

Avis sur les performances du réseau d'écoute microsismique TOTAL à Rousse (64)

Rapport final

BRGM/RP-57741-FR

Novembre 2009

Avis sur les performances du réseau d'écoute microsismique TOTAL à Rousse (64)

Rapport final

BRGM/RP ou RC-57741-FR
Novembre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2009

M. Delatre et H. Fabriol

Vérificateur :

Nom : O. Bouc

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : H. Modaressi

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.
Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : CO₂, stockage géologique, sismicité, réseau sismologique, Pyrénées Atlantiques, Aquitaine.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : **H. Fabriol et M. Delatre** (2009) – Avis sur les performances du réseau d'écoute sismique TOTAL à Rousse (64). BRGM/RP-57741- FR, 35 p.

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre du projet pilote de captage et stockage géologique de dioxyde de carbone (CO₂) de Lacq-Rouse (Pyrénées-Atlantiques) la société Total E&P France a mis en place un réseau de surveillance de la microsismicité à Rouse pour surveiller l'intégrité mécanique du réservoir et de la couverture suite à l'injection de CO₂. Le réseau comportait initialement sept antennes sismiques en subsurface ainsi qu'une antenne sismique au fond du puits d'injection RSE-1. Cependant, un problème est apparu dans la transmission par fibre optique des informations de l'antenne RSE-1, rendant indisponibles les signaux des capteurs en profondeur.

La DRIRE Aquitaine a demandé au BRGM d'évaluer la pertinence des objectifs de performances du réseau de surveillance sismique suite à cette perte, en termes de sensibilité de détection – magnitude et précision de localisation - au regard de l'objectif d'identifier d'éventuels dérangements mécaniques pouvant remettre en cause l'intégrité du réservoir lors des opérations d'injection et de stockage de CO₂.

Après analyse, il a été constaté que la sensibilité de cette configuration en terme de niveau minimal de magnitude détectée est suffisante pour détecter des séismes de magnitude supérieure à -1.5 induits par un réajustement de failles ou de fracture en profondeur ou encore supérieures à - 1,7 pour un dérangement dans la couverture. Ces microséismes correspondent à des ruptures de l'ordre de 1 à 1,5 m de longueur qui pourraient être l'indice d'une modification de contraintes importantes, pouvant affecter de façon significative l'intégrité du réservoir.

A partir des études portant sur un réseau dégradé dans sa configuration actuelle (scénario 1 du document sur le suivi microsismique fourni par Total) et concernant les incertitudes de localisation sur le site de stockage, le BRGM est amené à dire que :

- La précision verticale et horizontale du réseau de subsurface est suffisante pour suivre un éventuel endommagement de la couverture et déclencher une alerte si cet endommagement était susceptible de menacer l'intégrité du stockage ;
- La précision de la localisation d'une rupture éventuelle au niveau du réservoir par le réseau actuel permettrait uniquement de distinguer si la rupture a eu lieu dans le réservoir ou la couverture, sans pouvoir détailler quel niveau du réservoir est atteint ; cependant, la précision horizontale est suffisante pour suivre de manière indirecte l'extension du panache de CO₂.
- De même, la précision horizontale du réseau est suffisante pour déterminer quelle faille bordière a pu rompre, et donc conclure sur l'intégrité du réservoir ;

Dans tous les cas, la sensibilité du réseau de subsurface est suffisante pour détecter des ruptures sismiques d'une dimension supérieure à un mètre, ce qui est suffisant pour déterminer si l'intégrité du réservoir est menacée ou non.

Sommaire

1. Introduction.....	7
2. Suivi de l'intégrité du stockage par le réseau dégradé.....	9
2.1. SEUILS DE SENSIBILITÉ DU RESEAU DÉGRADÉ	9
2.2. RELATION MAGNITUDE / CARACTÉRISTIQUES DE LA RUPTURE.....	9
2.3. DIMENSIONS MINIMALES DES RUPTURES DÉTECTABLES PAR LE RÉSEAU DÉGRADÉ.....	12
3. Précision de localisation des événements et impact sur le suivi du stockage géologique	13
4. Conclusion.....	17
5. Bibliographie.....	19

Liste des illustrations

Figure 1: Relation magnitude en fonction de la longueur de la rupture.	11
Figure 2 : Coupe géologique N-S du site de stockage (Total 2009).	14
Figure 3 : Rupture centrée sur la tête de puits, à 4770 mètres de profondeur.	29
Figure 4 : Rupture en bord du réservoir, à 1600 m à l'ouest du point d'injection et à 4550 mètres de profondeur.	30
Figure 5 : Rupture au sommet de la couverture, centré sur le puits RSE-1, à 2000 m de profondeur.	31
Tableau 1 : Performances du réseau en terme de magnitude minimale détectée, dans le cas où seul le réseau de subsurface est opérationnel (TOTAL, 2009)	9
Tableau 2 : Relation entre magnitude, longueur de la rupture et déplacement fournie par TOTAL (2009)	11

Tableau 3 : Paramètres de localisation pour le scénario 1 (TOTAL 2009) 13

Liste des annexes

Annexe 1 Saisine de la DRIRE du 12 octobre 2009 21
Annexe 2 Calculs des incertitudes de localisation : modèle simple 25

1. Introduction

Dans le cadre du projet pilote de captage et stockage géologique de dioxyde de carbone (CO₂) de Lacq-Rouse (Pyrénées-Atlantiques) la société Total E&P France a mis en place un réseau de surveillance de la microsismicité à Rouse pour surveiller l'intégrité mécanique du réservoir et de la couverture suite à l'injection de CO₂. Le réseau comportait initialement sept antennes sismiques en subsurface ainsi qu'une antenne sismique au fond du puits d'injection RSE-1. Cependant, un problème est apparu dans la transmission par fibre optique des informations de l'antenne RSE-1, rendant indisponibles les signaux des capteurs en profondeur. L'enregistrement se fait donc actuellement à l'aide d'un réseau de 7 antennes disposées une au centre et 6 le long d'un cercle de 2 km de rayo. Chaque antenne inclut 4 sismomètres étagés entre 140 et 200 mètres de profondeur.

