

# Application des méthodes géophysiques (autres que sismique) au suivi des stockages géologiques de CO<sub>2</sub>

Rapport final

**BRGM/RP -54975-FR**  
Décembre 2006

Étude réalisée dans le cadre de la  
Convention CEP&M n°2005/04

**H. Fabriol et N. Debeglia**

**Vérificateur :**

Nom : A. Bitri

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

**Approbateur :**

Nom : H. Modaressi

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

**Mots clés :** CO<sub>2</sub>, Stockage, Monitoring, Géophysique, Gravimétrie, Densité, Résistivité électrique, Méthodes électriques, Electromagnétisme, EM, Potentiel spontané, PS

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Fabriol H., Debeglia N.** (2006) - Application des méthodes géophysiques (autres que sismique) au suivi des stockages géologiques de CO<sub>2</sub>. BRGM/RP -54975-FR, 38 p., 16 fig.

## Synthèse

Dans le cadre du projet PICOREF « Piégeage du CO<sub>2</sub> dans les réservoirs géologiques en France », cofinancé par le Réseau des Technologies Pétrolières et Gazières (RTPG), deux objectifs principaux doivent être atteints : la caractérisation de sites français adaptés au piégeage du CO<sub>2</sub> et la préparation d'un dossier de demande d'autorisation de stockage. Un secteur d'étude a été sélectionné dans le Bassin Parisien. Il se situe entre Sézanne et Sens, Romilly sur Seine et Nangis. Le projet inclut également la mise au point d'une méthodologie pour étudier et surveiller un site de stockage. Le présent rapport a pour objectif de faire un état des lieux des méthodes géophysiques de surveillance, autres que la sismique.

Durant les quatre phases que comprend un projet de stockage géologique de CO<sub>2</sub>, la surveillance géophysique joue un rôle primordial pour assurer la sécurité et permettre une gestion optimale de l'opération. La sismique réflexion répétée ou sismique 4 D (time lapse seismic) a été appliquée avec succès sur les sites de Sleipner et de Weyburn (Art et al., 2004, White et al., 2004). C'est cependant une méthode très coûteuse et il est maintenant nécessaire d'examiner si d'autres méthodes géophysiques, moins onéreuses, microgravimétrie, méthodes électriques et électromagnétiques, sismique passive, etc., sont en mesure d'apporter des éléments complémentaires, en particulier dans les intervalles de temps entre les campagnes sismiques. Par ailleurs, les méthodes géophysiques fournissant des indications indirectes et non uniques, une approche intégrée, couplant plusieurs techniques est recommandée (Hoversten et Myer, 2000).

L'emploi simultané de la sismique et de l'électromagnétisme, sensibles à des propriétés physiques différentes, devrait par exemple permettre de réduire les ambiguïtés d'interprétation de la sismique, en particulier lorsque plusieurs constituants gazeux préexistants coexistent dans le réservoir avec le CO<sub>2</sub> (Hoversten et al., 2003). De même, l'exploitation couplée de la sismique réflexion et de la microgravimétrie est actuellement appliquée à la surveillance du site de Sleipner (Nooner et al., 2003, 2006). La variation mesurée entre deux campagnes de mesures gravimétriques sous-marines, réalisées avec un intervalle de 2 ans, est de l'ordre de 10 µGal, alors que l'incertitude est estimée à 5 µGal. Cette différence est associée aux 2 10<sup>6</sup> T de CO<sub>2</sub> injectées entre les deux campagnes et permet de contraindre les estimations de la densité du CO<sub>2</sub> et par conséquent l'interprétation de la sismique. Une répétition des mesures est prévue en 2007.

Dans les conditions géothermiques moyennes du Bassin de Paris (gradient 33°C/km), les densités du CO<sub>2</sub> super-critique seraient de l'ordre de 600-650 kg/m<sup>3</sup> entre 800 et 1500 m de profondeur (Guillou-Frotier, 2004). Dans ces conditions et dans l'hypothèse d'un stockage à une profondeur moyenne de 1000 m, la variation de masse injectée entre deux acquisitions devrait être au minimum de 2.2 MT. La détection de très faibles variations temporelles de la gravité impose, par ailleurs, d'améliorer la qualité des mesures, en particulier grâce à une acquisition précise de tous les facteurs pouvant

affecter leur répétitivité. Les expériences menées pour la surveillance de réservoirs géothermiques ou des volcans montrent que si la précision des acquisitions gravimétriques peut être assurée grâce à des protocoles de mesures sévères, l'identification, l'acquisition et la correction des facteurs de perturbation environnementaux, en particulier hydrogéologiques, ne sont pas entièrement maîtrisées. Il faudrait examiner si un mode d'acquisition gravimétrique différent (par exemple : mesures de gradients ou mesures en forage) pourrait contribuer à résoudre ces problèmes.

Pour ce qui est des méthodes électriques, deux grandes catégories de méthodes peuvent être distinguées, celles avec mesures en surface et celles faisant appel aux mesures entre puits. Comme la microgravimétrie, elles sont à l'étape de test, ont montré des résultats prometteurs et demandent à être appliquées de manière expérimentale dans différentes configurations géologiques. Les méthodes limitées aux seules mesures en surface ne sont pas recommandées dans le cas d'un stockage dans des couches réservoirs relativement minces (moins de quelques dizaines de mètres) et situées à plus de 1500-2000 m de profondeur. A cette profondeur, en effet, le pouvoir de résolution de ces méthodes intégrantes dépasse largement l'épaisseur du réservoir. Un effort particulier devrait être mené également sur les études sur échantillon des propriétés électriques des roches, pour déterminer le comportement de la résistivité en fonction de la porosité, la pression, la température, la pression partielle de CO<sub>2</sub>, la conductivité de la saumure etc. Finalement, des mesures sur échantillon et des modélisations ont montré que, sur certains sites, les circulations de CO<sub>2</sub> pourraient être à l'origine d'anomalies de PS (Potentiel Spontané) mesurables. La PS pourrait donc être envisagée comme méthode de surveillance des flux de CO<sub>2</sub> à grande échelle, avec une faible résolution et un coût faible.

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
1.1. GÉNÉRALITÉS .....	9
1.2. STRATÉGIES PRECONISÉES POUR L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET LA MISE EN ŒUVRE .....	12
1.2.1. Simulations, modélisations, inversions .....	12
1.2.2. Validation sur le terrain et état(s) zéro .....	12
<b>2. La microgravimétrie .....</b>	<b>13</b>
2.1. L'EXEMPLE DE SLEIPNER .....	13
2.1.1. Résultats de l'étude de faisabilité – Principes de modélisation des variations de gravité (Williamson et al., 2001) .....	14
2.1.2. Expression du contraste de densité et de la saturation à l'intérieur de la bulle .....	15
2.1.3. Simulations gravimétriques de différents scénarios de stockage .....	16
2.1.4. Résultats des deux premières campagnes d'acquisition (2002-2005) .....	17
2.2. APPLICABILITÉ DE LA MÉTHODE DANS UN AUTRE CONTEXTE – HYPOTHÈSE D'UNE SÉQUESTRATION DANS LE BASSIN DE PARIS .....	18
2.3. APPLICATION DE LA MICROGRAVIMÉTRIE 4D À LA SURVEILLANCE DE RÉSERVOIRS DANS LE CADRE DE LA RÉCUPÉRATION ASSISTÉE D'HYDROCARBURES OU DE STOCKAGE DE GAZ .....	20
<b>3. Les méthodes électriques et EM .....</b>	<b>23</b>
3.1. VARIATION DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE AVEC LA SATURATION EN CO <sub>2</sub> .....	23
3.2. EXEMPLE DE SIMULATION : CHAMP PÉTROLIER DE SCHRADER BLUFF (USA) .....	25
3.3. AUTRES EXEMPLES .....	27
3.4. LE POTENTIEL SPONTANÉ (PS) .....	30
<b>4. Conclusions .....</b>	<b>35</b>
<b>5. Bibliographie .....</b>	<b>37</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 : Sections sismiques passant par le point d'injection acquises à Sleipner en 1994 et 1999 et différence entre les deux sections (d'après Eiken et al., 2000) .....	14
Figure 2 : Hypothèse de variation de la température et de la densité en fonction de la profondeur à Sleipner (d'après Williamson et al., 2001) .....	15
Figure 3 : Evolution de la densité en fonction de la profondeur (pression) pour différents gradients thermiques ( d'après Guillou-Frottier, 2004).....	16
Figure 4 : a) Profil de la variation dans le temps de l'anomalie résiduelle lissée, superposé à l'anomalie gravimétrique calculée pour deux gradients de températures : élevé (densité moyenne du CO <sub>2</sub> de 550 kg/m <sup>3</sup> ) et faible (densité moyenne du CO <sub>2</sub> de 700 kg/m <sup>3</sup> ). Les résultats des modèles et les observations ont été lissés en faisant la moyenne avec les valeurs des sites proches. Les valeurs observées des changements de gravité s'ajustent au mieux avec le modèle issu de la sismique avec gradient de température élevé. b) Graphe de la différence entre le modèle et les observations (au sens de la norme $\chi^2$ ), représenté en fonction de la densité du CO <sub>2</sub> utilisée dans a) pour le modèle sismique. La différence la plus faible correspond à une densité de 530 kg/m <sup>3</sup> $\pm$ 65 kg/m <sup>3</sup> avec un intervalle de confiance de 95% (bande grisée). (D'après Nooner et al. , 2006).....	18
Figure 5 :Variation de masse minimale détectable par microgravimétrie (hypothèse d'une bulle sphérique de CO <sub>2</sub> ) .....	19
Figure 6 : Simulation de l'effet gravimétrique du réservoir de Prudhoe bay après 5 ans d'injection (d'après Hare et al., 1999).....	21
Figure 7 : Evolution du champ de gravité sur le site d'Izaute, Aquitaine, entre janvier 2003 et juillet 2004. Points bleus : mesures discrètes, trait bleu : mesures continues. Trait rouge : stock de gaz (en %), pointillé rouge : pression dans le réservoir (en %). Le signe de l'anomalie gravimétrique a été inversé pour faciliter la comparaison. (d'après Bate, 2005) .....	21
Figure 8 : Expériences de changement de la résistivité dans des échantillons de grès Berea, avec des saumures de résistivité différente et contenant du CO <sub>2</sub> (d'après Myer, 2001).....	23
Figure 9 : Variation de la résistivité globale en fonction de la saturation en gaz S <sub>g</sub> , pour une saumure de résistivité $\rho$ de 0,33 Ohm.m et une porosité $\phi$ de 25%.(d'après Hoversten et Gasperikova, 2003).....	24
Figure 10 : Amplitude du champ électrique EM naturel en fonction de la fréquence en bleu. Champ électrique induit par une source EM de 10 A dans un dipôle de 100 m : ligne rouge. Champ de Schrader Bluff, Alaska (d'après Hoversten et Gasperikova, 2003).....	25
Figure 11 : Changement net de saturation en eau (Sw) après 15 ans d'injection, en couleur. Les isovaleurs correspondent aux variations en % du champ électrique mesuré à la surface. Les puits d'injection sont représentés par des points (d'après Hoversten et Gasperikova, 2003). .....	26

Figure 12 : Changement net de saturation en CO <sub>2</sub> (Sw) après 15 ans d'injection, en couleur ; les contours d'isovaleurs correspondent aux variations en % du champ électrique mesuré à la surface. (d'après Hoversten et Gasperikova, 2003).....	27
Figure 13 : Induction EM entre puits : L'émetteur et le récepteur sont alternativement déplacés dans les puits. Le courant induit par l'émetteur génère un champ magnétique qui est enregistré dans le second puit (d'après Kirkendall et Roberts 2001) .....	28
Figure 14 : Induction EM entre puits : Une image de la résistivité dans le plan vertical des deux puits est obtenue a) avant l'injection, b) après 3 mois d'injection. c) Une variation positive de résistivité traduit la présence de CO <sub>2</sub> (d'après Kirkendall et Roberts 2001). .....	29
Figure 15 : Variations de potentiel PS mesurées sur un échantillon parcouru par du CO <sub>2</sub> . Réponse aux variations lentes (a) et rapides (b) de la pression d'injection, Moore et al., 2004. ....	31
Figure 16 : Modèle utilisé pour simuler l'effet PS dû à l'injection de CO <sub>2</sub> dans la formation Frio. Le puits et le point d'injection sont matérialisés en rouge. Dans le modèle b), la formation est tronquée à droite. D'après Hoversten et Gasperikova (2003). ....	32
Figure 17 : a) Coupe des distribution de la pressions en profondeur pour le modèle de la fig. 16a. b) Potentiel électrique pour ce modèle avec un coefficient de couplage L= - 15 mV/atm. D'après Hoversten et Gasperikova (2003) .....	32
Figure 18 : Effet PS dû à la circulation de CO <sub>2</sub> dans une couche de sable de 100 m d'épaisseur située à différentes profondeurs : 500 m, 1000 m , 1500 m et 2000 m. (d'après Hoversten et Gasperikova, 2003). ....	33

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Etapes d'un projet de stockage de CO <sub>2</sub> (modifié à partir du BGS, Février 2005) .....	10
Tableau 2 : Application des méthodes géophysiques au domaine profond (réservoir, couverture) .....	11
Tableau 3 : Application des méthodes géophysiques à la subsurface .....	11
Tableau 4 : Synthèse des coefficients de couplage observés. Toutes les unités sont en mV/0,1MPa (d'après Moore et al., 2004). ....	31





# 1. Introduction

## 1.1. GÉNÉRALITÉS

Dans le cadre du projet PICOREF « Piégeage du CO<sub>2</sub> dans les réservoirs géologiques en France », cofinancé par le Réseau des Technologies Pétrolières et Gazières (RTPG), deux objectifs principaux doivent être atteints : la caractérisation de sites français adaptés au piégeage du CO<sub>2</sub> et la préparation d'un dossier de demande d'autorisation de stockage. Un secteur d'étude a été sélectionné dans le Bassin Parisien. Il se situe entre Sézanne et Sens, Romilly sur Seine et Nangis. Le projet inclut également la mise au point d'une méthodologie pour étudier et surveiller un site de stockage. Le présent rapport a pour objectif de faire un état des lieux des méthodes géophysiques de surveillance, autres que la sismique.

