



Expertise du dossier
“ Stockage géologique de CO₂
sur le site de Rousse
Réseau d’écoute micro-sismique”

2009-10-28.1

Fontainebleau, 28 Octobre 2009

Alexandrine Gesret, Mark Noble

Sommaire

1	Synthèse	3
2	Introduction	5
3	Les différents types de micro-séismes possibles.....	6
4	Le réseau micro-sismique mis en place par Total.....	7
5	Situation actuelle du réseau.....	9
6	Objectifs de performance du réseau d'écoute (sensibilité, incertitudes de localisation)	9
7	Demande d'expertise de la DRIRE portant sur la défaillance de certains capteurs.....	10
8	Evaluation des méthodes utilisées pour estimer les performances du réseau micro-sismique ..	10
9	Performances du réseau complet ou dégradé.....	12
9.1	Performances du réseau complet.....	13
9.2	Performances du réseau dégradé avec 7 antennes de subsurface.....	14
9.3	Performances du réseau dégradé avec 4 ou 5 antennes de subsurface.....	14
9.4	Performances du réseau dégradé avec 3 antennes de subsurface et le puits RSE-1	15
10	Conclusion finale	17

1 Synthèse

La société Total E&P France (TEPF) développe actuellement un projet pilote de captage et stockage géologique de dioxyde de carbone (CO₂), prévoyant l'injection de ce gaz dans un gisement de gaz naturel en fin d'exploitation, situé à Rouse (Pyrénées-Atlantiques).

Les objectifs du projet sont de démontrer la faisabilité industrielle d'une chaîne complète de captage, de transport, d'injection et de stockage de CO₂ dans un objet géologique adapté, et de valider les technologies de monitoring de l'ensemble de la chaîne.

Dans le cadre général du monitoring, un des aspects concerne la surveillance sismique. TEPF s'est fixé des objectifs de performance en termes de sensibilité de détection et précision de localisation du réseau de surveillance sismique afin d'identifier d'éventuels dérangements mécaniques pouvant remettre en cause l'intégrité du réservoir lors des opérations d'injection et de stockage de CO₂.

Le réseau complet est constitué de:

- 7 antennes de subsurface, chacune composée de 4 capteurs (3 composantes),
- 1 antenne dans le puits d'injection RSE-1, composée de 3 capteurs (3 composantes) situés près de la zone d'injection,
- et d'un sismomètre additionnel sur un des emplacements d'une antenne de subsurface.

La DRIRE Aquitaine a souhaité obtenir de la part de Mines ParisTech / Armines un avis sur le dossier technique "Stockage géologique de CO₂ sur le site de Rouse - Réseau d'écoute micro-sismique". L'expertise demandée porte sur 2 points:

- **Point 1/** Les conclusions de TEPF, compte tenu de la défaillance des capteurs de fond, sur la capacité du réseau de capteurs de subsurface, à assurer la détection de mouvements sismiques conformes à ses objectifs de performance.
- **Point 2/** La définition par TEPF des configurations minimales du réseau de détection permettant de garantir l'atteinte de ses objectifs, lors de situations dégradées concernant ou non les capteurs de fond.

Afin de réaliser cette expertise, nous avons d'une part, examiné le dossier technique ainsi que des documents complémentaires fournis par TEPF et d'autre part, réalisé des simulations avec une approche différente de celle suivie par la société Magnitude. Suite à cet examen et aux différents tests, nous parvenons aux réponses suivantes :

- **Point 1:** Suite à la défaillance des capteurs dans le puits RSE-1, le réseau est alors composé des 7 antennes de subsurface. Cette configuration permet d'atteindre les objectifs de performance fixés par TEPF, qui concernent les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site. La réalisation de ces objectifs nécessite cependant que l'incertitude sur le modèle de vitesse soit inférieure ou égale à 2%, c'est-à-dire que le modèle de vitesse doit être inversé suite à un tir de calibration.
- **Point 2:** En cas de défaillance du réseau, TEPF a assoupli les critères de localisation des séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site. Les configurations minimales du réseau définies par TEPF permettent de garantir l'atteinte de ces nouveaux objectifs. La réalisation de ces objectifs nécessite cependant que l'incertitude sur le modèle de vitesse soit inférieure

ou égale à 2%, c'est-à-dire que le modèle de vitesse doit être inversé suite à un tir de calibration.

•**Remarque 1:** Dans le cas d'une configuration dégradée, nous recommandons de préciser spécifiquement les capteurs (nom et position géographique) permettant d'atteindre les objectifs. En effet, certaines combinaisons ne remplissent pas les critères.

•**Remarque 2:** Les objectifs de performance définis par TEPF sont atteints avec les antennes de subsurface. Pour l'objectif R&D qui concerne les séismes liés à l'injection, le remplacement des capteurs de fond de puits (RSE-1) permettra de disposer du réseau complet dont les performances sont remarquables en termes de précision de localisation et de détection des événements de faible magnitude.