La DRIRE Aquitaine a demandé au BRGM d'évaluer la pertinence des objectifs de performances du réseau de surveillance sismique suite à cette perte, en terme de sensibilité de détection – magnitude et précision de localisation - au regard de l'objectif d'identifier d'éventuels dérangements mécaniques pouvant remettre en cause l'intégrité du réservoir lors des opérations d'injection et de stockage de CO₂ (cf. copie de la saisine du 20 octobre 2009 en annexe 1). Le problème posé à cette expertise, s'exprime de la façon suivante :

- le réseau dégradé sera-t-il capable de détecter un endommagement du réservoir ou une rupture de la couverture, susceptibles de mettre en cause l'intégrité du stockage ?
- la précision de localisation des événements sismiques par le réseau dégradée est-elle suffisante pour estimer correctement l'état mécanique du réservoir et de la couverture ?

Pour cette étude, nous nous sommes principalement appuyés sur les documents suivants :

- le rapport TOTAL « Stockage géologique de CO₂ sur le site de Rouse, Réseau d'écoute micro-sismique », DGEP/SCR/RD MGR - 09-156, transmis le 14 octobre 2009 ;
- le rapport TOTAL « Le réseau d'écoute microsismique sur le site de Rouse, Performances, ligne de base et surveillance », DGEP/SCR/RD/ MGR 09-191, transmis le 23 octobre 2009 ;
- le rapport Magnitude "TOTAL Rouse Microseismic Monitoring Feasibility Study Modelling & Network Design", MAG 06/763, Septembre 2006. Ce rapport faisait partie des documents déjà fournis au BRGM lors de la première expertise BRGM de juin 2008 (Bouc *et al.*, 2008).

2. Suivi de l'intégrité du stockage par le réseau dégradé

Dans cette partie, nous montrons que le réseau sismique, malgré la panne des capteurs de fond de puits de RSE-1, est capable de détecter des ruptures de couverture pouvant remettre en cause l'intégrité du stockage géologique de CO₂.

2.1. SEUILS DE SENSIBILITÉ DU RESEAU DÉGRADÉ

Dans l'étude effectuée suite à la demande de Total sur les performances du réseau sismique complet, la société Magnitude a proposé plusieurs scénarios de fonctionnement (cf. PJ 4 citée dans le rapport DGEP/SCR/RD MGR - 09-156). Le scénario 1, en particulier, part du principe que l'antenne en fond de puits RSE-1 est indisponible. Dans ce scénario, les performances attendues pour les trois types d'événements sismiques considérés sont détaillées dans le Tableau 1 :

1) Dérangement autour du point d'injection à 4300 m de profondeur	Magnitude minimale détectée : -1.6
2) Réajustement de faille en bordure du réservoir à 4600 m de profondeur	Magnitude minimale : -1.5
3) Dérangement de la couverture à 2000 m de profondeur	Magnitude minimale : -1.7

Tableau 1 : Performances du réseau en terme de magnitude minimale détectée, dans le cas où seul le réseau de subsurface est opérationnel (TOTAL, 2009)

L'expertise de la capacité du réseau à atteindre ces objectifs étant effectuée par ailleurs, nous nous limiterons à signaler que ces seuils correspondent aux sensibilités typiques des réseaux de surveillance sismique de subsurface, utilisés notamment en exploitation pétrolière ou dans certains champs géothermiques produisant de l'électricité. Ainsi, l'expérience montre qu'un réseau de capteurs installés en fond de puits à plus d'une centaine de mètres de profondeur est tout à fait capable de détecter des séismes de magnitudes négatives situés à quelques kilomètres de distance. L'objectif de l'installation sous la surface est de s'affranchir des vibrations parasites existant à la surface du sol, ainsi que des faibles vitesses et de l'atténuation de la zone altérée existant dans les premières dizaines de mètres (la LVZ, low velocity zone, des sismiciens).

2.2. RELATION MAGNITUDE / CARACTÉRISTIQUES DE LA RUPTURE

Afin de déterminer si une rupture de faille d'une magnitude donnée peut porter atteinte à l'intégrité du stockage géologique, il faut déterminer si la taille caractéristique de sa surface de rupture est assez grande pour rompre la couverture ou endommager significativement les failles bordières. Ce sujet fait l'objet de nombreuses recherches, aussi bien en microsismicité (exploitation de mines,

champs géothermiques et d'hydrocarbures), qu'en sismologie (pour l'évaluation du risque sismique en particulier). Des modèles simples de faille ont été conçus pour répondre à cette question. Ces modèles se sont révélés assez robustes, et servent de base à notre estimation. D'un point de vue théorique, la surface de rupture S et D le déplacement induit pour une faille simple sont reliés au moment sismique M_0 (le couple de forces généré par la rupture) par la relation suivante (μ = rigidité du milieu) :

$$M_0 = \mu SD$$

En supposant que surface et déplacement sont liés par une relation simple, $S \approx c \times D^2$, avec c un coefficient géométrique proche de un, il apparaît que le moment sismique est proportionnel au cube de la longueur caractéristique de la rupture. Nous avons par ailleurs la relation suivante entre la magnitude (de moment) et le Moment sismique (Kanamori, 1977, repris dans Stein et Wysession, 2003, p. 266) :

$$magnitude = \log(M_0) / 1.5 - 10.73$$

Ces études théoriques ont été complétées par de nombreuses observations à différentes échelles de rupture. Nous utilisons ici les résultats obtenus par Gibowicz *et al.* en 1991 à partir de la microsismicité enregistrée dans les mines, ainsi que les calculs effectués par Feignier et Grasso en 1991 à partir des données du réseau sismique déployé à l'aplomb du site de Lacq. Ces derniers ont calculé les dimensions de la source pour des séismes de magnitude supérieure à 1, enregistrés entre août 1976 et juin 1979. Les résultats de ces deux études sont reportés dans la Figure 1, qui représente la magnitude en fonction de la taille caractéristique de la rupture. Il est donc possible, à partir d'une magnitude donnée, d'estimer la dimension caractéristique d'une rupture ; cette relation est robuste pour la gamme de magnitudes de séismes pouvant se produire au niveau du site de stockage géologique.

TOTAL a fourni par ailleurs le Tableau 2 reliant la magnitude à la longueur de la rupture et au déplacement le long de celle-ci, dans le glossaire du rapport DGEP/SCR/RD/ MGR 09-191. Cette relation est matérialisée par la courbe rose dans la Figure 1. Elle est compatible avec la courbe de régression logarithmique établie à partir des données en mine, prolongée dans le nuage des données de Lacq. Ceci montre une cohérence certaine entre deux types d'observations dans des contextes géologiques et à des échelles différents. Nous observons cependant que pour les magnitudes supérieures à 3 les longueurs de rupture calculées à Lacq sont largement inférieures à ce qui est prédit par ce type de loi, et restent inférieures à 200 m. Même si ce genre de calcul est tributaire des modèles physiques simplifiés de la source sur lesquels ils reposent et d'un nombre limité de séismes, les observations faites à Lacq ont tendance à montrer que la longueur de rupture ne devrait pas dépasser les 200 m, en cas d'occurrence de séisme de magnitude 4.