Durant les quatre phases que comprend un projet de stockage géologique de CO<sub>2</sub>, la surveillance joue un rôle primordial pour assurer la sécurité et permettre une gestion optimale de l'opération. Le tableau 1 montre comment s'organise un projet de stockage et la place qu'occupent la surveillance et le monitoring. Les tableaux 2 et 3 détaillent comment les méthodes géophysiques peuvent s'appliquer par domaine de profondeurs (réservoir-couverture et proche surface) à la détection du CO<sub>2</sub>.

La surveillance géophysique des sites de séquestration géologique de CO<sub>2</sub>, par des répétitions de mesures (« time-lapse » ou 4D) ou par l'enregistrement en continu de paramètres physiques (monitoring), a un double intérêt (Hoversten et Myer 2000, Chalaturnyk et Gunter, 2004) : Durant la phase opérationnelle, elle devrait contribuer à optimiser les procédures de stockage en quantifiant le volume de CO<sub>2</sub> effectivement piégé. Durant les phases de vérification et de suivi environnemental, elle devrait aider à contrôler la sécurité du stockage. Largement utilisées par les industries pétrolière, gazière et géothermique pour le suivi de réservoirs, ces méthodes devraient être aptes à détecter les déplacements du CO<sub>2</sub> et à déceler de possibles fuites. Elles pourraient également permettre de vérifier l'intégrité de la couverture et de déceler d'éventuels impacts environnementaux, sur les aquifères, les terrains de surface, etc.

La sismique réflexion a été la première méthode à être testée et mise en œuvre dans le cadre des projets de séquestration de CO<sub>2</sub>. L'imagerie sismique, couramment employée pour la surveillance de réservoirs d'hydrocarbures, en particulier dans le cadre de la récupération assistée (Enhanced Oil Recovery, EOR), est actuellement appliquée sur les sites de Sleipner et de Weyburn où elle a fait ses preuves (Arts et al., 2004, White et al., 2004). C'est cependant une méthode très coûteuse et il est maintenant nécessaire d'examiner si d'autres méthodes géophysiques, moins onéreuses, microgravimétrie, méthodes électriques et électromagnétiques, sismique passive, etc., sont en mesure d'apporter des éléments complémentaires, en particulier dans les intervalles de temps entre les campagnes sismiques.

Etape du projet	Durée	Préalables	Objectifs de la surveillance/monitoring
<b>Pré-injection</b>	3- 5 ans	Construire le modèle géologique	Conception du programme de surveillance + Campagnes de mesures des lignes de base (état zéro du système)
		Modélisation prédictive du comportement du système	
		Evaluation de l'impact environnemental	
		Prévoir des stratégies de mitigation	
		Evaluation du risque	
		Préparer le dossier réglementaire	

Etape du projet	Durée	Objectifs de la surveillance/monitoring
<b>Injection</b>	5- 50 ans	Vérification de la quantité stockée
		Evaluation/Mesure des fuites
		Satisfaire les exigences réglementaires en matière de santé, sécurité et environnement
		Comparer et ajuster les modèles prédictifs (history matching)
		Aide à la gestion du champ : ajuster les paramètres d'injection, déclencher les actions de mitigation
		Apporter des éléments de crédibilité aux décideurs face aux questions de la société

Etape du projet	Durée	Objectifs de la surveillance/monitoring
<b>Post-Injection Fermeture</b>	50-100 ans	Mêmes objectifs que durant la phase d'injection (excepté l'ajustement des paramètres d'injection)
		Démontrer que le système se comportera comme prévu et qu'il peut être abandonné

Etape du projet	Durée	Objectifs de la surveillance/monitoring
<b>Post-Fermeture (Abandon)</b>	1000 à 2 000 ans	Ne doit plus être nécessaire, mais les données doivent être conservées et accessibles ( ! )

Tableau 1 : Etapes d'un projet de stockage de CO<sub>2</sub> (modifié à partir de DTI, mars 2005)

Méthode	Type de méthode	Caractérisation	Paramètre	Etat zéro	Pré-requis
Sismique 4 D	Indirecte	Quantitative	Vitesses P, S amplitudes atténuation	Oui	Mesures Vp, Vs sur carottes, diagraphies
Sismique de puits	Id.	Quantitative	Id.	Oui	Id.
Suivi microsismique	Id.	Qualitative	Tenseur des contraintes	Oui	Modèle de vitesse Vp, Vs
Imagerie Electrique Electromagnétisme, PS	Id.	Qualitative	Résistivité électrique $\rho$	Oui	Mesures $\rho$ sur carottes, diagraphies
Microgravimétrie	Id.	Quantitative	Densité	Oui	Mesures météo+niveau de la nappe, diagraphies
Diagraphies	Id.	Quantitative	P, T, d, $\rho$ , Vp, Vs etc.	Oui	

Tableau 2 : Application des méthodes géophysiques au domaine profond (réservoir, couverture)

Méthode	Type de méthode	Caractérisation	Paramètre	Etat zéro	Pré-requis
Imagerie Electrique Electromagnétisme	Indirecte	Qualitative	Résistivité électrique $\rho$	Oui	Mesures $\rho$ sur carottes
PS	Indirecte	Qualitative	Différence de potentiel	Oui	Modélisation

Tableau 3 : Application des méthodes géophysiques à la subsurface

Les méthodes géophysiques fournissant des indications indirectes et non uniques, une approche intégrée, couplant plusieurs techniques est par ailleurs recommandée (Hoversten et Myer, 2000). L'emploi simultané de la sismique et de l'électromagnétisme, sensibles à des propriétés physiques différentes, devrait par exemple permettre de réduire les ambiguïtés d'interprétation de la sismique, en particulier lorsque plusieurs constituants gazeux préexistants coexistent dans le réservoir avec le CO<sub>2</sub> (Hoversten et al., 2003). De même, l'exploitation couplée de la sismique réflexion et de la microgravimétrie est actuellement appliquée à la surveillance du site de Sleipner (Nooner et al., 2003, 2006).

## **1.2. STRATÉGIES PRECONISÉES POUR L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET LA MISE EN ŒUVRE**

### **1.2.1. Simulations, modélisations, inversions**

La faisabilité des méthodes doit être vérifiée au cas par cas, pour les différents scénarios de stockage envisageables (réservoirs d'hydrocarbures, aquifères, gisements de charbon) et en fonction des particularités de chaque site (Myer, 2000). L'applicabilité d'une technique géophysique dépend de trois facteurs : l'amplitude des variations géophysiques induites par le stockage, la résolution inhérente à la méthode et la configuration du dispositif de mesure (Benson et Myer, 2002). Les effets géophysiques prévisibles peuvent être estimés en connectant des « post processeurs » en sortie d'outils de simulation des réservoirs (Hoversten et Myer, 2000, Pruess, 2003). On peut ainsi calculer les variations géophysiques qui résulteront des modifications des propriétés physiques (pression, saturation et distribution des fluides, changements d'état), simulés à différents stades des opérations et pour différents scénarios de migration ou de fuite. L'étape suivante consistera à appliquer aux effets théoriques prédits par la modélisation des procédures d'analyses et d'inversions identiques à celles qui seront appliquées aux mesures réelles afin de sélectionner les combinaisons de méthodes et les dispositifs les mieux adaptés et d'évaluer la résolution à en attendre (Hoversten et Myer, 2000).

### **1.2.2. Validation sur le terrain et état(s) zéro**

Ces simulations numériques devront être ensuite validées par des tests de terrain afin de s'assurer que les mesures et leurs corrections peuvent être réalisées avec une précision suffisante. En particulier, il est nécessaire de vérifier que les perturbations induites par les variations temporelles sans relation avec les phénomènes à mettre en évidence peuvent être correctement éliminées. L'approche « time-lapse », consistant en des acquisitions successives permettant de quantifier les variations des effets géophysiques à différents stades du stockage, implique d'avoir enregistré l'état zéro du système, avant le début des injections, par une première série de mesures. Cet état zéro ne concerne pas seulement la valeur moyenne des paramètres qui seront étudiés mais également la manière dont ils varient naturellement dans l'espace et le temps (Benson et Myer 2002). Sans un état zéro adéquat, il sera impossible de différencier les variations induites par le stockage des variations naturelles spatiales et temporelles (influence des variables climatiques en particulier).

## 2. La microgravimétrie

### 2.1. L'EXEMPLE DE SLEIPNER

A Sleipner, 1MT de CO<sub>2</sub> résultant de l'exploitation par Statoil d'un gisement de gaz naturel, sont injectées chaque année à 1000 m de profondeur, dans le sous-sol de la mer du Nord. Le réservoir est un aquifère profond, la formation d'Utsira, constituée de sable à forte porosité surmonté par des argiles peu poreuses. Dans le cadre du projet SACS (Saline Aquifer CO<sub>2</sub> Storage), la surveillance géophysique du site a débuté en 1998. La méthode principale de surveillance est la sismique 4-D ou « time-lapse » (Eiken et al., 2000) qui, grâce à des acquisitions successives, permet de décrire l'évolution de la bulle de CO<sub>2</sub>. La géométrie de cette bulle peut en effet être estimée par l'interprétation de fortes réflexions apparaissant au niveau de son contact (Figure 1). Cette interprétation donne une image de l'enveloppe extérieure de la bulle de CO<sub>2</sub> et permet de décrire globalement le volume total occupé par le CO<sub>2</sub>. Des incertitudes subsistent cependant, car la roche n'est pas entièrement saturée en CO<sub>2</sub> et la masse de CO<sub>2</sub> effectivement stockée n'est pas connue avec précision. En effet cette masse est fonction de la densité du CO<sub>2</sub>, elle-même dépendant des conditions de pression et température dans le stockage. A Sleipner, on estime que la densité du CO<sub>2</sub> dans le réservoir pourrait varier de 350 à 700 kg/m<sup>3</sup> (Williamson et al., 2001). Par ailleurs, une partie du CO<sub>2</sub> injecté pourrait migrer vers le haut ou latéralement, à la faveur de fracture de la barrière argileuse. Enfin, une dissolution partielle du CO<sub>2</sub> devrait également intervenir, la rapidité de cette évolution étant fonction des conditions de pression, température et salinité des fluides. Des réactions chimiques avec la roche et les fluides sont également possibles. L'obtention de données gravimétrique 4-D à l'aplomb du stockage pourrait donc apporter des contraintes supplémentaires : Couplée avec les données de géométrie fournie par la sismique 4-D, elle devrait permettre d'estimer la densité, de vérifier la quantité de CO<sub>2</sub> effectivement séquestré et de détecter d'éventuelle fuite à travers la couverture.

Après une étude de faisabilité (Williamson et al., 2001) basée sur plusieurs simulations de scénarios de stockage (densité, migration), la surveillance du site de Sleipner par microgravimétrie a commencé en août 2002 par une première campagne d'acquisition (Nooner et al., 2003).

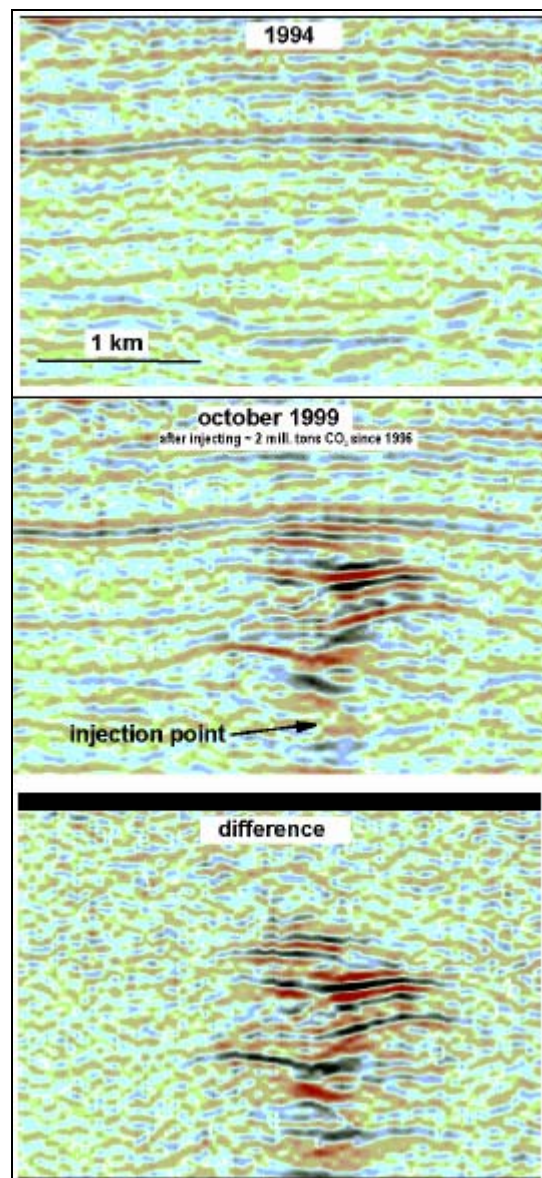


Figure 1 : Sections sismiques passant par le point d'injection acquises à Sleipner en 1994 et 1999 et différence entre les deux sections (d'après Eiken et al., 2000)

### 2.1.1. Résultats de l'étude de faisabilité – Principes de modélisation des variations de gravité (Williamson et al., 2001)

Cette étude avait pour but d'évaluer l'applicabilité du monitoring microgravimétrique pour la surveillance de l'évolution et de la migration de la bulle de CO<sub>2</sub>, dans les conditions du site de stockage de Sleipner.