2 Introduction

La société Total E&P France (TEPF) développe actuellement un projet de captage, d'injection et de stockage de dioxyde de carbone (CO₂) dans un réservoir géologique, autour de ses installations de production d'hydrocarbures situées à Lacq (Pyrénées-Atlantiques). Dans le cadre de ce projet pilote, le gisement de Rouse, situé à environ 24 km à l'Est de Lacq, dont le réservoir Mano est épuisé, a été choisi comme cible de stockage. La connaissance géologique, géométrique ainsi que du comportement du gisement de Rouse s'appuie sur des données statiques (géophysique, puits) et dynamiques acquises au cours de la vie du gisement.

Le projet de stockage géologique sur le site de Rouse comporte un plan de surveillance pour surveiller que le site et la surface ne sont le siège d'aucune migration. Le BRGM a expertisé et contre expertisé que le projet ne présentait pas de risque de fuite significative et qu'aucune incidence notable sur l'environnement et la santé n'était à craindre. Dans ce cadre de monitoring, une surveillance micro-sismique a également été mise en place pour enregistrer et localiser les éventuels événements sismiques.

Par courrier du 5 octobre 2009, le Directeur Régional de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement a demandé à TOTAL de solliciter auprès de l'équipe de géophysique de Mines ParisTech / Armines une tierce expertise de son dossier technique "Stockage géologique de CO₂ sur le site de Rouse - Réseau d'écoute micro-sismique". L'expertise demandée porte sur les 2 points rappelés ci-dessous:

- **Point 1/** Les conclusions de TEPF, compte tenu de la défaillance des capteurs de fond, sur la capacité du réseau de capteurs de subsurface, à assurer la détection de mouvements sismiques conformes à ses objectifs de performance.
- **Point 2/** La définition par TEPF des configurations minimales du réseau de détection permettant de garantir l'atteinte de ses objectifs, lors de situations dégradées concernant ou non les capteurs de fond.

Nous nous sommes donc focalisés sur les performances du réseau d'écoute micro-sismique lors de situations dégradées.

Le présent rapport est basé sur l'analyse du rapport de TEPF "Stockage géologique de CO₂ sur le site de Rouse - Réseau d'écoute micro-sismique" et sur l'analyse de 5 pièces jointes (PJ) rédigées par la société Magnitude et fournies par TEPF.

La PJ1 concerne l'étude de faisabilité de monitoring microsismique menée en 2006.

La PJ2 décrit la méthodologie utilisée pour calculer les cartes de sensibilité en détaillant le principe de calcul ainsi que les limitations de la méthode. De la même manière, la PJ3 décrit la méthodologie utilisée pour calculer les cartes d'incertitude de localisation.

La PJ4 présente les résultats de sensibilité et de localisation pour 11 scénarii (réseaux complet ou dégradés) après un bref rappel sur les paramètres (positions capteurs, positions sources, modèle de vitesse) ainsi que sur les méthodologies utilisés.

Enfin, la PJ 5 résume les résultats pour la plupart des scénarii.

Dans les premiers chapitres, nous nous focalisons sur les paramètres tels que les différents types d'événements possibles (chapitre 3), la configuration du réseau complet et actuel (chapitres 4 et 5). Nous rappelons ensuite les objectifs de performance définis par TEPF (chapitre 6) ainsi que la demande d'expertise de la DRIRE (chapitre 7). Le chapitre 8 constitue une évaluation des méthodes

utilisées pour calculer les cartes de sensibilité et d'incertitude de localisation qui valide ces dernières. Enfin, dans le chapitre 9, les performances des réseaux complet et dégradés sont analysées, ce qui nous permet de répondre aux questions de la DRIRE.

NB : Au fil du rapport, nous faisons quelques commentaires par intérêt scientifique mais seules les conclusions finales sont à prendre en compte.

3 Les différents types de micro-séismes possibles

Lors de la définition de la surveillance microsismique du site de stockage, deux cibles ont été définies : l'enregistrement des effets de l'injection sur le proche voisinage de la zone d'injection (source 2 sur Fig.1) et le suivi des éventuels dérangements mécaniques des terrains pouvant porter atteinte à l'intégrité du site. Cette dernière catégorie se découpe en deux sous-ensembles : événements déclenchés par des réajustements de failles en bordure de réservoir (source 3 sur Fig.1) ou par des dérangements dans la couverture (source 1 sur Fig.1) induits par l'injection ou la sismicité naturelle.

