pratiquement constant (comme le modèle théorique de la craie) mais modulé par une variation des temps de relaxation tel qu'observé in-situ donne un profil de teneur en eau RMP en accord avec les mesures de terrain à Warloy-Baillon.

La corrélation entre temps de relaxation et pression capillaire avait déjà été soulignée par (Kleinberg, 1996) dans des grès (Figure 18). Lorsque le milieu désature, les molécules d'eau forment un film autour des grains dont elles sont de plus en plus proches, et le temps de relaxation du phénomène de résonance magnétique est réduit (perte de synchronisation des mouvements de spins via les « chocs » sur la surface des grains). Peut-on établir une telle relation dans la ZNS de la craie ?

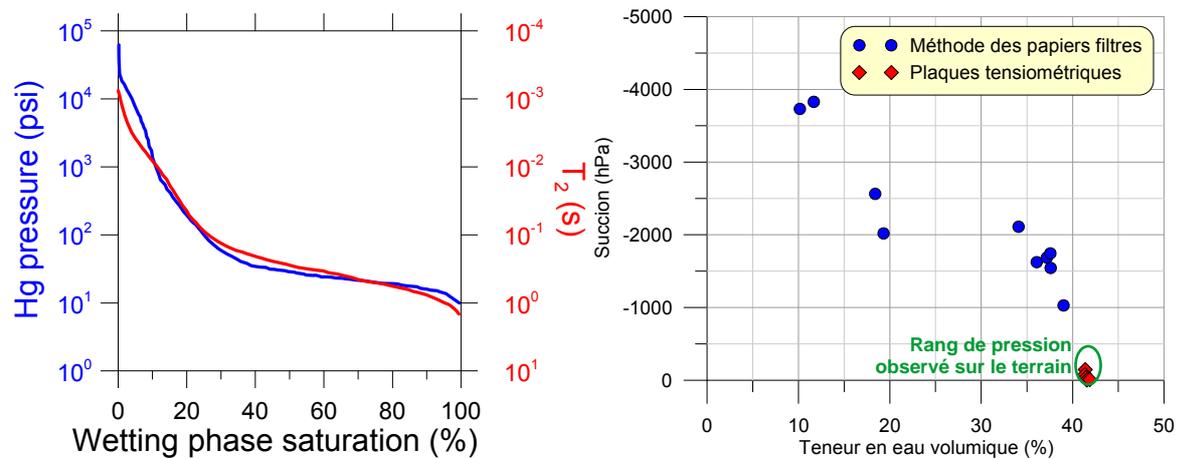


Figure 18 Comparaison d'une porosimétrie mercure et d'une courbe cumulative de $T2$ d'après Kleinberg 1996 (à gauche) et courbe de rétention dans la craie (flood1 - ANTEA)

La matrice crayeuse est caractérisée par une porosité très fine et très homogène. En conséquence la pression d'entrée d'air est élevée et la matrice poreuse reste pratiquement saturée même pour des pressions élevées (jusqu'à -1000 hPa). Sur le terrain, la pression capillaire n'atteint pratiquement jamais la pression d'entrée d'air et la matrice poreuse est pratiquement toujours saturée. La question se pose alors de savoir si dans de telles conditions de saturation le temps de relaxation va aussi être lié à la pression capillaire. Ou bien faut-il une désaturation significative des échantillons pour diminuer le temps de relaxation ?

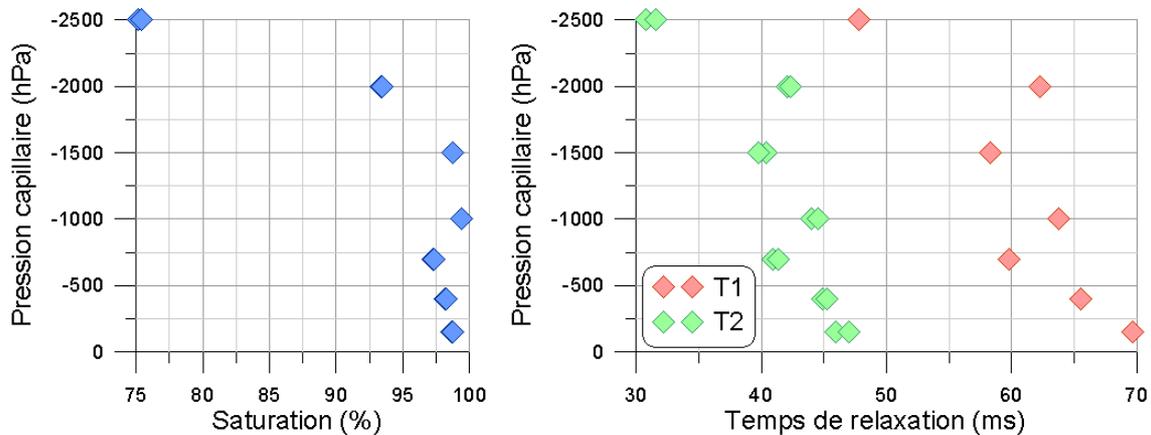


Figure 19 Variation de la saturation et des temps de relaxation avec la pression capillaire

Nous avons reproduit les conditions de pression sur des échantillons à l'intérieur de cellules tensiométriques (en collaboration avec ANTEA et l'INRA d'Orléans) en respectant un protocole de

mesure qui assure d'avoir atteint un état d'équilibre (cf. thèse de M. Boucher 2007). Les résultats sont présentés Figure 19. Les variations de temps de relaxation en fonction de la pression ne peuvent pas expliquer les variations observées le long du profil où le temps de relaxation T2 varie de 40 ms et T1 de 60 ms depuis la surface jusqu'à la nappe alors que les pressions rencontrées in-situ sont de l'ordre de 0 à -500 hPa. Il faut noter cependant que les fissures ne sont pas échantillonnées dans l'expérience en laboratoire alors qu'il est probable qu'elles jouent un rôle important à la fois sur le comportement hydrique de la ZNS et sur le signal RMP de terrain.

Nous avons donc cherché à valider une deuxième explication du phénomène observé sur le site de Warloy-Baillon. En effet, si la première partie de la courbe de temps de relaxation entre la surface et la nappe montre une variation progressive et qui faisait penser à un lien avec le champ de pression capillaire, la brusque variation vers 33 m est parfaitement corrélée avec un changement lithologique.

Pour tester cette hypothèse, alors que ce site a été choisi pour sa grande homogénéité, nous avons procédé à plusieurs types d'analyse sur des échantillons de la craie prélevés à plusieurs profondeurs. Le paramètre le plus significatif s'est révélé être la susceptibilité magnétique.

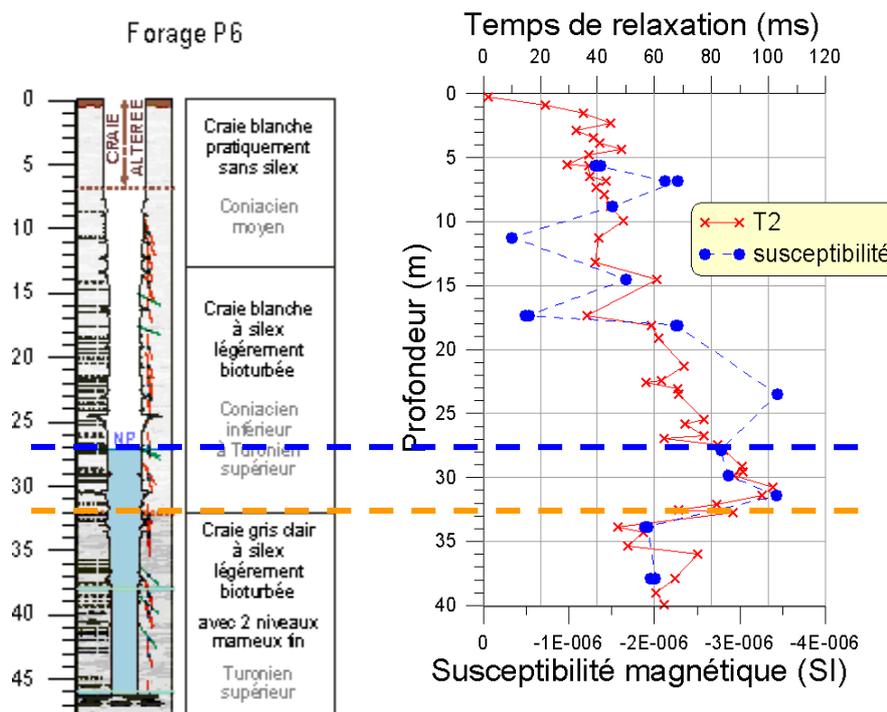


Figure 20 Géologie d'après le forage P6 à Warloy-Baillon (à gauche), susceptibilité magnétique et temps de relaxation T2 en fonction de la profondeur sur le forage P4 (à droite)

La forte corrélation entre les mesures de susceptibilité magnétique en laboratoire prouve que les variations de temps de relaxation dans la craie sont nettement contrôlées par des variations lithologiques fines. Ce résultat était d'autant plus inattendu que si l'impact des propriétés magnétique du sous-sol est toujours suspecté lors d'une étude par RMP, la craie est certainement le milieu sédimentaire le moins magnétique que l'on ait rencontré. Néanmoins, la taille moyenne des pores dans la craie est de l'ordre du micron, et l'on peut soupçonner que les molécules d'eau sont toujours très proches de la surface des grains au contraire des milieux granulaires comme les grès (où l'eau libre est en grande quantité dans les pores).

De manière générale, les paramètres mesurés par résonance magnétique sur le terrain et en laboratoires présentent une bonne corrélation avec la géologie. Les variations importantes de teneur en eau et de temps de relaxation ont lieu en correspondance avec les changements géologiques.

Ce site test près d'Orléans, est constitué d'alternances sablo-argileuses présentant à quelques centaines de mètres de distance des géométries 3D ou tabulaires dans les 30 premiers mètres. Les caractérisations géophysique et géologique ont été complétées par des analyses en laboratoires et des mesures RMN sur échantillons, et des essais de pompages. Lors du workshop MRS 2006 à Madrid, M. La Plata (IGME) a recensé plus de 20 citations de ce site dans diverses publications scientifiques ce qui en fait un site unique dans la bibliographie RMP.

Pour comprendre les mécanismes et quantifier les paramètres qui influencent le signal RMP, il est possible de réaliser des mesures RMN en laboratoires basées sur le même principe physique. Ces mesures en laboratoires sont mieux contrôlées que les mesures de terrains car, d'une part, elles ne sont pas affectées par un temps mort, et d'autre part les propriétés des échantillons peuvent facilement être mesurées par d'autres méthodes.

Des échantillons ont été prélevés et conservés tant que possible tel qu'in situ sur les sites de Marcilly-en-Villette. Les mesures RMN réalisées sur ces échantillons sont comparées avec la géologie et le résultat de sondages RMP sur la Figure 23. Les sondages RMP représentés sur ces figures ont été effectués avec des boucles de dimension adaptée à la profondeur d'investigation recherchée (boucles de 25 m) et qui englobent les forages d'où les échantillons ont été prélevés.

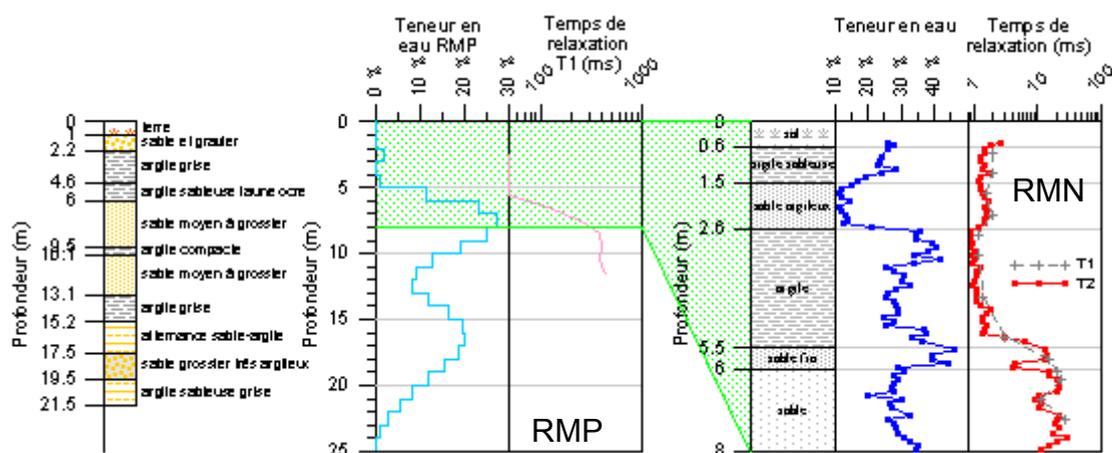


Figure 23 Géologie et mesures par résonance magnétique à Marcilly-en-Villette, De gauche à droite : log géologique ; sondage RMP sur le terrain ; RMN sur carottes (d'après Boucher 2007)

Si la corrélation entre les variations géologiques et les paramètres RMP / RMN est excellente, on remarquera que dans les sables saturés de Marcilly-en-Villette, les temps de relaxation mesurés en laboratoire par RMN sont inférieurs d'un ordre de grandeur aux temps mesurés par les sondages RMP (le temps T_1 est d'environ 30 ms en laboratoire contre 400 ms sur le terrain). Au contraire, sur les échantillons de craie provenant du site de Warloy-Baillon (flood1), les temps de relaxation mesurés en laboratoire et sur le terrain sont tout à fait comparables. Deux hypothèses sont émises pour expliquer ce comportement des temps de relaxation :

- Les échantillons de Marcilly-en-Villette sont composés de sables et argiles non consolidés qui auraient pu être compactés lors du prélèvement. La taille des pores aurait ainsi été réduite et le temps de relaxation serait sous-estimé avec les mesures en laboratoire. La compaction ne peut affecter les échantillons d'un matériel consolidé comme la craie de Warloy-Baillon.
- Les espèces paramagnétiques ont une influence sur les temps de relaxation (Foley *et al.*, 1996 ; Bryar *et al.*, 2000). Cette influence est plus ou moins importante selon le champ statique utilisé, mais n'est pas liée de manière simple à ce champ statique (Kenyon *et al.*, 1995). Il est donc possible que le changement de champ magnétique (multiplication par 1000 entre le laboratoire et le terrain) modifie les temps de relaxation dans certains contextes géologiques mais pas dans tous.

Ces hypothèses ne sont pas contradictoires entre elles et le comportement des temps de relaxation peut s'expliquer par une combinaison de plusieurs effets (compaction ou non des échantillons ; influence du champ magnétique statique utilisé et des propriétés magnétique des échantillons). Elles soulignent une fois de plus la difficulté du changement d'échelle entre l'échantillon et le terrain.

III.3.3 Traitement du signal RMP par voies remote

Les paramètres mesurés par RMP présentent une dépendance directe à la présence d'eau dans le sous-sol et une sensibilité unique aux paramètres qui régissent les écoulements. Ce qui limite son utilisation est son faible niveau de signal : l'amplitude des signaux RMP varie généralement de quelques dizaines de nV jusqu'à 1 μ V. On considère le bruit instrumental d'environ 5 nV. Les principales sources de bruits sont d'origine anthropique : les harmoniques du courant industriel (50 ou 60Hz), les pics (clôtures électriques), les alternateurs en général. On rencontre aussi parfois des limites liées au bruit magnétotellurique, particulièrement marqué sous certaines latitudes (tropiques).

Le traitement du signal est donc une étape cruciale dans la mesure et le principal facteur d'évolution de la méthode dans les années à venir. Classiquement, un « bon » sondage dure environ 2h, pour des courbes de sondages avec 16 pulses et 100 stacks. Si la fréquence de Larmor est suffisamment écartée des harmoniques du 50 Hz, on peut appliquer un filtre étroit sur ces harmoniques (Notch). On utilise aussi des techniques de filtrage analogique en connectant en série 2 boucles de réception soumises au même bruit mais de polarités inversées (boucles en « huit », boucle de compensation).

J'ai participé au travers au développement d'une nouvelle stratégie de filtrage des données, au design et aux tests instrumentaux pour la mise au point d'une nouvelle génération d'instruments Numis multi-voies dans le cadre de la convention de collaboration IRIS Instruments-IRD-BRGM, cf. projets nationaux Riteau Proton (améliorer la qualité de l'information apportée par MRS) et ANR ReMaPro (application de la RMP aux sites et sols pollués). Le premier prototype opérationnel a pu être exploité à partir de l'automne 2009 et j'ai pu appliquer les algorithmes que j'avais développés.

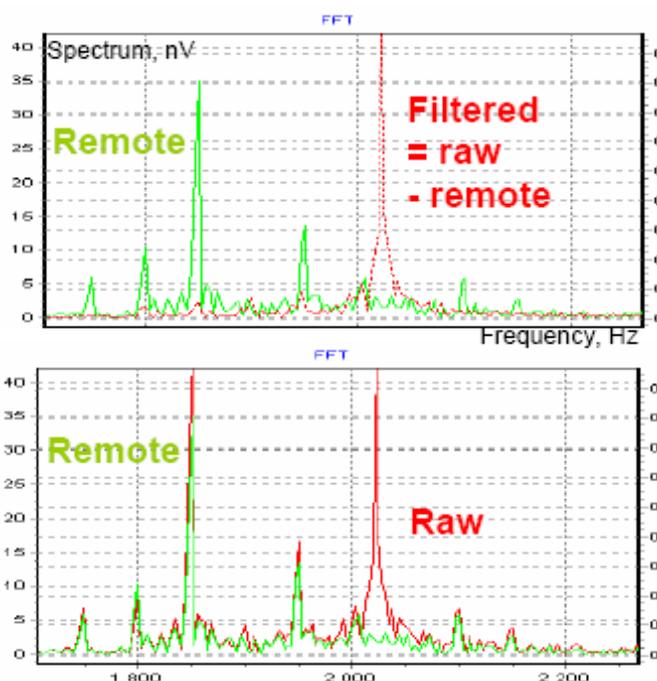


Figure 24 Exemple de filtrage « remote » du signal RMP : en bas, le signal Raw contient le signal RMP et le bruit EM, après filtrage (en haut) le signal résiduel n'est plus pollué par les harmoniques du 50 Hz

Le principe consiste à enregistrer simultanément de bruit EM dans une ou plusieurs boucles autour de la boucle de sondage RMP. Celles-ci doivent être suffisamment loin pour ne pas enregistrer de signal RMP mais soumises à un bruit suffisamment corrélé à celui du sondage RMP pour pouvoir estimer une fonction de transfert complexe (ici en domaine fréquentiel) qui permet de reconstruire le bruit durant le sondage. Ce type de filtrage permet de filtrer des bruits dont la signature fréquentielle recouvre le spectre du signal RMP. La Figure 24 illustre en domaine fréquentielle un cas où avec 36 stacks on obtient un résultat excellent. On notera que le spectre du signal RMP n'est pas du tout affecté par ce filtrage. Le même signal RMP avant et après filtrage est présenté en domaine temporel

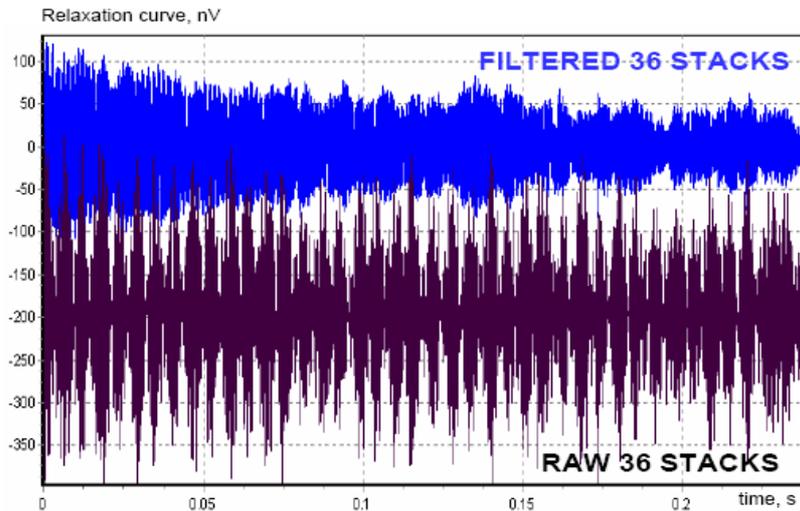


Figure 25 Exemple de filtrage « remote » du signal RMP : en bas, le signal brut et en haut après filtrage : on retrouve l'enveloppe caractéristique d'une sinusoïde modulée par une exponentielle décroissante

L'efficacité du filtrage dépend du site, de la structure du bruit (sa stabilité) et de l'amplitude du signal RMP. L'algorithme que j'ai développé pour estimer la fonction de transfert entre une boucle « remote » et la boucle de sondage s'appuie sur la technique de moyenne des inter-spectres. J'ai écrit un algorithme qui s'inspire de la méthode proposée par Pajot et al. (2008) et qui permet d'exploiter un nombre quelconque de voies « remote ».

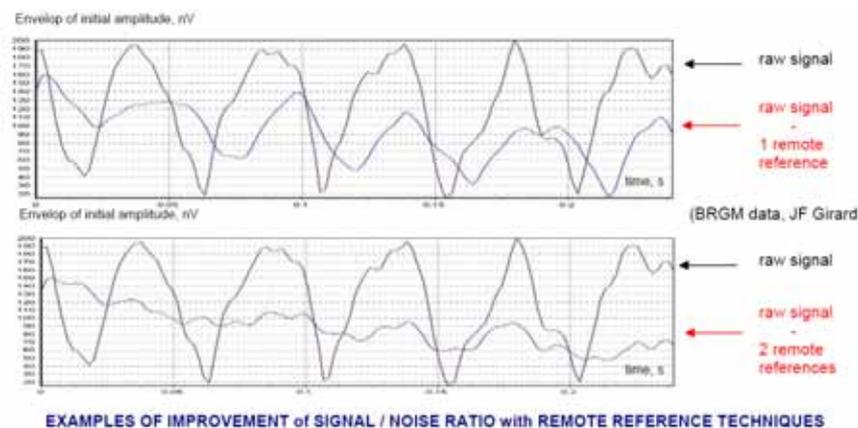


Figure 26 Filtrage avec 1 (en haut) ou 2 (en bas) voies remote : le signal représenté est l'enveloppe après détection synchrone, le signal brut est distordu par les harmoniques proches du 50 Hz.

Comme le montre la Figure 26, lorsque deux sources de bruit indépendantes et proches (ici un transformateur électrique et une autre ligne électrique) perturbent le signal RMP, une seule voie « remote » ne permet généralement pas de les filtrer. Mais si on utilise deux boucles pour mesurer le bruit (dans l'idéal, chacune préférentiellement soumise à une source de bruit) alors on obtient un résultat excellent après seulement quelques dizaines de stacks.

La disponibilité de cette nouvelle génération d'instrument multivoie devrait permettre de voir apparaître de nombreuses procédures de traitement dans les prochains mois et le champ d'application de la RMP s'accroît d'autant !

III.4 Applications

III.4.1 Aquifères en milieu de socle (Hyderabad, Inde)

J'ai participé à la caractérisation géophysique des aquifères en milieu de socle (granite altéré) dans la région d'Hyderabad (en Inde) dans le cadre du projet CEFIPRA entre 2003 et 2005 (cf. paragraphe VII.2.6).

Nous avons d'une part développé l'utilisation de boucles « remote » pour ajouter un filtrage analogique au filtrage numérique et exploité différentes stratégies de filtrage nécessaires dans ce contexte bruité et sur des sols à faible teneur en eau. Les signaux RMP sont très faibles sur la plupart des altérites, pour une présentation plus générale, cf. résumé étendu (4 pages) paragraphe VIII.1.4 Baltassat J.M., Krishnamurthy N.S., Girard J.F. et al., , Geophysical characterization of weathered granite aquifers in the Hyderabad region, Andhra Pradesh, India, MRS2006., et la publication dans Groundwater, Legchenko et al. 2006.

III.4.2 Estimation du volume des sinkholes (Mer morte, Jordanie)

Nous avons développé une méthodologie pour utiliser les mesures RMP pour estimer le volume de vides remplis d'eau. L'application au cas d'étude des « sinkholes » en bordure de la mer Morte nous a également amené à étudier les performances de la RMP en milieu très conducteur (cf. III.1.4).

Depuis les années 1990, des centaines de « sinkholes » (fontis) sont apparus le long de la côte de la Mer Morte. Dans la littérature, le développement rapide de ces effondrements est relié à la chute du niveau de la Mer Morte. Ce modèle suppose une dissolution très rapide de grands volumes de sel et prédit la création de nouvelles cavités qui provoqueront des effondrements pendant les 10 – 20 années à venir.

Néanmoins, les résultats de notre étude géophysique (Legchenko et al, 2008) ne confirment pas cette hypothèse de dissolution rapide. Pour expliquer nos observations, nous proposons un autre modèle : (1) une dissolution lente du sel (beaucoup plus lente que 20 ans) et la création de cavités sans développement d'effondrements systématiques jusqu'en surface; (2) le développement des « sinkholes » est contrôlé par la baisse du niveau piézométrique car les couches qui sont au-dessus de la couche de sel se désaturent (3) la durée d'effondrement des cavités est contrôlée par les propriétés mécaniques des roches au toit de la couche de sel.

III.4.3 Imagerie du conduit karstique de Rocamadour

Dans le cadre de la gestion des aquifères karstiques, les prospections géophysiques permettent de localiser les conduits/cavités et de caractériser la matrice calcaire encaissante. La caractérisation des environnements karstiques par les méthodes de géophysique de surface est néanmoins difficile en raison de la complexité des hétérogénéités de ces milieux.

J'ai participé à plusieurs travaux réalisés sur le site de effectuées sur le site test de Poumeyssen proche de Rocamadour (France). L'objectif méthodologique de ces prospections est l'évaluation de la performance de plusieurs méthodes géophysiques : imagerie de résistivité électrique, profil de sondages de résonance magnétique des protons (RMP), cartographie électrique de mise à la masse, et tomographie sismique. Ce site offre la possibilité d'étudier un conduit karstique relativement large, peu profond, plein d'eau et dont la position en surface et la forme sont connues grâce à des reconnaissances spéléologiques. La tomographie sismique et la RMP fournissent les caractéristiques du conduit (localisation et taille). La sismique et les données électriques indiquent que le milieu calcaire encaissant n'est pas homogène.

Le lecteur pourra se référer aux articles auxquels j'ai contribué : Boucher et al. (2006), Girard et al. (2007) et à l'article de synthèse des prospections géophysiques réalisées sur ce site (Guerin et al. 2009).

