



# Expertise du dossier « Code Minier » pour l'autorisation du pilote de stockage géologique de CO<sub>2</sub> à Rousse (64)

Rapport final

**BRGM/ RC-56440-FR**  
Juin 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2008

**O. Bouc, H. Fabriol, C. Kervévan, J. Rey, J. Rohmer**

**Vérificateur :**

Nom : **M. Lansart**

Date : 25/06/08



**Approbateur :**

Nom : **H. Modaressi**

Date : 26/06/08



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** : CO<sub>2</sub>, stockage, pilote, Rousse, sécurité, tierce-expertise

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

**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 CO<sub>2</sub> à Rousse (64). BRGM/RC-56440-FR, 126 p.

## Synthèse

La société TOTAL E&P France développe actuellement un projet pilote de captage et stockage géologique de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), prévoyant l'injection de ce gaz dans un gisement de gaz naturel en fin d'exploitation situé à Rousse (Pyrénées-Atlantiques). Le cadre réglementaire applicable à ce projet exige, en plus de l'autorisation au titre de la législation des installations classées, une autorisation au titre du Code Minier.

Le DRIRE Aquitaine a souhaité obtenir de la part du BRGM un avis sur le dossier Mines de la demande d'autorisation de TOTAL. Cet avis est rendu dans le présent rapport. Il a été rédigé au vu du dossier de demande d'autorisation, ainsi que des documents, communiqués au BRGM par TOTAL, qui ont servi de support à la réalisation de ce dossier. Il porte sur :

- la démonstration de la capacité du site de Rousse à « assurer la rétention du gaz sans fuite significative » et sur le choix de cet emplacement en termes de risques de relâchement du CO<sub>2</sub> à long terme ;
- la pertinence et l'exhaustivité des scénarios de risques pour l'homme et l'environnement retenus par TOTAL ;
- l'évaluation des conséquences d'un séisme ;
- l'adéquation du programme de surveillance mis en œuvre pour « assurer la protection des populations et de l'environnement » ainsi que pour vérifier l'aptitude du site à « assurer la rétention du gaz à long terme ».

Au vu du dossier examiné et des documents annexes fournis par TOTAL, nous considérons :

- que le projet d'injection de CO<sub>2</sub> à Rousse ne présente pas de risques majeurs à court terme du point de vue de la sécurité des personnes et de l'environnement immédiat ;
- que le site choisi présente des caractéristiques favorables à la rétention à long terme du gaz. Toutefois, l'état des connaissances actuelles sur le stockage de CO<sub>2</sub>, au niveau international, ne permet pas de fournir des estimations quantitatives de taux de fuite ou de valider numériquement a priori le respect des objectifs pour l'atténuation du changement climatique.

Les modélisations géochimiques et géomécaniques entreprises ainsi que l'analyse de la vulnérabilité à un séisme permettent en effet d'écarter l'occurrence des scénarios de risque envisagés ; la liste de ces scénarios est conforme à l'état de l'art. Les mesures préventives y sont adaptées, de même, globalement, que le programme de

surveillance, et les mesures d'intervention garantissent la maîtrise des risques pendant la phase opérationnelle.

La demande d'autorisation se place dans un contexte de projet pilote, pour une durée limitée pendant laquelle la réversibilité des opérations pourrait être assurée. Dans ce cadre, nous recommandons que soient apportés au dossier des compléments sur :

- l'étude de l'effet conjoint de la température et de la pression sur l'activation des failles bordières lors de l'injection de CO<sub>2</sub> ;
- la mise en œuvre d'un programme de surveillance des aquifères sus-jacents ;
- la conception d'un programme de protection des populations ou de l'environnement et de surveillance des impacts qu'ils subissent, en cas de fuite avérée ;
- la conduite de calculs géochimiques avec un maillage plus fin autour des zones-clés ;

ainsi que des précisions, notamment à propos :

- des arguments utilisés pour traiter des impacts d'un séisme sur le stockage ;
- des méthodes de surveillance microsismique et des gaz des sols.