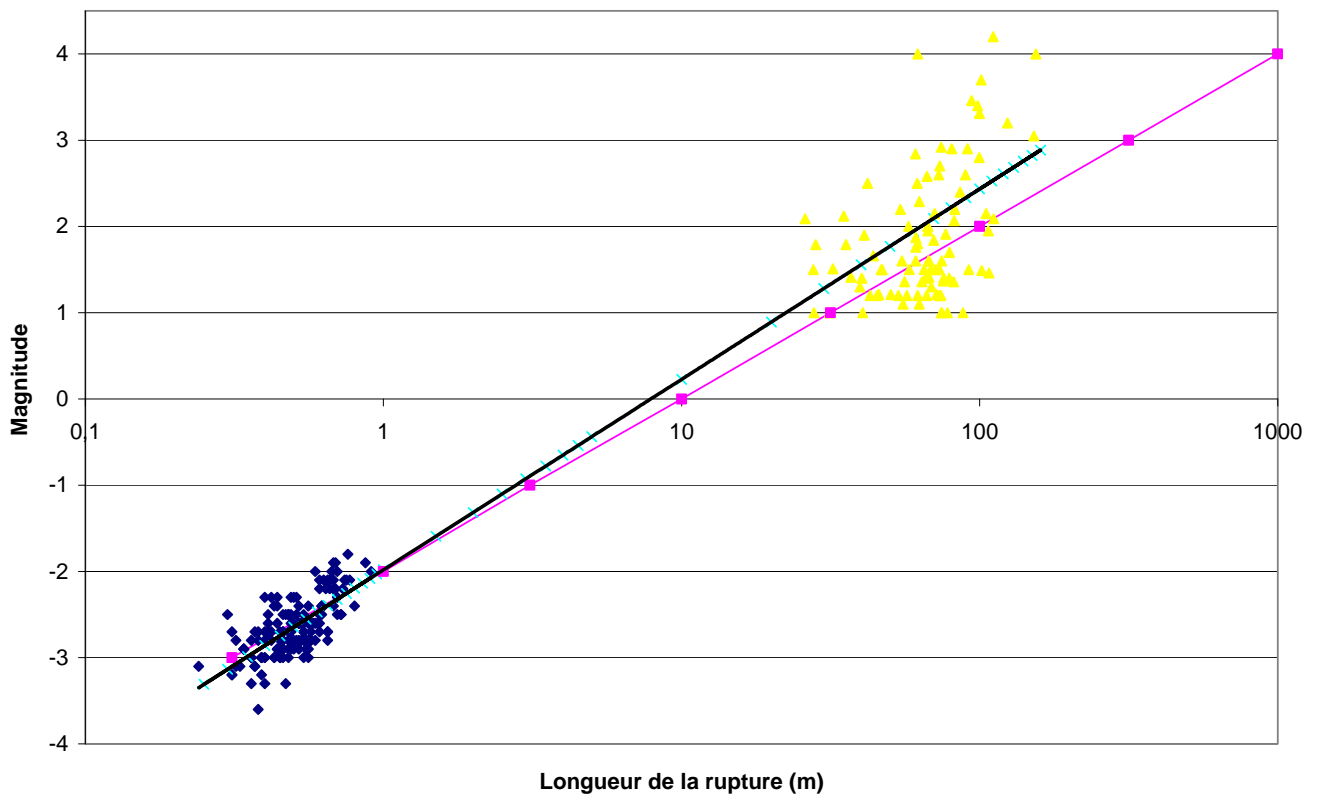


Figure 1: Relation magnitude en fonction de la longueur de la rupture. En bleu, les données de Gibowicz et al. (1991) ; en jaune les données de Feignier et Grasso (1991). La droite noire est la courbe de régression logarithmique établie à partir des données en mine, prolongée dans le nuage des données de Lacq. En rose, la droite correspondant au tableau du rapport TOTAL DGEP/SCR/RD/ MGR 09-191.

Magnitude	Longueur de la faille (en m)	Déplacement (en mm)
-3,0	0,3	0,0
-2,0	1,0	0,1
-1,0	3,1	0,2
0,0	10,0	0,5
1,0	31,6	1,6
2,0	100,0	5,0
3,0	316,2	15,8
4,0	1000,0	50,0

Tableau 2 : Relation entre magnitude, longueur de la rupture et déplacement fournie par TOTAL (2009)

2.3. DIMENSIONS MINIMALES DES RUPTURES DÉTECTABLES PAR LE RÉSEAU DÉGRADÉ

Il convient de noter d'abord qu'une étude récente a montré que la sismicité induite à Lacq entre 1974 et 1997 par la compaction du réservoir était localisée au-dessus (à 70 %), dans et au-dessous du réservoir (Bardainne *et al.*, 2008). Comme le fait remarquer TOTAL, les contextes géologiques à Rousse et à Lacq sont similaires, il n'est donc pas exclu que s'il y a apparition de microsismicité suite aux modifications de contraintes, celle-ci puisse affecter le réservoir et la couverture à Rousse. Cependant, au vu du différentiel de pression existant actuellement dans le réservoir, les magnitudes devraient rester très faibles.

D'après l'étude de sensibilité du réseau fournie par Total, le réseau dégradé est capable de détecter des événements d'une magnitude supérieure à -1,7 dans la couverture et -1.5 dans le réservoir. D'après la Figure 1, cette magnitude correspond à des longueurs de rupture d'un ordre de grandeur égal au mètre. Cette taille de rupture est très faible en comparaison de la taille typique de la couverture à Rousse (2000 mètres), ainsi que celle des failles bordières du réservoir (plusieurs centaines de mètres à plurikilométriques, cf. Figure 2). Ceci signifie que le réseau de subsurface peut suivre des endommagements extrêmement mineurs, et serait donc capable *a fortiori* de détecter les microséismes annonciateurs d'une rupture éventuelle pouvant menacer l'intégrité du stockage géologique.