III.4.4 Prospection RMP sur le site vosgien de La Soutte (Alsace)

L'EOST étudie le site expérimental de La Soutte dans les Vosges (France) et j'ai participé lors de deux campagnes de mesure, à la mise en œuvre de plusieurs techniques hydrogéophysiques qui

permettent une étude multi-échelle du contenu en eau dans la zone vadose et des aquifères perchés. Ce site expérimental se situe sur un bassin versant où plusieurs sources et ruisseaux apparaissent le long de fractures volcaniques et à proximité de roches plutoniques altérées. Le site est concerné par une étude à long terme qui a commencé en 2004, qui utilise des mesures en continu et d'autres répétées afin de suivre les processus hydrogéologiques.

On pourra se référer à l'article de synthèse auquel j'ai contribué (Sailhac et al., 2009).

La synthèse des résultats obtenus par les méthodes audio-magnétotellurique (AMT) et de résistivité en courant continu (DC) permet de produire un modèle 3D de résistivité à grande échelle. Le géoradar (GPR) a été employé pour analyser plus précisément la partie issue de l'altération des roches dont l'épaisseur est très variable (0 à 10-15 mètres). Nous montrons des résultats de mesures GPR en configuration point milieu commun (CMP) qui conduisent à des estimations du contenu en eau et de la porosité dans la couche la moins profonde (0-30 cm) par une simple interprétation de l'onde directe dans le sol.

Les mesures par Résonance Magnétique Protonique (MRS) ont permis de faire une carte de l'épaisseur saturée de la zone altérée. Cela permet également une estimation de l'épaisseur de l'aquifère perché et de son volume total d'eau par unité de surface. Cela renseigne aussi sur l'épaisseur de la zone vadose à partir de la profondeur du toit de la zone saturée. La conversion des mesures géophysiques en un modèle hydrogéologique (porosité, conductivité de l'eau et teneur en eau) est discutée dans cet article.

III.4.5 Bassin versant de Montreuil-sur-Epte (Cuisien, France)

Application à la caractérisation géométrique et hydrodynamique d'un bassin versant, cas de Montreuil sur Epte pour comprendre et modéliser le transfert des pesticides de la surface jusqu'à l'aquifère (cf. proceedings MRS 2006 et publication en cours).

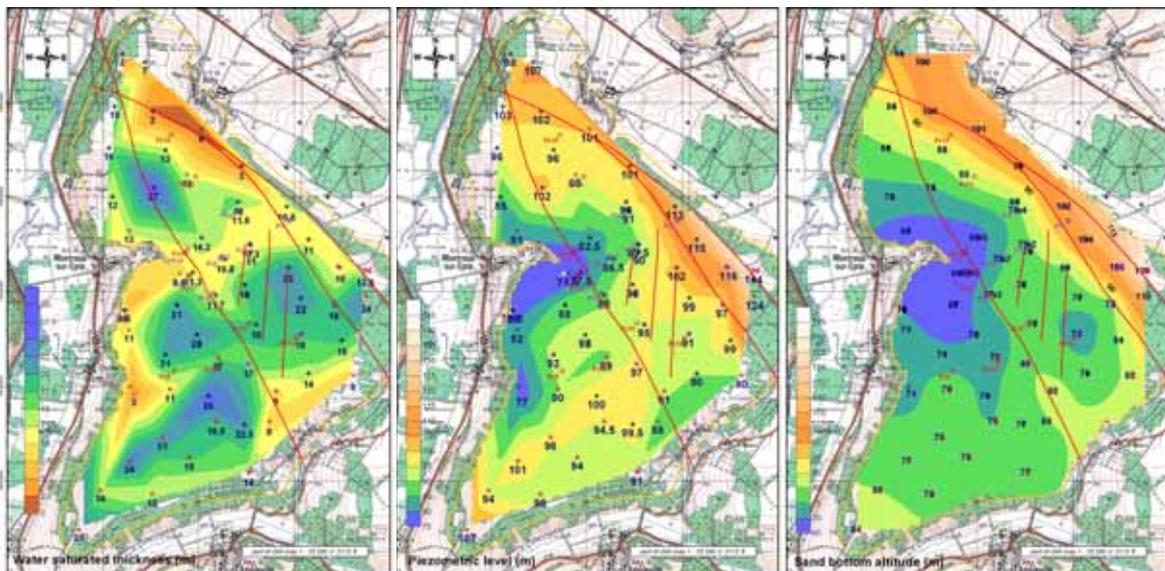


Figure 27 Carte de l'épaisseur de la zone saturée (à gauche) calculée par différence entre la carte piézométrique obtenue par RMP (au centre) et la carte de l'altitude de la base des sables à partir du modèle géologique (à droite)

Un résultat extrait de la publication en cours est présenté Figure 27. Les mesures RMP réparties sur l'ensemble du bassin versant (64 sondages) ont permis de dresser une carte de l'altitude du toit de la zone saturée. Par différence avec l'altitude de la base des sables bien déterminée par les affleurements qui entourent le bassin versant, on obtient alors une carte de l'épaisseur saturée. D'autres combinaisons des cartes et profils de paramètres obtenus par RMP et imagerie électrique sont possibles et sont présentés sur un jeu partiel de données (voir le proceeding (Girard et al., 2006) en annexe) puis complété après 2007.

III.5 Dissémination

La résonance magnétique est une « jeune » méthode géophysique et élargir la communauté scientifique qui l'emploie nécessite un travail de dissémination des résultats au-delà du cercle des spécialistes. Cet élargissement peut se mesurer au nombre de publications sur le sujet ainsi qu'à l'augmentation de la fréquentation des colloques MRS tous les 3 ans.

Ma contribution peut se juger sur la rédaction d'un chapitre de passage en revue des applications de la RMP (Girard et al., 2007, Selected papers from the International Association of Hydrogeologists Dijon Symposium 2006) et ma participation à celle sur le « retour d'expérience sur l'utilisation de la RMP » (Vouillamoz et al., 2007, Boletín Geológico y Minero).

Mais cette contribution peut se juger aussi sur la publication dans des revues d'hydrogéologie d'articles sur la détection de conduit karstique dans Journal of Hydrology (Boucher, Girard et al., 2006) et la caractérisation géophysique en milieu de socle dans Ground Water (Legchenko et al., 2006).

La dissémination passe aussi par la formation et j'ai co-encadré la thèse de M. Boucher à Orléans (2004-2007, thèse sous la direction d'A. Legchenko, IRD-LTHE Grenoble). J'enseigne depuis 2005 les principes et applications de la RMP dans le module hydro-géophysique de l'école d'ingénieur de l'EPGS à Strasbourg. J'encadre régulièrement des étudiants en stage de Master 1 ou de fin d'étude principalement sur la RMP et les méthodes électriques.

J'anime depuis 2005 une formation professionnelle de 3 jours délivrée par brgm.formation et dispensée principalement à des agents du brgm mais également ouverte à l'extérieur intitulée « Sensibilisation aux méthodes géophysiques ».

D'autre part, je suis co-organisateur et membre du comité scientifique des workshops MRS2003 (Orléans), MRS2006 (Madrid) et MRS2009 (Grenoble).

IV. Méthodes électromagnétiques

IV.1 Monitoring électromagnétique (CSEM)

IV.1.1 Développement du dispositif LEMAM pour le monitoring du stockage géologique du CO₂

Parmi les actions engagées à l'échelle internationale pour lutter contre les émissions de CO₂ dans l'atmosphère, le stockage géologique a été retenu comme une option de transition en attendant que se mettent en place des changements significatifs des modes de consommation d'énergie de nos sociétés. Le stockage géologique présente par bien des aspects des similarités avec les opérations liées à l'exploitation du pétrole et du gaz, ainsi que du stockage temporaire de gaz.

Néanmoins, pour que cette démarche ait un impact à l'échelle planétaire, il faut qu'une part significative des émissions industrielles soit capturée et stockée. Sont visés tout particulièrement les sites mêmes d'extraction des hydrocarbures et les activités qui génèrent beaucoup de CO₂ regroupées dans des grands bassins industriels (aciéries, cimenteries, centrales thermiques...). D'un point de vue efficacité énergétique il sera préférable de stocker dans le sous-sol à proximité de ces « sources massives de pollution » aussi souvent que possible. Sous la Mer du Nord, des formations gréseuses comme la formation d'Utsira qui sont en même temps des cibles d'exploitation du méthane présentent de forts potentiels. Mais on peut aussi citer les aquifères profonds du Bassin Parisien dans le Dogger (calcaires) et le Trias (Grès).

La question des volumes gigantesques à stocker (plusieurs dizaines puis centaines de Millions de tonnes par an) amène à dimensionner des sites capables de stocker de l'ordre de plusieurs Mt / an. Pour ce faire, il est acquis que le CO₂ doit être stocké sous forme supercritique car alors sa densité accrue lui permet d'occuper un volume bien plus faible qu'à l'état gazeux et il remonte moins facilement. Dans les conditions de pression hydro-statique et de gradient de température moyen (25°C/km, 15 °C en surface) le CO₂ passe à l'état supercritique vers 800 m de profondeur.

D'autre part, les projets de stockage géologique du CO₂ doivent être suffisamment efficaces pour capturer le CO₂ durant plusieurs siècles avant qu'il ne retourne dans l'atmosphère. Que ce soit dans des réservoirs déplétés (bien connus par l'exploitant mais alors les réservoirs sont perforés par les précédentes exploitations) ou dans des aquifères profonds, se pose la question de la caractérisation des réservoirs, la moins invasive possible, et la question du monitoring à long terme. Les méthodes géophysiques ont donc un rôle important à jouer sur ces deux aspects. Si le monitoring sismique 4D semble tout indiqué pour ces opérations, les méthodes basées sur la résistivité électrique présentent des intérêts évidents présentés ci-après.

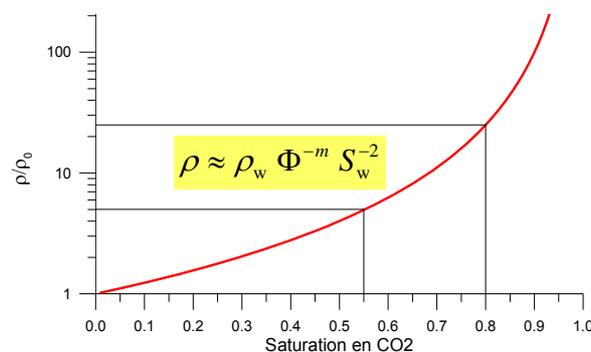


Figure 28 Contraste de résistivité entre une roche imprégnée de CO₂ et la même roche saturée en eau pour différentes saturations en CO₂ (d'après Archie généralisé).

La Figure 28 illustre que le contraste de résistivité entre une roche imprégnée de CO₂ et une roche saturée en eau (i.e. sans fraction de gaz ou d'huile) est directement lié à la saturation en CO₂, calculé dans ce cas avec un exposant $n = 2$ dans la loi d'Archie généralisée (cas d'un grès peu argileux).

Deux cas de substitution de fluide sont soulignés : $S_{CO_2} = 55\%$ et 80% , pour lesquels les contrastes de résistivité valent respectivement 5 et 25. Il est notable que le contraste de résistivité est indépendant de la conductivité électrique de l'eau de la formation et que le paramètre résistivité est a priori fortement affecté par la présence de CO_2 gazeux ou supercritique.

Cette sensibilité encourage l'utilisation des méthodes diagraphiques qui mesurent la résistivité électrique. Mais comme on souhaite avoir le moins possible de forages (fuites potentielles et coûts élevés) l'emploi de méthodes depuis la surface (ou le fond de la mer) a suscité de nombreux travaux scientifiques un peu partout dans le monde. On notera qu'un parallèle peut s'établir avec les travaux antérieurs pour l'imagerie des réservoirs géothermiques qui est un domaine où les méthodes géo-électriques ont depuis longtemps montré leur pertinence.

S'appuyant sur l'expertise du BRGM dans l'utilisation des méthodes électromagnétiques pour la prospection minière et géothermique, nous avons étudié les géométries d'acquisition qu'il serait possible de mettre en œuvre pour ces cibles. Pour de plus amples détails, je renvoie le lecteur vers Bourgeois et Girard 2010 (en annexe).

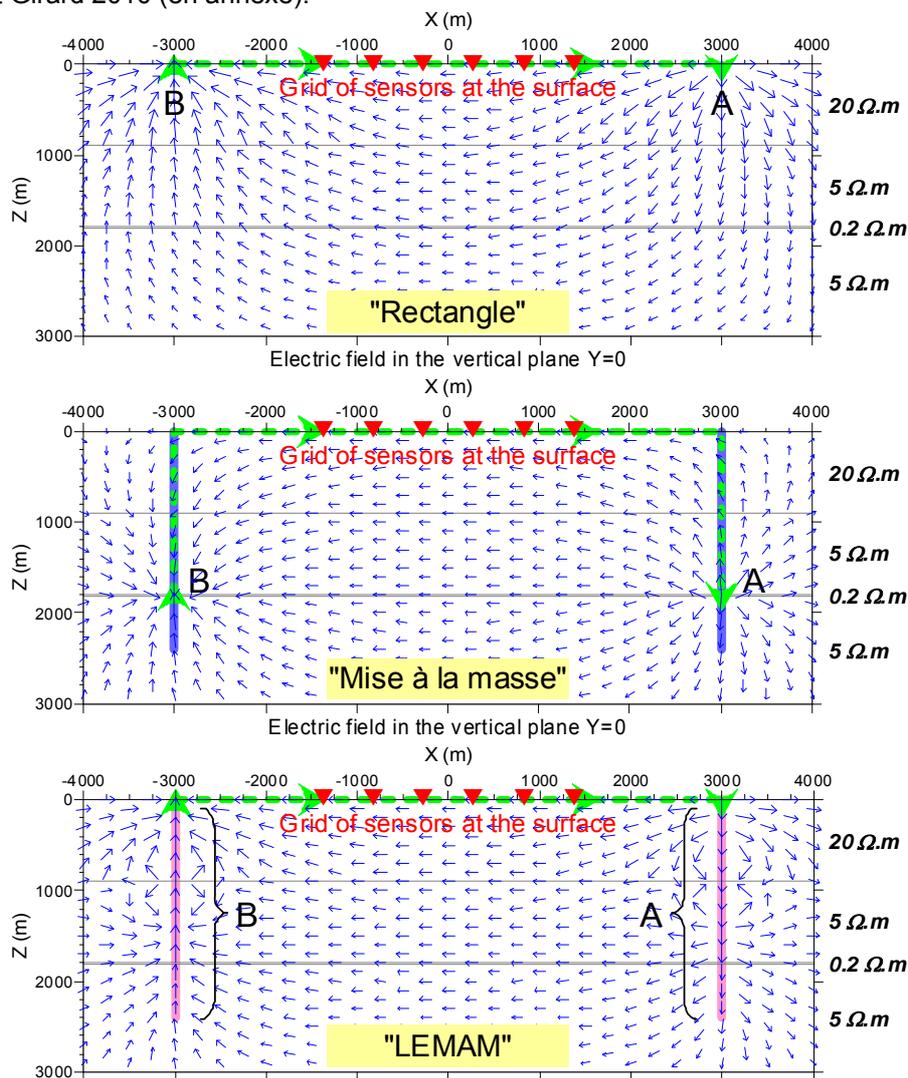


Figure 29 Schéma de trois dispositifs d'injection électrique qui peuvent être utilisés pour la surveillance du CO_2 . Les flèches représentent le champ électrique calculé à 0.5 Hz pour un modèle tabulaire à 4 couches en l'absence de bulle de CO_2 (i.e. réponse de la stratification, ou « champ primaire stratifié »).

Malgré les masses colossales de CO_2 injectées, et l'extension latérale de plusieurs kilomètres des panaches attendus lors de l'exploitation à l'échelle industrielle des sites de stockage ; la grande profondeur et la faible épaisseur de ces panaches (souvent confinés dans des couches de quelques dizaines de mètres) rendent la plupart des dispositifs de surface inapplicables.

Comme l'illustre la Figure 29, l'originalité de notre démarche consiste à utiliser les forages métalliques pour l'émission du courant, nous avons donc utilisé l'appellation LEMAM (Long Electrode Mise à la Masse) pour décrire ce type d'injection. Nous avons proposé et démontré par des modèles numériques qu'il était possible, en injectant le courant électrique via les casings métalliques des forages, de générer une réponse time-lapse (différence entre les mesures à un temps T2 et un temps T1) sur le champ électrique (et magnétique) supérieure au signal magnétotellurique et de l'ordre de plusieurs pourcents du champ primaire (i.e. réponse du sous-sol en l'absence de CO2 générée par l'injection du courant).

Un travail de modélisation (code par méthode intégrale de Newman) a permis de préciser les paramètres du dispositif (dimensions, fréquence, pas de mesure, sensibilité, etc...) à utiliser sur un site test de stockage de CO2 (1800 m de profondeur) dans un champ pétrolier en Algérie (In Salah). Forts de ce succès, nous avons donc réalisé une étude de faisabilité du suivi de l'injection de CO2 dans l'aquifère calcaire du Dogger (Oolithe blanche) dans le cadre du projet ANR GeoCarbone Monitoring. Malheureusement, si le site algérien s'est avéré très favorable (réponse > 4% du champ total), dans les hypothèses d'exploitation de l'aquifère du Dogger, ce site s'est révélé inadéquat. Nous l'expliquons par un raisonnement simple qui consiste à évaluer le pourcentage du courant injecté en tête des forages par rapport au courant circulant dans les autres couches sus- et sous-jacentes au réservoir. Si le réservoir est le plus conducteur de la série, il va concentrer les lignes de champs. Dans le cas d'In Salah, nous estimons que plus de 30% du courant injecté circule dans la couche cible pourtant de 20 m d'épaisseur à 1800 m de profondeur, alors que seulement quelques pourcents circulent dans l'aquifère du Dogger. En effet, celui-ci est peu salin et d'autres séries « court-circuitent » le réservoir. De plus, en raison de son épaisseur (70 m), il n'est presque jamais saturé sur toute son épaisseur. Hors c'est justement lorsque que le panache de CO2 « bloque » le passage du courant que la variation observée est maximale.

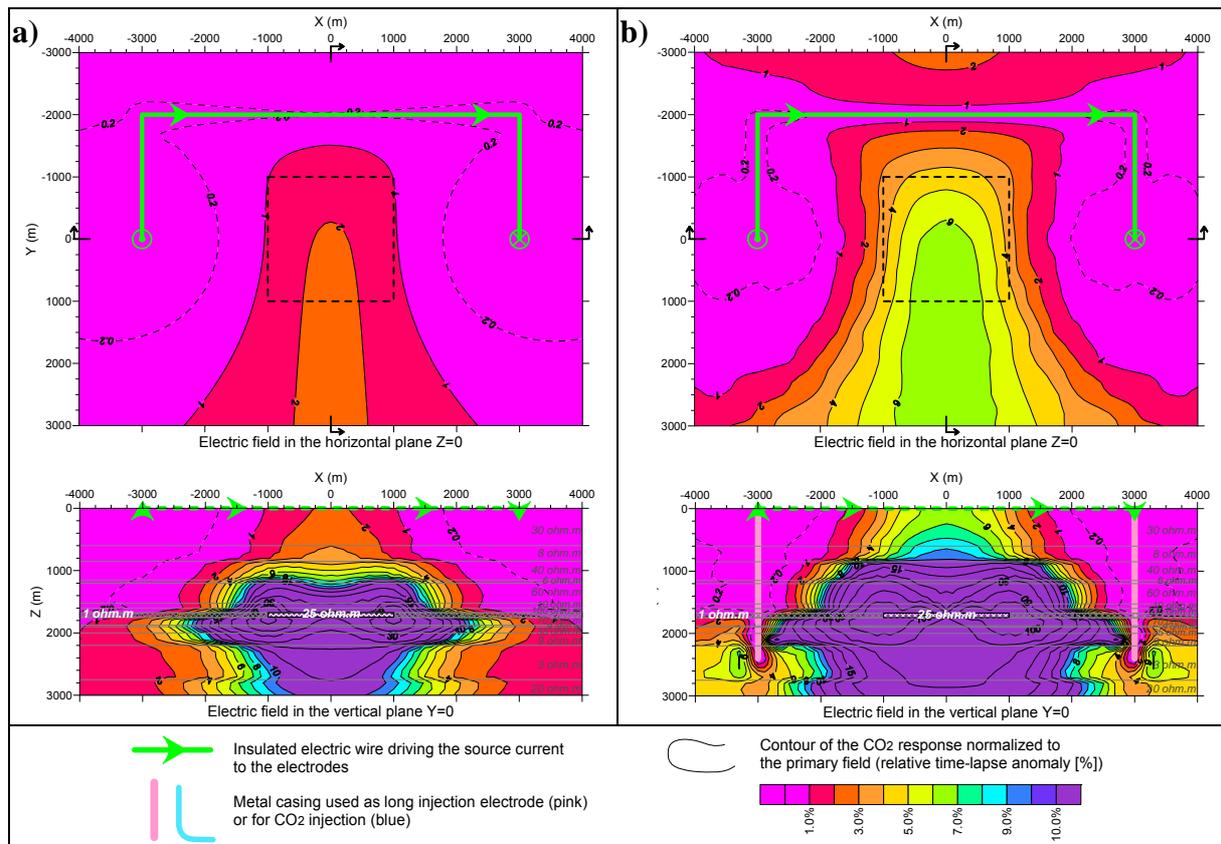


Figure 30 Réponse électrique Time-lapse (estimée sur le grand axe de l'ellipse de polarisation) obtenu pour un courant à 0.5 Hz et un panache de CO2 de 2 km×2 km×70 m, et une résistivité de 25 Ω.m (S_{CO2}=80%), dans un réservoir de 1 Ω.m a) pour une injection via des électrodes en surface; b) pour une injection de type LEMAM via une paire de casing verticaux (2400 m de long).

Comme le montre la Figure 30, pour un même scénario d'injection de CO₂, la réponse pour une injection en surface ne dépasse pas 1 à 2% maximum (la Figure 30 montre une vue en plan horizontal où les mesures sont praticables et un plan vertical passant par l'axe de électrodes qui montre l'amplitude de la réponse dans le sous-sol) alors qu'on atteint 8% du champ initial avec une injection de type LEMAM. Notez que dans les deux cas, les électrodes sont séparées de 6 km. La réponse est exprimée en pourcentage de l'amplitude du champ électrique sans bulle (i.e. état initial sans CO₂). Si l'on considère que le bruit de répétition des mesures est actuellement de l'ordre de 1% du champ initial, les zones où la réponse est < 1% sont non mesurables.

Le dispositif LEMAM présente de nombreuses particularités (dont celle de présenter une atténuation en divergence cylindrique et non pas sphérique comme une mise-à-la-masse classique, cf. Figure 29) qui en font un dispositif potentiellement très performant. La complexité de la réponse EM est en grande partie résolue par la mesure time-lapse qui permet par différence de soustraire la réponse de l'encaissant.

La grande sensibilité du dispositif a été illustrée par les travaux de modélisation présentés lors de la Hedberg Conférence (AAPG/SEG/SPE) à Vancouver en 2009 (Bourgeois, Rohmer et Girard, 2009).

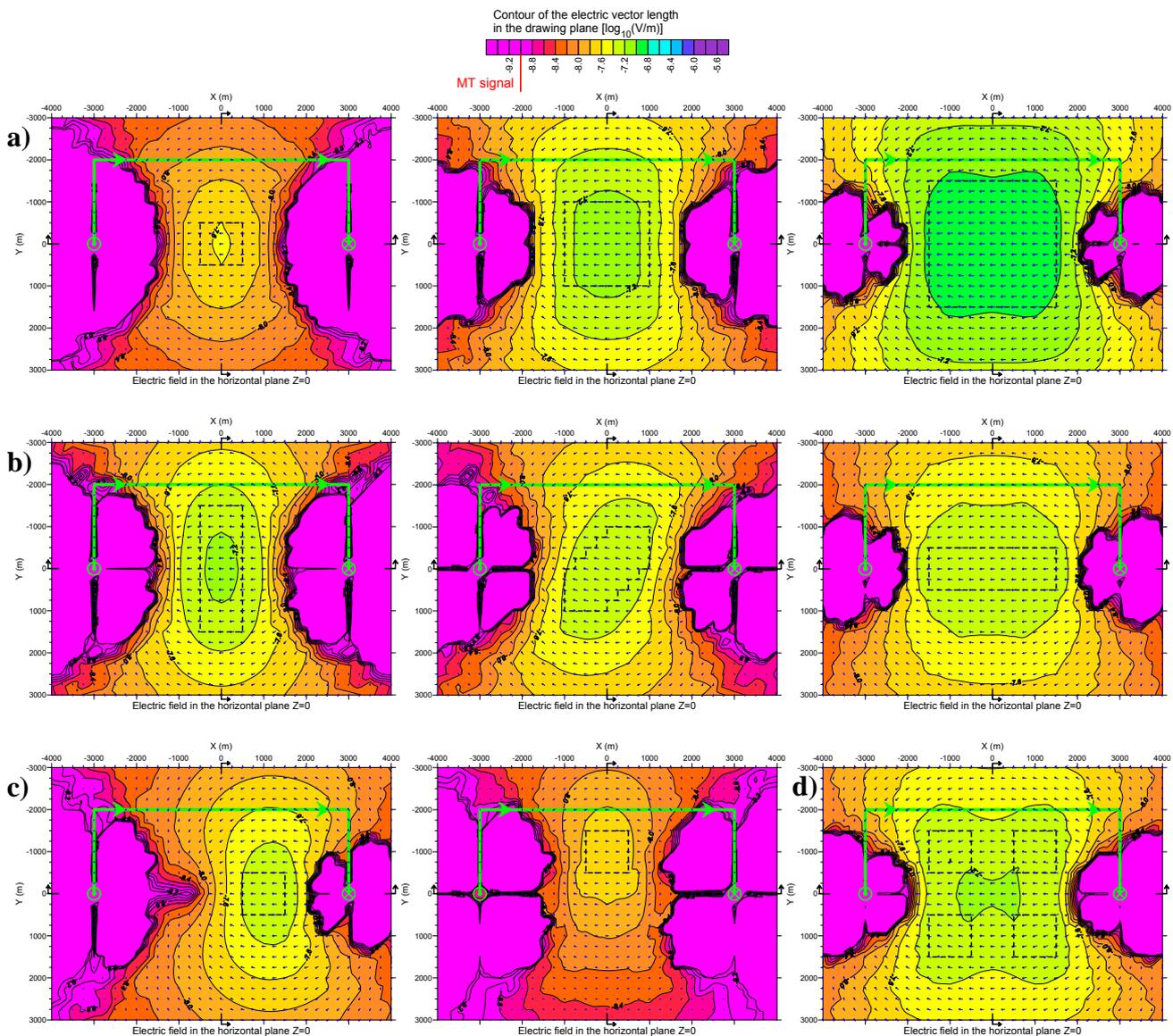


Figure 31 Réponses Time-Lapse sur le champ électrique en phase (à 0.5 Hz) d'un panache de CO₂ de 70 m d'épaisseur, avec une résistivité de 10 Ω.m ($S_{CO_2}=70\%$), confiné dans une couche réservoir de 1 Ω.m à 1700 m de profondeur, en utilisant un dispositif de type LEMAM. Les différents géométries du panache dans le plan horizontal sont des variations : a) de taille, b) de direction, c) de position et d) un panache qui se scinde en 4.