Le modèle géométrique de la bulle résulte d'une acquisition sismique effectuée en 1999 et correspond aux sections interprétées obtenues entre les profondeurs 787 m et

1012 m. L'enveloppe externe de la bulle peut être approximativement décrite par un cylindre elliptique de 225 m de haut et d'extension approximative 1500 m par 600 m. Cette surface 3D définit le volume à l'intérieur duquel est situé le CO<sub>2</sub> injecté. Le volume réel de roches saturées en CO<sub>2</sub> est cependant nettement inférieur.

### 2.1.2. Expression du contraste de densité et de la saturation à l'intérieur de la bulle

Le CO<sub>2</sub> étant stocké dans des conditions proches de son point critique, sa densité est particulièrement sensible aux variations des conditions de pression et température dans le réservoir. Si on se base sur le gradient thermique estimé par la seule valeur de température (37°C à 1058 m) mesurée dans le stockage, l'évolution de la température, et donc de la densité, avec la profondeur devrait être conforme au diagramme de la figure 2, soit une densité du CO<sub>2</sub> à la profondeur de stockage de l'ordre de 700 kg/m<sup>3</sup>. Pour des gradients thermiques supérieurs, la densité du CO<sub>2</sub> pourrait être cependant beaucoup plus basse (Figure 3). A 950 m de profondeur (10 MPa, avec 10.5 MPa/km), la densité peut ainsi varier de 350 kg/m<sup>3</sup> à plus de 750 kg/m<sup>3</sup> si le gradient thermique passe de 45 à 20 °C/km.

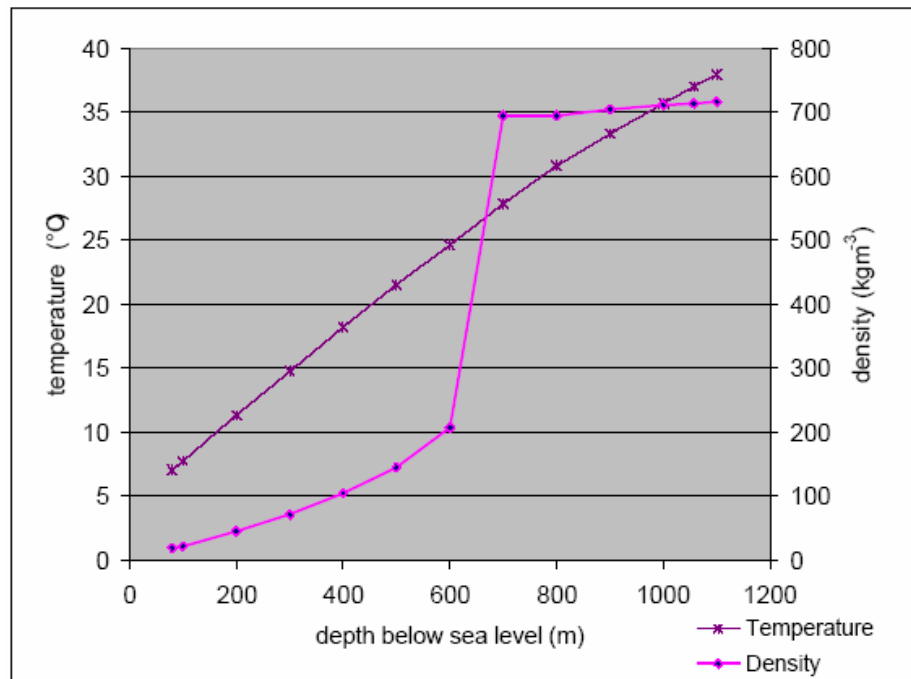


Figure 2 : Hypothèse de variation de la température et de la densité en fonction de la profondeur à Sleipner (d'après Williamson et al., 2001)



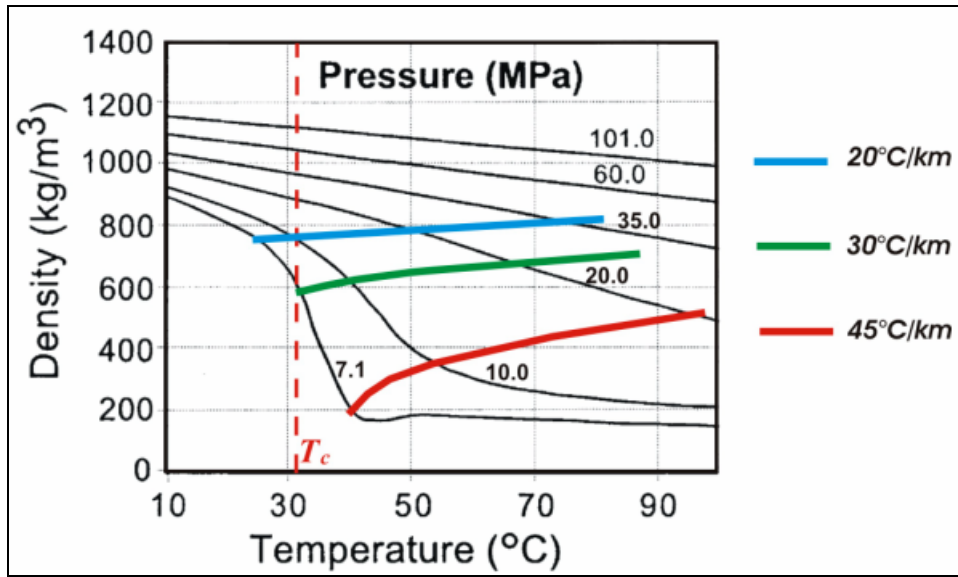


Figure 3 : Evolution de la densité en fonction de la profondeur (pression) pour différents gradients thermiques ( d'après Guillou-Frottier, 2004)

Pour une densité de CO<sub>2</sub> donnée,  $\rho_{CO_2}$ , le contraste de densité,  $\Delta\rho$ , entre la bulle et son encaissant sera fonction de la masse injectée,  $M_{CO_2}$ , du volume du stockage,  $V$  et de la densité du fluide remplacé,  $\rho_w$  :

Volume de CO<sub>2</sub> dans le stockage :  $M_{CO_2} / \rho_{CO_2} = \text{Volume de fluide expulsé } M_w / \rho_w$

Variation de masse dans  $V$  :  $\Delta M = M_{CO_2} - M_w = M_{CO_2} (1 - \rho_w / \rho_{CO_2})$

**Contraste de densité** :  $\Delta\rho = \Delta M / V = M_{CO_2} (1 - \rho_w / \rho_{CO_2}) / V$

L'anomalie de gravité entre deux instants de mesures sera donc due à la différence de masse entre le fluide expulsé de densité  $\rho_w$  et le CO<sub>2</sub> injecté dans le volume  $V$  du réservoir. Plus le contraste de densité  $\rho_w / \rho_{CO_2}$  sera élevé, plus l'anomalie (négative) sera importante.

Dans un réservoir de volume  $V$  et de porosité  $\phi$ , incluant un volume d'argile  $V_a$ , le volume occupé par du CO<sub>2</sub> pur sera :

$V_{CO_2} = M_{CO_2} / \rho_{CO_2} = V \phi (1 - V_a) S_{CO_2}$ , d'où

**$S_{CO_2}$ , saturation moyenne du CO<sub>2</sub> dans la bulle =  $M_{CO_2} / V \phi (1 - V_a) \rho_{CO_2}$**

### 2.1.3. Simulations gravimétriques de différents scénarios de stockage

Les effets gravimétriques induits par l'injection de CO<sub>2</sub> ont été estimés pour les deux modèles géométriques résultant de l'interprétation des campagnes sismiques de 1999 et 2001, avec deux contrastes de densités (700 kg/m<sup>3</sup> et 350 kg/m<sup>3</sup>). L'algorithme

utilisé est celui d'Okabe (1979), qui calcule l'effet gravimétrique à l'aide d'intégrales de surface. En 1999, pour une masse injectée de 2.28 MT, les effets prévisibles sont de l'ordre de  $-10 \mu\text{Gal}$  pour une densité de  $700 \text{ kg/m}^3$  et de  $-30 \mu\text{Gal}$  pour une densité de  $350 \text{ kg/m}^3$ . En 2001, pour une masse injectée de 4 MT, les effets prévisibles seraient de l'ordre de  $-18$  à  $-60 \mu\text{Gal}$ . La variation de gravité qui aurait été enregistrée en deux ans serait donc de  $8 \mu\text{Gal}$  dans l'hypothèse la plus défavorable, contre  $30 \mu\text{Gal}$  dans le cas le plus favorable. Le premier cas est donc en limite du seuil de détection de la microgravimétrie, qui est généralement de  $5$  à  $10 \mu\text{Gal}$  suivant les conditions et en supposant que toutes les causes d'erreurs ont été soigneusement éliminées. Pour un contraste de  $350 \text{ kg/m}^3$ , les variations seraient détectables.

D'autres simulations ont été également réalisées dans l'hypothèse d'une migration du CO<sub>2</sub> à travers la couverture argileuse. Dans le cas d'une migration verticale, le CO<sub>2</sub> passant à l'état gazeux, aurait une densité plus faible que celle du CO<sub>2</sub> super-critique. La profondeur de la bulle étant plus faible également, l'anomalie prévisible augmente considérablement ( $-235 \mu\text{Gal}$  pour une bulle située à moins de 600 m) et serait très facilement repérable. Des migrations latérales seraient par contre difficilement détectables.

#### **2.1.4. Résultats des deux premières campagnes d'acquisition (2002-2005)**

La campagne gravimétrique sous-marine réalisée au fond de la mer par un véhicule téléguidé (ROVDOG, Remotely Operated Vehicle deployable Deep Ocean Gravimeter) en août 2002 (Nooner et al., 2003) a constitué un état zéro pour le monitoring des variations gravimétriques ultérieures. Cette campagne a été implantée sur 30 repères permanents en béton situés dans une zone de 3 par 7 km. Chaque station a été occupée trois fois avec un bon contrôle des différents facteurs d'erreur (dérive instrumentale, profondeur). L'incertitude des mesures est de  $2.5 \mu\text{Gal}$  à la quelle s'ajoute l'incertitude sur le niveau de référence de la gravité mesuré en dehors de la zone de stockage, environ  $1$  à  $2 \mu\text{Gal}$ . L'incertitude sur la détection de variations de gravité entre deux réitérations peut être ainsi estimée à  $5 \mu\text{Gal}$ . Cette incertitude est plus faible que l'incertitude de  $10 \mu\text{Gal}$  prise en compte par l'étude de faisabilité, ce qui laisse de bons espoirs de détecter des variations temporelles de gravité attribuables à l'évolution des densités et de la distribution du CO<sub>2</sub> dans le stockage.

Les 30 bases en béton ont été réoccupées en 2005 avec une incertitude sur les mesures de l'ordre de  $3,5 \mu\text{Gal}$  (Nooner et al., 2006). Après avoir effectué des corrections correspondant à une dérive régionale due à l'extraction de gaz dans un gisement proche et l'enfoncement de quelques unes des bases, il apparaît une anomalie de l'ordre de  $10 \mu\text{Gal}$  (Figure 4). L'effet gravimétrique du modèle de répartition du CO<sub>2</sub> a été calculé à partir du modèle utilisé pour simuler l'écoulement et de modèle issu de la sismique, constitué de plusieurs bulles planes en « piles d'assiette ». Le meilleur ajustement entre observations et modèle correspond au modèle issu de la sismique et calculé avec une densité de l'ordre de  $530 \text{ kg/m}^3 \pm 65 \text{ kg/m}^3$  (intervalle de confiance de 95%). Cette densité est compatible avec des températures dans le réservoir de l'ordre de  $45^\circ\text{C}$  (Figure 3). Les possibilités de la méthode sont ainsi démontrées et de nouvelles mesures gravimétriques et sismiques devraient permettre d'augmenter la fiabilité de l'estimation de la densité.