3. Précision de localisation des événements et impact sur le suivi du stockage géologique

Connaître le lieu précis où une rupture s'est produite est aussi important que connaître la surface de la rupture mise en jeu. Si des ruptures successives semblaient montrer qu'il y a propagation d'une fracture vers le haut, ou si une faille commençait à être réactivée, l'intégrité du stockage géologique devrait être remise en cause et des actions de monitoring supplémentaires, voire des mesures correctives, pourraient s'avérer nécessaires.

La perte de l'antenne sismique de RSE-1, située en profondeur, entraîne une augmentation de l'incertitude de localisation. Cependant, cette augmentation de l'incertitude ne sera pas uniforme : elle sera plus grande dans le plan vertical et peu changée dans le plan horizontal. En effet, si l'extension horizontale du réseau de subsurface reste bonne (notamment grâce à la disposition en couronne sur un cercle de 2 km de rayon), l'extension verticale du réseau est réduite de 4300 m à 200m, ce qui pénalise la précision verticale.

La société Magnitude a procédé à une évaluation de la précision de la localisation par différents réseaux dégradés, c'est-à-dire en faisant varier le nombre d'antenne de subsurface opérationnelles (cf. PJ 4 citée dans le rapport DGEP/SCR/RD MGR - 09-156 et Tableau 9 du même rapport). C'est le scénario 1, avec les 7 antennes en fonctionnement, qui nous intéresse particulièrement. En prenant la moins bonne des précisions possibles entre horizontale et verticale, ils considèrent trois types d'événements qui pourraient survenir sur la structure de Rouse et obtiennent les résultats suivants :

1) Dérangement autour du point d'injection (Point 2, à 4300 m de profondeur)	incertitude 240m
2) Réajustement de faille en bordure du réservoir (Point 3, à 4600 m de profondeur)	incertitude 260m
3) Dérangement de la couverture (Point 1, à 2000 m de profondeur)	incertitude 100m

Tableau 3 : Paramètres de localisation pour le scénario 1 (TOTAL 2009)

Une expertise précise de ces valeurs est procédée par ailleurs. Il convient cependant de noter dès maintenant les points suivants :

- L'incertitude indiquée correspond approximativement à l'erreur verticale, l'erreur horizontale étant plus faible : nos calculs sur un modèle simple (voir annexe 2) montrent que le ratio erreur verticale / erreur horizontale est environ de 2. Il sera donc plus facile de situer un événement géographiquement en X, Y que de déterminer sa profondeur ;

- L'incertitude de localisation est principalement liée aux incertitudes sur le modèle de vitesse, l'erreur sur le pointé des ondes étant beaucoup plus faible (voir annexe 2). Les erreurs données par Magnitude correspondent à des erreurs du modèle de vitesse de l'ordre de 5%. Ces erreurs seront considérablement diminuées si le modèle de vitesse est affiné par des tirs de calibration, proposés par TOTAL dans ses rapports.
- Le cas « dérangement de la couverture » fait l'hypothèse d'une rupture au sommet de la couverture, à 2000 mètres de profondeur ; si une rupture a lieu à la base de la couverture, il faut se référer au cas « dérangement autour du point d'injection », qui implique une précision plus faible due à la distance plus grande par rapport au réseau de subsurface. L'incertitude de localisation pour une rupture dans la couverture est située entre ces deux extrêmes et diminue à mesure que la rupture se rapproche de la surface.

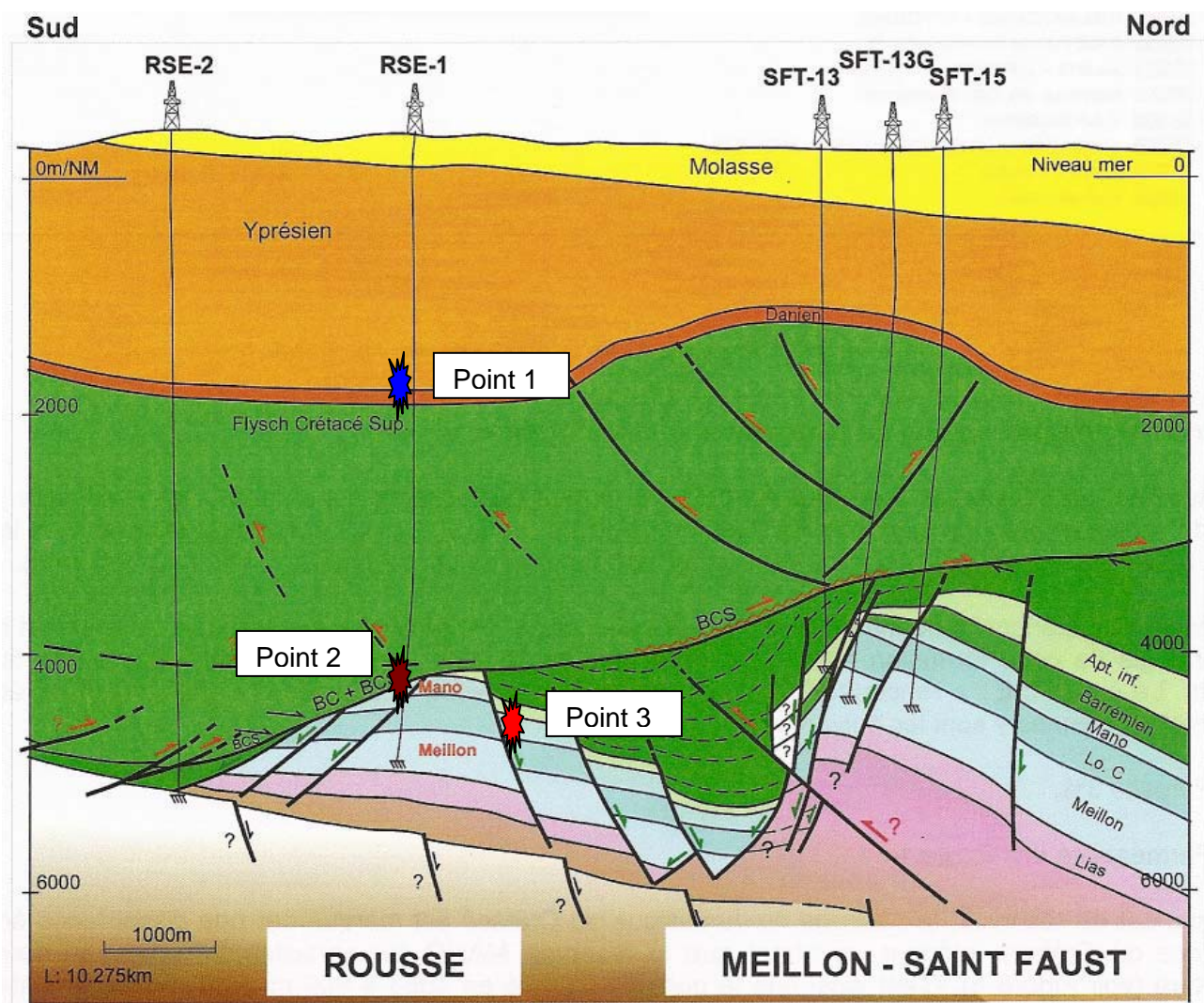


Figure 2 : Coupe géologique N-S du site de stockage (Total 2009). Les points de couleurs correspondent respectivement aux trois types d'événements considérés par TOTAL