Une rapide revue de cas d'évolution des panaches de CO₂ et leur réponse associée pour un dispositif LEMAM (pour les mêmes conditions géologiques que la Figure 30) est présentée Figure 31 et illustre la bonne sensibilité du dispositif malgré la profondeur du réservoir (1700 m). Les contours colorés représentent l'amplitude de la partie en phase (avec le courant d'injection) en $\log_{10}(V/m)$ pour un courant source de 1A. La réponse du panache de référence (1 km×1 km) présenté en pourcentage dans la Figure 30 est montré en haut à gauche de la Figure 31 et représente environ 5 Mt de CO₂ dans les conditions de l'aquifère du Dogger.

Actuellement, et après 3 ans de travaux répartis sur plusieurs projets, les modélisations ont montré que le dispositif LEMAM est 3 fois plus efficace qu'une injection par électrodes depuis la surface (type rectangle ou gradient). La réponse Time-Lapse d'un panache de 1 km x 1 km x 70 m (~ 5 Mt) est bien au-dessus du bruit MT et d'une erreur de répétition estimée à 1%. De plus, la réponse électrique time-lapse fournit une image directement informative sur la forme et la position du panache de CO₂ en profondeur.

D'autres dispositifs alternatifs sont en cours d'étude, tels que l'utilisation d'un seul casing LEMAM et un retour en surface via un groupe d'électrodes ou l'utilisation d'une injection dipolaire LEMAM en utilisant 2 casings proches (100 m).

Ces prochaines années devraient voir l'aboutissement de ces travaux et leur validation sur des sites d'exploitation, notamment les pilotes on-shore d'injection de CO₂ en Europe.

IV.1.2 CSEM - Volet expérimental

Le volet instrumental, en cours, nécessite d'une part de contrôler l'injection d'un courant de forte intensité dans un forage et d'autre part, consiste à utiliser un équipement de mesure MT tensoriel (système Metronix avec 3 capteurs magnétiques et 2 dipôles électriques) en un certain nombre de stations de mesures réparties sur la zone d'étude (dans un rayon de plusieurs kilomètres).

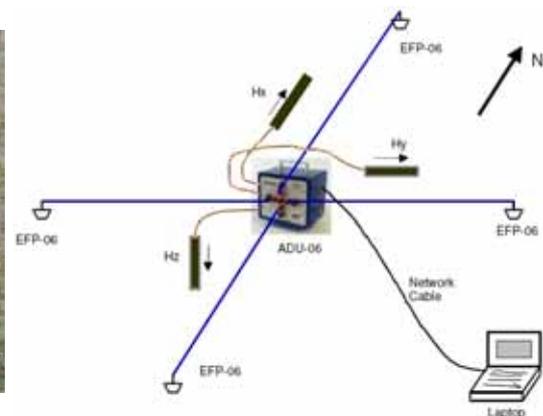


Figure 32 Système de réception (mobile) : 3 capteurs magnétique et 2 dipôles électriques permettent de mesurer les champs en surface

Les procédures numériques de traitement du signal que nous avons développé utilisent la transformée de Fourier pour estimer la fonction de transfert E/I et H/I aux fréquences d'émission (fréquence fondamentale et harmoniques). Le cas échéant (plusieurs séries temporelles) nous employons la méthode de moyenne par les interspectres. Il est à noter que nous avons développé toute la chaîne logicielle de traitement des données, des calculs d'erreurs, de calibrations des capteurs, de repositionnement (GPS différentiel) etc...

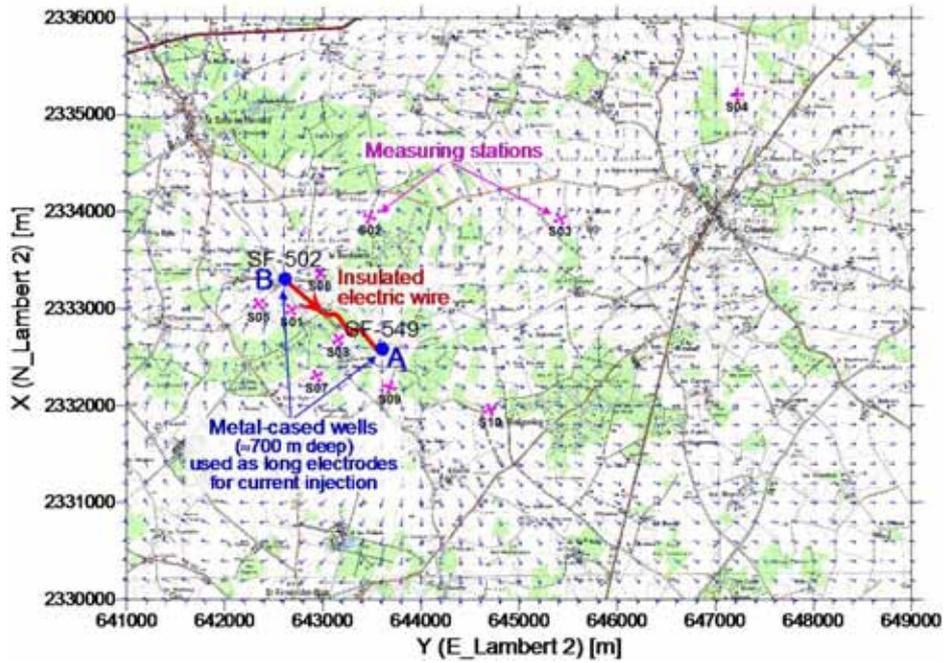


Figure 33 Carte de positionnement de 10 stations de mesure sur le site test près de Château-Renard, avec la permission et le soutien logistique de l'exploitant du champ pétrolier Toréador Energy (France).

Dans le cadre du projet ANR EMSAP CO2, le volet modélisation s'accompagne d'un volet mesures de terrain afin de nous permettre de mettre au point les procédures de traitement et d'estimer le bruit de répétition des mesures. Ce bruit est lié aux erreurs de replacement, changements de capteurs mais surtout des variations des conditions saisonnières, la saturation en eau des sols et les battements de nappe.

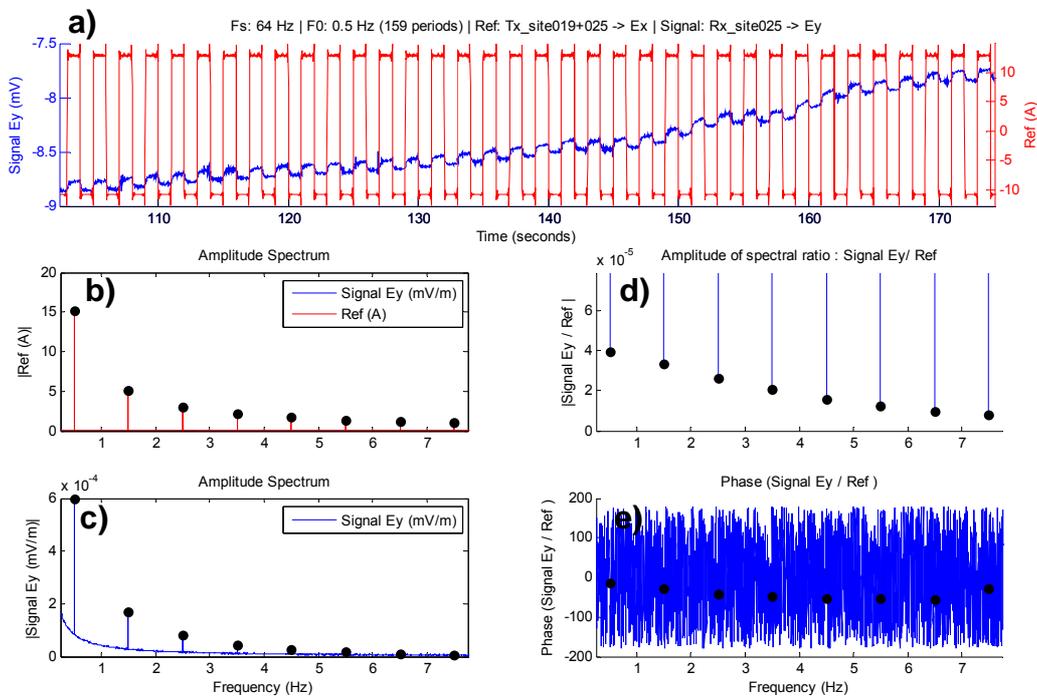


Figure 34 Exemple de traitement d'une voie électrique pour la station n°25 sur le site de Château-Renard : a) séries temporelles du courant injecté (10 A) et du signal enregistré sur un dipôle de 100 m, b) et c) spectres respectifs en fréquence, d) et e) module et phase du ratio E/I. Les points noirs indiquent les mesures aux fréquences de travail (ici : 0.5 Hz, 1.5 Hz, etc...)

Nous avons réalisé en Mars et Septembre 2009 deux campagnes de mesure, et une troisième campagne est prévue en Mars 2010. Notre étude porte aujourd'hui sur le suivi de 30 stations réparties sur toute la zone jusqu'à 5 km de distance du forage d'injection et répétées à des périodes bien contrastées (hiver, fin d'été). Le courant injecté a une forme carrée ($\approx 10A$) et nous injectons généralement à des fréquences allant de 0.125 Hz à 8 Hz. La forme carrée du courant nous permet d'exploiter les harmoniques du signal source jusqu'à 9 harmoniques impaires et présentent une très bonne concordance avec les mesures réalisées sur la fondamentale du signal émis à ces mêmes fréquences. La Figure 34 présente un exemple de traitement d'une voie électrique pour la station n°25 située à une distance de 3 km du forage d'injection le plus proche.

Les travaux en cours devraient être publiés prochainement et ces mesures auront permis de quantifier l'erreur de répétition à prendre en compte dans la mise en œuvre éventuelle d'un tel dispositif de monitoring de stockage du CO₂.



Figure 35 Application du monitoring CSEM du stockage de CO₂ sur le site pilote de Ketzin (CO₂SINK, Allemagne)

Des mesures utilisant deux variantes du dispositif LEMAM ont été réalisées sur le site de Ketzin en Allemagne, où la première expérimentation européenne On-Shore, d'injection de CO₂ a lieu (projet CO₂SINK). Une première campagne de mesure (état zéro) a été réalisée en Août 2008, pour établir un état initial. Une répétition des mesures a été effectuée en Juin 2009 après que >10.000 t de CO₂ aient été injectées. L'étude de la différence des mesures est susceptible d'apporter des informations sur la propagation du CO₂ supercritique dans le réservoir saturé d'eau salée (grès à 800m de profondeur). Nous y avons déployé un dispositif dont le champ électrique en surface est de type dipolaire (utilisant deux forages distants de 110 m, au centre de la Figure 35) et une injection en forage avec un retour en surface à 1 km de distance (câble noir NS, la Figure 35).

Les mesures du champ électrique en surface sont réalisées en utilisant des paires de dipôles de 200m réparties sur 2 cercles à 800 et 1600m de distance du forage d'injection de CO₂ (également utilisé pour injecter le courant). Parallèlement sont réalisées un suivi via une tomographie électrique répétée entre forages (VERA experiment, Helmholtz Centre Potsdam/ GFZ) et un autre via un dispositif de dipôles électriques concentriques en surface (points jaunes sur la Figure 35) couplés à des mesures en forage (en coopération avec l'université de Leipzig). Actuellement, les résultats obtenus dans le cadre du projet CO₂SINK et CO₂ReMove sont encore confidentiels mais seront présentés lors du colloque GHGT10 (Girard et al., 2010) puis publiés.

IV.2 Applications des méthodes de résistivité électriques

Parmi les mesures géophysiques mises en œuvre par le BRGM, les mesures électriques tiennent une place prépondérante au fil de l'histoire du BRGM. Aujourd'hui encore, de nombreux donneurs d'ordre s'adressent au BRGM tout particulièrement lorsqu'il s'agit d'imager des cibles profondes ou dans des conditions de terrain difficiles (îles, Afrique, Inde). J'ai eu l'occasion de réaliser et / ou traiter des campagnes de mesure utilisant des dispositifs de grande tailles (dipôles allant de 50, 100, 200, 400 et même 800 m) ou des dispositifs typiques de la prospection minière (rectangle, mise à la masse). J'ai choisi quelques exemples dont les rapports publics sont disponibles à la diffusion sur www.brgm.fr.

IV.2.1 Ressources hydrologiques et géothermiques

a) La Réunion – (Dipôle – Dipôle grandes tailles)

J'ai synthétisé et traité les données électriques réalisées par mes collègues dans le cadre d'une étude méthodologique (Girard et al., 2008, rapport public BRGM 56612) pour l'imagerie électrique haute résolution des aquifères côtiers en milieu volcanique à la Réunion. L'objectif était de caractériser les aquifères côtiers sur une bande allant jusqu'à 3 km de la côte et jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 300m. Les résultats obtenus par imagerie électrique sont généralement très appréciés.

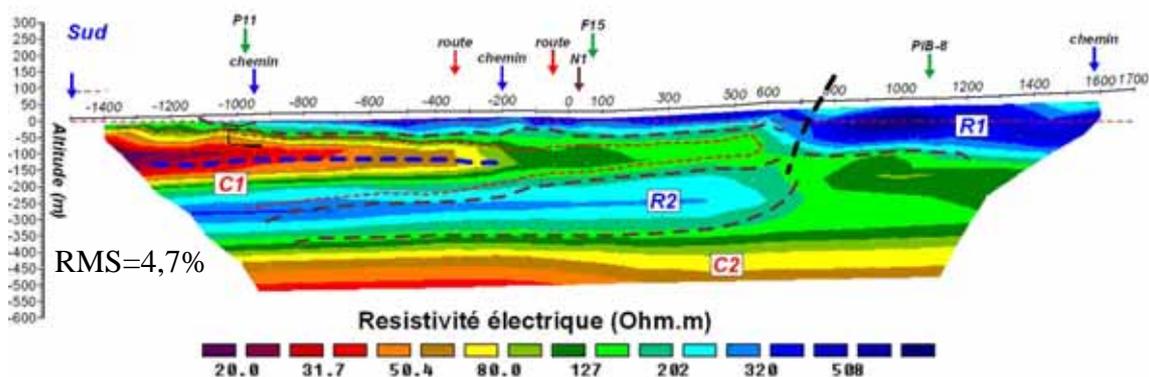


Figure 36 Panneau électrique interprété (inter-électrode 100m) : dipôles 100, 200 et 400 m

Le profil présenté Figure 36 met en évidence des terrains superficiels peu résistants ($\approx 100 \Omega.m$) depuis la côte jusqu'au voisinage du forage P11. Cette faible résistivité est attribuée à des alluvions très argileuses ou à la salinité des terrains de surface ; tandis que dans la partie plus au nord, la résistivité des terrains de surface apparaît plus élevée $> 300 \Omega.m$ attribué à des alluvions moins argileuses (noter que des tufs sont signalés en surface dans F15) et devient l'anomalie R1 plus au Nord.

Une zone nettement conductrice (C2) et présentant un pendage vers l'intérieur des terres est interprétée comme le biseau salé. En raison de la résolution de la méthode et de variations lissées par l'inversion, cette zone conductrice est entourée d'une zone moyennement résistante (comme R1) et le calage au forage P11 nous amène à pointer le toit du biseau salé sur l'iso-valeur $100 \Omega.m$.

Nous intervenons chaque année pour des opérations similaires, plus ou moins profonde, pour la caractérisation des aquifères côtiers en milieu volcanique.

b) Mayotte (Petite Terre) : Modélisation des effets 3D

Un problème récurrent qui se pose lors de l'application de l'imagerie 2D est l'impact d'éléments hors profil (3D) sur la mesure inversée en 2D. Une des principales causes d'effets 3D est la topographie. Pour contraindre les résultats, il est possible de modéliser l'effet de la topographie au voisinage du profil et d'estimer son impact sur les résultats (voire de corriger ces effets sur les mesures).

Dans le cas choisi, les mesures ont été réalisées en injectant un courant électrique de forte intensité (avec un VIP 10.000, Iris-Instruments) nécessaire dans les milieux très conducteurs comme les terrains saturés d'eau salée en bordure de mer. Il est à noter que les dipôles d'injection et de réception ont été permutés (principe de réciprocité) de manière à injecter le courant dans la zone la plus conductrice en surface (au Sud) qui permet d'atteindre les plus fortes intensités. Chaque mesure a été réalisée en utilisant deux valeurs d'intensité de courant (une valeur nominale, et le double). Les courants utilisés sont 5 A et 10 A (ou 2.5 et 5A dans les zones plus résistantes). La valeur retenue est la valeur moyenne V/I mesurée sur 4-5 répétitions. Les tensions mesurées varient entre 18 mV à 0.06 mV avec une valeur moyenne autour de 1 mV. Les répétitions sont stables.

Longueurs des dipôles	Level	Nombre de mesures
200	1,2,3,4,5,6	141
400	1,2,3,4,5,6	69
800	1,2,3	16
Total		226

Tableau récapitulatif des mesures

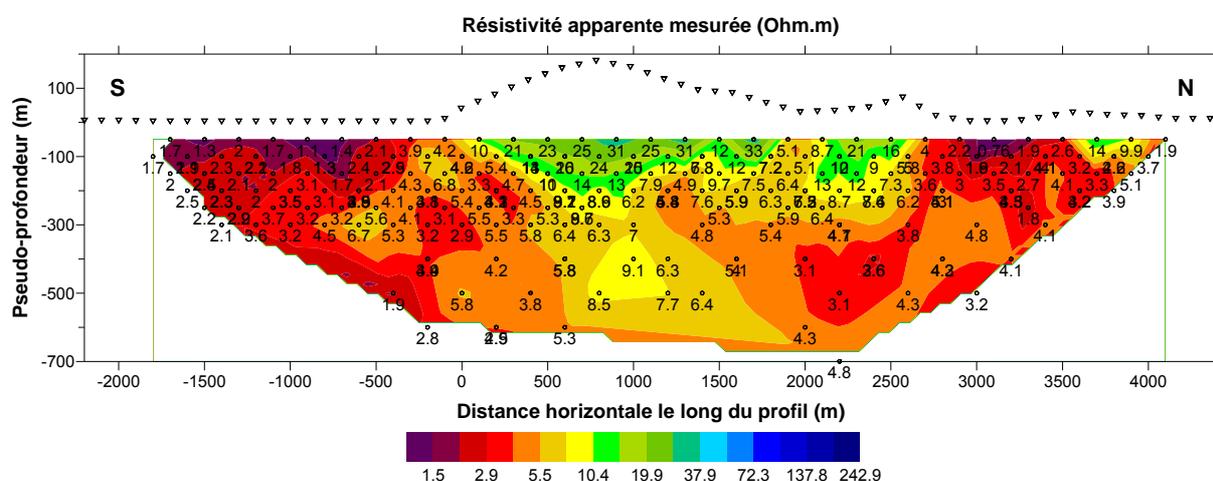


Figure 37 Mayotte (Petite Terre) : données mesurées, pseudo-coupe de résistivité apparente ($\Omega.m$)

Le profil complet (regroupant les mesures de 2007 et 2008) est finalement composé de 226 mesures (Figure 37).

En théorie, les mesures 2D sont réalisées le long d'un profil (rectiligne idéalement) et perpendiculaire aux structures étudiées. Les différentes positions des dipôles permettent de réaliser une tomographie en deux dimensions des variations de résistivité électrique en profondeur sous le profil. Cependant, bien que prises dans leur ensemble les mesures soient focalisées sur les variations sous le profil, chaque mesure est également sensible aux variations latérales autour du profil (effets dits 3D) qui peuvent être faussement interprétées lors de la tomographie 2D. Par exemple, si le profil se rapproche de la mer, les mesures les plus profondes (qui sont également sensibles aux effets latéraux les plus lointains) vont être influencées par la présence de la mer (très conductrice) et pourraient être interprétées comme la présence d'un conducteur profond.

Afin de retirer les effets « hors profil » de la mer et de la topographie (Figure 38), nous avons modélisé en trois dimensions la topographie de l'île et la bathymétrie dans une zone centrée sur le profil, de 4 km de large (E-W) et 10 km de long (N-S). Les données de bathymétrie ne couvrant pas le plateau à faible profondeur (<200 m), les données manquantes ont été extrapolées de manière à faire apparaître un plateau avec une limite abrupte assez réaliste (par rapport à la limite du plateau représentée sur la carte IGN).

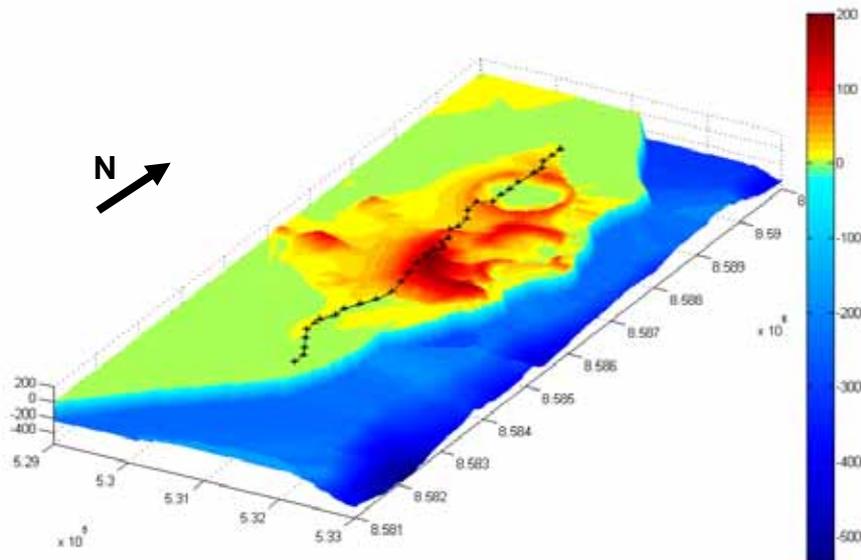


Figure 38 Vue 3D du profil réalisé, de la topographie de l'île et de la bathymétrie (extrapolée), le codage en couleurs correspond à l'altitude (m).

Le modèle 3D est composé d'un maillage carré en horizontal. Au niveau de l'île, la surface est déformée pour prendre en compte la topographie. La surface de la mer est prise constante égale à l'altitude zéro et la variation du fond de la mer est rendue par un maillage en « marches d'escalier ». La variation réelle de l'épaisseur de la couche d'eau conductrice étant abrupte, le faible nombre de cellules en vertical altère peu le réalisme du modèle.

Une valeur constante de résistivité a été associée à l'eau de mer (0.2 Ohm.m) et une autre à la roche (5 Ohm.m) de manière à faire apparaître un fort contraste de résistivité entre les deux milieux. La réponse de ce modèle 3D a été calculée pour chacun des 226 quadripôles, et normalisée sous forme de résistivité apparente ($\rho_{\text{modèle}}$), pour une résistivité constante du substratum ($\rho_0=5$ Ohm.m). Les données mesurées sur le terrain (ρ_{mesures}) ont été corrigées ($\rho_{\text{corrigées}}$) suivant la formule suivante :

$$\rho_{\text{corrigées}} = \frac{\rho_{\text{mesurées}}}{\rho_{\text{modèles}}} \times \rho_0$$

La correction de l'effet 3D de la mer et de la topographie peut s'exprimer en pourcentage suivant une formule qui est indépendante des données de terrain (mais dépend de la géométrie d'acquisition, de la topographie, etc...) :

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\text{corrigées}} - \rho_{\text{mesurée}}}{\rho_{\text{mesurées}}} \times 100 = \left(\frac{\rho_0}{\rho_{\text{modèle}}} - 1 \right) \times 100 \text{ (en \%)}$$

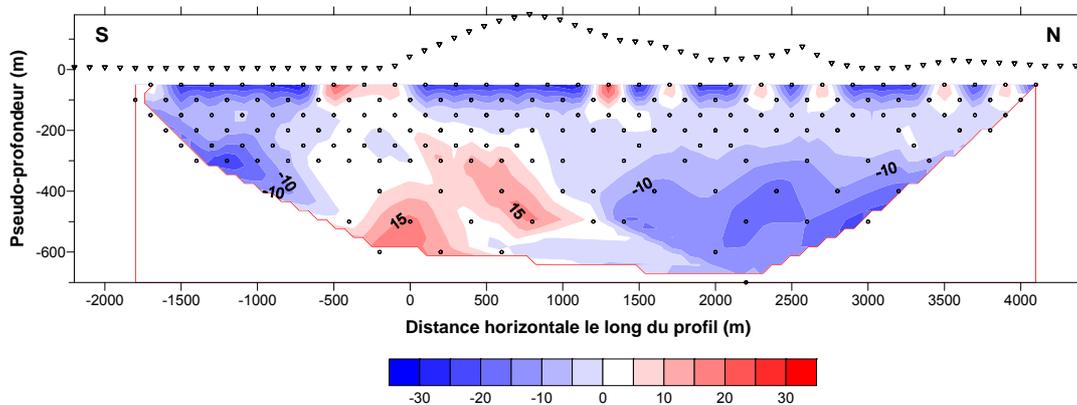


Figure 39 Correction de l'effet 3D (mer + topographie) sur le profil de résistivité apparente mesuré (en %) : en rouge, correction positive

On note que les effets les plus forts sont de l'ordre de +/- 15%, ce qui est faible au vu des contrastes recherchés (jusqu'à 1 ordre de grandeur).

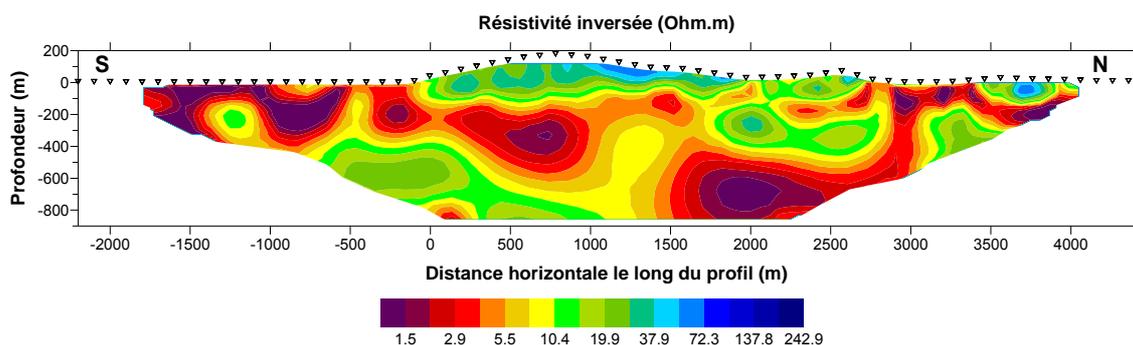


Figure 40 Résultat d'inversion 2D après correction des effets 3D

Je renvoie le lecteur au rapport de Sanjuan et al., 2008 (rapport RP56802) pour une analyse détaillée des résultats géophysiques et géochimiques. La corrélation entre la modélisation des effets latéraux dus à la mer et la topographie de l'île et le résultat d'inversion des données de terrain est très faible, et ne pousse pas à suspecter ces effets comme pouvant être à l'origine des anomalies électriques observées.

c) Prospection géoélectrique du Puy de la Nugère, Volvic, France

Nous avons été sollicités pour réaliser un profil électrique qui permette de mettre en évidence la morphologie accidentée du substratum granitique (socle) à l'aplomb du Puy de la Nugère. Reconnu par sondage à quelques dizaines de mètres de profondeur en périphérie du Puy de la Nugère, d'autres ouvrages n'ont pu l'atteindre et semblent montrer le plongement du socle sous ce volcan (Figure 41).