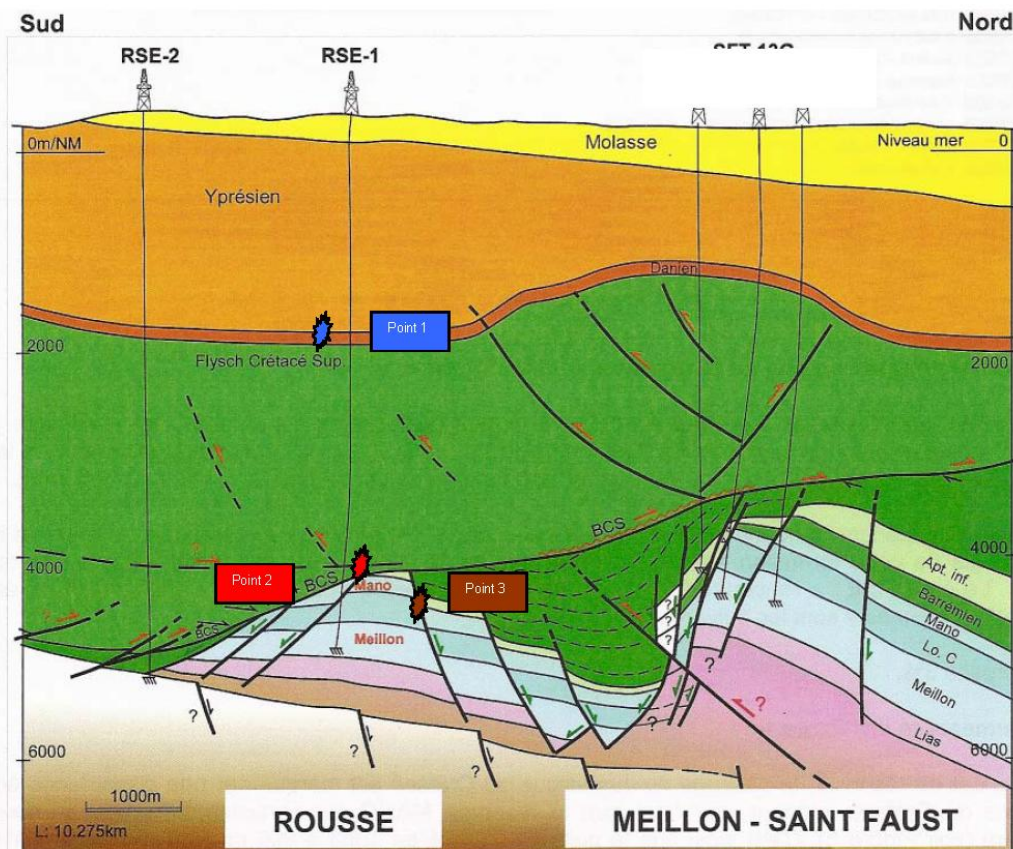


Figure 1: Coupe Nord Sud de la structure de Rouse avec les trois types d'événements sismiques attendus.

Les événements liés aux effets de l'injection (source 2) ne peuvent remettre en cause l'intégrité du site, cet objectif d'enregistrement est de nature R&D.

Pour les événements de type source 3, l'expérience acquise sur le champ de Lacq Profond permet d'attribuer leur nucléation à des rejeux de failles. De la même manière, pour les événements de type

source 1, seules les discontinuités existantes pourront être les vecteurs d'une éventuelle migration de CO₂ car la remontée de pression restera limitée.

Commentaires

Les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site ne pouvant nucléer que sur des failles existantes, le choix des positions de source est justifié. Cependant, on s'est interrogé sur l'incidence d'une légère modification de ces positions sur les résultats des modélisations. Nous avons donc testé avec notre approche (cf chapitre 8) quelques positions de source supplémentaires et nous sommes assurés que les résultats d'incertitude de localisation ne sont pas affectés. Ce résultat était attendu car le réseau est symétrique. Cette question ne concerne pas les seuils de détection car les cartes de sensibilité ne dépendent que des positions et des seuils des capteurs, elles sont représentées pour des coupes verticales et horizontales, c'est-à-dire pour toutes les positions de source.

4 Le réseau micro-sismique mis en place par Total

Le réseau de surveillance micro-sismique a été dimensionné afin d'enregistrer les effets de l'injection (source 2) et de suivre les dérangements mécaniques (sources 1 et 3).

Suite à une étude de faisabilité réalisée par Magnitude (PJ 1), TEPF a retenu une configuration composée de :

-un réseau de subsurface

Il est constitué de 7 puits (Z1 à Z7 sur Fig.2 et Fig.3) d'une profondeur de 200 m, disposés approximativement pour 6 d'entre eux sur les sommets d'un hexagone d'un rayon de l'ordre de 2000 m, centré sur le puits injecteur. Le septième puits est lui situé près du puits injecteur RSE-1 (Fig.2 et Fig.3). Dans chaque puits sont implantés 4 capteurs microsismiques 3 composantes, qui sont espacés de 20 m. Les forages pour ce réseau de subsurface ont été réalisés entre Octobre 2008 et Juin 2009. Les opérations de calibration sur les sept antennes de subsurface ont été finalisées en Octobre 2009.

-une antenne sur le puits de Rouse-1 (RSE-1)

Une antenne de trois sondes sismiques (Antenne WF sur Fig.3) a été installée dans le puits de Rouse-1 (RSE-1) en Mars 2009. Les sondes sismiques sont constituées d'accéléromètres et sont positionnées aux cotes 4180, 4280, 4380 m. Les informations fournies par ces sondes sont retransmises en tête de puits par des fibres optiques. Le système optique sismique mis en place a été fourni par la société de service Weatherford.