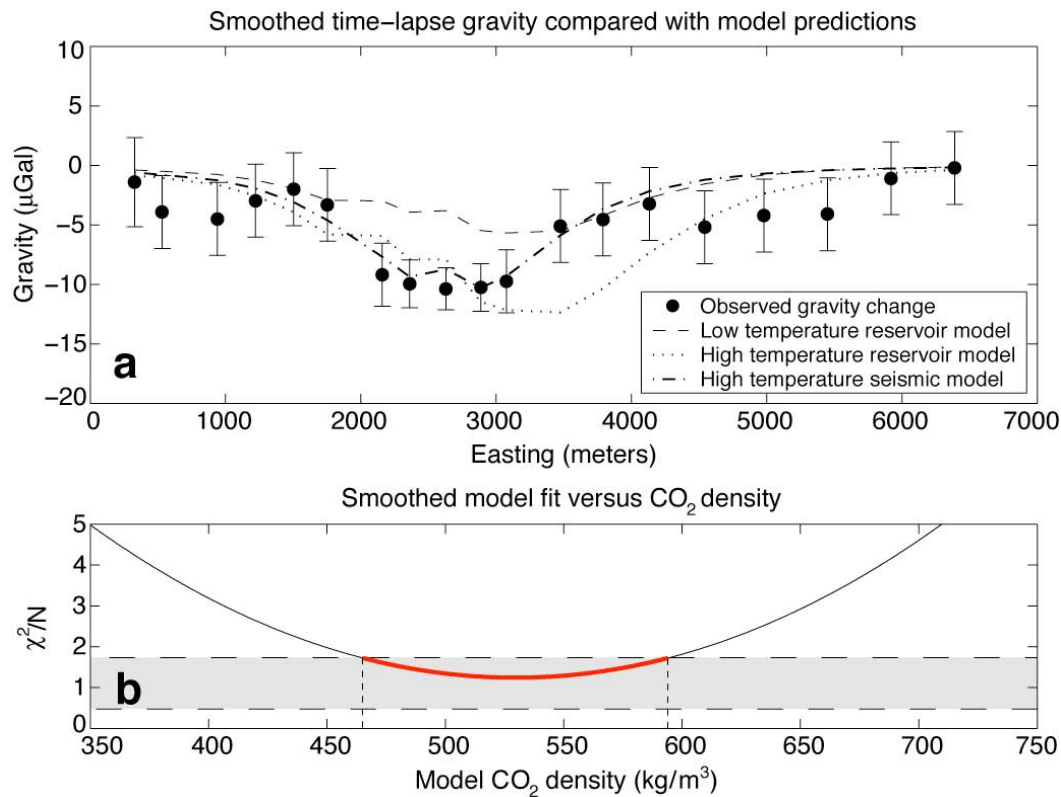


Figure 4 : a) Profil de la variation dans le temps de l'anomalie résiduelle lissée, superposé à l'anomalie gravimétrique calculée pour deux gradients de températures : élevé (densité moyenne du CO<sub>2</sub> de 550 kg/m<sup>3</sup>) et faible (densité moyenne du CO<sub>2</sub> de 700 kg/m<sup>3</sup>). Les résultats des modèles et les observations ont été lissés en faisant la moyenne avec les valeurs des sites proches. Les valeurs observées des changements de gravité s'ajustent au mieux avec le modèle issu de la sismique avec gradient de température élevé. b) Graphe de la différence entre le modèle et les observations (au sens de la norme  $\chi^2$ ), représenté en fonction de la densité du CO<sub>2</sub> utilisée dans a) pour le modèle sismique. La différence la plus faible correspond à une densité de 530 kg/m<sup>3</sup>  $\pm$  65 kg/m<sup>3</sup> avec un intervalle de confiance de 95% (bande grisée). (D'après Nooner et al. , 2006)

## 2.2. APPLICABILITÉ DE LA MÉTHODE DANS UN AUTRE CONTEXTE – HYPOTHÈSE D'UNE SÉQUESTRATION DANS LE BASSIN DE PARIS

De manière générale, la faisabilité de la surveillance gravimétrique des injections de CO<sub>2</sub> dépendra des masses injectées, de la profondeur du stockage, du contraste de densité entre le fluide présent initialement dans le réservoir et le CO<sub>2</sub> injecté dans les conditions de stockage et de la précision des mesures microgravimétriques. Cette précision est non seulement fonction de la précision instrumentale mais également de la précision qu'il est possible d'atteindre pour la correction des variations temporelles de pesanteur indépendantes du phénomène étudié. Si on admet que l'on est capable

de détecter en surface une variation de gravité d'amplitude  $\Delta g$  entre deux réitérations de mesures, la variation de masse,  $\Delta M_{CO_2}$ , qui pourrait être mise en évidence peut être estimée dans l'hypothèse d'une bulle de CO<sub>2</sub> sphérique à la profondeur  $z$  :

$$\Delta M_{CO_2} (MT) = \Delta g (\mu Gal) z^2 (km^2) / 6.67 (1 - \rho_w / \rho_{CO_2})$$

Ce calcul a été réalisé dans l'hypothèse d'une acquisition gravimétrique permettant de détecter des variations de 10  $\mu Gal$  et pour différentes hypothèses de densités (Figure 5). Connaissant le rythme des injections, ce diagramme permettra également d'estimer la fréquence souhaitable pour les réitérations gravimétriques.

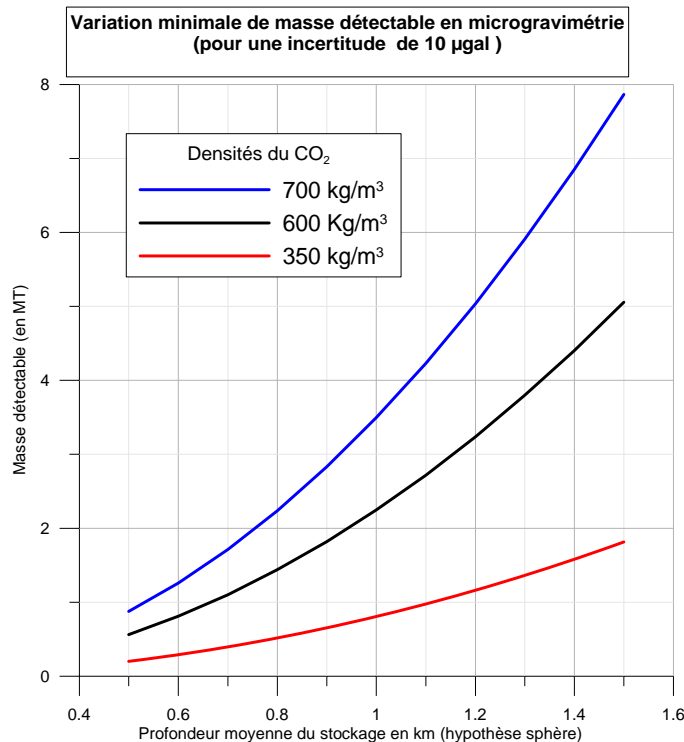


Figure 5 : Variation de masse minimale détectable par microgravimétrie (hypothèse d'une bulle sphérique de CO<sub>2</sub>)

Dans les conditions géothermiques moyennes du Bassin de Paris (gradient 33°C/km), les densités du CO<sub>2</sub> super-critique seraient de l'ordre de 600-650 kg/m<sup>3</sup> entre 800 et 1500 m de profondeur (Guillou-Frottier, 2004). Dans ces conditions et dans l'hypothèse d'un stockage à une profondeur moyenne de 1000 m, la Figure 5 montre par exemple que la variation de masse injectée entre deux acquisitions devrait être au minimum de 2.2 MT.

Dans le cadre d'un projet précis cette estimation devrait être affinée grâce à une simulation prenant en compte la géométrie du stockage et ses conditions thermodynamique. De manière pratique ceci pourrait être réalisé en connectant un algorithme de calcul direct de l'effet gravimétrique à un simulateur de réservoir ou en

introduisant un modèle de densité issue du simulateur dans un modèleur gravimétrique.

### **2.3. APPLICATION DE LA MICROGRAVIMÉTRIE 4D À LA SURVEILLANCE DE RÉSERVOIRS DANS LE CADRE DE LA RÉCUPÉRATION ASSISTÉE D'HYDROCARBURES OU DE STOCKAGE DE GAZ**

La faisabilité de la surveillance par microgravimétrie 4D a été également étudiée dans le cadre de la récupération assistée d'hydrocarbures (EOR : Enhanced Oil Recovery), notamment sur le site de Prudhoe Bay en Alaska (Hare et al., 1999) et sur le gisement de Troll, en mer du Nord (Eiken et al., 2004). Dans ce contexte, l'injection d'eau est utilisée pour augmenter les performances de récupération des hydrocarbures. La migration vers le haut du contact liquide gaz peut donc être suivie par géophysique. Sur le gisement de Troll, par exemple, on s'attend à ce qu'un déplacement vers le haut de un mètre de ce front puisse être à l'origine d'une anomalie de 6  $\mu$ Gal. Sachant que, grâce aux progrès des méthodes d'acquisition, l'écart type des mesures gravimétriques acquises en fond de mer sur ce site est passée de 26  $\mu$ Gal, en 1998, à 11  $\mu$ Gal, en 2000, et 4  $\mu$ Gal, en 2002, des déplacements de quelques mètres deviennent détectables. Sur le site terrestre de Prudhoe Bay des tests ont montré que des gravimètres de prospection classiques (Lacoste & Romberg ou Scintrex CG3M), couplés avec une altimétrie GPS, permettent d'atteindre une répétitivité de 5 à 10  $\mu$ Gal, malgré des conditions de terrain difficiles (certaines stations sont sur la glace).

La surveillance gravimétrique du réservoir de Prudhoe Bay a été simulée par modélisation directe des effets des variations de densité dans le réservoir. Des variations en surface de 100  $\mu$ Gal après 5 ans d'injection (Figure 5) et de 180-250  $\mu$ Gal après 15 ans sont ainsi prédites. Une étape d'inversion par moindres carrés sous contraintes a ensuite permis de vérifier que l'on peut retrouver la distribution des densités dans le sous-sol à partir des données synthétiques, même bruitées.

Des tests ont été effectués par Gaz de France sur le site de Céré-la-Ronde, en région Centre, il y a une dizaine d'années. Ils n'ont pas été poursuivis du fait de l'importance des effets perturbateurs environnementaux comparée à l'amplitude du signal gravimétrique attendu. Une expérience de suivi par microgravimétrie du stockage de gaz d'Izaute (TFE), en Aquitaine, a eu lieu entre janvier 2003 et juin 2004 (Bate, 2005). Le réseau de mesures comprenait 200 points, répétés chaque mois, plus deux stations permanentes, une localisée sur le maximum d'anomalie et l'autre hors de la zone d'influence du site de stockage. Les premiers résultats montrent que pour un réservoir relativement peu profond (moins de 500 m) avec une perméabilité élevée, l'effet du déplacement du contact gaz/eau induit un changement gravimétrique tout à fait mesurable. La Figure 7 montre la superposition des mesures gravimétriques (discrètes et continues), du niveau du gaz stocké et de la pression dans le réservoir.

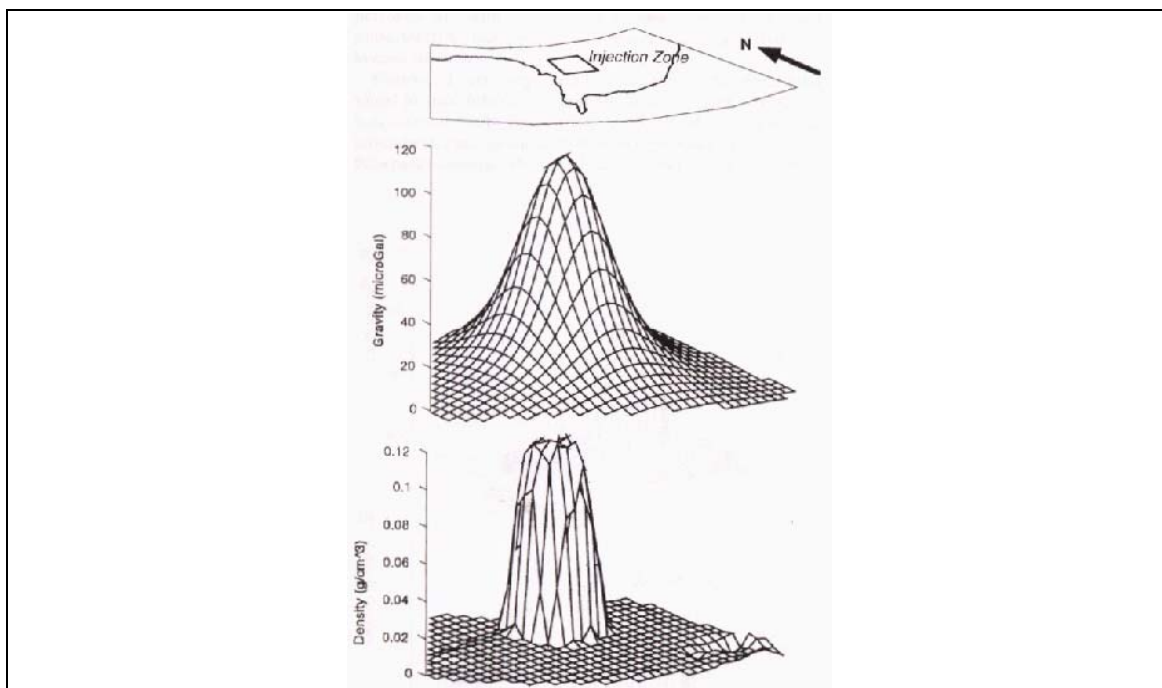


Figure 6 : Simulation de l'effet gravimétrique du réservoir de Prudhoe bay après 5 ans d'injection (d'après Hare et al., 1999)

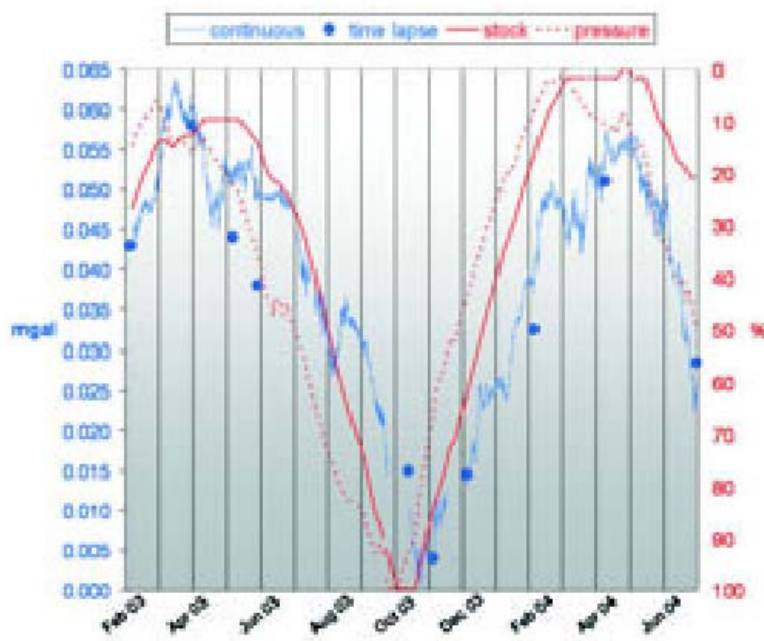


Figure 7 : Evolution du champ de gravité sur le site d'Izaute, Aquitaine, entre janvier 2003 et juillet 2004. Points bleus : mesures discrètes, trait bleu : mesures continues. Trait rouge : stock de gaz (en %), pointillé rouge : pression dans le réservoir (en %). Le signe de l'anomalie gravimétrique a été inversé pour faciliter la comparaison. (d'après Bate, 2005)



### 3. Les méthodes électriques et EM

#### 3.1. VARIATION DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE AVEC LA SATURATION EN CO<sub>2</sub>

D'après des recherches en cours aux Etats-Unis, faisant intervenir des données expérimentales et des simulations, le remplacement d'un fluide conducteur par du CO<sub>2</sub> résistant devrait augmenter de manière significative la résistivité des roches (Myer, 2001). Des essais d'injection d'une saumure contenant du CO<sub>2</sub> dans des échantillons de grès Berea ont montré que la résistivité était multipliée par 2 ou 3 par rapport à des échantillons contenant de la saumure seule (Figure 8). L'auteur fait remarquer cependant que des essais plus poussés seraient nécessaires pour examiner la variation de résistivité lors du changement d'état, car pour une saumure de 3,5 Ohm.m contenant du CO<sub>2</sub> il observe une baisse significative de résistivité pour une pression de 950 psi (6,65 MPa), lors du passage à l'état supercritique.