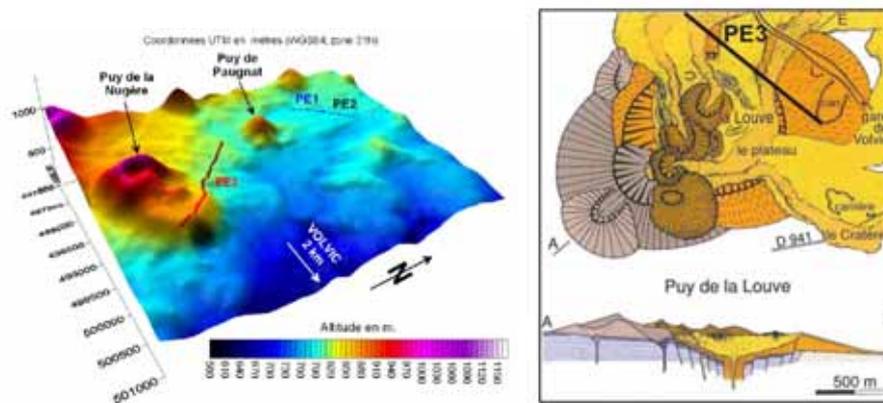


Figure 41 Localisation des panneaux électriques PE1, PE2 et PE3 sur le modèle numérique de terrain (90m). et extrait du schéma géologique du Puy de la Nugère (tiré et modifié d'après Boivin et al., 2009, Volcanologie de la Chaîne des Puys, Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne. 5th édition.

Nous avons réalisé un profil de 2200m de long, et utilisé un dispositif dipôle dipôle de 50, 100, 200 m. La profondeur atteinte estimée est de l'ordre de 150 m. Les conditions de mesures étaient délicates puisque outre une topographie accidentée (mais faible à l'échelle du profil) il s'agissait d'injecter un courant électrique suffisant pour réaliser des mesures fiables, à travers plusieurs dizaines de mètres de basalte très compact et peu fissuré dans l'ensemble. Si les résultats de l'étude sont aujourd'hui confidentiels, le donneur d'ordre est favorable à une prochaine diffusion publique (rapport confidentiel pour le groupe Danone, Coppo et Girard, 2009).

IV.2.2 Friches industrielles (ERT – SIP)

Dans le cadre du programme Européen Hygeia (2001-2004), plusieurs approches multi-méthodes géophysiques ont été mises en œuvre sur des zones de friches industrielles pour identifier des sources de pollutions massives (mares à goudron, zone de stockage) et cartographier l'extension de panaches de pollution ou des chemins préférentiels d'écoulement (chenaux).

La plupart des pollutions massives se traduisent par une modification de la conductivité électrique du milieu pollué, bien souvent en milieu humide voire saturé. Dans le cadre du projet Hygeia, nous avons utilisé des dispositifs d'acquisition de type prospection minière (méthode rectangle, mise à la masse) pour cartographier les anomalies de résistivité électrique. Ces informations spatialisées ont été couplées à des profils de tomographie de résistivité électrique pour obtenir une information en profondeur afin d'estimer les volumes concernés.

La prospection par méthodes électriques (tomographie 2D, mise à la masse, rectangle) a été appliquée sur plusieurs sites : sables désaturés en Hollande (Weert), argile et craie (Monchecourt), argile au niveau de la mer (Mestre).

Les résultats ont été vérifiés sur un site en partie excavé (France) et un autre contrôlé par des sondages géotechniques : les cartes de potentiels spontanés ont montré dans plusieurs environnements géologiques une corrélation avec les variations de pH, et avec les teneurs en CO₂ obtenues par des mesures de gaz in-situ avec des spectromètres en phase gazeuse.

Ces travaux concernent principalement le workpackage WP9 du projet Hygeia, à diffusion restreinte en raison du caractère confidentiel des sites privés étudiés. Une partie des résultats a néanmoins été présentée dans des congrès (Gourry et al. 2005, Béhaegel et al. 2004).

Le résultat le plus innovant a été la mise en œuvre de mesure de polarisation provoquée spectrale (précision de l'ordre de quelques milli-radians) à l'échelle du terrain en profils. Un travail préalable de test du couplage électromagnétique (champ électrique induit qui se superpose au phénomène de polarisation) s'est montré favorable tant d'un point de vue modélisation que sur le terrain.

Les mesures en domaine temporel (chargeabilité) se sont révélées très perturbées alors que l'utilisation en domaine fréquentiel (système Zonge) ou dit de résistivité complexe (CR ou SIP) s'est révélé exploitable jusqu'à 10 – 20 Hz environ et a permis d'identifier des anomalies de chargeabilité au niveau de pollutions massives aussi variées que des organo-chlorés ou des goudrons dégradés (carbone organiques) alors que la résistivité électrique ne varie pas ou peu.

Les phénomènes physiques bien que largement étudiés en laboratoire (jusqu'à des fréquences bien plus élevées que celles employées sur le terrain) ne sont pas accompagnés par une bibliographie importante sur le sujet. La faute en incombe aux difficultés de métrologie (couplage électromagnétique, présence de métaux sur des sites souvent remblayés, etc...) et d'interprétation.

Néanmoins, nos travaux sur sites ont permis de montrer la pertinence de l'utilisation de la résistivité complexe pour les problématiques environnementales et son utilisation avec des dispositifs de cartographie de type mise à la masse. Pour des applications particulières, j'ai mis au point un modèle numérique basé sur le schéma classique en volumes finis décrit par Dey et Morrison (1977). La méthodologie continue aujourd'hui d'être développée au BRGM dans le cadre de projets de recherche (projets PRECODD et Ecotech).

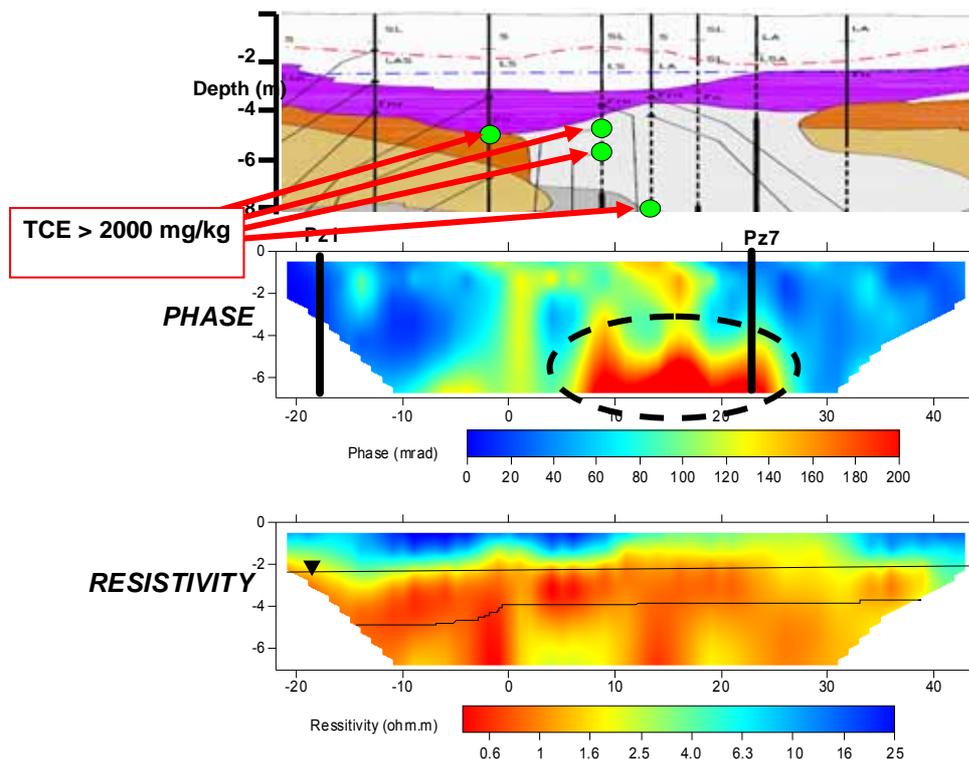


Figure 42 Exemple d'anomalie de phase (ici, à 30 Hz) corrélée avec la présence massive et ancienne de Trichloroéthylène dans un milieu de chenaux creusés dans les argiles (lagune).

Il est à noter que deux stages ingénieurs de l'EOST ont été encadrés sur cette thématique, B. Riwier (2004, Mesures et modélisation 2D/3D de polarisation spectrale et temporelle pour la reconnaissance de pollution par hydrocarbures) et M. Béhaegel (2003, Détection de pollutions organiques par Polarisation Provoquée Spectrale et Potentiel Spontané).

IV.3 Le Géoradar

Durant 3 ans au sein du laboratoire de proche-surface de l'EOST, mes travaux de thèse ont porté sur l'utilisation du géoradar et du traitement des signaux électromagnétiques. Cela m'a amené à développer des techniques de modélisation et d'inversion aussi bien en domaine fréquentiels que temporels (différences finies).

Ces travaux ont reçu un bon accueil de la part de la communauté scientifique lors des nombreuses communications dans des congrès internationaux. Les applications sont l'estimation des paramètres diélectriques du sous-sol, la reconstruction des géométries des interfaces, l'étude de la variation de la teneur en eau, la propagation d'ondes radar en milieux dispersifs ...

Ces travaux ont été présentés le 18 décembre 2002, lors de ma soutenance de thèse à l'université de Strasbourg. Le jury était composé de M. Dietrich du LGIT-Grenoble, M. Marquis et M. Bano de l'EOST, M. Grandjean du BRGM et M. Gibert de Géosciences-Rennes.

Ces travaux se sont poursuivis dans le cadre d'une collaboration avec l'EOST et M. Bano, soutenu notamment par le projet INSU – PNRH WATERSCAN (2005-2007).

IV.3.1 Principaux résultats

Le géoradar est une technique couramment utilisée pour prospecter le proche sous-sol. Des ondes électromagnétiques à hautes fréquences (>10 MHz) sont émises dans le sol et les échos enregistrés traduisent les contrastes de permittivité diélectrique entre les différents milieux. Cela permet d'imager les changements de lithologie, des états de fracturation différents, des variations de teneur en eau...

Dans ces milieux diélectriques, l'onde perturbe les distributions de charges électriques liées et induit une polarisation qui à son tour influe sur l'onde et déforme le signal.

1/ En accord avec les mesures sur échantillons, nous utilisons une loi puissance de la susceptibilité électrique en fonction de la fréquence pour caractériser cette dispersion. Avec une telle sensibilité aux différents matériaux et une résolution allant de quelques centimètres à plusieurs décimètres, le traitement des données requiert la prise en compte de la forte hétérogénéité des milieux étudiés. C'est pourquoi nous avons développé un algorithme de modélisation par différences finies en domaine temporel et généralisé l'emploi d'une convolution récursive pour les milieux dispersifs. Nous avons également implémenté d'une façon originale des conditions limites de type "perfect match layer".

2/ L'analyse des coefficients de réflexion nous a permis de valider l'hypothèse qu'une faible variation de la teneur en eau pouvait expliquer la présence des réflecteurs à l'intérieur d'une dune de sable. Nous avons aussi exploité le contenu fréquentiel des signaux en calculant les rapports spectraux entre des signaux réfléchis à différents offsets pour estimer la permittivité diélectrique. (Bano et Girard, 2001).

3/ Ces valeurs des paramètres et la prise en compte des variations de la teneur en eau servent ensuite à modéliser des situations réalistes. En dernier lieu, nous avons utilisé avec succès le même code de différences finies, en renversant le temps, pour rétro-propager le champ enregistré.

Durant sa thèse à l'EOST (2002-2005), M. Loeffler a utilisé les codes développés pendant ma thèse et a confronté le modèle numérique à une expérience contrôlée (en cuve) de l'infiltration de fuel dans un sable (Figure 43). Les résultats ont été publiés en 2009 (voir en annexe, Bano, Loeffler et Girard, 2009).

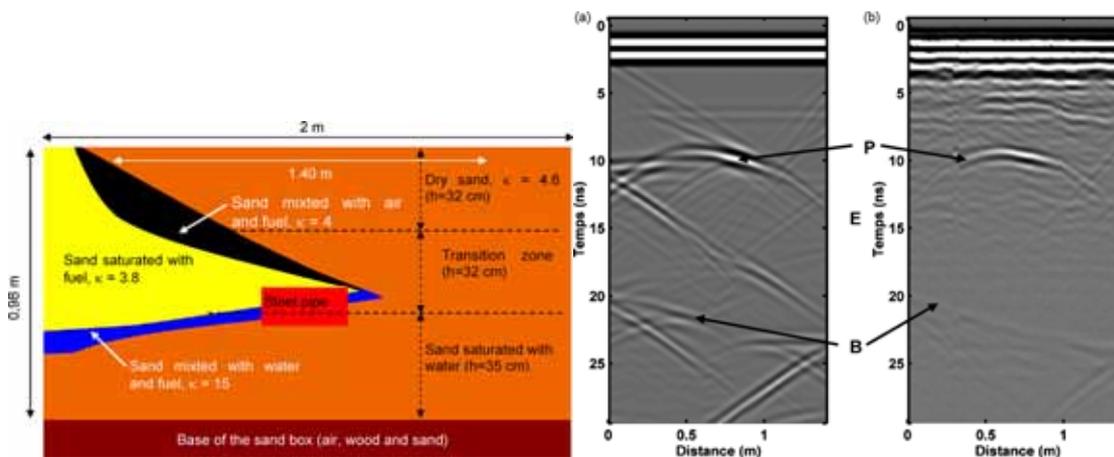


Figure 43 Modèle conceptuel (a) utilisé dans les simulations (b) du profil GPR mesuré (c) sur la cuve 12 jours après l'injection de fuel. P et B indiquent les réflexions sur le tube en acier et la base de la cuve.

Ces travaux ont mis en évidence la pertinence des paramètres géométriques (temps de trajets, réflexions, etc...) directement quantifiables à partir des enregistrements radar. La caractérisation de l'atténuation est elle plus problématique. Le programme de modélisation 3D que j'ai développé permet de prendre en compte les milieux dispersifs. Le couplage de ce type d'expérience en cuve avec des dispositifs de mesure de la permittivité en fréquence (lame quart d'onde par ex.) permettraient d'aller plus avant dans la caractérisation de la signature radar de la présence de polluant comme le gasoil.

IV.3.2 Applications à la Paléo-sismologie

Durant ma thèse, j'ai collaboré avec l'équipe de sismo-tectonique de l'EOST pour mettre les moyens géophysiques d'étude de la proche-surface au service de la recherche des failles actives. J'ai participé en 1999 à une campagne au Portugal de recherche de la faille responsable du séisme historique de Lisbonne. De même, nous avons à nouveau collaboré dans le cas de la faille de Bâle en 2000. Il s'agit d'un problème ardu car ces failles sont très lentes, sub-horizontales et engendrent de faibles

déplacements verticaux (métriques à décimétriques parfois) ce qui réduit les indices topographiques qui servent généralement à les détecter. Nous sommes donc régulièrement sollicités pour des campagnes d'acquisition pour des études structurales ou l'étude d'objets sédimentaires (Ferry et al. 2004).

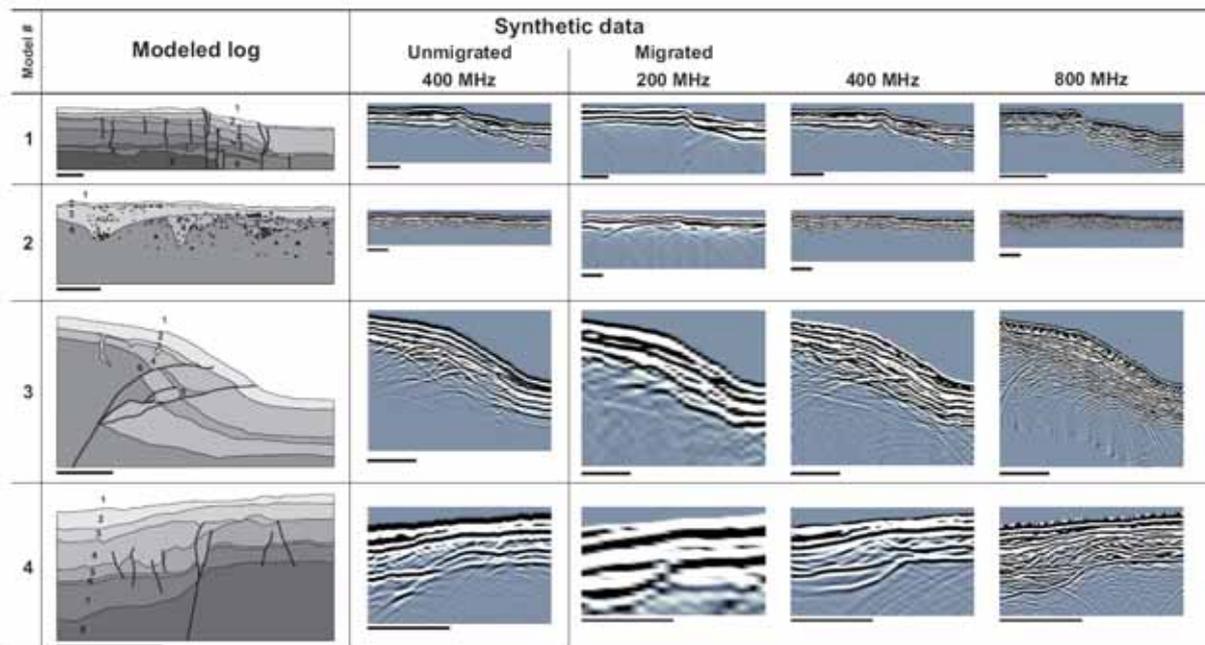


Figure 44 Pertinence de l'utilisation du géoradar pour la prospection des failles actives : simulation de cas à partir de tranchées réelles, par différences finies à 200, 400 et 800 MHz, images résultats migrées et non migrées.

Afin de mieux exploiter les performances du géoradar pour imager ces structures superficielles, j'ai réalisé avec M. Ferry une série de modélisations s'appuyant sur des cas réels d'études de failles actives. La Figure 44 montre quatre cas où la géométrie décrite à partir des observations en tranchées a été complétée par l'association de valeurs de résistivité électrique (contrôlant l'atténuation des ondes) et de permittivité diélectrique (vitesse des ondes).

On trouve qu'une fréquence centrale de l'ordre de 400 MHz est un bon compromis entre résolution et profondeur de pénétration. Ces exemples soulignent l'importance de la mesure de la topographie et de l'impact de la migration avant d'estimer des pendages.

IV.3.3 Application la sédimentologie et les Paléo-climats

Au cours de mon doctorat à l'EOST, j'ai développé une collaboration avec des collègues sédimentologues de l'institut de géologie de Strasbourg. Cette collaboration se poursuit encore actuellement au travers de deux activités.

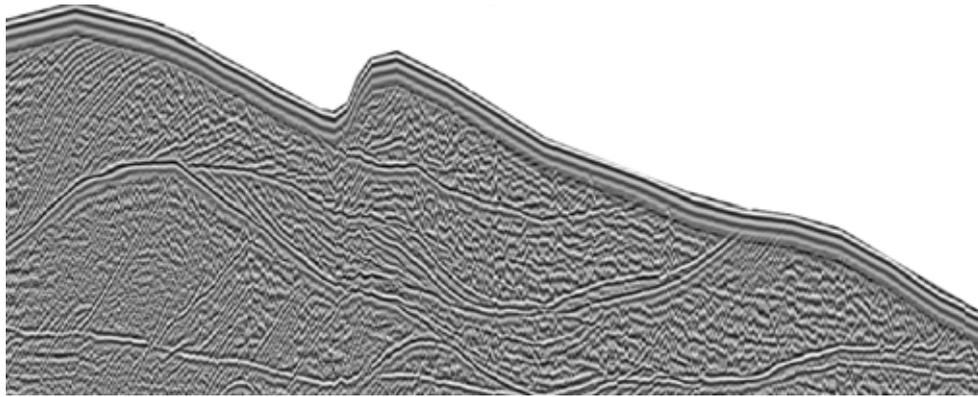


Figure 45 Imagerie par géoradar (450 MHz) d'une dune éolienne au Tchad (10m de haut, 100m de long)

La première en termes d'expertise en prospection géophysique : préparation des missions en Afrique, optimisation des dispositifs à utiliser selon les cibles géologiques visées, ainsi que du traitement des données et de leur interprétation.

La deuxième activité concerne la modélisation numérique de la dynamique de remplissage du plus grand paléo-lac saharien (le méga-lac Tchad) en fonction de divers paléo-scénarios climatiques. Je collabore sur ces sujets avec M. Schuster (CNRS, Université de Poitiers), sédimentologue spécialiste des paléoenvironnements du bassin du lac Tchad. Il participe dans le cadre de la Mission Paléanthropologique Franco-Tchadienne à l'étude des milieux d'émergence et d'évolution des hominidés anciens (*Australopithecus bahrelghazali* et *Sahelantropus tchadensis*) et à la reconstruction de la dynamique des paléoenvironnements de ce bassin au cours des derniers 10 Ma. J'ai apporté mes compétences en modélisation numérique afin de réaliser ensemble une simulation numérique de l'évolution du remplissage du lac Tchad basée sur ses hypothèses. Ces travaux ont été repris et largement raffinés (Sepulchre et al., 2008).

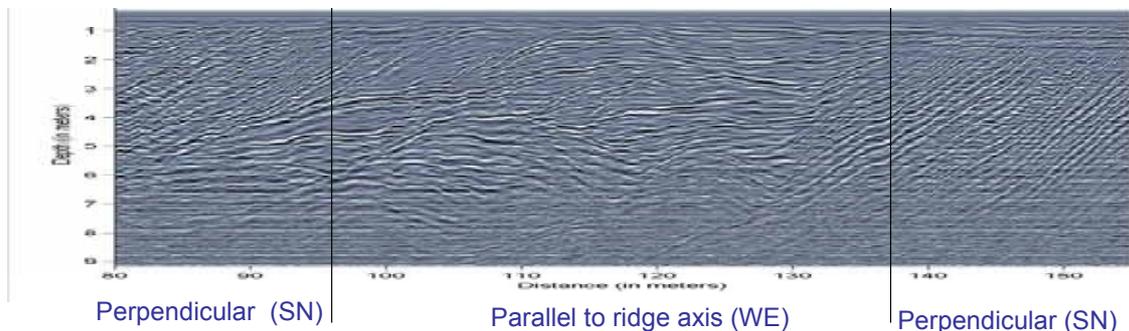


Figure 46 Profil Géoradar en travers d'un dépôt fluvio-glaciaire en Norvège : profil en ligne brisée, successivement parallèle à la direction de dépôt (SN) puis transverse (EW) montrant la structure en chenaux, puis à nouveau SN.

Je retrouve actuellement la problématique de l'imagerie des dépôts sableux dans le cadre d'une étude sur une moraine en Norvège (2009) où les images GPR permettent d'illustrer et de contribuer à quantifier l'anisotropie de conductivité hydraulique dans une telle structure. Cette information géométrique va être utilisée pour caractériser les fonctions géostatistiques qui vont servir à générer la distribution des valeurs de perméabilités dans un modèle hydrogéologique de cette moraine (projet CO2FieldLab, 2010-2013).

V. PROJET DE RECHERCHE ACTUEL ET FUTUR

RMP

Le développement de la méthode RMP est aujourd'hui à un nouveau tournant de son évolution. La conception puis la diffusion de systèmes de mesure multi-voies ouvre la voie à des progrès significatifs en termes de rapport signal sur bruit et de temps d'acquisition des mesures. Des zones où il était jusqu'ici impossible (ou très coûteux en temps d'acquisition) d'appliquer la RMP vont devenir de nouveaux champs d'applications. Si j'ai eu le privilège de participer à la mise au point du premier prototype, et donc de réaliser les premières exploitations de ces nouvelles performances, il reste à explorer de nombreuses pistes dont on ne sait jusqu'où elles nous conduiront. Les progrès dans la qualité des mesures et le temps d'acquisition vont permettre de disposer de jeux de données plus denses et donc rendre l'approche par tomographie incontournable. Nous verrons dans les années qui viennent si la RMP va connaître des progrès aussi significatifs que les méthodes électriques lors du passage aux systèmes de commutation automatique et multi-voies dans les années 1990 et 2000.

La compréhension de la réponse RMP dans les différents milieux géologiques et la calibration de cette réponse en termes hydrogéologiques propose de nombreux défis. Notamment, la mesure RMP dans les milieux magnétiques via la combinaison de mesures par séquence standard (mesure du signal de précession libre) et via les séquences telles que celle de l'écho de spin ouvre de nombreuses perspectives tant dans le domaine de la mesure, que pour la modélisation et son utilisation dans les zones volcaniques par exemple.

Je compte poursuivre mes travaux sur le couplage des méthodes géophysiques. Les premiers travaux ont montré la pertinence de l'approche par inversion jointe, et leur passage en 2D ou 3D est tout à fait envisageable tout particulièrement pour les méthodes géo-électriques et RMP. Bien entendu, d'un point de vue immédiatement opérationnel mais jusqu'ici peu employé, la fusion de données géophysiques est réalisable via les méthodes de logique floue (Grandjean et al. 2008) et de classification (par exemple par réseaux dits de neurones sur lesquels j'ai réalisé mon DEA et diplôme de fin d'études en 1999).

CSEM et méthodes électriques (ERT, SIP)

Les travaux méthodologiques sur l'utilisation de la méthode CSEM, que j'ai présenté dans ce mémoire, vont être complétés par la publication de l'analyse des résultats obtenus sur les deux sites d'étude (en France et en Allemagne). Cette analyse, actuellement en cours, montre déjà que la qualité de la mesure nécessaire pour interpréter les phénomènes recherchés est techniquement réalisable, et nous améliorons à chaque campagne le protocole de mesure.