- d'un sismomètre additionnel sur un des emplacements d'une antenne de subsurface.

Commentaires

Cette configuration nous paraît tout à fait adaptée pour répondre aux objectifs définis par TEPF.

Le choix de déployer 4 capteurs par antenne est raisonnable ; en effet même si l'information est redondante, cela permet de disposer d'un réseau fiable car la probabilité que les 4 capteurs soient défectueux est faible.

L'acquisition sera continue, l'outil de supervision est basé sur une interrogation pseudo temps réel, ceci est primordial puisqu'en cas de crise sismique, une décision pourra être prise très rapidement.

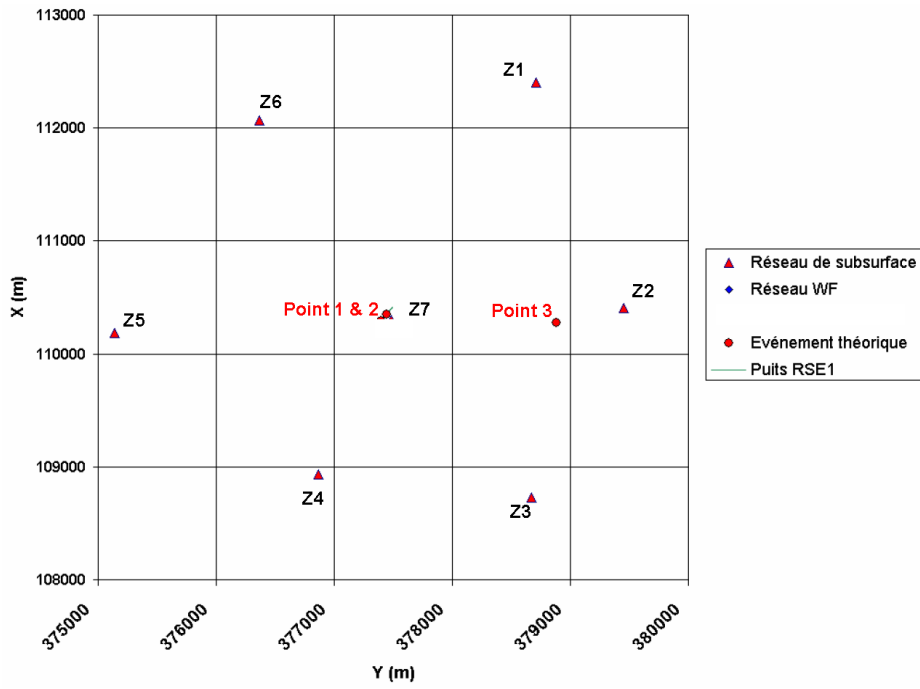


Figure 2: Positions des différents capteurs et événements (X,Y)

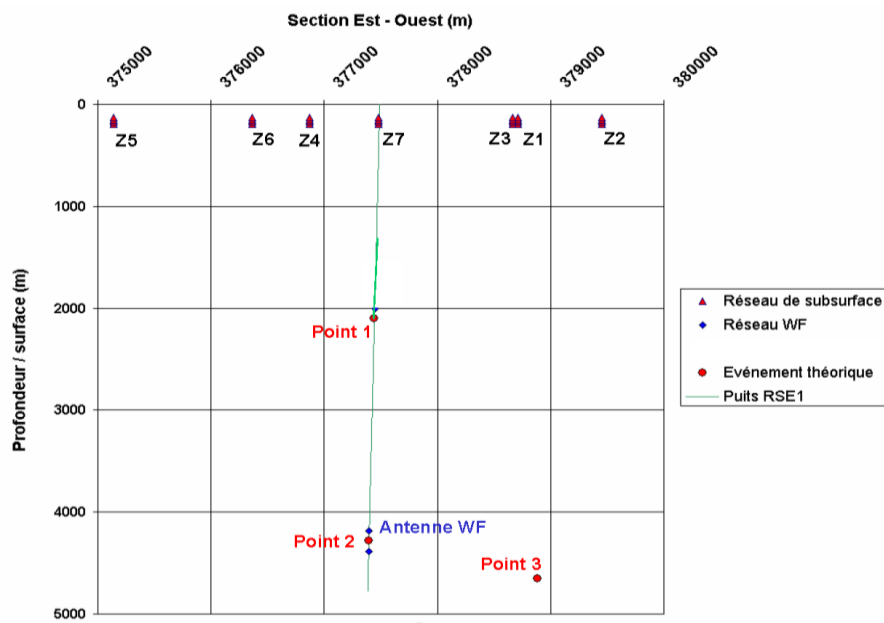


Figure 3: Positions des différents capteurs et événements (Y,Z)

5 Situation actuelle du réseau

Lors des essais de connection avec les boîtiers surface, le 18 Juin 2009, aucun signal provenant des capteurs sismiques de l'antenne de RSE-1 n'est enregistré en surface.

Le remplacement du système défectueux est planifié pour le second semestre 2010. Ce délai est long mais correspond au temps nécessaire pour résoudre tous les problèmes techniques: c'est-à-dire concevoir, construire et qualifier un nouveau système sismique.