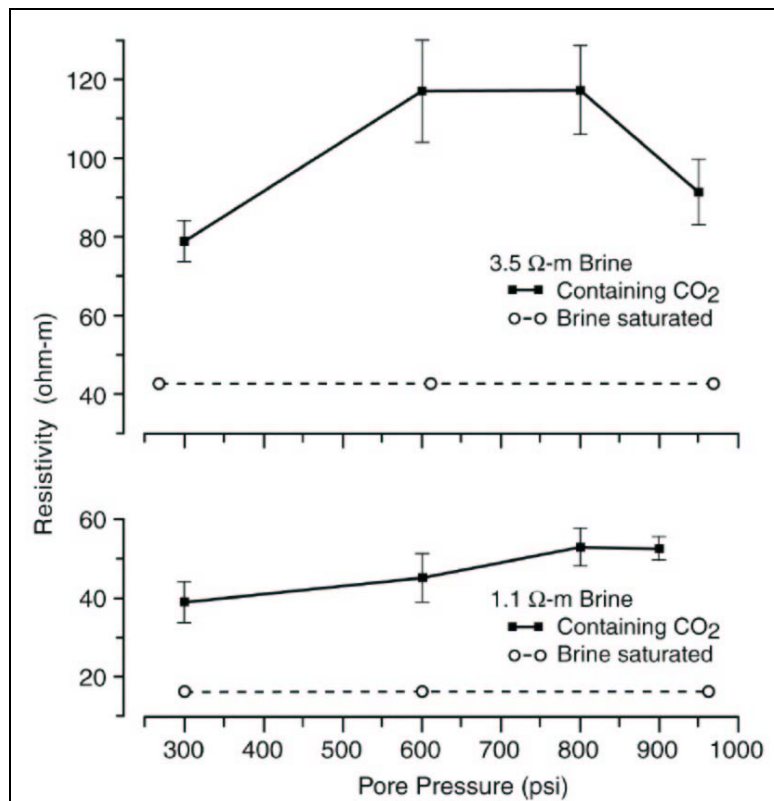


Figure 8 : Expériences de changement de la résistivité dans des échantillons de grès Berea, avec des saumures de résistivité différente et contenant du CO<sub>2</sub> (d'après Myer, 2001)



Hoversten et Gasperikova (2003) utilisent la loi d'Archie pour calculer la variation de résistivité globale d'une roche contenant de la saumure plus du gaz (Figure 9). Cette loi ne tient pas compte de la pression du celui-ci, elle présuppose qu'il ne change pas d'état. Par contraste avec la conductivité élevée de la saumure, on observe une augmentation de plusieurs échelles de magnitude de la résistivité du mélange fluide-gaz, en fonction de la saturation croissante en gaz.

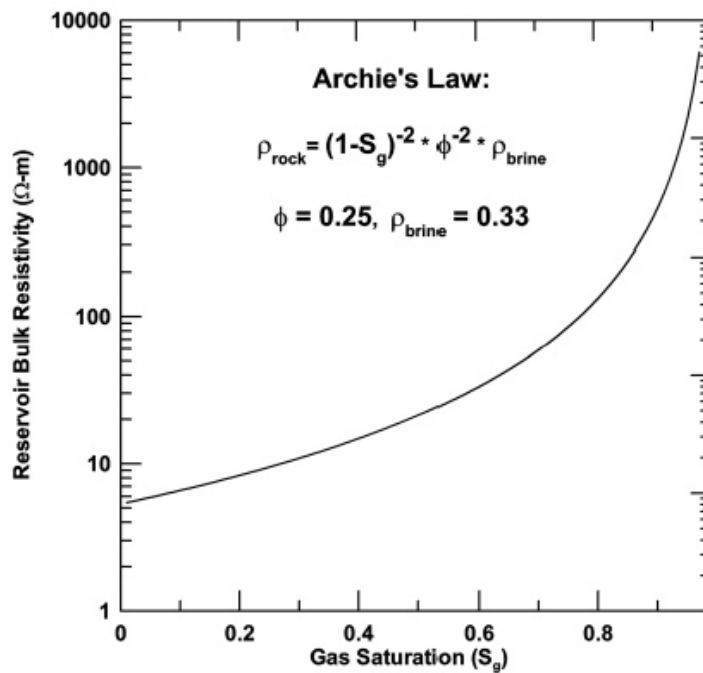


Figure 9 : Variation de la résistivité globale en fonction de la saturation en gaz  $S_g$ , pour une saumure de résistivité  $\rho$  de 0,33 Ohm.m et une porosité  $\phi$  de 25%. (d'après Hoversten et Gasperikova, 2003)

Les méthodes électromagnétique (EM) et électrique (DC) qui mesurent la résistivité électrique des roches sont donc a priori adaptées à la détection des déplacements du CO<sub>2</sub> et des autres fluides dans le réservoir. Toutes les combinaisons de sources et de récepteurs de champs EM peuvent être imaginées pour s'adapter à la profondeur et la taille des cibles pétrolières : émetteur-récepteur en surface, émetteur en surface et récepteur en puits, émetteur et récepteur en puits. Les solutions faisant intervenir les puits offrent l'avantage de pouvoir détecter des variations de résistivité dans des couches trop minces pour être détectées depuis la surface, mais elles dépendent de l'accès à des puits d'observation. Une solution intermédiaire consiste à utiliser les puits comme électrode d'injection soit pour du courant continu (voir méthode ERT ci-dessous), soit pour du courant alternatif (EM).

### 3.2. EXEMPLE DE SIMULATION : CHAMP PÉTROLIER DE SCHRADER BLUFF (USA)

Pour évaluer la faisabilité des méthodes EM dans le contexte pétrolier, Hoversten et Gasperikova (2003) ont calculé le champ électrique créé à la surface par un dipôle d'injection de 100 m de long, de fréquence d'émission 1 Hz, à une distance de 2 km et pour un modèle de terrain en 3D correspondant au champ de Schrader Bluff en Alaska. Des études y ont été menées pour montrer la faisabilité de la récupération assistée du pétrole par injection alternée d'eau et de CO<sub>2</sub> (WAG). Le réservoir est une couche de grès de 25 à 30 m d'épaisseur située entre 1000 et 1400 m de profondeur. La Figure 10 montre que l'amplitude du champ électrique généré à 2 km de la source par un courant de 10 A est un ordre de grandeur au-dessus du champ EM naturel (celui qui est utilisé en magnétotellurique, par exemple). L'utilisation de la détection synchrone et de la sommation permet d'espérer de mesurer à mieux que 0.1 % des variations du signal électrique liées à des variations de résistivité électrique en profondeur.

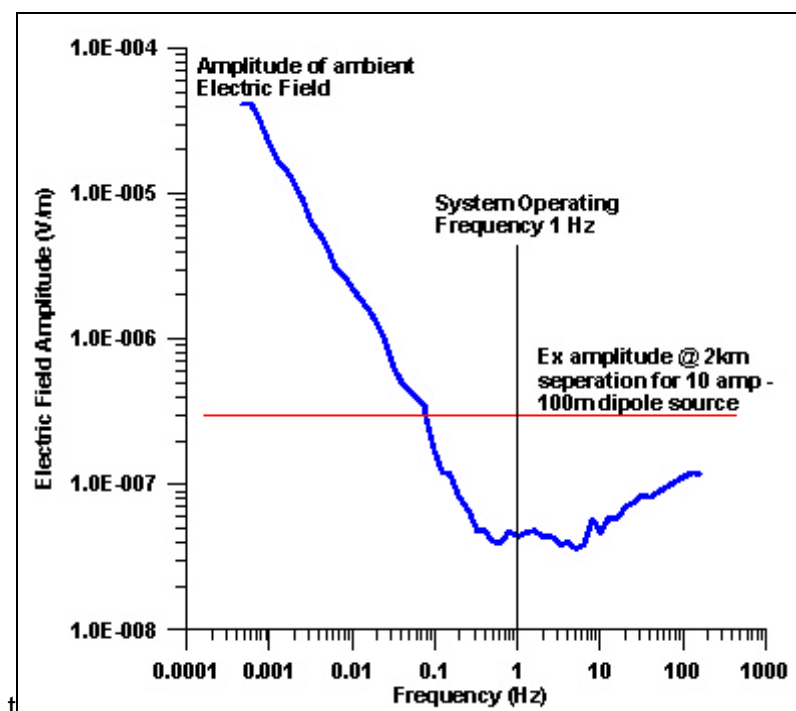


Figure 10 : Amplitude du champ électrique EM naturel en fonction de la fréquence en bleu.  
Champ électrique induit par une source EM de 10 A dans un dipôle de 100 m : ligne rouge.  
Champ de Schrader Bluff, Alaska (d'après Hoversten et Gasperikova, 2003).

Cette modélisation du champ électrique a été superposée au modèle de répartition de la saturation en eau après 15 ans d'injection alternée d'eau et de CO<sub>2</sub> (variations en couleurs, Figure 11). La diminution calculée du champ électrique (contours en noir), correspondant à une diminution de la résistivité, est de l'ordre de 0.5 %, crête à crête, particulièrement marquée dans les zones où la saturation est proche de 1.6 (en rouge).

Cet effet est détectable en utilisant le dispositif décrit précédemment. En l'absence de pétrole (cas du stockage en aquifère salin), la relation avec la saturation en CO<sub>2</sub> est directe en faisant la différence par rapport à l'état zéro (car  $S_w + S_{CO_2} = 1$ ). La présence de CO<sub>2</sub> peut alors être déduite de l'augmentation du champ électrique. En présence de pétrole (cas des stockages en réservoir déplété) cet effet est moins évident, car la relation  $S_w + S_{CO_2} = 1$  n'est plus vérifiée et le pétrole a également pour effet d'augmenter la résistivité. Dans ce cas, la Figure 12 montre que la présence de CO<sub>2</sub> (variations en couleurs) ne se superpose plus aussi bien aux diminutions du champ électrique (contours en noir).