Il est important de noter que cette méthode recouvre en fait de nombreuses variantes du dispositif de mesure. L'originalité qui repose sur l'injection de courant dans un forage ou par le casing d'un forage associé à une cartographie de la réponse électrique et magnétique en surface à plusieurs fréquences, peut également servir à l'étude d'autres cibles que les panaches de CO₂ ! Des travaux en ce sens ont été menés à l'université de Berkeley pour suivre l'avancée d'un panache salin dans un aquifère à 30 m de profondeur (Tseng et al. 1998). Les cibles potentielles sur lesquelles peut être utilisée la méthode que nous avons développée sont nombreuses, et l'on pourra citer l'avancement de biseaux salés, des traçages salins dans des aquifères superficiels, ou le suivi de panaches de pollution présentant un contraste électrique.

MODELISATION COUPLEE

Il est généralement admis qu'une expérience de suivi de l'évolution temporelle et spatiale des paramètres physico-chimiques au sein d'un milieu poreux est un problème qui nécessite de mesurer et d'exploiter conjointement des données de sources différentes. La nécessité d'une approche multi-méthode est renforcée par la complexité et l'unicité de chaque site d'étude. Mais cela signifie d'être capable d'intégrer des paramètres d'une grande variabilité : en termes de nature (géologie, géophysique, champ de pression hydraulique, chimie des eaux,...) de représentativité spatiale

(prélèvements, mesures ponctuelles, et tomographies géophysiques) et en termes de variabilité temporelle de chaque mesure.

Ce que je décris n'est finalement que le travail de synthèse auquel est confronté un groupe de spécialistes de divers domaines attelés à comprendre les mécanismes à l'œuvre dans le milieu étudié. Il est nécessaire que chacun souligne les paramètres les plus pertinents et l'objectif final est l'établissement d'un modèle conceptuel qui explique au mieux les variations observées. Quand bien même on dispose de modèles numériques, ceux-ci sont quasiment toujours spécifiques à une méthode (simulation d'écoulement, de la chimie, de la réponse électrique, etc...) et il est donc difficile de concilier prédictions quantitatives et respect des contraintes entre les différents types de mesures. Ce modèle conceptuel est donc bien souvent qualitatif.

Du point de vue des méthodes électromagnétiques (depuis les mesures en champ statique jusqu'aux mesures radar) et RMP, on dispose de lois (Archie, Topp, etc...) qui permettent de relier les paramètres géophysiques (résistivité électrique, permittivité diélectrique, teneur en eau RMP et temps de relaxations) aux paramètres de la matrice poreuse (porosité, perméabilité) et du contenu en fluide (saturation, conductivité).

Les progrès en termes de maillage en 2D / 3D et de puissance de calcul permettent la résolution numérique de systèmes physiques sur des géométries complexes. Il est aujourd'hui possible de réaliser concrètement des couplages entre modélisation hydrodynamiques et réponse géophysique par exemple. La difficulté de l'opération réside toujours au niveau de la capacité du spécialiste à identifier les phénomènes dominants afin de garantir la stabilité du couplage et la validité des résultats du modèle. Mais avec un tel modèle, on peut non seulement réaliser des modélisations prédictives quantitatives, mais il apparaît très vite que des effets de couplage, négligés lors de modélisation en parallèle, modulent voire domine les résultats.

Je me suis engagé dans cette démarche en 2009, dans le cadre du suivi du stockage géologique du CO₂. Avec mes collègues (Leroy, Audigane, Rohmer, Bourgeois) du BRGM regroupant des compétences en chimie, hydrologie, modélisation, géophysique, nous avons réalisé une première étude de couplage entre modélisation du transport réactif et réponse du paramètre résistivité électrique.



Figure 47 Paramètres du modèle utilisé pour calculer l'évolution de la minéralisation dans un aquifère calcaire (Andre et al., 2007) au cours d'une injection de CO₂. Le transport réactif est calculé à l'aide de TOUGHREACT (Xu and Pruess, 2001 et 2005).

Dans le cas de l'injection de CO₂ à l'état supercritique dans un milieu carbonaté ont lieu des réactions de précipitation et de dissolution qui vont affecter l'injectivité dans ce réservoir mais également influencer sa capacité de piégeage. De nombreux travaux de modélisation de ces effets sont conduits actuellement de par le monde, et nous nous appuyons sur les travaux de André et al (2007), réalisés au BRGM pour calculer la variation temporelle et spatiale de la minéralogie dans le cas du Dogger (Figure 47).

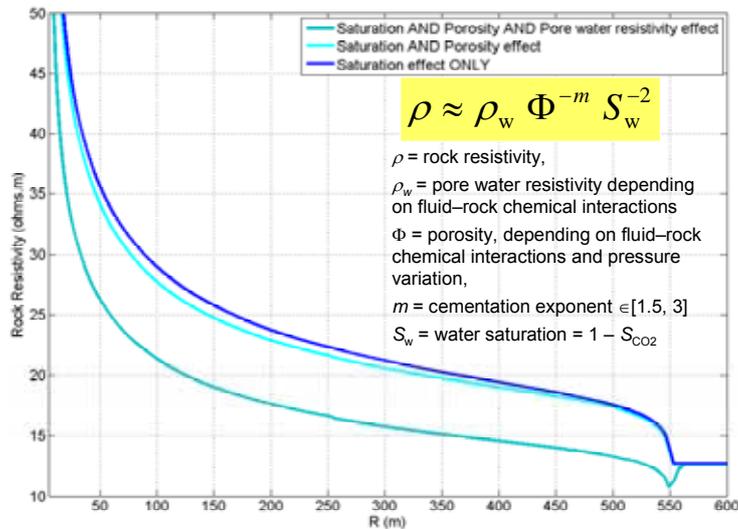


Figure 48 Travaux préliminaires sur le calcul de la variation de la résistivité électrique en fonction de la distance au forage, après 10 ans d'injection de CO₂ supercritique dans un aquifère calcaire, en tenant compte des variations de la saturation en CO₂, de la porosité et de la conductivité de l'eau liées aux phénomènes de précipitation / dissolution.

Les résultats du modèle de transport réactif fournissent la saturation en CO₂, les concentrations ioniques, la porosité, la pression, température etc... Il nous est alors possible de calculer la conductivité électrique de l'eau à partir des concentrations ioniques en tenant compte des mobilités ioniques à ces conditions de pression et température. A partir de là nous avons calculé la résistivité de la couche aquifère utilisant ces paramètres physico-chimiques dans la loi d'Archie généralisée (Figure 48). Dans cet exemple, je soulignerai ici deux points.

Tout d'abord, on observe que la variation de la porosité affecte peu la résistivité tandis que la saturation en CO₂ (qui est le seul paramètre généralement pris en compte dans tous les travaux de modélisation de la réponse géophysique dans la littérature sur le monitoring du stockage de CO₂) contrôle la variation de résistivité en fonction de la distance au forage. Le deuxième point est que la variation de la conductivité de l'eau de la formation atténuée de près de 20% la variation de la résistivité : l'augmentation de la résistivité lié à la désaturation en eau est en partie compensée par une augmentation de la conductivité de l'eau liée aux phénomènes de dissolution. Ces résultats sont dépendants de nombreux paramètres géologiques et seraient très différents dans des grès ou d'autres formations.

Il faut noter que cet exemple, bien qu'appliqué au stockage géologique du CO₂, fait appel à des moyens de mesure et de modélisation qui sont les mêmes que ceux employés pour suivre les variations au sein d'un hydro-système avec deux zones saturée et non-saturée, les biseaux salés, les pollutions d'aquifère de surface, etc. Le développement de cette approche trouve donc des applications dans tous les domaines des géosciences. Bien entendu, les méthodes les plus pertinentes pour chaque problématique varient mais la gamme des méthodes géophysiques est large et les progrès à venir dans chacune de ces méthodes permettront d'envisager de nouvelles applications.

Je souhaite que cette première étude en préfigure de nombreuses et que cela ouvrira de nouvelles collaborations dans les années à venir.

V.1 Collaborations

Grenoble – **IRD/LTHE** : Legchenko A. (MRS) Descloîtres M. (TDEM), Vouillamoz J-M. (MRS & hydro)

Strasbourg – **EOST** : Marquis G. (EM), Salliac P. (Hydrogeophysics), Bano M. (GPR)

Paris – **Sisyphé** : Guérin R. (Geophysics) et Plagnes V. (hydrology, karst)

Paris – **IPGP** : Mainault A. (Geophysics, SP & ERT)

Montpellier - **BRGM** EAU: Dorfliger N. (Hydrology, karst)

Danone - Lachassagne P. (Hydrology)

Univ. Poitiers – CNRS : Schuster M. (GPR & Paleo-climates)

Univ. Orléans – Chen Y. (Géomagnétisme)

Univ. Bordeaux **RMSB** : Baril N. (Lab. NMR)

Univ. Berlin (Allemagne) – **TUB** : Braun M. (MRS),

LIAG (Allemagne) – prof. U. Yaramanci

ETH Zurich (Suisse) : Hertrich M. (MRS)

IGP (Canada) : Roy J. (MRS & geophysics)

IGME (Spain) Plata, Juan L. (Geophysics)

ITC, International Institute for Geosciences, Enschede (Hollande): Lubczynski M. (MRS & Hydro).

Univ. Evora – **Portugal** : Ferry M. (GPR et sismo-tectonics)

Univ. **Trieste** (Italie) : Pipan M. (GPR)

Hyderabad (Inde) – **NGRI** : Krishnamurthy (Geophysics)

Wallingford (Angleterre) – **BGS** : Adams B. (Hydrology)

Univ. Brighton (Angleterre) – **UoB** : Mortimer R. (Geology)

Missions de terrain en : France, Allemagne, Angleterre, Italie, Pays-Bas, Portugal, Inde, Norvège.

Conférences : Europe, USA (cf. liste de publications).

VI. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Andre L., Audigane P., Azaroual M., Menjoz A., 2007, Numerical modeling of fluid–rock chemical interactions at the supercritical CO₂–liquid interface during CO₂ injection into a carbonate reservoir, the Dogger aquifer (Paris Basin, France), *Energy Conversion and Management* 48, pp 1782–1797
- Boucher M., thèse 2007, Estimation des propriétés hydrodynamiques des aquifères par Résonance Magnétique des Protons dans différents contextes géologiques, de l'échantillon à l'échelle hydrogéologique
- Braun, M., Hertrich, M., Yaramanci, U., 2005. Study on complex inversion of magnetic resonance sounding signals. *Near Surface Geophys.* 3 (3), 155–163.
- Grandjean G., Hibert C., Mathieu F., Garel E., Malet J-P., 2009, Monitoring water flow in a clay-shale hillslope from geophysical data fusion based on a fuzzy logic approach, *C. R. Geoscience* 341.
- Hertrich M., Imaging of groundwater with nuclear magnetic resonance, *J. Prog. Nucl. Magn. Reson. Spectrosc.* (2008).
- Legchenko, A., Beauce A., Guillen A., Valla P., Bernard J., 1997, Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface, *European Journal of Environmental and engineering geophysics*, 2, 173-190.
- Legchenko, A.V., Shushakov, O.A., 1998. Inversion of surface NMR data. *Geophysics* 63 (1), 75–84.
- Legchenko, A., Valla, P., 2002a. A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *J. Appl. Geophys.* 50 (1–2), 3–19.
- Legchenko, A., Baltassat, J.M., Beauce, A., Bernard, J., 2002b. Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *J. Appl. Geophys.* 50 (1–2), 21–46.
- Legchenko, A., Baltassat, J.M., Bobachev, A., Martin, C., Robain, H., Vouillamoz, J.-M., 2004. Magnetic resonance sounding applied to aquifer characterization. *GroundWater* 42 (3), 363–373.
- Pajot G., de Viron O., Diament M., Lequentrec-Lalancette M.-F., et Mikhailov V., 2008, Noise reduction through joint processing of gravity and gravity gradient data, *GEOPHYSICS*, VOL. 73, NO. 3 May-June 2008; pp. I23–I34.
- Tarantola A., *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation* (book, SIAM ed.)
- Trushkin, D.V., Shushakov, O. A., and Legchenko, A.V., 1993, Modulation effects in non-drilling NMR in the earth's field: *Appl. Magnetic Resonance*, 5, 399–406.
- Tseng H.-W., Alex Becker, Wiltz M. J., Deszcz-Pan M., 1998, A borehole-to-surface electromagnetic survey, *GEOPHYSICS*, Vol. 63, no. 5 (Sept-Oct 1998); pp. 1565–1572.
- Valla, P., Legchenko, A., 2002. One-dimensional modelling for proton magnetic resonance sounding measurements over an electrically conductive medium. *J. Appl. Geophys.* 50 (1–2), 217–229.
- Vouillamoz, J.-M., Legchenko, A., Albouy, Y., Bakalowicz, M., Baltassat, J.-M., Al-Fares, W., 2003. Localization of karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery. *Journal of Ground Water* 41 (5), 578–587.
- Vouillamoz JM, Chatenoux B., Mathieu F., Baltassat JM, Legchenko A., 2007, Efficiency of joint use of MRS and VES to characterize coastal aquifer in Myanmar, *Journal of Applied Geophysics* 61, 142–154.
- Weichman, P.B., Lavelly, E.M., Ritzwoller, M.H., 2000. Theory of surface nuclear magnetic resonance with applications to geophysical imaging problems. *Phys. Re., E* 62, 1290–1312.
- Xu T, Pruess K., 2001, Modeling multiphase non-isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variably saturated fractured rocks: 1. Methodology. *Am J Sci* 2001;301:16–33.
- Xu T, Apps J, Pruess K. 2005, Mineral sequestration of a sandstone–shale system. *Chem Geol* 2005;217(3–4):295–318.

VII. ANNEXE PROJETS

VII.1 Projets avec participation technique ET montage / pilotage

VII.1.1 CO2FieldLab (2009-2013)

Coordinateur (pour la France) et Chef de projet BRGM

Projet européen Franco-Norvégien, labellisé par le label EUROGIA+, et approuvé par le ministère Français MINEFE, le projet devrait démarrer en Octobre 2009 après l'approbation de l'organisme Norvégien GassNova (équivalent à l'ANR pour les questions d'énergies).

Le budget total du projet est de 10 M€, dont 1.5 M€ pour la participation du BRGM.

Partenaires français :

BRGM, Schlumberger Carbon Services, Bureau Veritas, Géosciences Montpellier, imaGeau

Partenaires étrangers :

SINTEF Petroleum Research (Norway, coord.), Schlumberger Stavanger Reseach, Norwegian Geotechnical Institute

British Geological Survey (U.K.)

Résumé

CO2 Field Laboratory for Monitoring & Safety Assessment

Le captage et le stockage géologique du dioxyde de carbone (CO2) est considéré comme une des solutions pour diminuer les concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre et influencer sur le changement climatique. Le CO2 est capturé au niveau d'une large source émettrice, transporté puis stocké sous terre, dans des réservoirs d'hydrocarbures déplétés, des aquifères profonds, ou des veines de charbons inexploitable. Le choix du site de stockage et les modèles d'opérations sont des étapes cruciales pour minimiser les risques de perte de confinement. Cependant, un système robuste et validé de détection et de quantification des fuites et de leur impact est une brique technologique manquante, dont l'absence peut ralentir le déploiement industriel de cette technologie.

Le projet CO2FieldLab propose de réaliser deux expériences contrôlées d'une fuite de CO2 pour permettre de suivre la migration du CO2 dans le sous-sol et les fuites en surface. L'analyse des résultats va permettre la spécification et l'évaluation des systèmes de monitoring et de contrôle des fuites de CO2, de définir un protocole de monitoring en vue d'une certification, de valider et calibrer les modèles de remontée du CO2 dans des conditions in-situ mais contrôlées, et d'informer le public sur la sécurité des sites de stockage de CO2 par la démonstration in-situ de la performance des systèmes de monitoring pour la détection des fuites.

VII.1.2 REMAPRO (2006-2009)

Coordinateur et Chef de projet BRGM

Développement d'une méthodologie de cartographie 3D de la perméabilité des aquifères par REsonance MAgnétique PROtonique pour mieux gérer les sites pollués et prévoir le transfert des polluants.

Soutenu par l'Agence Nationale pour la Recherche, ANR PRECODD 2006 / **ReMaPro**

Budget 500 k€, dont 275 k€ pour la participation du BRGM.

Partenaires : BRGM (leader), IRD-LTHE, IRIS Instruments

Une gestion efficace de l'ensemble des problèmes causés par la pollution des eaux et des sols nécessite de comprendre comment circule l'eau dans le sous-sol des sites pollués. Lorsque la pollution atteint la nappe, les scénarios de propagation reposent sur les paramètres hydrodynamiques et la géométrie de l'aquifère. Aujourd'hui, le modèle de perméabilité est établi à partir des informations obtenues dans un nombre limité de forages qui sont extrapolées sur l'ensemble du site (log géologique, essais de pompage...). L'augmentation du nombre de forages est une solution qui trouve rapidement ses limites budgétaires et techniques : les forages sont chers et peuvent favoriser la contamination de la nappe.

Nous proposons d'utiliser le signal mesuré par résonance magnétique protonique (RMP) pour caractériser en 3 dimensions la perméabilité hydraulique de l'aquifère. Les pétroliers utilisent ce phénomène physique et l'appliquent en forage à la caractérisation de leurs réservoirs depuis des années, mais cet outil de diagraphie ne permet d'investiguer qu'un volume de quelques décimètres autour de la sonde. Aujourd'hui, le seul appareil commercial de sondage RMP depuis la surface est fabriqué par IRIS Instruments. Il est dédié à l'acquisition de sondages RMP dans les milieux tabulaires ou les variations de caractéristiques hydrodynamiques sont généralement constantes à l'échelle de la boucle de mesure.

L'essentiel du projet consiste à mettre au point une méthodologie fiable et efficace allant de l'acquisition des données à l'interprétation des résultats en utilisant des procédés innovants tel que l'inversion 3D des données RMP et la combinaison par logique floue des résultats RMP et électriques. Elle vise à obtenir une résolution suffisante pour décrire l'hétérogénéité des paramètres hydrodynamiques du sous-sol. Parallèlement, le développement instrumental est proposé pour gagner en précision de mesure dans les milieux à faible temps de relaxation (craie, calcaires).

VII.1.3 Proton (2005 - 2007)

Chef de projet BRGM

Cofinancé par le *Réseau de recherche et d'innovation technologique, Eau et technologies de l'environnement* (Riteau)

Amélioration de la précision et de la fiabilité d'estimation des paramètres hydrodynamiques des aquifères avec la méthode RMP.

Partenaires : IRD-LTHE (leader), BRGM, IRIS Instruments, Sisyphe (Paris 6)

Ce projet vise à développer une nouvelle méthode de mesure de la teneur en eau dans le sous-sol et d'estimation des paramètres hydrodynamiques des aquifères (porosité, perméabilité etc.) basée sur le phénomène de la Résonance Magnétique Protonique (RMP). Dans le cadre de ce projet un nouvel instrument avec des logiciels de modélisation et d'inversion et une méthodologie d'application correspondante seront développés qui permettra d'augmenter la précision et la fiabilité des résultats par rapport à la technique RMP existante.

Techniquement, la résolution verticale et la profondeur d'investigation de la méthode RMP pourront être améliorées avec une sonde RMP en forage et la résolution spatiale avec un dispositif multi boucles. Associer ces deux approches dans le même outil semble en effet pertinent pour bénéficier simultanément des caractéristiques de chacune d'entre elles.

Le projet comporte quatre principaux volets :

Un nouvel appareillage RMP destiné à la détection et la caractérisation des aquifères avec une plus grande précision sera développé afin de pouvoir réaliser des mesures permettant de déterminer le contenu en eau et d'estimer des paramètres hydrodynamiques des aquifères. Cet appareil utilisera à la fois des mesures RMP à partir de la surface avec le dispositif multi boucles et des mesures surface – forage (une boucle émettrice à la surface et la sonde RMP en forage).

Les logiciels de modélisation directe et d'inversion 2D et 3D des mesures RMP selon ce nouveau schéma seront développés.

Les résultats de la modélisation seront validés par des expérimentations de terrain sur des sites correspondants à différents contextes hydrogéologiques, bien connus par ailleurs. L'étude des

corrélations entre les résultats RMP et les paramètres hydrodynamiques des aquifères mesurés avec des approches dites traditionnelles permettra d'établir des relations empiriques reliant les mesures géophysiques et les paramètres caractéristiques des roches utilisés par les hydrogéologues. Le rapport signal sur bruit des mesures RMP sera amélioré par rapport au matériel existant.

VII.1.4 Waterscan (2005-2007)

Chef de projet BRGM

Prospection et modélisation hydrogéophysique 4D

Cofinancé par l'Institut National des Sciences de l'Univers, INSU programme ECCO-PNRH : suite des projets précédents *HyKar* et *Metreau*.

<http://phineas.u-strasbg.fr/WaterScan/>

Résumé du projet :

Nous proposons une étude pluridisciplinaire contribuant à développer une méthodologie de caractérisation des circulations hydriques dans le sous-sol à partir de mesures géophysiques de différents types :

- résonance magnétique du proton (RMP),
- géoradar (GPR et HYMENET),
- tomographie de conductivité électrique,
- et potentiels électriques spontané (PS) et provoqué (PP).

Notre approche intègre des développements de méthodes d'inversion pour l'interprétation et des expériences de laboratoire et des observations in situ.

Volet méthodologique

L'approfondissement des méthodes de modélisation et d'inversion des différents types de mesures en relation avec la modélisation des flux hydriques repose sur l'expérience des différentes équipes, en particulier l'IMFS et Sisyphe pour des modélisations hydrologiques, Géosciences Rennes, IGP, IPGS, Orsay-Terre, et Sisyphe pour l'inversion des mesures électriques et géoradar, l'IRD et le BRGM pour l'inversion des mesures RMP.

Volet expérimental en laboratoire

Des mesures sur échantillons et des simulations analogiques en cuve sont réalisées principalement par l'IPGP-Géomatériaux sur granite fracturé, par l'IPGS et l'IMFS sur milieux granulaires et en cuves dont la taille varie de la dizaine de centimètre à la dizaine de mètres. De nouveaux instruments (électrode non polarisable de laboratoire, sonde géoradar, etc.) sont également en développement à l'IPGS et au LED.

Volet expérimental in situ

Des mesures sur plusieurs sites aux caractéristiques hydrogéologiques distinctes permettent de mettre à l'épreuve les différentes méthodes d'observation et de modélisation du contenu en eau et des flux hydriques. Nous étudierons quatre sites métropolitains et un ORE en Inde : Le site de la Soutte, sur une clairière d'un bassin versant vosgien (0.5-3m subsurface sur soubassement de granite fracturé), le site de l'Hallue, dans la vallée de la Somme (craie sub-affleurante), le site de l'Ouyse (réseau karstique de L'Ouyse souterraine), le site de l'Adour, dans une zone de culture intensive de maïs (0-6m subsurface sur soubassement d'argile à galets).

VII.2 Projets scientifiques avec participation technique uniquement

VII.2.1 EMSAPCO2 (2008-2010)

Projet cofinancé par l'ANR (2008-2010).

Développement des méthodes EM et Sismique Active et Passive pour la surveillance de réservoirs de stockage du CO2

Les 6 partenaires du projet EMSAPCO2 sont les suivants : 1) CGG-Veritas (coordonnateur), 2) BRGM (service RNSC), 3) ESPCI (labo LOA), 4) IFP, 5) Magnitude, 6) CNRS-IPRA (Pau).

Le BRGM est porteur de la tâche 2 (Applicabilité pratique de l'électromagnétisme), dans laquelle il est l'acteur principal, avec une petite participation de l'IFP (mesure électriques sur échantillons imprégnés de CO2) et de la CGG. Pour le BRGM l'objectif est d'étudier l'applicabilité pratique de certains dispositifs EM utilisant les tubages métalliques des forages pour le monitoring d'une injection de CO2 dans le Bassin Parisien, en fonction de paramètres internes et externes au stockage.

VII.2.2 CO2ReMoVe (2006 - 2012)

Cofinancé par l'UE dans le cadre du FP6.

CO2ReMoVe project aims to develop innovative research and technologies for the monitoring and verification of CO2 geological storage.

www.co2remove.eu

Intervention dans les Workpackages WP3.2, les études numériques ont porté principalement sur le cas du site d'In Salah (Algérie) et les mesures sur le terrain ont été financées par CO2ReMoVe et réalisées sur le site de Ketzin (Allemagne) instrumenté par le projet CO2SINK (www.co2sink.org). Nos travaux sur sites sont réalisés en partenariat avec GFZ Potsdam.

WP3.2 Innovative monitoring tool development (BRGM (Leader), BGR, BGS, EPS, IFP, OGS, SINTEF, SSR, TNO, URS).

A number of specific gaps or deficiencies in current monitoring technology have been identified. To address this, new tools will be developed, or existing ones 'tuned' to the requirements of underground CO2 storage.

Tools for the detection and measurement of CO2 in the subsurface:

Electrical methods (introducing CO2 into aquifer fluids will generally decrease their resistivity) can usefully complement seismic methods in terms of information content, but are relatively untested or not fully developed for CO2 monitoring. Electric self-potentials (SP) arise from fluid flow through porous media and offer a possible means of detecting CO2 leakage from onshore storage sites. The coupled flow equations relating self-potential to fluid flux will be developed for the CO2 case. Simple field trials will be used to further develop the available technologies. Shallow SP imaging technologies will be tested at naturally occurring CO2 seeps.

VII.2.3 CO2Geonet (2004 - 2009)

Cofinancé par l'UE dans le cadre du FP5.

Geological Storage of CO2 – European network of Excellence

www.co2geonet.com

Activité dans le cadre de l'action jointe (Joint research activity 17) : Geophysical methods to detect CO2 migration pathways in the shallow subsurface

This project aims to study how the combination of geophysical methods could better define the pathways of the leaking gas at shallow depths (from the surface down to a few tens of meters); characterise the eventual points of leakage in the shallow subsurface structures and possibly at the surface; this can be used for site selection, location and design of the surface monitoring arrays, and risk management.

In this study, different monitoring methods were evaluated over a site where natural, thermo-metamorphically produced CO₂ finds its way to the surface (Latera caldera, Italy). The study area clearly shows a change in vegetation at the locations where CO₂ (and H₂S) is reaching the surface. Different geophysical monitoring techniques have been deployed: 2D reflection seismics, 2D refraction seismics, ground penetrating radar (GPR), micro-gravity, 2D and 3D geo-electrical measurements, Self Potential (SP) and electro-magnetic (EM31, EM34 and TDEM) measurements. Furthermore both soil gas and gas flux measurements were performed in a dense grid over the study area to “ground-truth” the geophysical results. In general, a good correlation between the different methods and the presence of CO₂ was observed. The observed fractures on the seismic data appear to correspond to the preferred migration pathways of CO₂. A repeat survey of different methods (electrical resistivity tomography, EM and 2D seismics) was carried out to investigate repeatability aspects. Possible seasonal changes affecting the CO₂ fluxes are still to be investigated.