Le réseau actuel est donc composé des 7 antennes de subsurface.

6 Objectifs de performance du réseau d'écoute (sensibilité, incertitudes de localisation)

L'expérience de TEPF et Magnitude, acquise sur les réservoirs de Lacq Profond, a permis de définir des critères de détection et d'incertitude de localisation pour les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site (sources de type 1 et 3). Ces critères sont résumés dans le tableau suivant.

Objectif	Détection de Magnitude	Evenement concernes	Incertitude maximum de localisation
Dérangement dans la couverture, source 1	> -1	Dans la couverture, jusqu'à 1.5 km de rayon autour de RSE-1	±250 m
Réajustement de faille/fracture, source 3	> -1.5	En profondeur, jusqu'à 1.5 km de rayon autour de RSE-1	±250 m

Objectifs de performance pour les événements pouvant porter atteinte à l'intégrité du site pour le réseau complet.

Dans le cas d'un réseau dégradé, TEPF a relâché ses objectifs concernant les incertitudes de localisation des événements pouvant porter atteinte à l'intégrité du site. Comme indiqué dans le tableau suivant, cette incertitude est augmentée à ±350 m.

Objectif	Détection de Magnitude	Evenement concernes	Incertitude maximum de localisation
Dérangement dans la couverture, source 1	> -1	Dans la couverture, jusqu'à 1.5 km de rayon autour de RSE-1	±350 m
Réajustement de faille/fracture, source 3	> -1.5	En profondeur, jusqu'à 1.5 km de rayon autour de RSE-1	±350 m

Objectifs de performance pour les événements pouvant porter atteinte à l'intégrité du site pour un réseau dégradé.

Dans le cadre de la R&D, les critères concernant l'étude des séismes au voisinage de l'injection sont résumés dans le tableau suivant.

Objectif	Detection de Magnitude	Evenement concernes	Incertitude maximum de localisation
Effet au voisinage du point d'injection, source 2	< -1.5	100 m autour de la zone d'injection	±50 m

Objectifs R&D de performance pour les séismes au voisinage du point d'injection.

Commentaires

Ces critères sont consistants avec le réseau déployé.

7 Demande d'expertise de la DRIRE portant sur la défaillance de certains capteurs

La DRIRE Aquitaine a souhaité obtenir de la part de Mines ParisTech / Armines un avis sur le dossier technique "Stockage géologique de CO₂ sur le site de Rousse - Réseau d'écoute micro-sismique". L'expertise demandée porte sur 2 points:

- Point 1/** Les conclusions de TEPF, compte tenu de la défaillance des capteurs de fond, sur la capacité du réseau de capteurs de subsurface, à assurer la détection de mouvements sismiques conformes à ses objectifs de performance.
- Point 2/** La définition par TEPF des configurations minimales du réseau de détection permettant de garantir l'atteinte de ses objectifs, lors de situations dégradées concernant ou non les capteurs de fond.

Afin de réaliser cette expertise, nous avons d'une part, examiné le dossier technique ainsi que des documents complémentaires fournis par TEPF et d'autre part, réalisé des simulations de localisation avec une approche différente de celle suivie par Magnitude.

8 Evaluation des méthodes utilisées pour estimer les performances du réseau micro-sismique

Seuil de détection

La méthodologie de modélisation utilisée par Magnitude pour calculer les cartes de sensibilité est détaillée dans la Pièce Jointe 2. Elle repose sur une relation empirique qui lie la magnitude à la vitesse de déplacement à la source, cette dernière étant elle-même liée au seuil au capteur en supposant un modèle de vitesse homogène et une atténuation géométrique (et non une atténuation intrinsèque).

Commentaires sur le seuil de détection

La méthodologie utilisée par la société Magnitude pour l'élaboration des cartes de sensibilité nous semble parfaitement adaptée au contexte du site de Rousse et les calculs de performance du réseau en terme de sensibilité sont déterminés dans les règles de l'art.

L'hypothèse sous-jacente aux calculs d'un milieu homogène n'est pas un handicap. En effet, le modèle de vitesse issu de la sismique 3D présente des variations latérales et verticales mais elles sont extrêmement lisses. Les simulations de Magnitude faites par différences finies dans ce modèle (Pièce jointe 1) ne montrent aucune complexité et confirment que l'approximation du milieu homogène est tout à fait justifiée.

Localisation et incertitudes

La méthodologie de modélisation utilisée par Magnitude pour calculer les incertitudes de localisation d'un événement sismique est explicitée dans la Pièce Jointe 3. Elle se base sur les pointés des ondes P et des ondes S ainsi que sur la polarisation des ondes P, tous mesurés sur le sismogramme associé à un événement. Il s'agit d'une méthode non linéaire de recherche (systématique) sur grille de la densité de probabilité de localisation.