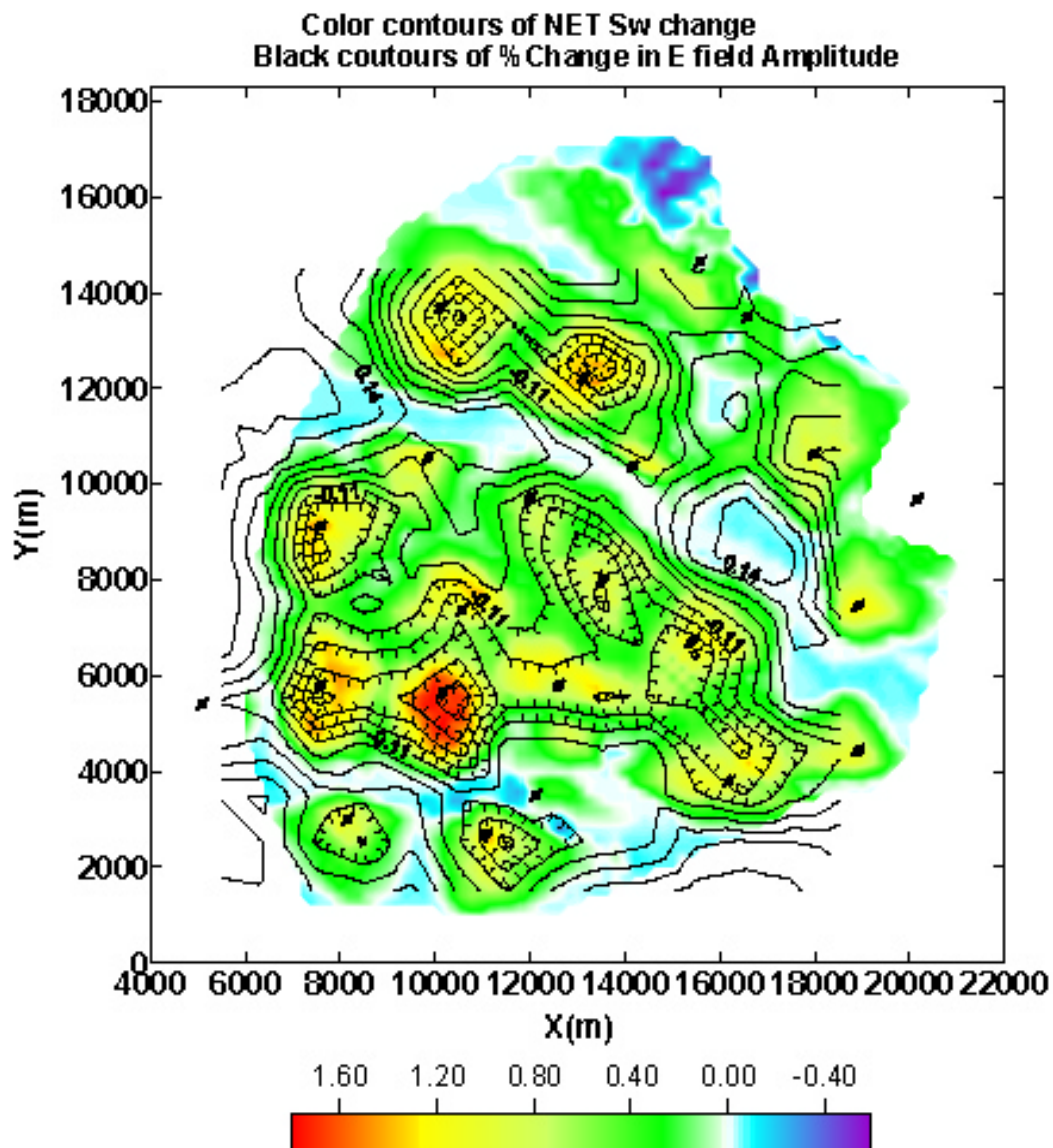


Figure 11 : Changement net de saturation en eau ( $S_w$ ) après 15 ans d'injection, en couleur. Les isovaleurs correspondent aux variations en % du champ électrique mesuré à la surface. Les puits d'injection sont représentés par des points (d'après Hoversten et Gasperikova, 2003).

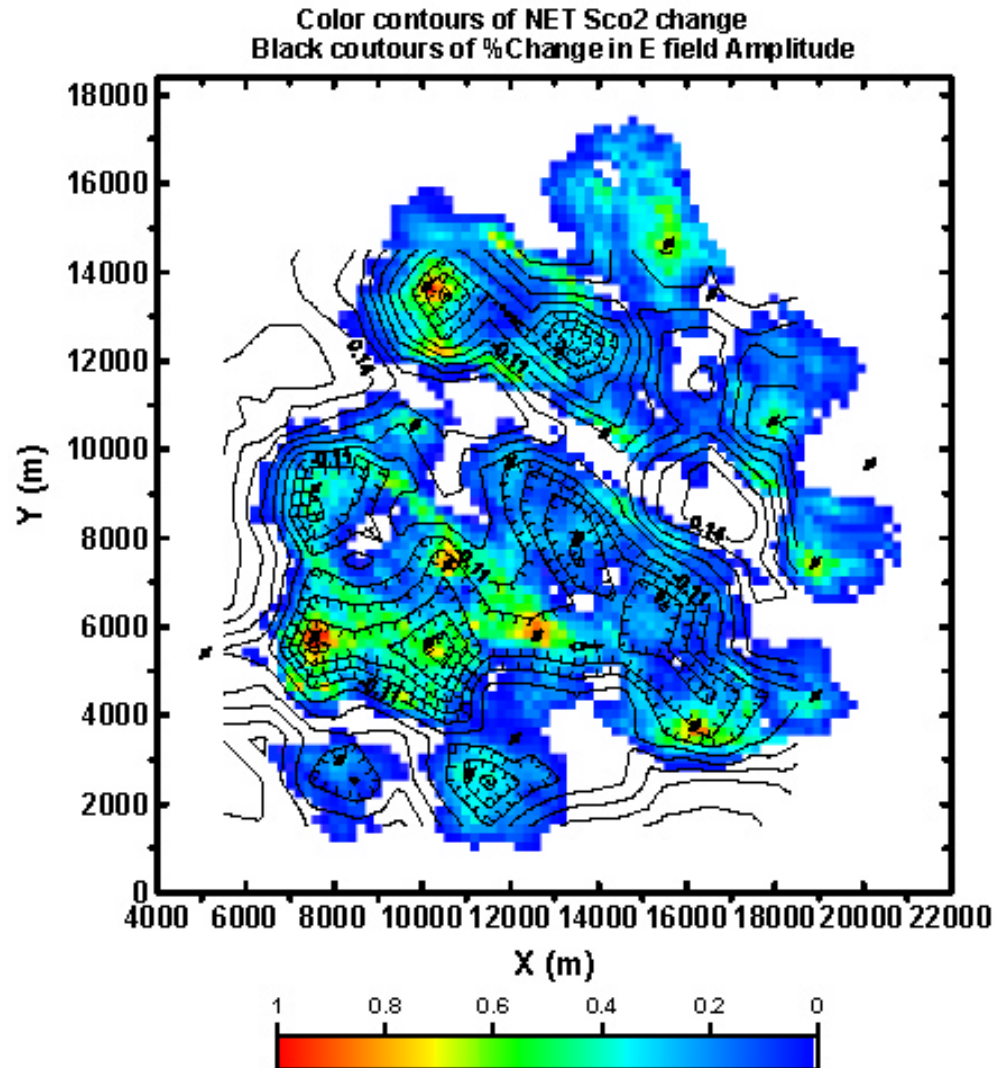


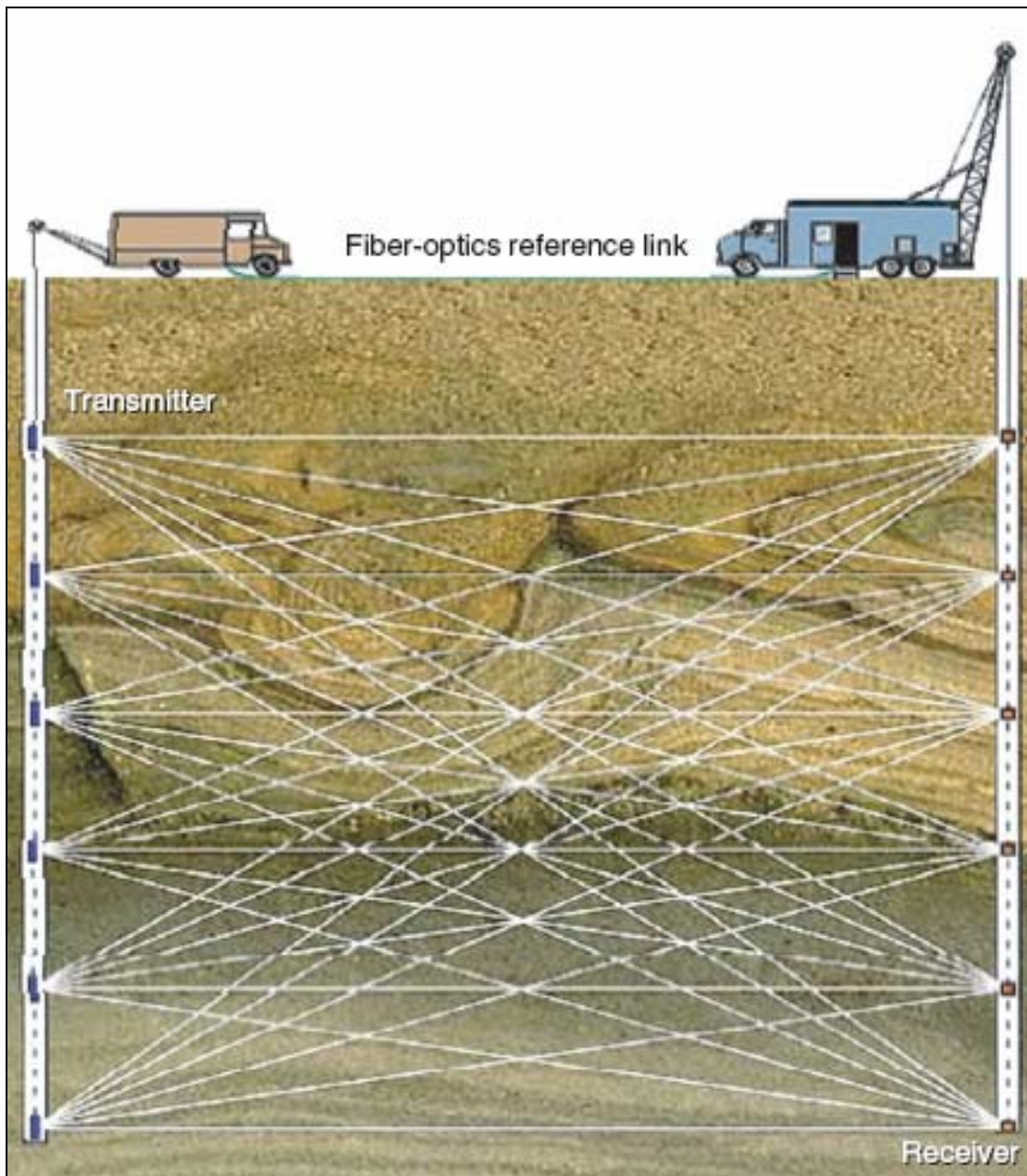
Figure 12 : Changement net de saturation en CO<sub>2</sub> (Sw) après 15 ans d'injection, en couleur ; les contours d'isovaleurs correspondent aux variations en % du champ électrique mesuré à la surface. (d'après Hoversten et Gasperikova, 2003).

### 3.3. AUTRES EXEMPLES

Une simulation basée sur un modèle inspiré d'un réservoir pétrolier réel, dans lequel du CO<sub>2</sub> est injecté, a montré que les anomalies de résistivité à attendre peuvent être de 0.2 à 10 fois la résistivité initiale (Newmark et al., 2001). Cette simulation, confirmée par des expérimentations en modèle réduit, a également permis de tester la sensibilité de divers dispositifs de tomographie électrique entre puits ou ERT (Electrical Resistance Tomography) et de définir un dispositif adapté pour une expérimentation réelle. Cette méthode a été testée sur des anomalies conductrices liées à une injection de vapeur (Newmark et al., 2002).



Une expérience d'imagerie EM entre puits a réussi à suivre la migration du CO<sub>2</sub> sur un site pétrolier de récupération assistée (Kirkendall et Roberts, 2001). Cette méthode, qui utilise un émetteur fréquentiel à source contrôlée et un capteur magnétique 3 composantes (Figure 13), fournit des images de haute résolution (Figure 14). Elle peut être mise en œuvre entre puits (sans tubages métalliques) ou de surface à forage.



*Figure 13 : Induction EM entre puits : L'émetteur et le récepteur sont alternativement déplacés dans les puits. Le courant induit par l'émetteur génère un champ magnétique qui est enregistré dans le second puit (d'après Kirkendall et Roberts 2001)*

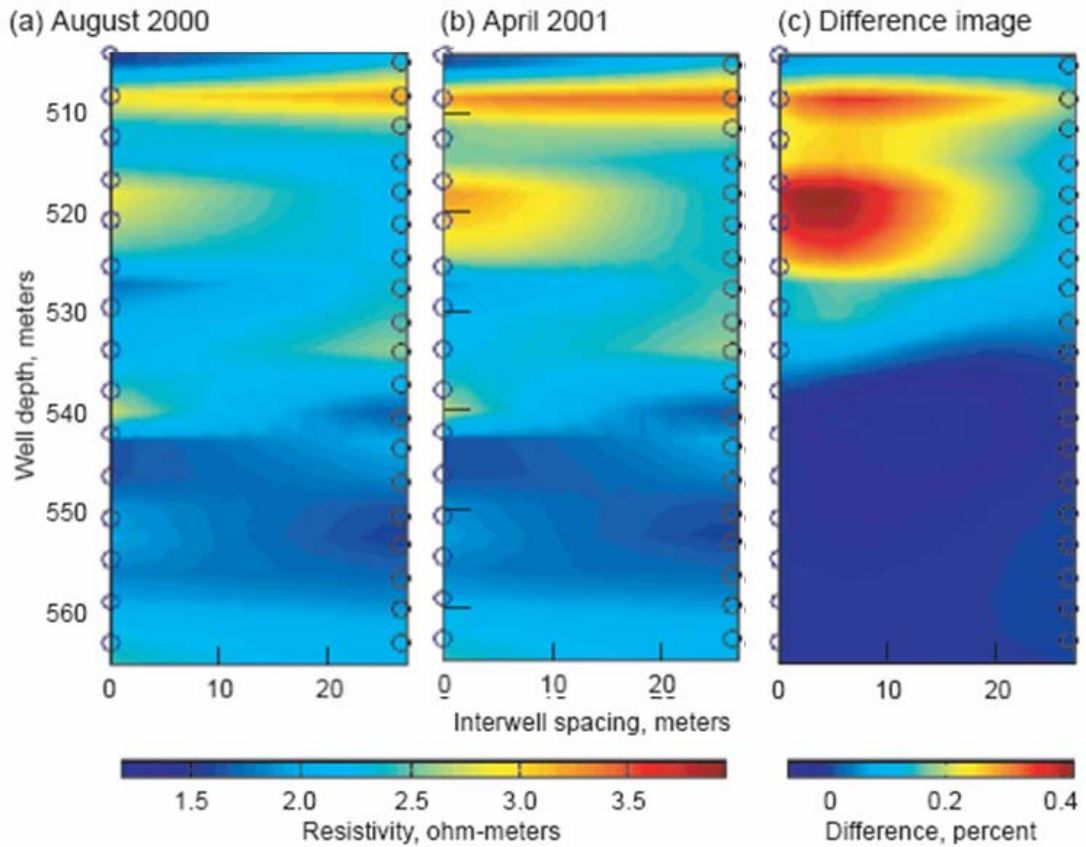


Figure 14 : Induction EM entre puits : Une image de la résistivité dans le plan vertical des deux puits est obtenue a) avant l'injection, b) après 3 mois d'injection. c) Une variation positive de résistivité traduit la présence de CO<sub>2</sub> (d'après Kirkendall et Roberts 2001).