VII.2.4 Flood1 (2005 - 2008)

Cofinancé par l'UE dans le cadre FP6.

– www.flood1.info –

Principaux partenaires : BRGM, BGS, University of Brighton

Durant la période 2000-2001, des crues importantes ont eu lieu sur le Nord de la France, en Belgique et dans la partie Sud de l'Angleterre, particulièrement dans les vallées crayeuses. Dans beaucoup de ces régions, la remontée rapide du niveau des nappes souterraines a été enregistrée juste avant les crues. Une autre caractéristique commune à ces inondations fut leur durée particulièrement longue, allant de quelques semaines à quelques mois.

Aujourd'hui, l'hypothèse est émise que la clé de l'énigme se trouve dans la zone non-saturée (la zone comprise entre la surface de la nappe et la surface du sol) qui, nulle part dans le Monde à notre connaissance, ne fait partie intégrante des réseaux de surveillance des crues. En effet, toutes les observations disponibles et les mesures réalisées suggèrent que la zone non saturée joue un rôle fondamental dans la genèse de ce type de crues, notamment en stockant de l'eau durant les périodes de fortes précipitations et en la libérant à partir d'un certain seuil de saturation.

Les modèles préliminaires et les investigations géochimiques des différents types d'eau (sources, rivières, eau souterraine) menés à ce jour par le BRGM dans la Somme ont clairement montré qu'il y avait **une contribution importante de l'eau souterraine dans le déclenchement et la persistance de ces crues.**

Une meilleure prévision de l'importance et de la durée des crues permettra aux différents acteurs d'identifier les éléments vulnérables d'une commune, et de mieux évaluer le risque d'inondation. Cette approche novatrice, différente de celles en vigueur actuellement contribuera à minimiser les fausses alertes, car il sera tenu compte à la fois de l'état du système aquifère et de l'importance des événements pluvieux. Les autorités en charge des services d'annonce des crues et d'assistance pourront ainsi prendre à temps les décisions les mieux adaptées à une situation donnée. Ce projet constituera la première tentative au monde d'instrumentation et de suivi de la zone non saturée dans le but d'identifier les mécanismes d'inondation par remontée de nappe.

- comprendre le comportement hydraulique des écoulements à travers la zone non saturée qui conduisent au déclenchement des crues de nappe
- **développer des techniques de mesures pour le suivi de la zone non saturée, en incluant autant que possible une méthode non destructive comme la Résonance Magnétique Protonique (RMP), de manière à réduire les impacts environnementaux et économiques des suivis, et d'améliorer la représentativité spatiale des mesures.**
- développer des méthodes et outils plus appropriés pour la prévision des crues de nappe permettant des calculs à des échelles de temps plus longues qu'actuellement (i.e. quelques jours à quelques semaines au lieu de quelques heures)

VII.2.5 Hygeia (2001-2004)

www.hygeia-eu.org

Cofinancé par l'UE dans le FP5.

HYbrid Geophysical technology for the Evaluation of Insidious contaminated Areas

Partenaires :

POLIMI - POLYTECHNIC OF MILAN, EOST - Strasbourg, CSIM - CONSORZIO PER LO SVILUPPO INDUSTRIALE DEL COMUNE DI MONFALCONE, URS Italia s.r.l., TNO - NETHERLANDS ORGANISATION FOR APPLIED SCIENTIFIC RESEARCH , D&MES - URS España, UNICRE - TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE, BRGM - BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, OGS - The Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica

J'ai été tout particulièrement impliqué dans les workpackages 6 à 9, optimisation de l'acquisition de données géophysiques, modélisation des réponses géophysiques, réalisation d'une base de données sur les sites pollués et friches industrielles prospectées, et proposition d'une méthodologie pour caractériser les variations lithologiques et l'extension du panache pollution quand celui-ci marque les paramètres géophysiques.

Workpackage 6

This WP will focus on the implementation, test and optimisation of dedicated data acquisition tools to enhance the performance of the individual techniques and provide solutions for data acquisition problems peculiar to environmental applications which are not adequately solved by commercial systems. The research and technological effort is devoted to dedicated developments in the field of e.m. and seismic sources and receivers and in the field of accurate dynamic positioning.

Workpackage 7

Theoretical models and efficient numerical modeling codes are instrumental in the validation of survey results and in unequivocal reconstruction of spatial-temporal variations of subsurface physical properties. No commercial systems are presently available which provide a quantitative control of survey results and perform optimisation of the subsurface model by minimizing deviations between numerical and (processed) field results. This WP will focus on formulation of theoretical models able to predict contaminants saturation from geophysical response and on implementation of efficient numerical modeling algorithms.

Workpackage 8

Aims at the creation of the data bank to be exploited in the framework of the project for technology development and test of intermediate solutions and final deliverables. Such data bank will be further made available to end-users and environmental operators as a database of geophysical data and relevant physical, geochemical and sedimentological properties. No such database is presently available in the field of non-invasive studies for environmental applications and rehabilitation purposes. This WP will also focus on the test of dedicated acquisition tools developed by WP6 and on the improvement of survey procedures for safe and cost-effective prospecting of brownfields and contaminated sites.

Workpackage 9

Will apply conventional and new software (developed in WP5) to process experimental data for extraction of physical parameters, data attributes, and production of 2D and 3D images. Calibration of single and integrated geophysical methods will be performed. Integration of geophysical and conventional approaches and comparison with conventional assessment techniques to evaluate the achievable cost and risk reductions will be further pursued. Finally, this WP will evaluate the performances of the proposed techniques

VII.2.6 Cefipra – Inde (2003-2005)

Geophysical characterisation of weathered granite aquifer within the Hyderabad region, Andhra Pradesh, India – (2003-2005)

Projet de recherche cofinancé par le BRGM et le centre franco-indien pour la promotion de la recherche avancée (Indo-French Centre for The Promotion of Advanced Research, IFCPAR), (project N°2700-W1).

Partenaires : BRGM (leader), IRD-LTHE, Sisyphe (Paris 6)

The region of Hyderabad is representative of central and south India with a geology essentially composed of Archean granite under a semi-arid climate. In such a context where the groundwater overexploitation threatens the sustainability of the agricultural development, NGRI and BRGM with the collaboration of IRD, UMR Sysiphe (Paris VI university) proposed a research project entitled "Proton Magnetic Resonance technique in weathered-fractured aquifer" which was granted by the Indo-French Centre for The Promotion of Advanced Research (IFCPAR, project N°2700-W1). It aims at establishing a methodology combining electric-electromagnetic method (ERT, TDEM) for delineating subsurface water bearing geometry and Magnetic Resonance Sounding (MRS) for defining the hydrodynamic characteristic of aquifer has been implemented.

The expected results of the project included a methodology for locating bore-wells on water bearing structures/zones and evaluating water resources in hard-rock terrain. During fieldwork, we often faced the detection limit of the MRS method in such a low water content environment. The contrasted MRS observation made a) on KBTanda rice fields in 1999 and 2005 (Maheshwaram watershed) while the water table had respectively deepened from 5 to 12 m below groundwater level (BGL) as well as b) on two sites of Wailpally watershed where water level are respectively at 9 m BGL in a non irrigated area and 19 m BGL because of intense pumping, show that MRS is able to assess the groundwater table depletion with time or spatially in agreement with piezometric measurement and with the local agricultural activity. In other word the groundwater assessment capability of the MRS method is limited to the water saturated saprolite because the fissured zone conditions of water content are at the sensitivity limit of the method and makes that this formation cannot be fully resolved using the currently available instrumentation (NUMIS^{PLUS}).

From this analysis completed by a few other sites measurements, a geophysical model of the Hyderabad region weathered granite aquifer is proposed, where the different water bearing zones can be distinguished by their MRS, electrical and magnetic characteristics. The screening effect of the Saprolite water layer on the underlying fissured zone is discussed and the limit of the inversion schema of interpretation in this context is underlined.

The observed significant variations of magnetic susceptibility along the weathered profile are an indicator of potential magnetic field inhomogeneities which could significantly affect the MRS response but it is not necessary to invoke them for interpreting the observed contrasted MRS responses as they are fully explained by water table variations.

Further development on the potential effect of magnetic field inhomogeneities, further MRS determination of the fissured zone water content or hydraulic conductivity in this context will require to gain one order of magnitude in S/N ratio. The well documented sites investigated in the Hyderabad region during this project could be the laboratory for these future experiments.

Electrical and electromagnetic method are recommended in a combined methodology with MRS as they can qualitatively image the weathering profile and map the substratum elevation at reasonable cost. Electrical Resistivity Tomography is preferred to Time Domain Electromagnetism because the Fissured Zone is too resistive to be distinguished from the underlying unweathered rock by the latter. Although quantitative characterisation should however be obtained by constraining inversion, a reliable formation resistivity can't be easily obtained and the way to a characterisation of water content through the Archie's law or similar empirical relationship is not obvious. These conclusions support our choice to prefer MRS for this purpose.

VIII. SELECTION DE RESUMES ETENDUS

- VIII.1.1 Girard J-F. et al., 2D and 3D Magnetic Resonance Tomography: synthetic cases and field applications, MRS2009.
- VIII.1.2 Girard J-F. et al., Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint stochastic approach, MRS2009.
- VIII.1.3 Girard, J-F. et al, Contribution of the joint use of MRS and ERT to hydrogeological modelling: case study of the Montreuil-sur-Epte basin (France), MRS2006.
- VIII.1.4 Baltassat J.M., Krishnamurthy N.S., Girard J.F. et al., , Geophysical characterization of weathered granite aquifers in the Hyderabad region, Andhra Pradesh, India, MRS2006.

2D AND 3D MAGNETIC RESONANCE TOMOGRAPHY : SYNTHETIC CASES AND FIELD APPLICATIONS.

*GIRARD Jean-François^a, LEGCHENKO Anatoly^b, BALTASSAT Jean-Michel^a, MAURY Etienne^c,
MIC Lisa-Maria^d, CLEMENT Rémi^b.*

^aBRGM – Development Planning & Natural Risks division, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France. (jf.girard@brgm.fr)

^bLTHE – Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) Bureau C334, Bât. CERMO, 460 rue de la Piscine, Domaine universitaire de Saint Martin d'Hères BP53, 38041 Grenoble Cedex 09, France.

^cUJF – l'Université Joseph Fourier – Grenoble 1, 15, rue Maurice Gignoux, 38000 Grenoble, France,

^dINPG - Ecole Nationale d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble, Domaine Universitaire – B.P. 95 – 38402 Saint MARTIN D'HERES Cédex, France

SUMMARY

Magnetic Resonance of the proton is used as a Sounding method (MRS) specifically sensitive to the free water content in the near surface down to several tens of meters of investigation. It provides quantitative information on the amount of groundwater but also on the hydraulic conductivity of the rock material. After calibration, use of empirical laws allows estimation of the aquifer transmissivity and consequently to evaluate an aquifer productivity.

Ability to obtain information about the 2D or 3D distribution has long ago been noticed but scarcely applied in field surveys. Indeed, acquisition time may be often long: several hours are commonly required per sounding, depending on the noise conditions and the amount of groundwater. This approach is nowadays referred as Magnetic Resonance Tomography (MRT). As part of the French national research project ANR REMAPRO, forward and inverse modelling for 2D and 3D distribution of underground water has been developed. A data set consists in a profile (or several profiles for the 3D case) of “coincident loop soundings” where the distances between two neighbouring loops are sufficiently narrow to make several loops sensitive to the same underground area. Typically, half-overlapping loops and up to side to side loops distances are sufficient.

Using the linearity of the MRS theory (i.e. MRS response is the sum of the signals from all the water molecules distributed in the underground) and assuming Gaussian uncertainties (on both the data and the model parameters) we have applied the theory of the inverse problem using the Least Squares Criterion. It is powerful in this context because the forward problem is linear, and then the solution uncertainties are also Gaussian, and an explicit expression can be easily computed. In addition

this formulation allows using a priori information which is valuable tool for the geophysicists to reduce the uncertainty due to the always ill-posed nature of the problems they face. Based on our previous experience in applying the MRS method, we propose an effective and robust approach to invert the data.

Two examples from field surveys will illustrate the discussion. We inverted in 3D a grid of small size loops (18x18m) covering a peat bog and its surrounding (80x 80m) was performed in the Alps during the 2008 summer. A second field case which is interpreted in 2D consists in a 800 m long profiles using 75x75m loops crossing a faulting zone between a sandy aquifer environment toward a thick chalk medium. This later field case provides the basis for a discussion about mixing different loops size in a dataset to enhance the resolution and investigation depth.

LEAST SQUARES FORMULATION

Theory (**G**) which describes the initial MRS amplitude (**d** in **nV**), recorded in a loop after an excitation oscillating magnetic field has been generated by an electric current pulse (**Q** in **A.ms**) in a loop laid on the ground, has been presented in several articles since the 90's [1,2]. What makes MRS method so interesting is that it is directly sensitive to “free” ground water, but even more the recorded signal is the water content (**WC** in **volumetric %**) weighted sum of the complex signal that could be emitted in the underground for a given loop(s) set. We can write: $d = G.m$

Where **G** is a linear complex kernel (matrix nb. of data x nb. of model parameters) and **m** the water content distribution (we will see later that **d** can be replaced by the integrated MRS signal FID1 and hence **m** the product water content x T_2^* , etc... various strategies are available). Observed values **d_{obs}** vector is accompanied by a diagonal covariance matrix with standard deviation of experimental uncertainties (supposed Gaussian). If they are constant equal to **S_d**, one can writes: $C_{obs} = S_d^2 I$.

If we know an average value of the water content distribution, this is introduced in the vector **m_{prior}**. If we have no a priori information, we may prefer a model which underestimates the true water content and put **m_{prior}** = 0. Accuracy of this prior information is described by an a priori covariance matrix, which is generally diagonal. In the case this uncertainty is constant, one writes: $C_{prior} = S_m^2 I$. **S_m** corresponds to the standard deviation of the prior model with mean values **m_{prior}**.

In least-squares (LSQ) theory [3], the likelihood function is expressed as $L(\mathbf{m}) = \text{const} \cdot \exp(-\mathbf{S}(\mathbf{m}))$ where (twice) the misfit function $2.S(\mathbf{m}) = \|\mathbf{G.m} - \mathbf{d}_{obs}\|^2 + \|\mathbf{m} - \mathbf{m}_{prior}\|^2$.

In the linear case, it is shown that the posterior probability density (linked to the likelihood L) is a Gaussian with a mean **m_{post}** and covariance **C_{post}** where :

$$C_{post} = \left(G^t C_{obs}^{-1} G + C_{prior}^{-1} \right)^{-1}$$

$$m_{post} = C_{post} \left(G^t C_{obs}^{-1} . d_{obs} + C_{prior}^{-1} . m_{prior} \right)$$

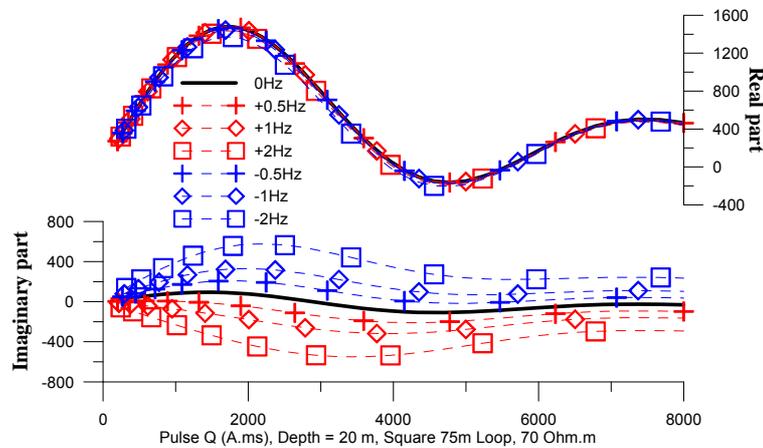
The model \mathbf{m}_{post} has been defined as the center of the posterior Gaussian probability density but it is also the model which minimizes the least-squares misfit function: \mathbf{m}_{post} is the ‘best model’ in the sense that, at the same time, it is close to the a priori information $\mathbf{m}_{\text{prior}}$ and the predicted data $\mathbf{G}\mathbf{m}$ are close to the observed data \mathbf{d}_{obs} .

In the general LSQ formulation, it is not possible to impose a non-negativity of the water content model \mathbf{m} . A rough approach would be to remove the negative values from \mathbf{m} and replace them by zero value. This could be a problem if robust negative solutions exist. But the behavior of the kernel \mathbf{G} for MRS method (at least in the case of coincident loops) is regular and a single maximum of the likelihood function is always found with positive values for \mathbf{m} in the underground volume well resolved by the loops array. Only the neighborhood of the “best” solution, as defined by \mathbf{m}_{post} and \mathbf{C}_{post} , is limited to positive values. In practice, this approach revealed to be very efficient even with low signal to noise ratio data set.

Using both the real and imaginary components of the signal provides better resolution. Nevertheless, we faced the problem to fit the imaginary part with various field data. First, in conductive material (resistivity $< 30 \text{ Ohm.m}$ and less), then we need to include the ground resistivity in the kernel computation for each loops positions (if lateral conductivity variations). But in all dataset, we meet some frequency shift between the exciting pulse (ω) and the local Larmor frequency (ω_0). This shift is often variable along the same sounding, especially when many stacking are needed and at some latitudes where the daily geomagnetic variations are strong [4,5]. If we define the frequency shift as: $\Delta\omega = \omega_0 - \omega$, the transverse component of the spin magnetization ($M_{\perp}^2 = M_x^2 + M_y^2$) which generates the signal is linked to M_0 the spin magnetization for protons per unit volume by :

$$M_x = -\frac{\omega_1 \Delta\omega}{\omega_{\text{eff}}^2} (1 - \cos(\omega_{\text{eff}} \tau)) M_0 \quad \text{and} \quad M_y = \frac{\omega_1}{\omega_{\text{eff}}} \sin(\omega_{\text{eff}} \tau) M_0$$

Where : $\omega_{\text{eff}}^2 = \omega^2 + \Delta\omega^2$. When this effect is included in the computation of the kernel \mathbf{G} , if we look at the response of a 1D layer, 1 m thick of free water at 20 m depth, for a 75 loop :



It is clear that the imaginary part of the signal is strongly affected by $\Delta\omega$ and the real part almost not. We propose to invert only the real part of the field data, which revealed to be easier than the

complex signal, but many times more efficient than to invert the modulus of the signal. In conductive materials or when using separated loops data, then the imaginary part carries some valuable information and the complex inversion which can be used.

3D IMAGING OF A PEAT BOG

To study the peat bog of the Lake Luitel (in the Alps), in addition to GPR and electric imaging, a 80 x 80 m zone was padded with 17 MRS soundings (square 18 m loops with 2 turns, see Fig. 1). Here we focus only on the 3D MRT realized with this dataset and not enter the hydrogeological discussion.

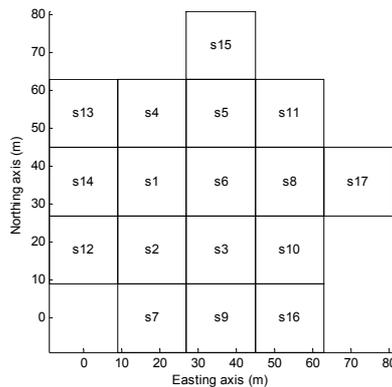


Figure 1 Position map of the 17 soundings near the peat bog

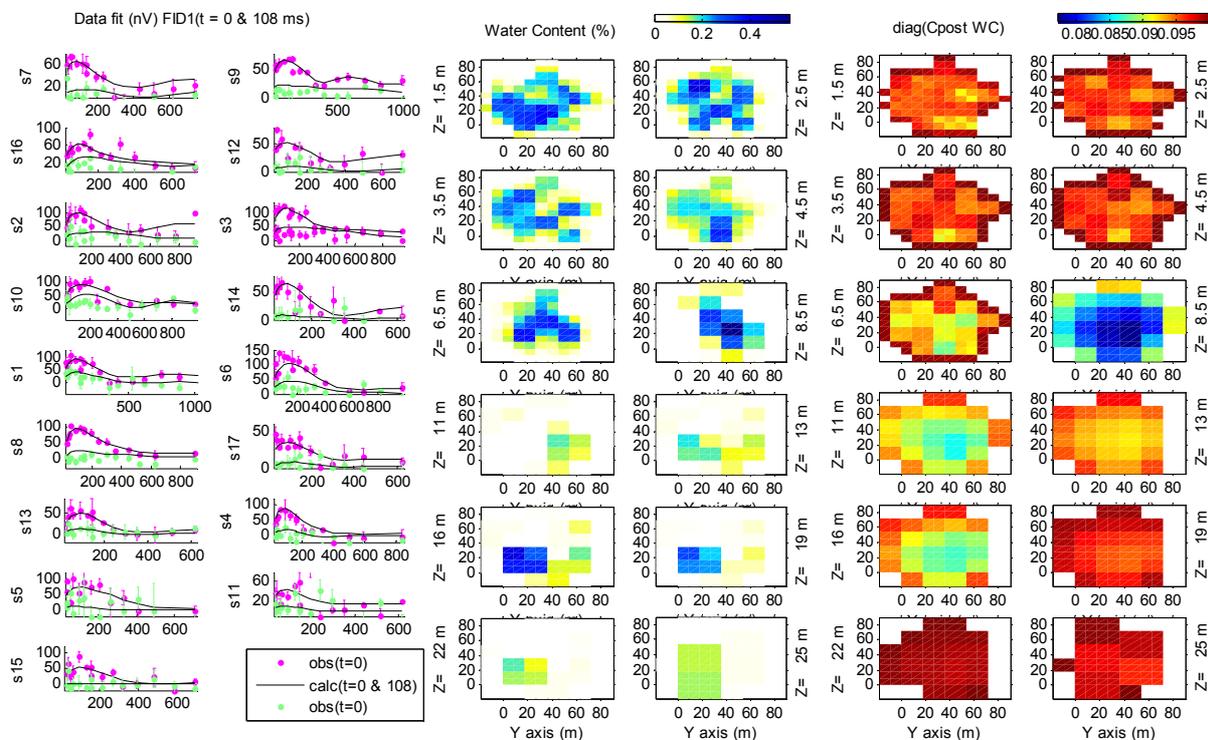


Figure 2 Fit on the data : FID1 at $t = 0$ & 108 ms after dead time (left), water content distribution (center) and uncertainties on the water content : blue zone are well resolved, red ones not (right)

Many soundings have a maximum signal level between 50 & 100 nV, and the noise level is generally around 10-20 nV. With such a signal to noise ratio (SN) it is interesting to take the data uncertainties into account in the interpretation of the resulting 3D imaging. T_2^* and T_1 estimation are mainly shorter than 70 ms, which is coherent with superposed FID1 and FID2 curves. T_2^* are estimated using the decay curve during the first 108 ms of FID1 (Fig. 2 left).

Down to 4.5 m (depth in Fig. 2 are the bottom of the layer) WC is around 20% with no significant trend in the spatial distribution. From 4.5 to 8.5 m, a narrow zone with WC up to 40% is well resolved. Deeper, only a patch with high WC is observed in the South-West corner around 13 – 15 m. Below 16 m, resolution is bad (Fig. 2 right).

2D IMAGING OF A FAULTED AQUIFER

In the framework of European project AquaTerra (FP6), the Montreuil sur Epte catchment (France) was chosen as experimental site for studying and modeling the pesticides transfer from surface to groundwater. Substratum consists of a clay layer that separate the studied sandy aquifer from the deeper chalk aquifer. On the eastern side, the chalk is uplifted by two faults which cross the whole stratigraphy and constitute a supposed watertight barrier. In order to improve the hydrogeological modeling, geophysical methods were applied for characterization of the aquifer. 11 soundings (75 m square loops) were performed along a 800 m West-East profile (Fig. 3). Noise level is around 20-40 nV but signal reaches up to 350 nV which provides a good quality dataset. Because of the short decay times in the chalk, FID2 is there stuck to FID1, we estimated T_2^* from FID1 (Fig. 3).

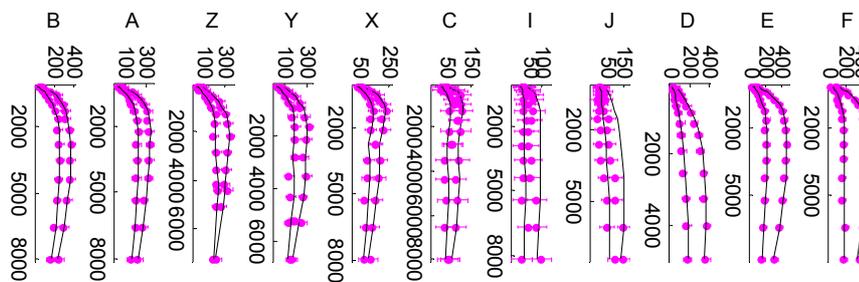


Figure 3 Fit on the data: FID1 at $t = 0$ & 68 ms after dead time

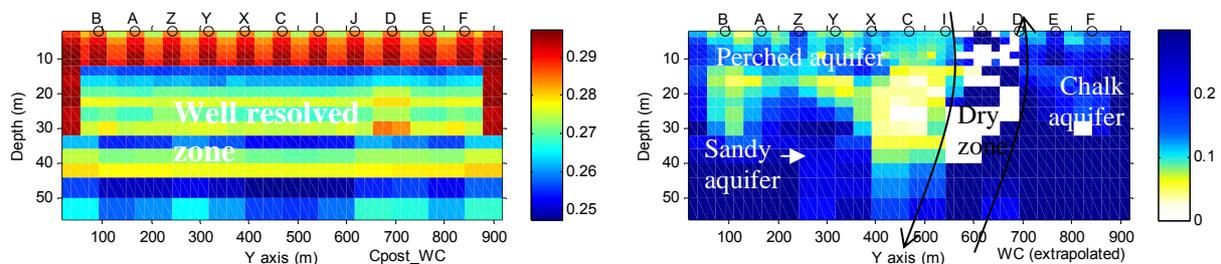


Figure 4 Uncertainties on the water content: blue zone are well resolved, red ones not (left), extrapolated water content (using T_2^*) distribution and structural interpretation (right)

The resulting image is very pertinent (Fig. 4). It clearly delimitates a de-saturated zone, eastward the chalk aquifer shows continuity until the surface whereas of the western side, the deeper sandy aquifer is surrounded by a complex vadoze zone where some perched aquifer could be delineated.

From the previous field case, we proposed to illustrate the improvement in resolution if soundings with square 37 m loops (2 turns) side-to-side are added to the 75 m square loops side-to-side profile.