Les incertitudes sur le pointé et sur la mesure de polarisation sont prises en compte dans les calculs de densité de probabilité. L'incertitude résultante de localisation d'un événement sismique dépend essentiellement des incertitudes sur le modèle de vitesse. L'algorithme utilisé par Magnitude suppose qu'une erreur moyenne de X% sur le modèle de vitesse se traduit par une incertitude de X% sur le temps de propagation des ondes et l'incertitude sur le modèle se traduit donc en incertitude sur le pointé.

Le moyen de diminuer l'erreur sur le modèle, initialement fixée à 5%, à 2% est de réaliser un tir de calibration qui permettra d'ajuster le modèle de vitesse. En effet la position vraie de la source étant connue, il faut ajuster le modèle de vitesse de manière à obtenir une localisation du tir à la vraie position.

Le modèle de vitesse V_p utilisé est issu de campagnes de sismique réflexion. Les vitesses S sont calculées pour un rapport V_p/V_s constant.

Il faut noter que la localisation relative des événements devrait permettre un meilleur suivi que celui attendu avec la localisation absolue. En effet, des séismes proches les uns des autres, même s'ils sont mal localisés, devraient être assez proches sur une carte 3D car l'erreur par rapport à l'hypocentre réel devrait suivre le même type d'évolution.

Commentaires sur localisation et incertitudes

Il sera très intéressant d'améliorer le modèle de vitesse V_s si le tir de calibration permet d'enregistrer des ondes S (50% de chance de générer ce type d'ondes). Dans le cas contraire, la calibration en vitesse V_p permettra d'améliorer ultérieurement le modèle V_s grâce aux ondes P et S générées par les séismes naturels.

Dans le cadre d'une perspective R&D, il serait intéressant de réaliser des calibrations au cours du temps afin de mettre à jour, si nécessaire, le modèle de vitesse. En effet des modifications du champ de contraintes ainsi que la présence de gaz peuvent entraîner des modifications des vitesses de propagation des ondes au niveau et à proximité du réservoir. Les vitesses P mais aussi le rapport V_p/V_s sont susceptibles de varier au cours du temps et il serait donc très intéressant d'ajuster le modèle de vitesse.

Il est précisé dans le rapport et dans la Pièce Jointe 1 que les ondes P et S sont facilement identifiables et donc faciles à pointer mais ces résultats correspondent à des modélisations. L'incertitude sur le pointé sera donc sûrement légèrement supérieure dans le cas réel où le bruit peut empêcher de pointer très précisément la première arrivée. Cependant, comme l'incertitude de 2% choisie pour

prendre en compte l'erreur sur le modèle de vitesse nous semble large, les incertitudes de pointé devraient être contenues dans cette erreur.

L'hypothèse d'une incertitude sur le modèle équivalente à une incertitude sur le temps de propagation n'est, à notre avis, vérifiée que pour un modèle de vitesse homogène. En théorie cette hypothèse n'est plus valable pour un milieu présentant des variations latérales et verticales de vitesse, ce qui est peut-être le cas de Rouse. Il est très difficile de trouver une correspondance simple entre une incertitude sur le modèle de vitesse et une incertitude sur les temps d'arrivée pour un milieu hétérogène.

Afin de valider les incertitudes de localisation calculées par Magnitude, nous avons choisi de mettre en oeuvre une approche différente, qui consiste à tester la localisation d'un événement dans plusieurs modèles de vitesse différents pour finalement en déduire une incertitude maximale sur la localisation. Pour ces simulations, nous avons adopté le même réseau que celui présenté dans ce projet. Le modèle de vitesse "vrai" est inspiré du modèle que Magnitude a utilisé pour faire les simulations et les temps d'arrivée obtenus dans ce modèle "vrai" ont servi à tester les localisations obtenues dans l'ensemble des différents modèles.

Après de nombreux essais avec notre approche, nous avons retrouvé à quelques dizaines de mètres près les mêmes incertitudes sur la localisation que Magnitude. Nous concluons que les cartes des incertitudes de localisation calculées par Magnitude sont fiables.

9 Performances du réseau complet ou dégradé

Après avoir analysé tous les documents et les méthodologies mises en place par TEPF et Magnitude, nous allons passer en revue les différentes configurations et vérifier qu'elles remplissent les objectifs de performance définis par TEPF.

Les événements simulés pour calculer les incertitudes de localisation sont:

- Point 1 : Déplacement mécanique dans la couverture
- Point 2 : Effet au voisinage de l'injection
- Point 3 : Réajustement de faille

Pour mémoire, les points 1 et 3 concernent les événements pouvant porter atteinte à l'intégrité du site alors que l'étude des sources de type point 2 constitue un objectif R&D.

L'erreur du modèle de vitesse initial est de 5%, cette erreur correspond aux incertitudes de localisation « **avant inversion** ». Si un tir de calibration est réalisé, et le modèle de vitesse inversé, l'erreur du modèle est réduite à 2%, cette erreur correspond aux incertitudes de localisation « **après inversion** ».