Les méthodes EM de surface pourront être également employées, mais avec d'importantes limitations : la profondeur de pénétration et la résolution. La magnétotellurique (MT) qui a une grande pénétration, mais une faible résolution, pourrait être intéressante dans le cadre d'une surveillance à grande échelle et le suivi de réservoirs de plusieurs dizaines de mètres voir la centaine de mètres d'épaisseur. Les méthodes EM à source contrôlées (CSAMT ou TDEM) pourraient donner des résultats pour des investigations moins profondes, jusqu'à environ 1 km, avec des résolutions plus grandes.

### 3.4. LE POTENTIEL SPONTANÉ (PS)

D'après Hoversten et Gasperikova, 2003, la polarisation spontanée (PS), qui est sensible aux différences de potentiel apparaissant entre deux points du sol soumis à une différence de pression hydrostatique ou potentiel électrocinétique, pourrait être également envisagée comme méthode de surveillance des flux de CO<sub>2</sub>, à grande échelle, avec une faible résolution et un coût faible. Des études en laboratoire (Moore et al., 2004) et des simulations numériques (Hoversten et Gasperikova, 2003) ont montré que, sur certains sites (Liberty field, aux USA et, de manière moins certaine, Sleipner) les circulations de CO<sub>2</sub> pourraient être à l'origine d'anomalies PS mesurables.

Une circulation de fluide dans un milieu poreux peut créer un potentiel électrique, du fait de la séparation des ions en des couches chargées au travers de la séparation entre les différents milieux. Ce phénomène est la base de la méthode de prospection PS (potentiel spontané). Cette méthode a été utilisée dans les années 70-80 pour l'exploration géothermique, l'étude des précurseurs pour des tremblements de terre et des applications de génie civil. La mesure de la PS est relativement simple et peu coûteuse. Le champ électrique généré par la circulation d'un fluide est le gradient du potentiel de circulation  $\phi$  (streaming potential), appelé aussi potentiel électrocinétique, donné par la formule :

$$\nabla \phi = L \frac{\Gamma \mu}{k \sigma}$$

Avec L : coefficient de couplage,  
 $\Gamma$  : écoulement du fluide, relié au gradient de pression par la loi de Darcy,  
 k : constante diélectrique du fluide,  
 $\sigma$  : conductivité globale de la roche,  
 $\mu$  : viscosité du fluide.

Un écoulement vertical de fluide et/ou le flux de chaleur en présence d'une zone de fracture ou d'un contact séparant des zones de coefficients de couplage électrocinétique ou thermoélectrique différents peuvent générer des anomalies de PS à la surface. Des anomalies de plusieurs centaines de mV ont été observées sur les volcans ou les champs géothermiques. De même, un écoulement horizontal en présence d'une barrière horizontale peut créer un potentiel électrocinétique. Par conséquent, le contraste de coefficient de couplage entre l'eau et le CO<sub>2</sub> supercritique pourrait permettre d'imager la progression du front de CO<sub>2</sub> injecté, dans la mesure où le second est plus résistant et non polarisé (tant qu'il ne forme pas de l'acide carbonique en se combinant avec l'eau).

Moore et ses collègues (2004) ont réalisé diverses expériences en laboratoire pour déterminer les coefficients de couplage et mesurer l'effet PS sur des échantillons de

grès de Berea parcouru par de l'eau puis par du CO<sub>2</sub> liquide. Ils montrent que le potentiel électrocinétique suit de façon linéaire les variations lentes et rapides de la pression d'injection (Figure 15a et 15b). Les coefficients de couplage observés sont synthétisés dans le Tableau 4. D'une manière générale, le coefficient de couplage du CO<sub>2</sub> est 10 fois moindre que celui de l'eau.

	Pre-Test (water)	During (CO <sub>2</sub> )	Post-Test (water)
<b>Test 1</b>	45	2.5	15
<b>Test 2</b>	20	3.5	30
<b>Test 3</b>	35	2.0	40

Tableau 4 : Synthèse des coefficients de couplage observés. Toutes les unités sont en mV/0.1MPa (d'après Moore et al., 2004).

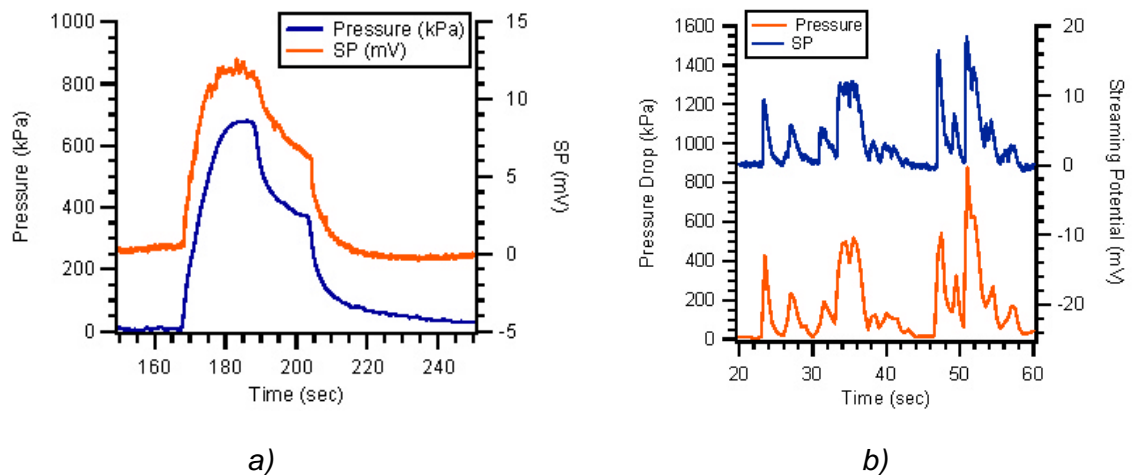


Figure 15 : Variations de potentiel PS mesurées sur un échantillon parcouru par du CO<sub>2</sub>. Réponse aux variations lentes (a) et rapides (b) de la pression d'injection, Moore et al., 2004.

C'est cette différence de coefficient de couplage entre le CO<sub>2</sub> et l'eau de formation qui pourrait être mise à profit pour suivre la progression de la bulle de CO<sub>2</sub>. Hoversten et Gasperikova (2003) ont réalisé à partir de ces résultats des modélisations simples de l'effet PS causé par la progression du CO<sub>2</sub> injecté dans la formation Frio (champ de South Liberty au Texas). Deux modèles sont utilisés et schématisés sur la Figure 16. La Figure 17 montre la distribution de la pression et du potentiel en fonction de la profondeur pour le modèle a). Les valeurs du potentiel en surface sont de l'ordre de 200 mV, ce qui est largement au-dessus du bruit de fond (de l'ordre du mV, mais très dépendant du site).



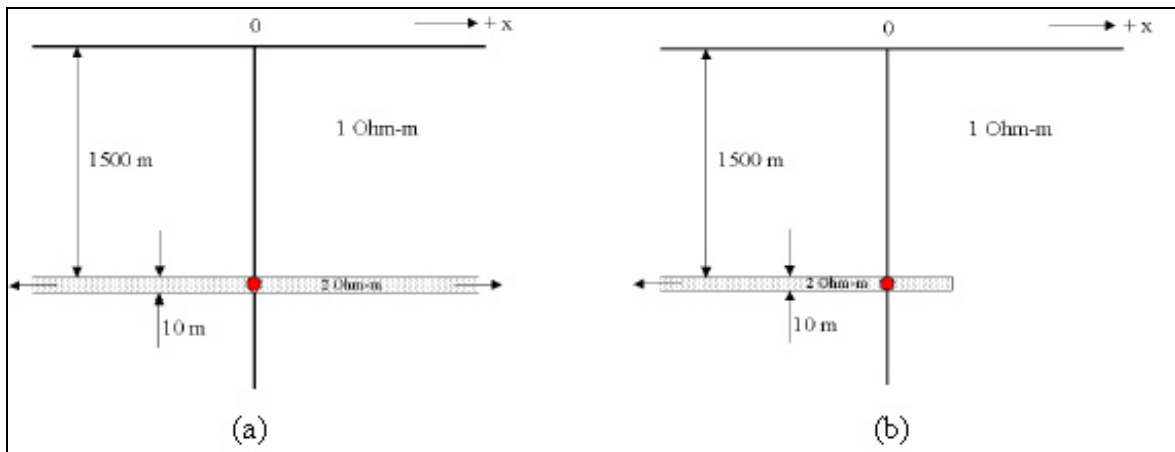


Figure 16 : Modèle utilisé pour simuler l'effet PS dû à l'injection de CO<sub>2</sub> dans la formation Frio. Le puits et le point d'injection sont matérialisés en rouge. Dans le modèle b), la formation est tronquée à droite. D'après Hoversten et Gasperikova (2003).

La Figure 18 montre les valeurs du potentiel en surface en fonction de la distance par rapport au point d'injection et suivant la profondeur de la couche dans laquelle est injectée le CO<sub>2</sub>. L'injection dans une couche de 100 m d'épaisseur située à 1500 m de profondeur génère une anomalie SP de quelques mV, ce qui est encore détectable.

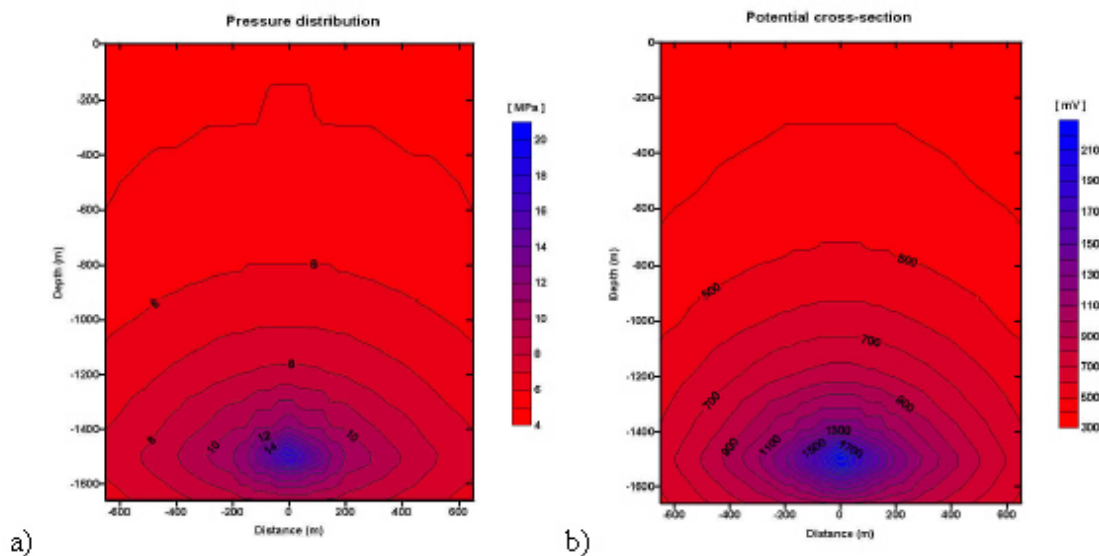


Figure 17 : a) Coupe des distribution de la pressions en profondeur pour le modèle de la fig. 16a. b) Potentiel électrique pour ce modèle avec un coefficient de couplage  $L = -15 \text{ mV/atm}$ . D'après Hoversten et Gasperikova (2003)

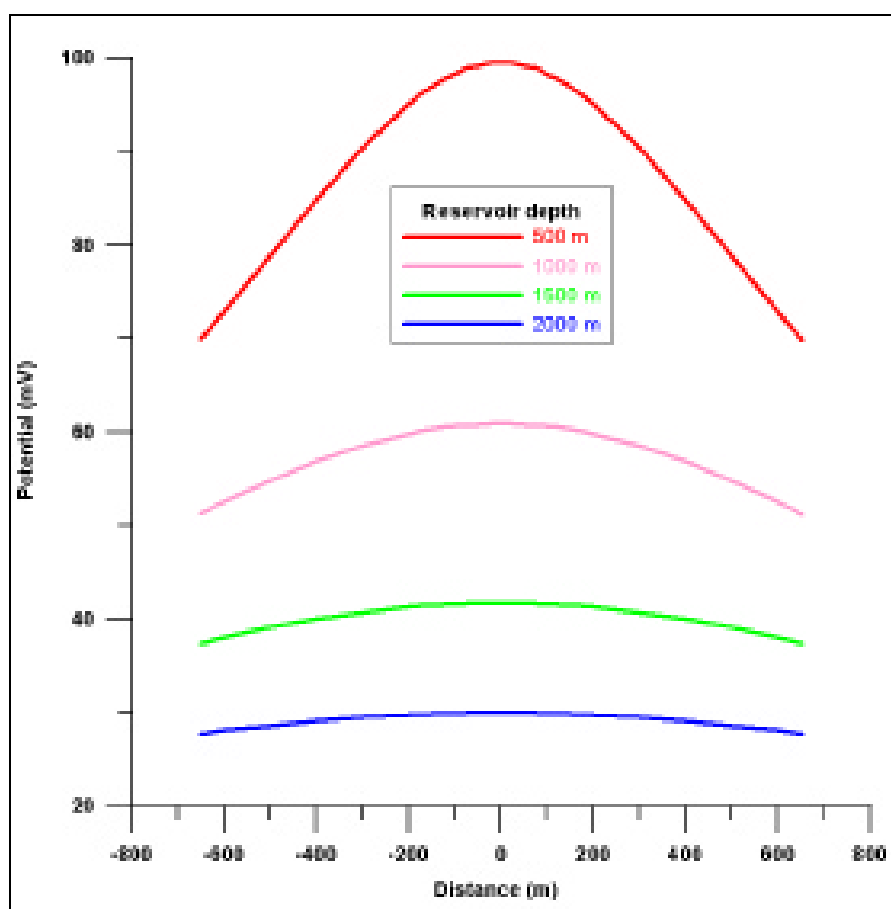


Figure 18 : Effet PS dû à la circulation de CO<sub>2</sub> dans une couche de sable de 100 m d'épaisseur située à différentes profondeurs : 500 m, 1000 m, 1500 m et 2000 m. (d'après Hoversten et Gasperikova, 2003).