D'après la figure 2, la couverture a une épaisseur de 2000 mètres, et l'extension horizontale du stockage est comprise entre 1000 et 2000 mètres jusqu'aux premières failles bordières. Une incertitude de localisation de 260 mètres représente donc 10% de l'épaisseur de couverture ; une incertitude de localisation horizontale de 130 mètres représente environ 10% de la largeur du réservoir.

Le réseau est donc capable de suivre une migration des ruptures depuis la base de la couverture jusqu'à son sommet. Pour des événements dans le réservoir, la précision dégradée des mesures ne pourra pas préciser à quel niveau du réservoir a eu lieu la rupture ; il sera cependant possible de mesurer la migration horizontale des ruptures par rapport au puits d'injection, et donc d'avoir une mesure indirecte de l'extension horizontale du panache de CO₂ injecté, ou éventuellement de caractériser un mouvement le long de failles bordières, en cas d'éloignement de plus de 1000 m à 1500 m par rapport au point d'injection.

4. Conclusion

Suite à la panne de l'antenne sismique en fond de puits RSE-1, le réseau sismique contrôlant le réservoir de stockage géologique s'est retrouvé dans une configuration dégradée qui a fait l'objet d'études publiées dans les documents fournis par Total, ce cas spécifique étant couvert par le scénario 1.

La sensibilité de cette configuration en termes de niveau minimal de magnitude détectée est :

- Rédhibitoire en terme de détection des magnitudes inférieures à -2 qui pourraient se produire dans le réservoir à proximité du point d'injection, ce qui était l'un des objectifs de l'antenne au fond de RSE-1 ;
- Inchangée en termes de détection des magnitudes supérieures à -1.5 induites par un réajustement de failles ou de fracture en profondeur ou encore supérieures à - 1,7 pour un dérangement dans la couverture.
- Suffisante pour détecter des ruptures de l'ordre de 1 à 1,5 m de longueur qui pourraient être l'indice d'une modification de contraintes importantes pouvant affecter de façon significative l'intégrité du réservoir.

A partir des études du scénario 1 concernant l'incertitude de localisation des ruptures sismiques sur le site de stockage et des valeurs d'incertitude annoncées, le BRGM est amené à dire que :

- La précision verticale et horizontale du réseau de subsurface est suffisante pour suivre un éventuel endommagement de la couverture et déclencher une alerte si cet endommagement était susceptible de menacer l'intégrité du stockage ;
- La précision de la localisation d'une rupture éventuelle au niveau du réservoir par le réseau actuel permet uniquement de conclure si la rupture a eu lieu dans le réservoir ou la couverture, sans pouvoir détailler quel niveau du réservoir est atteint ; cependant, la précision horizontale est suffisante pour suivre de manière indirecte l'extension du panache de CO₂ ;
- De même, la précision horizontale du réseau est suffisante pour déterminer quelle faille bordière a pu rompre, et donc conclure sur l'intégrité du réservoir ;
- Enfin, la précision de localisation devrait être grandement améliorée par une amélioration du modèle de vitesse (par exemple par des tirs de calibration comme suggérés dans les documents fournis par Total).

Dans tous les cas, la sensibilité du réseau de subsurface est suffisante pour détecter des ruptures sismiques d'une dimension supérieure à un mètre, ce qui est suffisant pour déterminer si l'intégrité du réservoir est menacée ou non.

5. Bibliographie

- Bardaine, T., Dubos-Sallée, N., Sénéchal, G., Gaillot, P. and Perroud H. (2008)** – Analysis of seismicity of the Lacq gas field (Southwestern France) and model of deformation. Vol. 172, 1151-1162.
- O. Bouc, H. Fabriol, C. Kervevan, J. Rey, J. Rohmer (2008)** – Expertise du dossier « Code Minier » pour l'autorisation du pilote de stockage géologique de CO₂ à Rouse (64). BRGM/ RC-56440-FR, 126 p.
- Feignier B. and Grasso J.-R. (1991)** – Relation Between Seismic Source Parameters and Mechanical Properties of Rocks: A Case Study. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 137, No. 3.
- Gibowicz, S.J., Young R.P., Talebi, S. and Rawlence, D. J. (1991)** – Source parameters of seismic events at the underground research laboratory in Manitoba, Canada: scaling relations for events with moment magnitude smaller than -2. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 81, No. 4, pp. 1157-1182.
- Hanks T.C., and Kanamori H. (1977)** – A moment magnitude scale, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. B5, pp. 2348-2350.
- Stein S. and Wysession, M. (2003)** – An introduction to seismology, earthquakes and Earth structure, Blackwell Publishing, ISBN 978-0-86542-078-6, 498 pp.

Annexe 1

Saisine de la DRIRE du 12 octobre 2009



Direction Régionale de l'Industrie de la
Recherche et de l'Environnement d'Aquitaine

Bordeaux le **20 OCT. 2009**

Référence : **DFRMG/EISS/09DP-4199**

TOURNAI

Le Directeur

Affaire suivie par : Daniel FAUVRE
Téléphone : 05 56 00 04 24
Fax : 05 56 00 04 25

a

Objet : **Projet de pilote d'injection de CO₂**

Monsieur le Directeur Régional du Bureau de
Recherche Géologique et Minière
Parc Technologique Europe
24, avenue Léonard de Vinci
33600 PESSAC

Réf. 1 : Votre avis en date du 26 juin 2009 et du 27
janvier 2010.

Réf. 2 : Dossier TEPF MGR U9-153 en date du 12
octobre 2009

Dans le cadre de l'instruction du dossier présenté par Total, pour le projet de pilote d'injection de CO₂ sur le site de Rousse, vous avez procédé à l'expertise du dossier et rendu en conséquence vos avis en références 1 et 2.