9.1 Performances du réseau complet

INJECTION		Point 1	Point 2	Point 3
Sensibilité (MI)		-1.3	-1.6	-1.4
Incertitude de localisation (\pm)	Avant inversion	± 160 m	± 25 m	± 370 m
	Après inversion	± 50 m	± 25 m	± 110 m

HORS INJECTION		Point 1	Point 2	Point 3
Sensibilité (MI)		-1.7	-1.6	-1.5
Incertitude de localisation (\pm)	Avant inversion	± 160 m	± 25 m	± 370 m
	Après inversion	± 50 m	± 25 m	± 110 m

Sensibilité : Concernant les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site (points 1 et 3), les objectifs définis par TEPF sont atteints en injection et hors injection. Concernant l'objectif R&D, la sensibilité est de -1.6 donc très proche du critère fixé (< -1.5) mais cette sensibilité est largement augmentée hors injection (cf Commentaires).

Incertitude de localisation : Les objectifs de performance définis par TEPF ainsi que les objectifs R&D sont atteints, et ce uniquement après inversion du modèle de vitesse pour le point 3.

Commentaires

Hors injection, les seuils de détection sont grandement diminués si seule l'antenne RSE-1 est considérée (cf tableau 7 p.27 du rapport TEPF). Pour les séismes de type source 2 (resp. 3, 1) de magnitude supérieure à -3 (resp. -2.3, -2.2) et inférieure à -1.6 (resp. -1.5, -1.7), il sera très intéressant de les enregistrer ; particulièrement les séismes liés à l'injection (source 2, objectif R&D) qui pourront être correctement localisés (cf tableau 7 p.27 du rapport TEPF).

En injection, les seuils de détection, pour les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site, sont diminués si seules les antennes de subsurface sont considérées (cf tableau 7 p.27 du rapport TEPF). Pour les séismes de type source 3 (resp. 1) de magnitude supérieure à -1.5 (resp. -1.7) et inférieure à -1.4 (resp. -1.3), il sera intéressant de les localiser. Les incertitudes de localisation permettent d'atteindre les objectifs de performance fixés par TEPF ; en effet, une incertitude de ± 260 m (cf tableau 7 p.27 du rapport TEPF) nous semble acceptable par rapport au ± 250 m fixé dans les objectifs.

Dans le cas où un seul des capteurs sur les quatre de l'antenne RSE-1 fonctionne, les résultats ne sont pas modifiés sauf pour l'incertitude de localisation du point 3. Celle-ci est légèrement supérieure mais elle est toujours inférieure, après inversion du modèle de vitesse, au critère défini par TEPF.

Lors de l'injection, il sera tout de même utile de vérifier que le niveau de bruit de fond des capteurs de subsurface n'est pas affecté par l'injection.

9.2 Performances du réseau dégradé avec 7 antennes de subsurface

		Point 1	Point 2	Point 3
Sensibilité (MI)		-1.7	-1.6	-1.5
Incertitude de localisation (\pm)	Avant inversion	± 290 m	± 620 m	± 670 m
	Après inversion	± 100 m	± 240 m	± 260 m

Sensibilité : Concernant les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site (points 1 et 3), les objectifs définis par TEPF sont atteints.

Incertitude de localisation : Concernant les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site (points 1 et 3), les objectifs définis par TEPF (réseau dégradé) sont atteints uniquement après inversion du modèle de vitesse pour le point 3.

Commentaires

Il est intéressant de noter que l'inversion du modèle de vitesse suite au tir de calibration permet d'atteindre les objectifs initialement fixés par TEPF avant relâchement des critères pour les événements pouvant porter atteinte à l'intégrité du site. En effet, une incertitude de ± 260 m pour le point 3 nous semble acceptable par rapport au ± 250 m fixé initialement.

9.3 Performances du réseau dégradé avec 4 ou 5 antennes de subsurface

5 antennes

		Point 1	Point 2	Point 3
Sensibilité (MI)		-1.7	-1.6	-1.5
Incertitude de localisation (\pm)	Avant inversion	± 310 m	± 740 m	± 760 m
	Après inversion	± 120 m	± 290 m	± 300 m

4 antennes centrées

		Point 1	Point 2	Point 3
Sensibilité (MI)		-1.7	-1.6	-1.5
Incertitude de localisation (\pm)	Avant inversion	± 330 m	± 810 m	± 930 m
	Après inversion	± 130 m	320 m	± 370 m

Sensibilité : Concernant les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site (points 1 et 3), les objectifs définis par TEPF sont atteints.

Incertitude de localisation : Concernant les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site (points 1 et 3), les objectifs définis par TEPF (réseau dégradé) sont atteints uniquement après inversion du modèle de vitesse pour le point 3.

Commentaires

Concernant le cas du « 4 antennes centrées », l'incertitude de localisation pour le point 3 est légèrement supérieure aux critères définis par TEPF. Cette configuration nous apparaît un peu dangereuse pour deux raisons. D'une part, elle est à la limite du critère pour le réseau dégradé, d'autre part, elle exige que les capteurs encore en fonction soient centrés. Il nous semble que dans le cas où des capteurs sont défectueux, la probabilité que le réseau encore en fonction soit centré n'est pas très élevée.