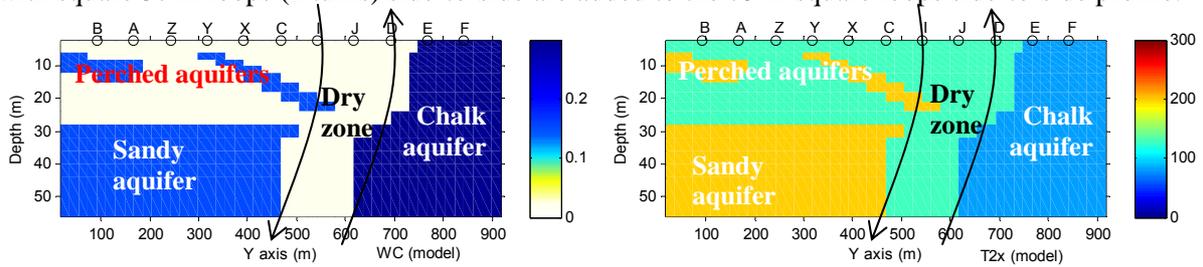


Figure 5 2D model of water content (left) and decay time T_2^* (right)

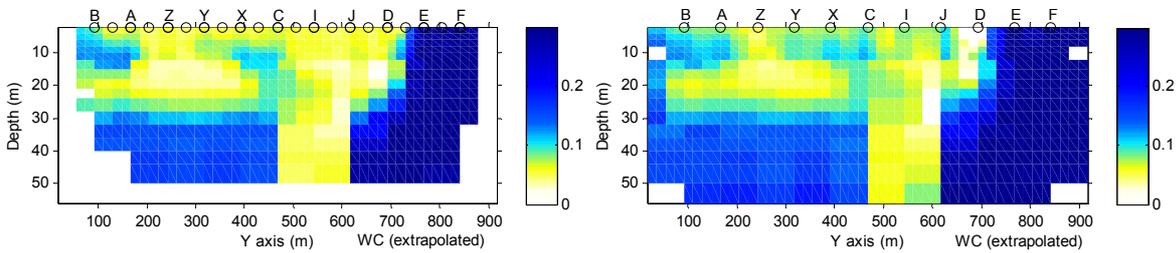


Figure 6 2D water content imaging using small and large loops (left) and only large loops (right).

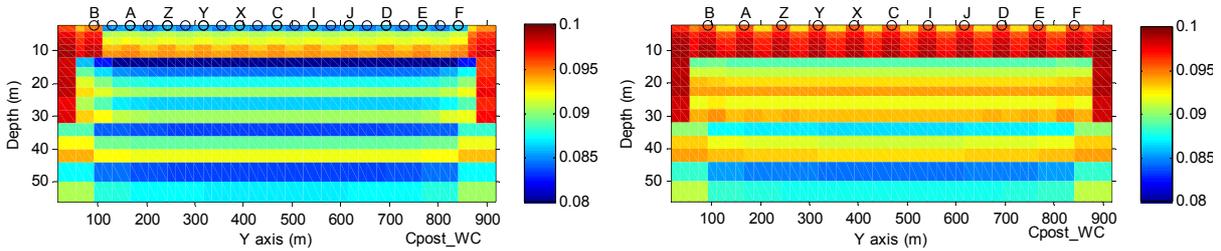


Figure 7 Uncertainties on the WC using small and large loops (left) and only large loops (right)

CONCLUSIONS

A 2D and 3D MRT software as been developed, based on the Gaussian linear LSQ scheme providing a precious estimation of the uncertainties. It has been successfully applied to field data. It allows imaging using mixed loop datasets and is a flexible tool to optimize MRT. The present study is limited to the “coincident loops arrays” but “separated loops array” can be used.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Valla P., Legchenko A.: J. Appl. Geoph. 50, 217-229 (2002)
- [2] Weichman P.B., Lavelly E.M., Ritzwoller M.H.: Phys. Rev. E 62, 1290-1312 (2000)
- [3] Tarantola A., Inverse problem theory and methods for model parameter estimation (book)
- [4] Girard, J-F., Legchenko A., and Boucher M., Near Surface Geophysics, 3, 187-194 (2005).
- [5] Trushkin D.V., Shushakov O.A., Legchenko A.V.: Appl. Magn. Reson. 5, 399-406 (1993)

CHARACTERIZATION OF HETEROGENEOUS NEAR-SURFACE MATERIALS BY JOINT STOCHASTIC APPROACH

GIRARD Jean-François^a, ROULLE Agathe^a, GRANDJEAN Gilles^a, BITRI Adnand^a, LALANDE Jean-Marie^b.

^aBRGM – Development Planning & Natural Risks division, 3 avenue Claude Guillemin-BP 36009-45060 Orléans Cedex 2 - France. Contact : jf.girard@brgm.fr

^bpreviously at BRGM, now at CEA, France.

SUMMARY

Using several geophysical methods to better constrain a diagnosis is a standard approach in many field studies. Generally data of each method are individually inverted and a global geological / hydro-geological interpretation is realized as a second step from separated inversion results. Thereby, contributions and limitations of each method to final interpretation are integrated after the inversion processes. Consequently, the expertise of the one who performs the interpretation is decisive and its weight on the final result is difficult to quantify.

In the end, reliability of geophysical interpretation is mainly limited by the problem of non-uniqueness of solution, on one hand because of equivalency of some models and intrinsic methods resolutions, and on the other hand because the links between geophysical parameters and rock physics properties in heterogeneous media are not so straight and do not allow to clearly discriminate between two materials (or state of weathering, or water saturation, etc...).

Following the work of many authors in the past twenty years, we propose to jointly inverse several data types simultaneously in order to better constraint the inverse problem. We selected a set of geophysical methods, widely used to investigate the subsurface: vertical electrical sounding (VES), time domain electromagnetism (TEM), magnetic resonance sounding (MRS) and multi-channel analysis of surface waves (MASW). We particularly insist on how to objectively introduce the a-priori knowledge as an input in the algorithm. For a given geological environment, one can define a few hydrogeological facies each described by a statistical (normal, log-normal) distribution of classical geophysical parameters (electrical resistivity, water content, decay time, shear wave velocity).

To explore the model space, we propose a stochastic approach based on the Metropolis algorithm in order to provide a statistical estimation on the result uncertainties (due to the data quality, sensitivity and investigation depth of each method). Result of inversion is displayed as a statistical distribution of the geophysical parameters but also as a statistical distribution of the facies initially

defined. The a-priori knowledge is hence quantitatively and objectively used to reduce the uncertainty of the interpretation.

STOCHASTIC THEORY

Solving an inverse problem aims to evaluate a probability distribution (a posteriori PD $\sigma(\mathbf{m})$) of the model parameters \mathbf{m} for a given dataset \mathbf{d} (described a PD $\rho_D(\mathbf{d})$) with respect to a priori information (a priori PD $\rho_M(\mathbf{m})$). The solution of the inverse problem (Bayes rule, see [1]) is generally written as:

$$\sigma(m) = k \rho_M(m) L(m)$$

Where $\mathbf{L}(\mathbf{m})$ is the likelihood function which can be also written as a PD: $\mathbf{L}(\mathbf{m}) = \rho_D(\mathbf{g}(\mathbf{m}))$, with $\mathbf{g}()$ the physical theory ($\mathbf{d}_{\text{calc}} = \mathbf{g}(\mathbf{m})$). Assuming a Gaussian PD (prior) or an exponential (later) PD:

$$L(m) = \exp\left(-\frac{1}{2}(g(m) - d_{\text{obs}})^t C_D^{-1}(g(m) - d_{\text{obs}})\right) \text{ or } L(m) = \exp\left(-\sum_i \frac{|g^i(m) - d_{\text{obs}}^i|}{(\text{mean dev.})^i}\right)$$

For simple cases, when the model PD $\sigma(\mathbf{m})$ has only one maximum, analytic techniques exist and the result can be characterized by a mean and variance. But for more complex cases, one needs to perform an extensive exploration of the model space and the whole PD should be displayed. This exploration can generally not be systematic and the Monte Carlo methods can be used to randomly explore the model space.

We have chosen to use the Metropolis algorithm to perform the random walk. At a given step j , a transition model \mathbf{m}_{j+1} is randomly generated through a perturbation of the previous model \mathbf{m}_j with respect to ρ_M (Gibbs sampler). This model may be rejected by using the following rule: if $L(\mathbf{m}_{j+1}) > L(\mathbf{m}_j)$ the transition is accepted, else the probability to accept it is $L(\mathbf{m}_{j+1}) / L(\mathbf{m}_j)$.

Difficulties in sampling the posterior PD with many parameters are to locate the “regions” of significant probability and to sample these regions densely enough. Number of iterations in the process should be generally high (up to tens thousand and more) and limits the applications to problems with fast forward modeling. The great interest in the (time consuming) Metropolis approach is that the resulting large collection of random models can be used to provide statistical response. For instance, at the question “What is the aquifer depth?” we can provide an histogram of the values, or “What is the probability to have more than X % of water content in the first Y meters?” is answered by calculating the ratio of the number of models in agreement with this proposition over the total number of models in the collection (see [2]).

JOINT INVERSION SCHEME

We propose to perform the joint inversion of several methods which are sometime sensitive to the same parameters \mathbf{m} (i.e. electrical resistivity for TEM and VES), or not (i.e. decay times for MRS). For \mathbf{k} physical parameters, the joint posterior PD σ is linked to the joint a priori PD ρ_M and joint likelihood L :

$$\sigma(m_1, m_2, \dots, m_k) = k \rho_M(m_1, m_2, \dots, m_k) L(m_1, m_2, \dots, m_k)$$

To define the a priori PD we followed the scheme used by (see [3]) where the model space is divided into primary and secondary parameters. We use our a priori information to define several “facies” (primary parameters) where each physical parameter (J secondary parameters) is characterized by a marginal PD (Fig. 1). The geometry (in this study, only 1D case is considered) is common for all methods and is a primary parameter. The a priori PD is then defined as:

$$\rho_M(m_1, m_2, \dots, m_k) = \rho_{s/p}(m_1, m_2, \dots, m_k | \text{facies, geometry}) \rho_p(\text{facies, geometry})$$

The geometry (layering with depth) is composed of fixed “sub-layers” (for instance, N layers with 2 m thickness, or we can choose an increasing thickness with depth...). These sub-layers are gathered in a limited number of units with varying thickness. This is a mean to generate small perturbations when varying the thickness or the number of units and a regularization parameter to limit the number of units we expect to resolve with a geophysical sounding (commonly from 3 to 8).

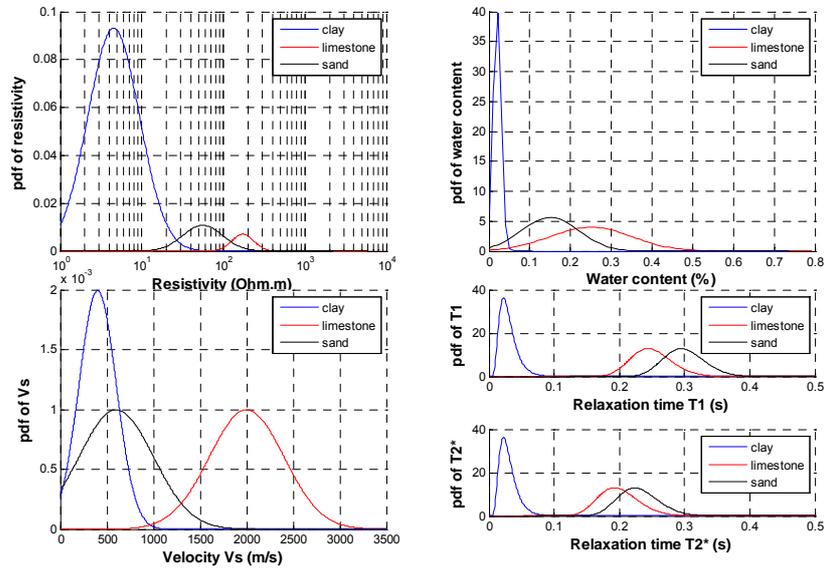


Figure 1 A priori information is defined through 3 « lithofacies » : clay, limestone, sand. Joint likelihood can be calculated from the marginal likelihood (calculated for each method) :

$$L(m_1, m_2, \dots, m_k) = \prod_i^{n_methods} L_i(m_1, m_2, \dots, m_k)$$

SYNTHETIC CASE STUDY

Based on the hydrogeological context near Orleans, a superposition of clay & sand layers above a limestone substratum, we illustrate the use of stochastic inversion on a synthetic case study. Three “hydrogeological facies” (Fig. 1) are defined as Clay, Sand and Limestone, with corresponding a marginal PD for each parameter. The model is depicted in Fig. 2.

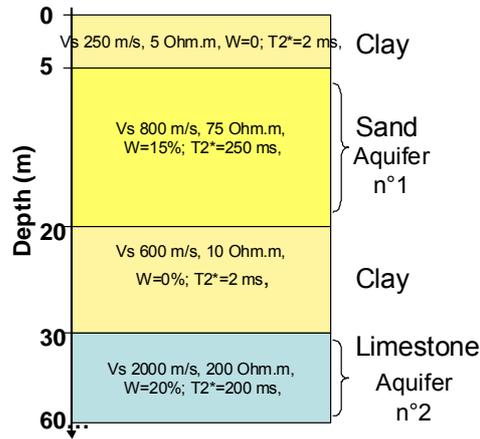


Figure 2 Synthetic case (inspired from the shallow subsurface near Orleans, France)

Results of stochastic inversion are expressed in terms of resistivity distribution for each sub-layer (21 layers 2 m thick). The best model is depicted in red and the mean model in black. Results are also expressed in terms of probability to have a given facies at each depth (Fig. 3 to 5).

First we applied stochastic inversion to TEM and VES separately. The shallow clay is well constrained, but the intermediate clay layer is better defined by the TEM than with the VES. We should notice that the synthetic dataset was corrupted with 5% Gaussian noise which is a bit noisy.

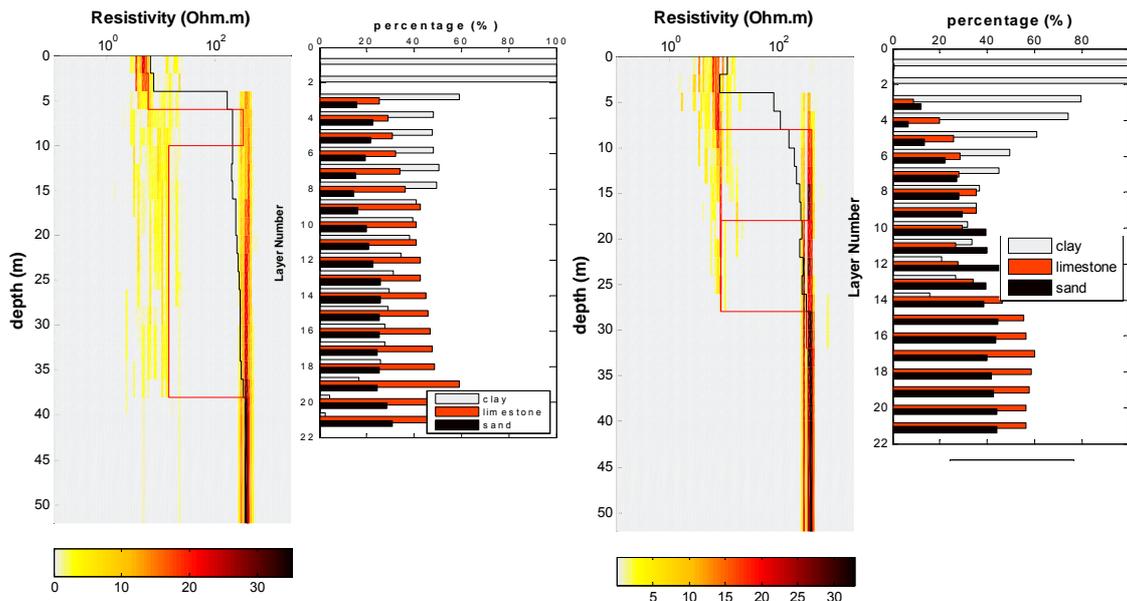


Figure 3 VES only (left) and TEM only stochastic inversion (right)

Based on the same model (Fig. 2) a MRS sounding was inverted (5% noise), which provide a good image of the aquifers (Fig. 4). One should note that information carried by the probabilistic results is more confident than to depict the best model only (red line). Limestone and sand PD for MRS parameters being very close, the bottom layer which is limestone is confound with sand.

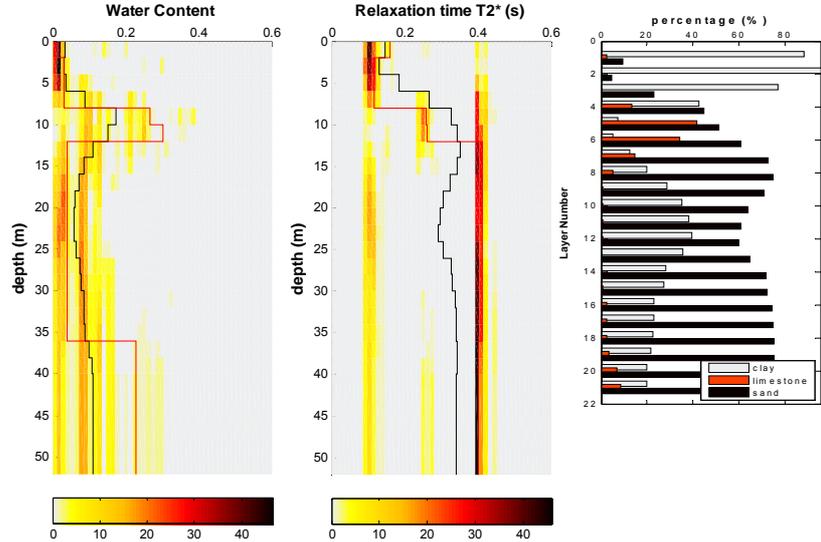


Figure 4 MRS alone stochastic inversion

We decided to jointly inverse the VES and MRS data (Fig. 5). One could notice that the geometry being common for all methods, the best model has a unique geometry on all parameters results. Many remarks could be done by comparison of Fig. 3-4 and Fig. 5, but we can underline that the bottom limestone is better recognized, and the limits of the units too.

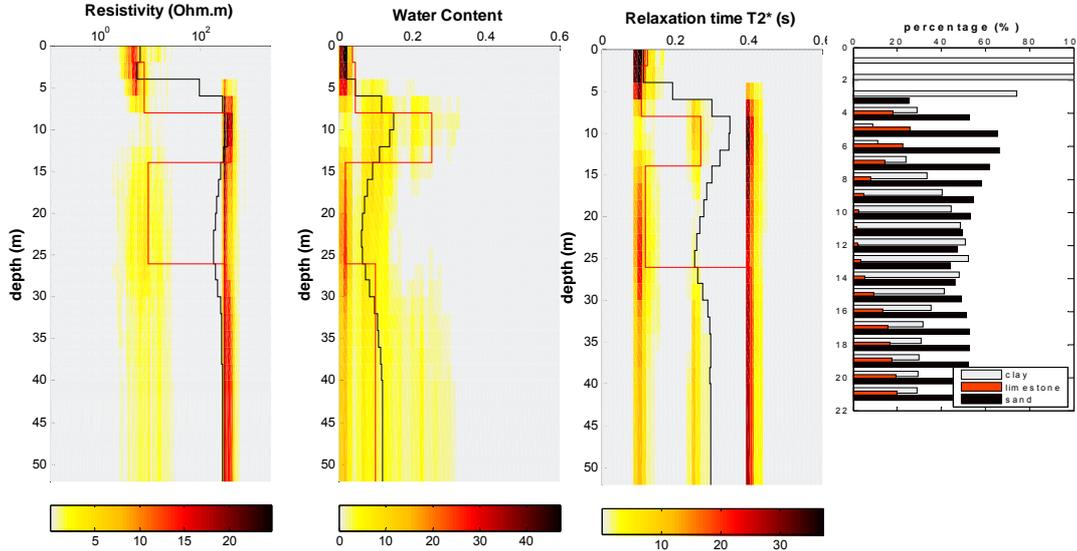


Figure 5 VES and MRS joint stochastic inversion

The collection of model sis not useful only to compute statistics, it provides also the possibility to calculate the resolution matrix for each method: for a given parameter and for each layer, we calculated the correlation with all the other layers (Fig. 6). It provides also a good indicator of depth investigation.

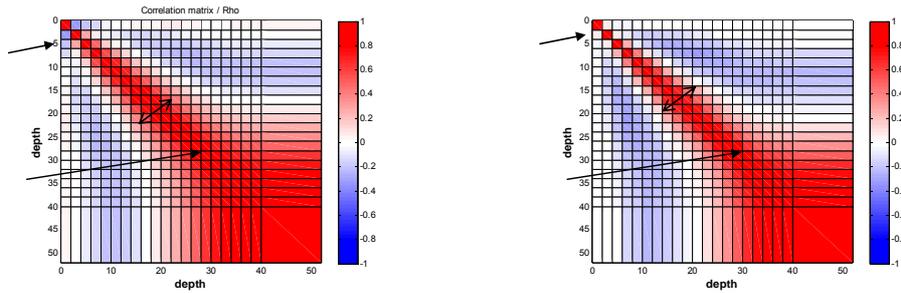


Figure 6 Resistivity (left) and Water content (right) marginal resolution matrix (correlation between layers) after joint VES – MRS stochastic inversion

CONCLUSIONS

A joint stochastic inversion scheme was proposed and applied to synthetic data, including VES, TEM, MRS and MASW. We expect to reduce the equivalence problem by using multiphysics and independent methods link via our “facies” approach. The obtained parameters distribution can be weighted by probability and we propose an original « facies » inversion result (lithologic inversion etc..).

The interpretation of several methods is here quantitative and many possibilities are offered to introduce a priori information. Sensitivity and accuracy of the results are provided. The posteriori information can be used to perform a scenarii analysis, by computing conditional probabilities on the resulting collection of models.

This work is currently in the phase of optimization, and we aim at establishing the “good thresholds” especially when introducing the a priori information to make it more efficient and robust to benefit of the interesting capabilities of this approach applied to field data.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Tarantola A., Inverse problem theory and methods for model parameter estimation (book)
- [2] Guillen, A., Legchenko, A., 2002, Inversion of surface nuclear magnetic resonance data by an adapted Monte Carlo method applied to water resource characterization, *Journal of Applied Geophysics* 50, 193-205.
- [3] Bosch, M., 1998, Tomographie Lithologique: développement de la méthode et applications, Thèse de doctorat de l’Institut de Physique du Globe de Paris.
- [4] Hertrich M., Yaramanci U., 2002, Joint inversion of Surface Nuclear Magnetic Resonance and Vertical Electrical Sounding, *Journal of Applied Geophysics* 50, 179– 191.

Contribution of the joint use of MRS and ERT to hydrogeological modelling: case study of the Montreuil-sur-Epte basin (France)

Girard¹, J-F., Baltassat¹ J.M., Gutierrez¹ A., Mouvet¹ C., Legchenko² A., Mathieu¹ F., Miehé¹ J-M., Baran¹ N., Morvan³ X.

¹ BRGM, 3, Avenue C. Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 2, France.

² IRD, LTHE, BP53, 38041 Grenoble Cedex 9, France.

³ INRA, Infosol Unit, Avenue de la Pomme de Pin, 45160 Ardon, France.

INTRODUCTION

In the framework of the European PEGASE project, the Montreuil-sur-Epte catchment basin (France) was chosen as an experimental site for studying and modelling pesticides transfer from surface water to ground water (Baran et al., 2005, Morvan, 2004). In this area, the aquifer is developed in fine sand (15-30 m thick) and limestone (about 30 m thick). The substratum consists of a clay layer that separates the studied aquifer from the deeper chalk aquifer. This basin presents a general monoclinical geometry dipping east-west. On the eastern side of the catchment basin, two faults cross the whole stratigraphy and constitute a barrier that is assumed to be watertight.

A change in agricultural practices simultaneously across the whole basin has made it possible to specifically study the transport of the new pesticide used, from surface water to ground water. Boreholes were drilled and geochemical monitoring started in 2001. However, vertical and lateral heterogeneities were quickly suspected and neglecting them would have severely impacted the adjustment of the pesticide transfer modelling. In order to improve the hydrogeological modelling (Wyns, 2001), geophysical methods were applied to characterize the aquifer. Geoelectrics were performed to extend surface structural and borehole observations and MRS for mapping permeability variations.

ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY

Initial geophysical field work was carried out in October 2003 to localize precisely a western fault poorly delineated previously. Several east-west ERT (electrical resistivity tomography) profiles were performed, crossing perpendicularly the lineament determined from observations during drilling piezometers and previous geological observations.

The presence of a fault was confirmed on ERT profiles and a vertical reject of a few metres can be estimated near drilled piezometers. A second result was the imaging of electrically conductive layers, dipping towards the east (Figure 1). It was an unexpected result to find an eastward dipping structure whereas the studied area corresponds to the western flank of a regional east-west anticlinal structure. It implies that the structural model has to be redefined and may in turn imply the presence of other faults.

A second survey was then performed to extend towards the east the previous ERT profiles. This confirmed and clarified the delineation of known faults and revealed an upward lift of the eastern block. Despite a weak electrical contrast between the limestone and sandy levels, useful information about structural geology was provided. Although ERT information cannot be directly converted into hydrogeological parameters, it contributes indirectly to establishing the hydrogeological model. Indeed, lateral heterogeneities have a major impact on the transport of pollutants and such indirect but laterally extended information is useful for building a model for such a precise study.

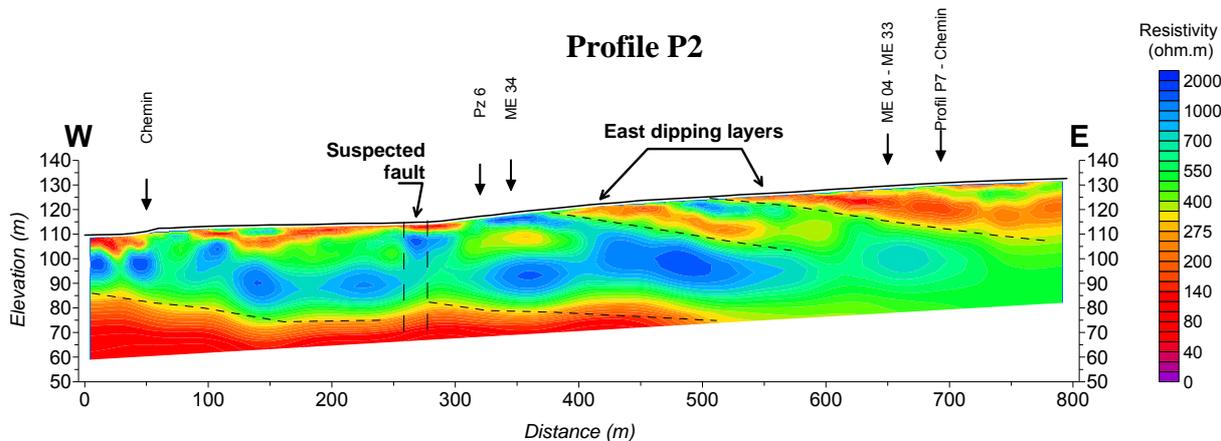


Figure 1 East-west ERT profile (P2) showing eastward dipping layers

MAGNETIC RESONANCE SOUNDINGS

Dense geophysical measurements (Baltassat et al., 2001) were here completed by a network of boreholes providing hydrogeological information: geological logs, pumping tests, water table monitoring, etc. MRS results ($w(z)$ – vertical distributions of the MRS water content and $k(z)$ – MRS estimation of hydraulic permeability) were carefully calibrated using boreholes before expanding these results to the whole basin.