Cette expertise portait notamment sur les modalités de surveillance sismique du réservoir.

Lors des vérifications préalables à la mise en service du pilote CO₂, Total a été confronté à une panne affectant l'ensemble des trois capteurs sismiques de fond, localisés à plus de 4000 mètres de profondeur, dont le signal est acheminé vers la surface par une seule et unique fibre optique.

La stratégie du groupe Total consiste à remplacer ces capteurs mais à démarer l'injection auparavant, en faisant reposer la surveillance sismique sur le réseau dit de surface, constitué des 7 antennes à 200 mètres de profondeur.

Dans ce cadre, TEPF m'a transmis le dossier justificatif en référence 2 qui vise à établir la capacité du réseau de surveillance sismique en situation dégradée – dont celle-ci – à assurer la surveillance sismique du réservoir.

Je souhaite que le BRGM examine la pertinence des objectifs de performances du réseau de surveillance sismique en terme de sensibilité de détection – magnitude et précision de localisation - au regard de l'objectif d'identifier d'éventuels dérangements mécaniques pouvant remettre en cause l'intégrité de réservoir lors des opérations d'injection et de stockage de CO₂.

Je vous demande de bien vouloir me faire part avant le 3 novembre de votre avis en vous appuyant sur le dossier en référence 2. Vous pourriez demander au groupe Total tout document complémentaire utile à votre analyse.

Je vous informe que la justification de la capacité du réseau dégradé (notamment sans les sondes de fond) à atteindre l'objectif de performances fait l'objet d'une force expertisée démarrée par ailleurs à TEPF.

Pour le Directeur,
Le Chef du Service Régional de
l'Environnement Industriel,

Daniel FAUVRE

Service Régional de l'Environnement Industriel
24, avenue Léonard de Vinci, 33600 PESSAC
Téléphone : 05 56 00 04 24 - Fax : 05 56 00 04 25

**Présent
pour
l'avenir**

BRGM - Direction Régionale de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement d'Aquitaine
11, rue de l'Industrie - 33000 BORDEAUX

42, rue du Général de Lamotte,
Belle-Maison,
63008 Rueilleville Cedex
Tél : 03 44 61 02 04 76 - Fax : 03 44 61 02 04 32
http://www.brgm.fr



BRGM 2009

Annexe 2

Calculs des incertitudes de localisation : modèle simple

Calculs des incertitudes de localisation : modèle simple

Dans cette étude, nous nous proposons d'évaluer l'incertitude de localisation d'un événement sismique détecté par le réseau de subsurface, pour un modèle très simple en termes de géologie et de propagation des ondes. La société Magnitude, dans son étude, a utilisé un modèle 3D et des calculs d'incertitude précis pour déterminer l'ellipsoïde d'erreur de localisation ; cependant, dans une approche conservatrice et dans un souci de pouvoir comparer différents types de réseau, seule la plus grande incertitude de localisation a été retenue. Cette approche est pénalisante pour les réseaux de subsurface qui permettent de localiser des ruptures avec plus de précision sur le plan horizontal que le plan vertical, ce qui peut permettre d'associer un événement avec une faille connue malgré l'incertitude sur la profondeur.

Nous avons effectué des calculs pour estimer le ratio incertitude verticale / incertitude horizontale, afin de pouvoir conclure sur la précision du réseau de subsurface de manière plus complète. Nous exposons ici les hypothèses et le modèle simple que nous avons adoptés, et les résultats obtenus par les simulations.

Hypothèses de calcul

- **Modèle de propagation**

Nous adoptons un modèle de vitesse homogène, avec $V_p=6$ km/s, et $V_s=V_p/1.8$. Dans ce modèle, les ondes se propagent alors en ligne droite, et le temps d'arrivée (heure locale) des ondes s'exprime donc très simplement de la manière suivante :

$t_{arrivee}^i = t_{rupture} + D^i / V$, avec D^i la distance entre la source et le capteur i , et V la vitesse de l'onde considérée. Dans ce problème, D^i et $t_{arrivee}$ sont les inconnues qui seront calculées à partir des temps d'arrivée et des positions des capteurs sismiques ; nous ne considérons pas l'information disponible apportée par la polarisation des ondes P, qui permet d'indiquer en plus d'où vient le train d'ondes.

- **Incertainces intervenant sur la localisation du séisme**

Deux types d'incertitude vont influencer la localisation du séisme : l'incertitude de pointé sur les temps d'arrivée des ondes P et S, estimée à quelques pas de temps de l'enregistrement (dans ce cas, quelques millisecondes), et l'incertitude sur le modèle de vitesse estimée par la société Magnitude de l'ordre de 5%.

L'équation précédente nous montre que l'incertitude sur le modèle de vitesse va directement influencer le temps d'arrivée : en effectuant une dérivée logarithmique de cette équation en

considérant le temps de propagation $t_{arrivee} - t_0$ et la vitesse comme variables, nous obtenons directement que $\frac{\delta t}{t} = -\frac{\delta V}{V}$, c'est à dire que l'incertitude relative de pointé sur le temps d'arrivée est égale à l'incertitude relative sur le modèle de vitesse si ce dernier est l'unique source d'incertitude. Considérant que le temps de propagation pour le type d'événements sismiques recherché est de l'ordre de 1 seconde, nous obtenons une incertitude de pointé de 0,02 secondes, dû au modèle de vitesse dans le cas d'un modèle de vitesse amélioré.

En comparant l'incertitude de pointé et l'incertitude générée par l'imprécision du modèle de vitesse, nous en déduisons que l'incertitude sur le modèle de vitesse est la principale incertitude qui peut influencer les calculs de localisation. Une amélioration du modèle de vitesse peut donc grandement améliorer la précision de localisation des séismes.

• Calcul de la densité de probabilité de la localisation

En prenant en compte les hypothèses précédentes, en supposant que seule l'incertitude sur le temps d'arrivée intervient (nous supposons par ailleurs que la position des stations est parfaitement connue), et comme nous n'avons pas d'information a priori sur cette incertitude, la densité de probabilité de la localisation s'écrit donc simplement :

$$\rho(x, y, z, t_0) = C \exp\left(-\frac{\sum_i (t_{cal}^i - t_{obs}^i)^2}{2\sigma^2}\right)$$

avec i l'indice du pointé considéré (P ou S sur une station), $t_{cal}(x, y, z, t_0)$ le temps calculé par l'équation précédente et t_{obs} le temps d'arrivée de l'onde considérée.