Nous recommandons de préciser spécifiquement les capteurs (nom et position géographique) permettant d'atteindre les objectifs. En effet, certaines combinaisons ne remplissent pas les critères ; en particulier pour le cas de quatre antennes.

9.4 Performances du réseau dégradé avec 3 antennes de subsurface et le puits RSE-1

INJECTION		Point 1	Point 2	Point 3
Sensibilité (MI)		-1.3	-1.6	-1.4
Incertitude de localisation (±)	Avant inversion	± 220 m	± 25 m	± 420 m
	Après inversion	± 50 m	± 25 m	± 130 m

HORS INJECTION		Point 1	Point 2	Point 3
Sensibilité (MI)		-1.7	-1.6	-1.5
Incertitude de localisation (±)	Avant inversion	± 220 m	± 25 m	± 420 m
	Après inversion	± 50 m	± 25 m	± 130 m

Sensibilité : Concernant les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site (points 1 et 3), les objectifs définis par TEPF sont atteints en injection et hors injection. Concernant l'objectif R&D, la sensibilité est de -1.6 donc très proche du critère fixé (<-1.5) mais cette sensibilité est largement diminuée hors injection (cf Commentaires).

Incertitude de localisation : Les objectifs de performance définis par TEPF ainsi que les objectifs R&D sont atteints, et ce uniquement après inversion du modèle de vitesse pour le point 3.

Commentaires

Hors injection, les seuils de détection sont grandement diminués si seule l'antenne RSE-1 est considérée (cf tableau 7 p.27 du rapport TEPF). Pour les séismes de type source 2 (resp. 3, 1) de magnitude supérieure à -3 (resp. -2.3, -2.2) et inférieure à -1.6 (resp. -1.5, -1.7), il sera très intéressant de

les enregistrer ; particulièrement les séismes liés à l'injection (source 2, objectif R&D) qui pourront être correctement localisés (cf tableau 7 p.27 du rapport TEPF).

Il est intéressant de noter que l'inversion du modèle de vitesse suite au tir de calibration permet d'atteindre les objectifs initialement fixés par TEPF avant relâchement des critères pour les événements pouvant porter atteinte à l'intégrité du site. En effet, le fonctionnement des capteurs de puits RSE-1 permet d'améliorer considérablement les incertitudes de localisation.

Nous recommandons de préciser spécifiquement les capteurs (nom et position géographique) permettant d'atteindre les objectifs. En effet, certaines combinaisons de 3 antennes de subsurface pourraient peut-être ne pas remplir les critères.

10 Conclusion finale

Pour l'ensemble des séismes et toutes les configurations de réseau, la diminution de l'incertitude de localisation est remarquable (en moyenne divisée par 3) lorsqu'une inversion du modèle de vitesse est réalisée. De plus, pour atteindre les objectifs de performance fixés par TEPF, une inversion est nécessaire pour remplir le critère de localisation des séismes de type réajustement de faille (source 3) pouvant porter atteinte à l'intégrité du site.

Suite à notre expertise, nous parvenons aux réponses suivantes aux deux questions de la DRIRE :

- Point 1:** Suite à la défaillance des capteurs dans le puits RSE-1, le réseau est alors composé des 7 antennes de subsurface. Cette configuration permet d'atteindre les objectifs de performance fixés par TEPF, qui concernent les séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site. La réalisation de ces objectifs nécessite cependant que l'incertitude sur le modèle de vitesse soit inférieure ou égale à 2%, c'est-à-dire que le modèle de vitesse doit être inversé suite à un tir de calibration.
- Point 2:** En cas de défaillance du réseau, TEPF a assoupli les critères de localisation des séismes pouvant porter atteinte à l'intégrité du site. Les configurations minimales du réseau définies par TEPF permettent de garantir l'atteinte de ces objectifs. La réalisation de ces objectifs nécessite cependant que l'incertitude sur le modèle de vitesse soit inférieure ou égale à 2%, c'est-à-dire que le modèle de vitesse doit être inversé suite à un tir de calibration.

La configuration « 4 antennes centrées », nous apparaît un peu dangereuse pour deux raisons. D'une part, elle est à la limite du critère défini par TEPF pour le réseau dégradé, d'autre part, elle exige que les capteurs encore en fonction soient centrés. Il nous semble que dans le cas où trois capteurs sont défectueux, la probabilité que le réseau encore en fonction soit centré n'est pas très élevée. Nous conseillons donc de préférer la configuration dégradée avec 5 antennes de subsurface à celle avec 4 antennes centrées.

Dans le cas d'une configuration dégradée, nous recommandons de préciser spécifiquement les capteurs (nom et position géographique) permettant d'atteindre les objectifs. En effet, certaines combinaisons ne remplissent pas les critères.

Les objectifs de performance définis par TEPF sont atteints avec les antennes de subsurface. Pour l'objectif R&D qui concerne les séismes liés à l'injection, le remplacement des capteurs de fond de puits (RSE-1) permettra de disposer du réseau complet dont les performances sont remarquables en termes de précision de localisation et de détection des événements de faible magnitude.