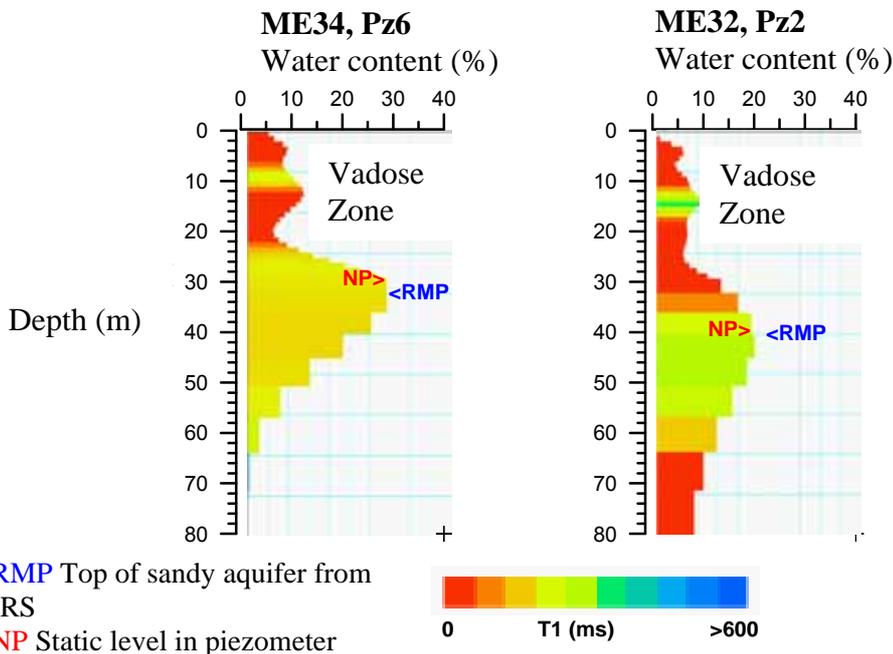


Figure 2 – MRS water content resulting from inversion and top of the sandy aquifer estimated at the MRS water content maximum as the result of an empirical correlation with the static level measured at the piezometer.

In chalk and limestone, MRS measures the signal from both water in the aquifer and water in the unsaturated zone. Consequently, the static water level cannot be directly derived from MRS results. On the basis of an empirical correlation with the static level measured at five piezometers, the top of the sandy aquifer was estimated at the maximum of the MRS water content log (figure 2). This

procedure extended to the whole studied area made it possible to draw the map of the sandy aquifer top from MRS results.

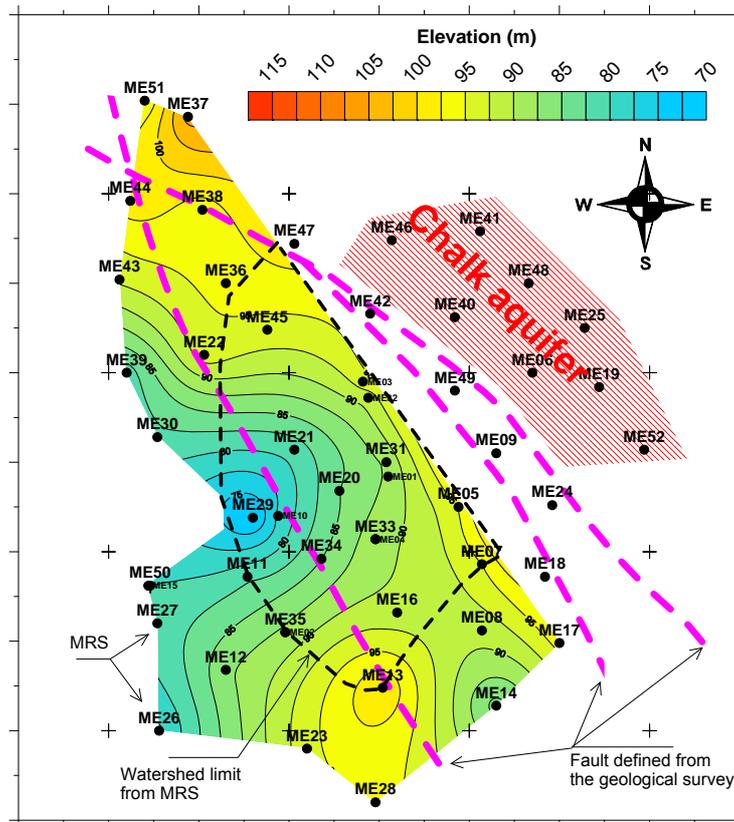


Figure 3 - Water table elevation mapping using MRS over the “Cuisian” sandy aquifer catchment basin.

The tops of the sandy aquifer determined at each MRS were interpolated over a dense network of more than 50 MRS soundings (figure 3). From the calibration with piezometers, localized in the centre of the basin, an accuracy of +/- 2m was estimated but this should worsen with increasing distance because of the geographic location of the piezometers. Such a “water table” mapping allows the limit of the catchment basin to be drawn (figure 3).

NATURE AND HETEROGENEITY OF THE AQUIFER

The type of water bearing material is characterized not only by the water content but also by the decay time of the MRS signal. The shorter the decay time the smaller the pores. In a known geological context, if media have noticeable variations in terms of MRS parameters then the MRS response is an indicator of the nature of the medium. This makes it possible to separate the response of sand aquifer from chalk. A bivariate study with (T1,W) and (T2*,T1) parameters on the whole dataset made it possible to discriminate the eastern chalk aquifer, east and west sandy aquifer.

Another interesting approach was to generate MRS profiles across the watershed showing water content variations. In figure 4 is presented the interpolation of MRS water content using automatic inversion (and fixed regularization parameter). Because there is a trade-off between thickness of aquifer and water content (Legchenko et al., 2004), we tested several approaches, such as using fixed thickness of the saturated zone in the sandy aquifer.

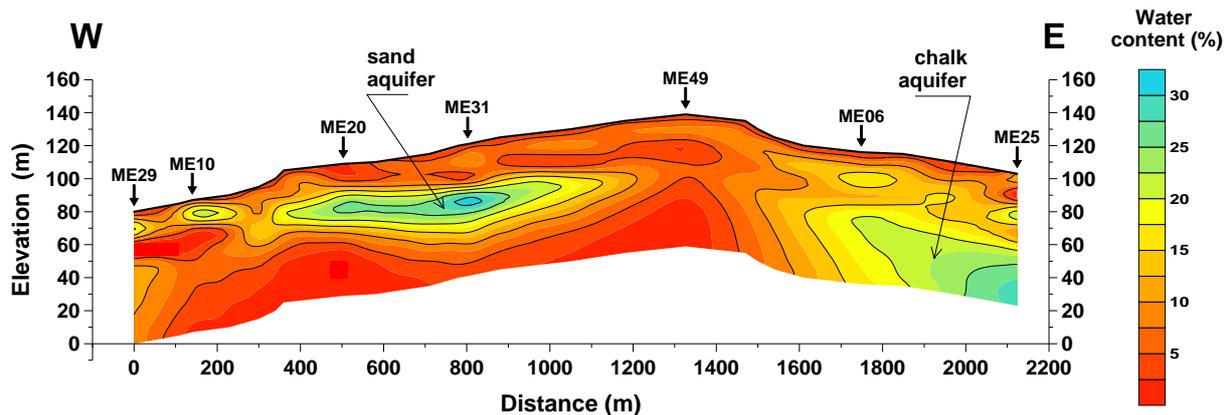


Figure 4 – East-west MRS water content profile derived from 7 soundings providing a 2D image of aquifer heterogeneity

CONCLUSIONS

Across all the studied area (3 km²), the subsurface structures were studied using 2D electrical resistivity tomography (ERT). More than 60 magnetic resonance soundings (MRS) were taken between 2000 and 2005. Useful information on the structural geology was derived from ERT results. MRS allowed the watershed to be delineated and lateral variations in the hydrodynamic properties of the aquifer to be generally characterised. This information, added to the geology, geochemistry, etc, was then used to generate hydrogeological models aimed at obtaining a better understanding of water and associated solutes transfer in this test site.

Sharing our experience, we hope that it will be used by other teams for designing future hydrogeophysical studies.

This work was funded by the European FP5 PEGASE project (Contract EVK1-CT1999-00028 financed by the EU through its 5th PCRDT), the European Union FP6 Integrated AquaTerra Project (Project no. GOCE 505428) under the thematic priority “Sustainable development, global change and ecosystems”, the BRGM POLDIF research project, the Agreement 012095 with the Seine-Normandy Water Authority (*l’Agence de l’Eau Seine Normandie*) and within the framework of the Ph.D. thesis of X. Morvan, financed by the Centre Regional Council (*Conseil Régional Centre*).

REFERENCES

- Baran N., Mouvet C. Gutierrez A., Morvan X. (2005) – Source des Brévilles (Montreuil-sur-Epte, Val-d’Oise). Bilan des activités pour l’année 2004 et synthèse pour la période 2000-2005. Rapport final. BRGM/RP-54357-FR. 99 p., 61 ill.
- Morvan X. (2004) – Influence de différentes caractéristiques du milieu aux échelles de la parcelle expérimentale et du bassin hydrogéologique sur la contamination d’un aquifère sableux par les phytosanitaires. Thèse de l’Université d’Orléans.
- Legchenko A., Baltassat J-M., Bobachev A., Martin C., Robin H., and Vouillamoz J-M., (2004), - Magnetic resonance sounding applied to aquifer characterization, *Journal of Ground Water*, vol. 42, Number 3, May-June 2004, pp. 363-373.
- Wyns R., avec la collaboration de Morvan X. (2001) –Modélisation géométrique de l’aquifère yprésien du bassin versant de Montreuil-sur-Epte ‘Val d’Oise). BRGM/RP 51051-FR, 17 p., 5 fig.
- Baltassat J-M., F. Mathieu, A. Legchenko, J-M. Miehé, (2001) - Caractérisation des aquifères dans le secteur de Montreuil-sur-Epte (Val-d’Oise) par la Résonance Magnétique Protonique (RMP). *Rapport BRGM/RP-51360-FR.*, 41 p., 21 fig., 4 tabl., 5 ann., (volume hors texte).

GEOPHYSICAL CHARACTERIZATION OF WEATHERED GRANITE AQUIFERS IN THE HYDERABAD REGION, ANDHRA PRADESH, INDIA

**Baltassat J.M.¹, Krishnamurthy N.S.², Girard J.F.¹, Dutta S.², Dewandel B.³,
Chandra S.², Descloitres M.⁴, Legchenko A.⁵, Robain H.⁶, Ahmed S.²**

¹ BRGM, 3, avenue C. Guillemin, BP 6009, 45060, Orléans cedex 2, France

² National Geophysical Research Institute, Hyderabad-500007, India

³ BRGM, Indo-French Center for Groundwater Research at NGRI, Hyderabad-500007, India

⁴ IRD, Indo French Cell for Water Science at IIS, Bangalore 560012, India

⁵ IRD, LTHE, BP53, 38041, GRENOBLE Cedex 9, France

⁶ IRD, 32, Av. Henri Varagnat, 93143 Bondy Cedex, Paris, France.

INTRODUCTION

The region of Hyderabad (Andhra Pradesh, India), with a geology essentially composed of Archean granite and its semi-arid climate, is representative of central and south India. The Green Revolution of the seventies has led to a complete inversion of the irrigation scenario with groundwater sustaining most irrigated land instead of the previously used surface water. Nowadays, the strain on groundwater resources due to the pumping of large quantities of water threatens the sustainability of agricultural and general development.

The principal tool to evaluate management scenarios for hydrosystems is groundwater modelling. One of the major prerequisites for establishing the reliability of such models is an accurate knowledge of the geometry and hydrodynamic properties of the aquifer. Borewell and pumping tests are time consuming and expensive. A reliable geophysical characterization of hard rock would indeed be a valuable tool as a complement to a hydrogeological investigation since it helps to extrapolate hydrogeological information between boreholes and makes it possible to reveal lateral variations at a reasonable cost.

A methodology based on the combined use of electrical and electromagnetic methods (Electrical Resistivity Tomography, ERT, Time Domain ElectroMagnetic, TDEM) for locating and delineating subsurface potential water-bearing zones and Magnetic Resonance Sounding (MRS) for estimating the hydrodynamic characteristics of aquifers was implemented. Field investigations were carried out on two hydrogeological watersheds in the Hyderabad region: the Maheshwaram and Wailpally watersheds, whose subsurface is composed of the same weathered granite.

HYDROGEOLOGICAL SETTING

In such a crystalline basement, aquifers generally occupy the upper tens of metres of the subsurface profile, which can be divided according to a conventional conceptual model into several stratiform compartments that together constitute the aquifer, but which are characterized by distinct hydrogeological properties (Lachassagne et al., 2001, Wyns et al. 2004). These different compartments are:

- The upper unit (alterite or saprolite) composed of weathered and decayed rocks of clayey-sandy composition. They play an essential storage role in the functioning of the aquifer.
- The intermediate Fissured Zone (FZ) is characterized by horizontal fissures which provide higher values of hydraulic conductivity, but also has a significant storage role.
- The underlying fresh, unweathered rock is highly permeable only locally, where affected by tectonic fracturing, and it has a very limited storativity.

The global geometry of this composite is mainly controlled by the weathering processes, which front are parallel to paleosurfaces and thus lead to a mainly sub-horizontal and stratiform structure. This conceptual schema is well confirmed in the Maheshwaram through several tens of scientific wells and numerous hydraulic testing performed in the framework of the Indo-French Center for Groundwater Research (IFCGR) of Hyderabad (Marechal et al. 2005, Dewandel et al. 2006). As the saprolite is generally desaturated, the saturated aquifer is mainly developed in the FZ which is affected by numerous horizontal fissures. These fissures whose density diminish with depth are responsible for a marked anisotropy of permeability.

MRS RESULTS

Geophysical field data were carefully compared to borehole lithology and hydrogeological testing data following such a detailed aquifer schema. On KBTanda rice fields (Maheshwaram watershed) contrasted MRS response were observed in 1999 and 2003, while the water table had respectively deepened from 5 to 12 m below ground level (BGL). IPMR11, measured in November 1999 show a well expressed MRS signal with a maximum amplitude of 30 nV while KB1 measured December 2003 hardly emerge from a 7.5 nV noise level (Figure 1).

In 2005, in the Wailpally watershed, similar contrasted responses were observed on two sites, 2km apart, with similar weathering conditions : MRS maximum amplitudes are respectively 65 and 20 nV in the non irrigated area of Kalvakuntala where water levels are at 9 m BGL and at the heavily irrigated paddy field of Yalamakana where the water table is as deep as 19 m BGL.

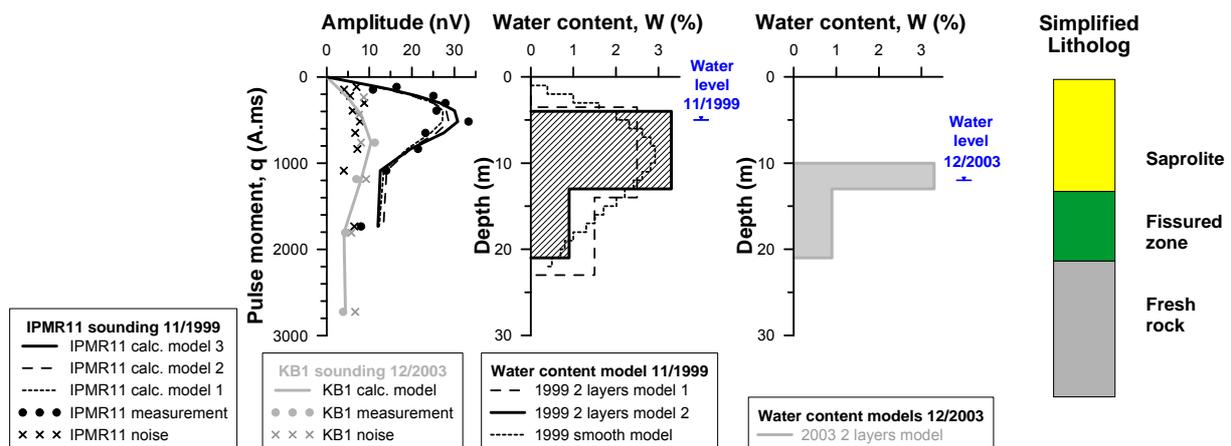


Figure 1: Contrasted MRS amplitude responses observed on KBTanda site (Maheshwaram watershed) in 1999 and 2003.

These contrasted observations are modelled using geometrical constraints provided by detailed borehole lithology and demonstrate that MRS is able to assess the groundwater table depletion over time or spatially, in agreement with piezometric measurements and with local agricultural activities. The modelled saprolite water content ranges from 2 to 6 % while the FZ water content is lower than 1.5 % (Figure 1). In agreement with a numerical simulation, these latter and lower water contents correspond to the sensitivity limit of the method considering a detection threshold at 10 nV (corresponding to about twice the instrumental noise level) and this range of aquifer thickness and depth. We can thus conclude that the currently available instrumentation (NUMIS^{PLUS}) is adapted for characterising the water-saturated saprolite but failed to fully resolve the FZ aquifer where the water content is lower.

These contrasted observations are modelled using geometrical constraints provided by detailed borehole lithology and demonstrate that MRS is able to assess the groundwater table depletion over time or spatially, in agreement with piezometric measurements and with local agricultural activities. The modelled saprolite water content ranges from 2 to 6 % while the

FZ water content is lower than 1.5 % (Figure 1). In agreement with a numerical simulation, these latter and lower water contents correspond to the sensitivity limit of the method considering a detection threshold at 10 nV (corresponding to about twice the instrumental noise level) and this range of aquifer thickness and depth. We can thus conclude that the currently available instrumentation (NUMISPLUS) is adapted for characterising the water-saturated saprolite but failed to fully resolve the FZ aquifer where the water content is lower.

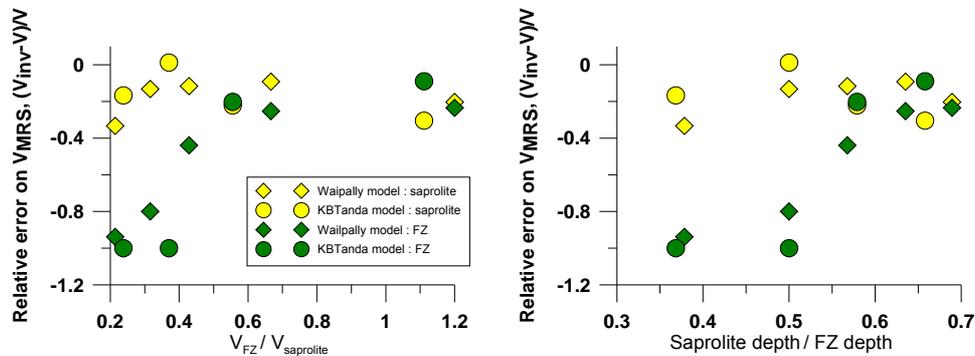


Figure 2 : Screening effect of the upper water bearing saprolite on the determination of the lower FZ when using an automatic process of inversion. Effect is presented as the relative error on the water volume V_{MRS} obtained after inversion with respect to the volume (left) and the depth (right) ratio between both units.

The MRS screening effect of the saprolite water layer on the underlying FZ is analysed using numerical simulation of MRS inversion results using an automatic process applied on synthetic model of water content corresponding to the KBTanda and Waipally weathered layers geometry. The effect starts to be really considerable (more than 40 % of the FZ is taken up) when the saprolite depth is two times less than the FZ depth or when saprolite water volume is twice the FZ one (Figure 2). The limit of the inversion schema of interpretation in this context is thus underlined.

GEOPHYSICAL MODEL OF THE WEATHERED GRANITE AQUIFER

From the analysis of MRS data and further geoelectrical and geomagnetic data, a geophysical model of the Hyderabad region weathered granite aquifer is proposed, where the different aquifer parts are clearly distinguished by their MRS, electrical and magnetic characteristics. Resistivity and magnetic susceptibility show significant variations at the lithological limits and significant increase with depth (Figure 3).

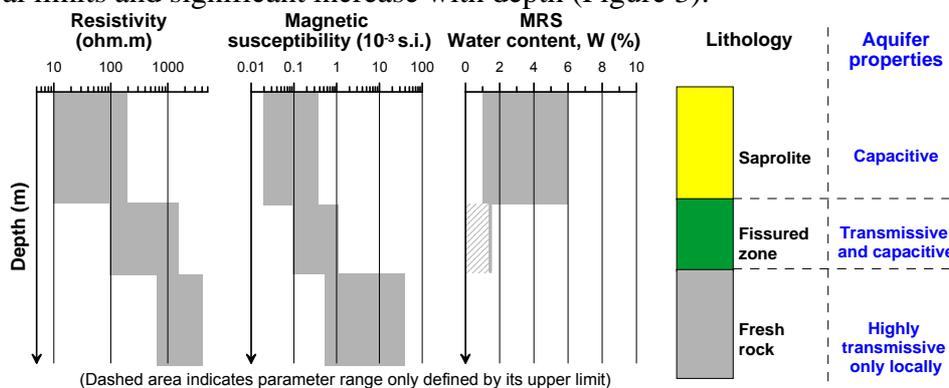


Figure 3 : Geophysical model of the weathered granite aquifer of the Hyderabad region.

MRS water content estimations are comparable with those obtained in Burkina Faso granite (Vouillamoz, 2005), thus suggesting that these results could be extended to similar geological settings around the world. The observed significant variations in magnetic

susceptibility along the weathered profile are an indicator of potential magnetic field inhomogeneities that could significantly affect the MRS response. It was however not necessary to invoke them for interpreting the contrasted MRS responses observed in Maheshwaram and Wailpally watershed since they are fully explained by water table variations.

CONCLUSION

The proposed geophysical model of the weathered granite aquifer explain the contrasted MRS observations made at different periods and over different sites. They correspond to water level variations. As a practical result, the potential contribution of geophysical methods to groundwater management can be derived from this better known geophysical setting, such as:

- the MRS definition of the Saprolite water content could help to evaluate and monitor the water resources,
- for borewell siting the proposed methodology uses electrical and EM method for locating structures and MRS for estimating hydraulic characteristics.

This is nevertheless not satisfactorily since the transmissive part of aquifer (the FZ) which is most often the target of the groundwater exploration in this context cannot be fully resolved and because the low signal to noise (S/N) ratio encountered in this environment doesn't make it possible to faithfully evaluate the relaxation time constants and then to give access to the hydraulic conductivity of rocks. Further development on the potential effect of magnetic field inhomogeneities and further MRS determination of FZ water content or hydraulic conductivity in this context will require a gain of at least one order of magnitude in the S/N ratio. The well documented sites investigated in the Hyderabad region during this project could be the laboratory for such future experiments.

This work was partly financed by the Indo-French Centre for The Promotion of Advanced Research (IFCPAR, project N°2700-W1), New-Delhi.

REFERENCES

- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.C. and N.S. Krishnamurthy 2006. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. J. of Hydrology. Under review.
- Lachassagne, P., R. Wyns, P. Bérard, T. Bruel, L. Chéry, T. Coutand, J.F. Desprats, and P. Le Strat. 2001. Exploitation of High-Yields in Hard-rock Aquifers: Downscaling Methodology Combining GIS and Multicriteria Analysis to Delineate Field Prospecting Zones. Ground Water, v. 39 (4), p. 568-582.
- Maréchal J.C., B. Dewandel, K. Subrahmanyam (2005)- Use of hydraulic tests at different scales to characterise fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer, Water Resources Res., vol.40, W11508.
- Vouillamoz, J.M., Descloitres, M., Toe, G., and Legchenko, A., (2005) Characterization of crystalline basement aquifers with MRS: comparison with boreholes and pumping tests data in Burkina Faso. *Near Surface Geophysics*, 2005, 3, 205-213.
- Wyns R., Baltassat J.M. , Lachassagne P., Legtchenko A., Vairon J. (2004).- Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). Bull. Soc. Géol. Fr., 175(1), 21-34.

IX. SELECTION D'ARTICLES

IX.1 RMP

- IX.1.1* Girard et al., 2005, Stability of MRS signal and estimating data quality, Near Surface Geophysics.
- IX.1.2* Boucher, Girard et al., 2006, Using 2D inversion of magnetic resonance soundings to locate a water-filled karst conduit, Journal of Hydrology.
- IX.1.3* Girard, J-F., et al., 2007, 2D magnetic resonance tomography applied to karstic conduit imaging, Journal of Applied Geophysics.
- IX.1.4* Girard, J-F. et al., 2007, Aquifers imagery and hydrodynamic parameters estimation using proton Magnetic Resonance Soundings, Taylor & Francis.
- IX.1.5* Legchenko A., M. Ezersky, J-F. Girard, J-M. Baltassat, M. Boucher, C. Camerlynck, A. Al-Zoubi, 2008, Interpretation of magnetic resonance soundings in rocks with high electrical conductivity, Journal of Applied Geophysics
- IX.1.6* Legchenko A., Ezersky M., Camerlynck C., Al-Zoubi A., Chalikakis K. and Girard J-F., 2008,, Locating water-filled karst caverns and estimating their volume using magnetic resonance soundings, Geophysics.
- IX.1.7* Girard J-F., Legchenko A., Boucher M., Baltassat J-M., 2008, Numerical study of the variations of magnetic resonance signals caused by surface slope, Journal of Applied Geophysics.

IX.2 CSEM

- IX.2.1* Bourgeois B. and Girard J-F., 2010, First modelling results of the EM response of a CO₂ storage in the Paris Basin, Oil & Gas Science & Technology.

IX.3 GPR

- IX.3.1* Bano M., Loeffler O., Girard J-F., 2009, GPR response and FDTD modeling to fuel infiltration in a sand box experiment, Cptes Rendus. Acad. Sc.