Simulations pour les différents scénarios de rupture

Pour ces simulations, nous avons considéré un réseau de subsurface avec 7 antennes réparties équitablement sur un cercle de 2 km de rayon autour du puits d'injection RSE-1, configuration proche de la configuration réelle du réseau installé. Nous avons considéré dans toutes ces simulations uniquement la densité de probabilité spatiale dans le plan $x=0$, à savoir une coupe Ouest-Est passant par le puits d'injection.

Trois scénarios similaires à ceux du Tableau 3 ont été considérés :

1) Dérangement autour du point d'injection (Figure 3)	En x, centré sur la tête de puits, en z à 4770 m de profondeur
2) Réajustement de faille en bordure du réservoir (Figure 4)	En x, 1600 m à l'ouest du point d'injection, et en z à 4550 m de profondeur
3) Dérangement de la couverture (Figure 5)	En x, centré sur la tête de puits et en z à 2000 m de profondeur

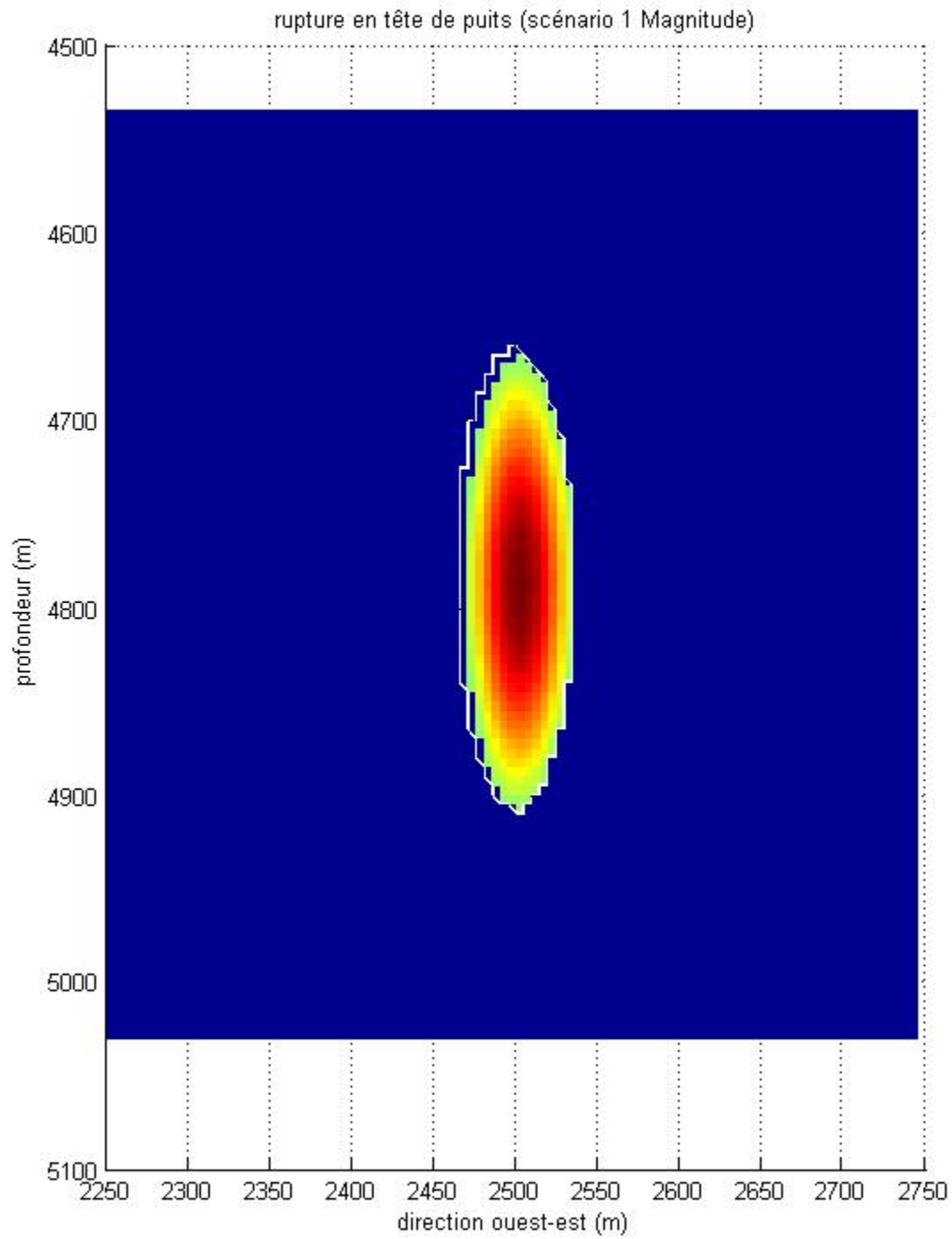


Figure 3 : Rupture centrée sur la tête de puits, à 4770 mètres de profondeur.