## 4. Conclusions

L'intérêt des méthodes non sismique pour la surveillance du stockage géologique du CO<sub>2</sub> réside dans leur moindre coût et leur mise en œuvre plus aisée. Bien que, dans l'état actuel elles n'atteignent pas le degré de résolution de la sismique 4 D, c'est un champ de recherche nécessaire, tant les pistes alternatives à celle-là sont importantes à explorer.

Sur le site de Sleipner, une étude de faisabilité du monitoring par microgravimétrie a été réalisée. Elle a montré que l'injection pendant deux ans d'au moins de 2 millions de T de CO<sub>2</sub> à 1000 m de profondeur devrait se traduire par un effet gravimétrique de 8 à 30 µGal, par contraste avec la quantité de fluide déplacé et selon les hypothèses sur la densité du CO<sub>2</sub> stocké. Dans le cas d'une migration verticale du CO<sub>2</sub> à travers la couverture argileuse, les simulations montrent que les effets prévisibles augmentent considérablement (-235 µGal pour une bulle située à moins de 600 m). La réalisation en août 2002 d'une première campagne gravimétrique sur ce site a montré que l'on pouvait espérer une précision de 5 µGal sur la variation de gravité entre deux répétitions. Les effets attendus sont donc supérieurs à l'incertitude de mesure, des informations complémentaires sur la répartition et l'état du CO<sub>2</sub> dans le réservoir n'étant cependant accessible que dans les hypothèses de densité les plus favorables. Une fuite verticale serait par contre facilement repérable quelle que soit la densité dans le stockage.

La surveillance par microgravimétrie 4D pourrait également intervenir dans le cadre de la récupération assistée d'hydrocarbures (EOR) pour suivre la migration vers le haut du contact liquide gaz. Les simulations réalisées sur les sites de Troll, en mer du Nord, ou de Prudhoe Bay, en Alaska, ont prédit des variations de gravité en surface aisément détectables (100 µGal après 5 ans d'injection à Prudhoe Bay, par exemple). Ces simulations montrent également que la distribution des densités dans le sous-sol peut être établie par inversion de données synthétiques, même en présence de bruit.

Concernant les projets de stockage dans le bassin Parisien à des profondeurs supérieures à 1500 m, il est important de noter que la quantité minimale injectée devrait être supérieure à 2 MT. En effet, la densité du CO<sub>2</sub> à ces profondeurs est de l'ordre de 700 kg/m<sup>3</sup>, ce qui rend le contraste de densité peu significatif par rapport à la saumure qu'il serait sensé déplacer.

La microgravimétrie 4D a, par ailleurs, été largement utilisée pour la surveillance de réservoirs géothermiques ou d'appareils volcaniques. L'expérience acquise dans ces domaines peut donc être en partie transposée aux applications envisageables sur les sites de séquestration de CO<sub>2</sub>. L'amélioration de la qualité des mesures, en particulier grâce à une acquisition précise de tous les facteurs pouvant affecter leur répétitivité, est en effet un besoin essentiel commun à toutes ces applications qui sont basées sur

la détection de faibles variations temporelles de gravité. Ces expériences montrent que si la précision des acquisitions gravimétriques peut être assurée grâce à des protocoles de mesures sévères, l'identification, l'acquisition et la correction des facteurs de perturbation environnementaux, en particulier hydrogéologiques, ne sont pas entièrement maîtrisées. Pour résoudre ces difficultés, il sera donc souhaitable de s'appuyer sur les méthodologies développées en gravimétrie fondamentale pour la correction des mesures des gravimètres absolus ou supra-conducteurs, par exemple en vue de l'étude des marées terrestres. Il faudrait également examiner si un mode d'acquisition gravimétrique différent (par exemple : mesures de gradients ou mesures en forage) peut contribuer à résoudre ces problèmes. A noter que cet effort méthodologique, qui devrait inclure des simulations théoriques et une expérimentation sur des sites réels, ne nécessite pas de travailler sur un site de stockage en activité et qu'il serait même préférable d'opérer d'abord sur un site où les effets hydrogéologiques sont les seules variations temporelles de gravité prévisibles.

Pour ce qui est des méthodes électriques, deux grandes catégories de méthodes peuvent être distinguées, celles avec mesures en surface et celles faisant appel aux mesures entre puits. Comme la microgravimétrie, elles sont à l'étape de test et demandent à être appliquées de manière expérimentale dans différentes configurations géologiques. Il n'y a pas encore dans la littérature d'estimation des seuils minimums de CO<sub>2</sub> injecté auxquels seraient sensibles les méthodes mesurant la résistivité (ou la conductivité) électrique. Cela doit donc faire l'objet de plusieurs études de cas. Néanmoins, les méthodes limitées aux seules mesures en surface ne sont pas recommandées dans le cas d'un stockage dans des couches réservoirs relativement minces (moins de quelques dizaines de mètres) et situées à plus de 1500-2000 m de profondeur. A cette profondeur, en effet, le pouvoir de résolution de ces méthodes intégrant dépasse largement l'épaisseur du réservoir. Soit parce que la longueur des dipôles nécessaires à la mesure du champ électrique est supérieure à 500 m pour les méthodes en courant continu, soit parce que la fréquence utilisée par les méthodes EM pour atteindre ces profondeurs est inférieure à quelque Hz et implique des longueurs d'onde supérieure à 200-300 m.

Par ailleurs, un effort particulier doit être mené sur les études sur échantillon des propriétés électriques des roches, pour déterminer le comportement de la résistivité en fonction de la porosité, la pression, la température, la pression partielle de CO<sub>2</sub>, la conductivité de la saumure etc. Cela devrait permettre de contraindre des modèles qui pour le moment reposent plus sur des hypothèses théoriques que sur des données de terrain.

Finalement, des mesures sur échantillon et des modélisations ont montré que, sur certains sites (Liberty field, aux USA et, de manière moins certaine, Sleipner), les circulations de CO<sub>2</sub> pourraient être à l'origine d'anomalies de PS (Potentiel Spontané) mesurables. La PS pourrait donc être envisagée comme méthode de surveillance des flux de CO<sub>2</sub> à grande échelle, avec une faible résolution et un coût faible.

## 5. Bibliographie

**Arts R., Chadwick A., Eiken O.** (2004) - Recent Time-Lapse Seismic Data Show No Indication of Leakage at the Sleipner CO<sub>2</sub> Injection Site. In, E.S.Rubin, D.W.Keith and C.F.Gilboy (Eds.), In: Proceedings of 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Volume 1: Peer-Reviewed Papers and Plenary Presentations, IEA Greenhouse Gas Programme, Cheltenham, UK, 2004

**Bate, D** (2005) - 4 D reservoir volumetrics: a case study over the Izaute gas storage facility. *Fist brak vol.* 23, pp 69-71.

**Benson S.M., Myer L.**(2002) - Monitoring to ensure safe and effective geologic sequestration of carbon dioxide. In: Proceedings IPCC WG III Workshop on Carbon Capture and Storage, november 18-21, 2002, Regina, Canada.

**Chalaturnyk R., Gunter W.D.** (2004) - Geological Storage of CO<sub>2</sub>: Time Frames, Monitoring and Verification. In, E.S.Rubin, D.W.Keith and C.F.Gilboy (Eds.), Proceedings of 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Volume 1: Peer-Reviewed Papers and Plenary Presentations, IEA Greenhouse Gas Programme, Cheltenham, UK, 2004.

**DTI** (2005) - Monitoring Technologies for the Geological storage of CO<sub>2</sub>, Technology status report, Cleaner fossil fuels programs, TSR025, March 2005.

**Eiken O., Zumberge M., Stenvold T., Sasagawa G., Nooner S.** (2004) -. Gravity monitoring of gas production from the Troll field. Abstract SEG, Denver, Octobre 2004.

**Eiken O., Brevik I., Arts R. et al.** (2000) - Seismic monitoring of CO<sub>2</sub> injected into a marine aquifer. SEG Calgary 2000 International conference and 70th Annual meeting, Calgary.

**Guillou-Frottier L.** (2004) - Propriétés de transport du CO<sub>2</sub> (densité, viscosité et paramètres thermiques) dans l'hypothèse d'une séquestration géologique dans le Bassin Parisien. Note interne BRGM.

**Hare J.L., Ferguson J.F., Aiken C.L.V. et al.** (1999) - The 4-D microgravity method for waterflood surveillance : A model study for the Prudhoe Bay reservoir, Alaska. *Geophysics*, 64, 78-87.

**Hoversten G.M., Gasperikova E.** (2003) - Investigation of novel geophysical techniques for monitoring CO<sub>2</sub> movement during sequestration. Lawrence Berkeley National Laboratory, octobre 2003.

**Hoversten G.M., Myer L.R.** (2000) - Monitoring of CO<sub>2</sub> sequestration using integrated geophysical and reservoir data. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns, Australia, August 13-16, 2000.

**Hoversten, G. M., Gritto R., Washbourne J., Daley T.M.** (2003) - Pressure and fluid saturation prediction in a multicomponent reservoir, using combined seismic and electromagnetic imaging. *Geophysics*, 68, 1580-1591.

**Kirkendall B. A., Roberts J. J.** (2001) - Probing the subsurface with electromagnetic fields. In : *Science and Technology Review (S&TR)*, Nov. 2001, 12-19.

**Moore J.R., Glaser S.D., Morrison H.F., Hoversten G.M.** (2004) - The streaming potential of liquid carbon dioxide in Berea sandstone. *Geophys. Res. Letter* 31, L17610.

**Myer L.R.** (2000) - A strategy for monitoring of geologic sequestration of CO<sub>2</sub>. Paper published in *Proceedings of Energex 2000, 8th International Energy Forum*, P. Catania, ed., Technomic Publishing, Lancaster, Pennsylvania, 1226-1231, Las Vegas, Nevada, July 23-28, 2000.

**Myer L.R.** (2001) - Laboratory measurement of geophysical properties for monitoring of CO<sub>2</sub> sequestration. In : *First National Conference on CO<sub>2</sub> sequestration*, Washington, DC, May 2001.

**Newmark R., Ramirez A., Daily W.** (2002) - Monitoring carbon dioxide sequestration using electrical resistance tomography (ERT): A minimally invasive method. Paper presented at the *Sixth International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-6)*, Kyoto, Japan, October 1-4, 2002.

**Newmark R.L., Ramirez A., Daily W.** (2001) - Monitoring carbon dioxide sequestration using electrical resistance tomography (ERT): Sensitivity studies. Paper published in *Proceedings of First National Conference on Carbon Sequestration*, Washington, DC, May 14-17, 2001.

**Nooner S.L., Zumberge M.A., Eiken O., Stenvold T., Sasagawa G.S.** (2003) - Seafloor micro-gravity survey of the Sleipner CO<sub>2</sub> sequestration site. *Eos Trans. AGU*, 84 (46), Fall Meet. Suppl. Abstract GC31A-01, 2003.

**Nooner S., Zumberge M., Eiken O., Stenvold T., Thibeau S.** (2006) - Constraining the density of CO<sub>2</sub> within the Utsira formation using time-lapse gravity measurements. In: *Proceedings of the Eighth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Trondheim, Norway, June 19-22, 2006.

**Okabe M.** (1979) - Analytical expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies. *Geophysics*, Volume 44, Issue 4, pp. 730-741.

**Pruess K.** (2003) - Numerical simulation of leakage from a geologic disposal reservoir for CO<sub>2</sub>, with transitions between super and sub-critical conditions. *Proceedings Tough symposium 2003*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, May 12-14, 2003.

**Williamson J.P., Chadwick, R.A., Rowley W.J., Eiken O.** (2001) - Saline aquifer CO<sub>2</sub> storage : A demonstration project at the Sleipner field - Work area 5 (geophysics) – Gravity modelling of the CO<sub>2</sub> bubble. BGS commissioned report CR/01/063.

**White D.J., Burrowes G., Davis T. et al.** (2004) - Greenhouse gas sequestration in abandoned oil reservoirs: The International Energy Agency Weyburn pilot project. *GSA Today* 14, 4-10.



**Centre scientifique et technique**  
**Service Aménagement et risques naturels**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34