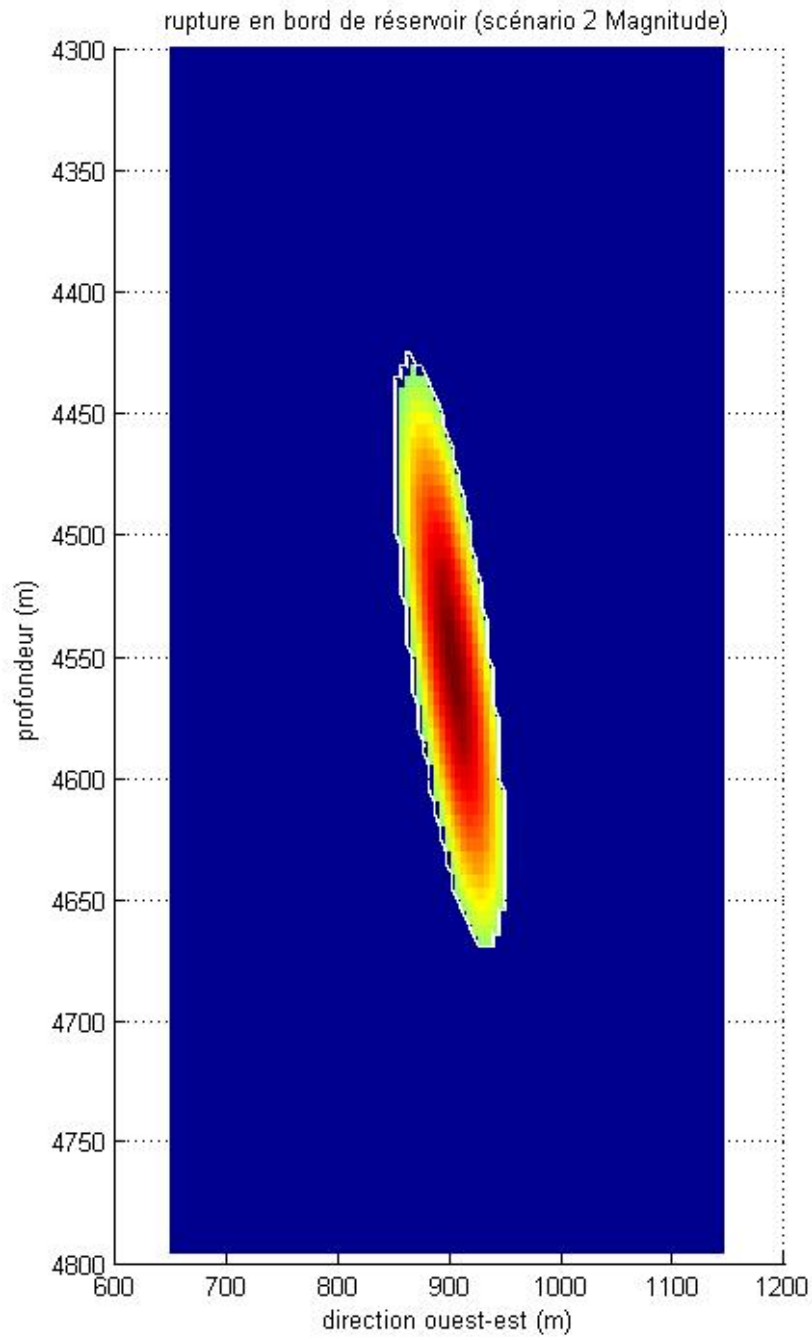


Figure 4 : Rupture en bord du réservoir, à 1600 m à l'ouest du point d'injection et à 4550 mètres de profondeur.

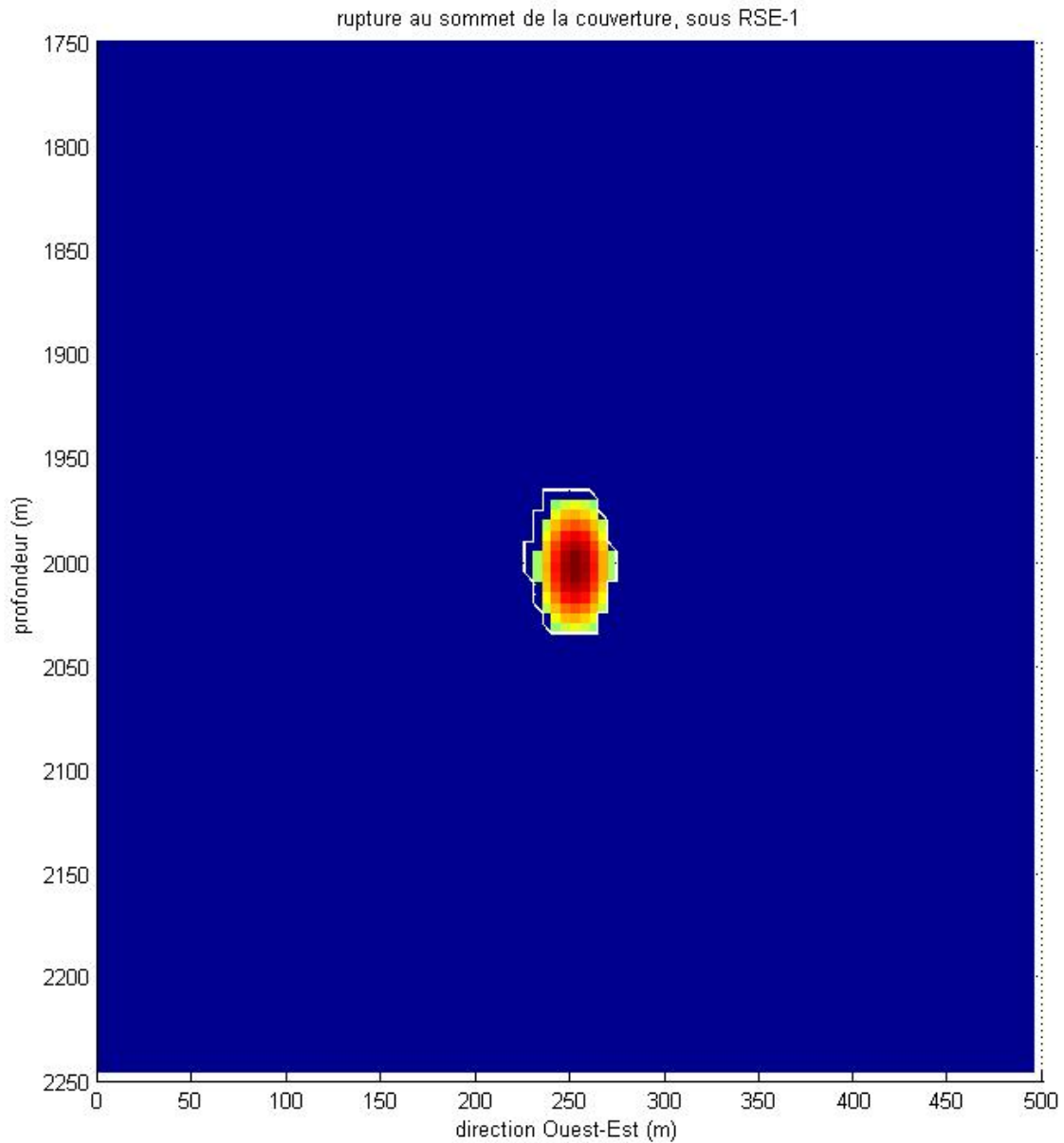


Figure 5 : Rupture au sommet de la couverture, centré sur le puits RSE-1, à 2000 m de profondeur.

Pour ces trois scénarios, l'incertitude horizontale apparaît deux fois plus faible que l'incertitude verticale. Pour un modèle très simple, le réseau en subsurface a donc une précision horizontale deux fois plus grande que la précision annoncée par les études préliminaires ; ces résultats sont vraisemblablement généralisables à des modèles de vitesse plus complexes.



Centre scientifique et technique
Service Risques naturels et sécurité des stockages de CO₂
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34