Pour le passage ultérieur à une phase de stockage à long terme, le dossier en l'état serait, à nos yeux, incomplet. Nous prescrivons la réalisation d'études complémentaires, dont certaines relèvent du domaine de la recherche, et dont la conduite pourrait accompagner l'exploitation du pilote et les projets de recherches qui y sont associés. Ces suppléments concernent :

- les simulations de réservoir ;
- le plan de fermeture, la surveillance post-fermeture et sa durée ;
- la prise en compte de la vulnérabilité des enjeux et l'évaluation des impacts potentiels d'une fuite sur les populations et l'environnement.

## Sommaire

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introduction</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>2. Evaluation du choix du site de Rouse et de sa capacité à assurer la rétention de gaz sans fuites significatives</b> .....            | <b>13</b> |
| 2.1. CHOIX DU SITE .....   | 13        |
| 2.2. EXAMEN CRITIQUE DES ASPECTS DU TRANSPORT REACTIF DU CO <sub>2</sub> AU SEIN DU RESERVOIR DE STOCKAGE .....                            | 14        |
| 2.2.1. Principaux éléments relevés dans les rapports techniques mis à disposition.....   | 15        |
| 2.2.2. Commentaires et propositions de compléments à apporter aux études réalisées .....   | 16        |
| 2.2.3. Conclusion et recommandations .....   | 20        |
| 2.3. EXAMEN CRITIQUE DES ASPECTS DE DERANGEMENT MECANIQUE DES TERRAINS.....  | 21        |
| 2.3.1. Dérangements mécaniques des terrains de couverture sous l'effet de l'injection de CO <sub>2</sub> plus froid que le réservoir ..... | 21        |
| 2.3.2. Dérangements mécaniques des terrains en surface sous l'effet de l'injection.....  | 23        |
| 2.4. SYNTHESE DU CHAPITRE 2 .....  | 24        |
| <b>3. Évaluation du choix des scénarios retenus par TOTAL</b> .....  | <b>27</b> |
| 3.1. APPROCHE ADOPTEE POUR L'ANALYSE DU DOSSIER .....  | 27        |
| 3.2. SCENARIOS RETENUS.....  | 28        |
| 3.3. EVALUATION DES RISQUES ET MESURES PREVENTIVES.....  | 31        |
| 3.3.1. Evaluation de l'occurrence des scénarios de risque .....  | 31        |
| 3.3.2. Evaluation des conséquences des scénarios de risque .....   | 34        |
| 3.4. SYNTHESE DU CHAPITRE 3 .....  | 36        |
| <b>4. Avis sur les éléments du dossier relatifs à l'évaluation des conséquences d'un séisme</b> .....                                      | <b>39</b> |
| 4.1. RECAPITULATIF DES ARGUMENTS PRESENTES DANS L'ETUDE D'IMPACT ET L'ETUDE DES DANGERS FOURNIES PAR TOTAL.....                            | 39        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2. MOUVEMENTS SISMIQUES DE REFERENCE.....   | 39        |
| 4.3. SISMICITE HISTORIQUE ET INSTRUMENTALE POUR LE SITE DE ROUSSE   | 41        |
| 4.4. MOUVEMENTS SISMIQUES EN PROFONDEUR .....   | 43        |
| 4.5. SYNTHESE DES RISQUES LIES AU RESERVOIR .....   | 44        |
| 4.6. SYNTHESE DU CHAPITRE 4.....  | 44        |
| <b>5. Intérêt et faisabilité technique de la mise en œuvre de vannes intermédiaires</b>   | <b>47</b> |
| <b>6. Avis sur le plan de surveillance pour assurer la protection des populations et de l'environnement, et vérifier la rétention du gaz à long terme .....</b> | <b>49</b> |
| 6.1. INTRODUCTION .....   | 49        |
| 6.2. LE PLAN DE SURVEILLANCE PROPOSÉ .....  | 50        |
| 6.3. L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ DE LA SURVEILLANCE MICROSISMIQUE.....   | 51        |
| 6.4. ANALYSE DES MÉTHODES DE SURVEILLANCE PROPOSÉES AU REGARD DES SCÉNARIOS ÉNUMÉRÉS DANS L'ÉTUDE DE DANGERS.....   | 52        |
| 6.5. SYNTHESE DU CHAPITRE 6.....  | 54        |
| <b>7. Conclusions sur les risques de fuite et les incidences sur la santé et l'environnement présentés par le projet .....</b>                                  | <b>57</b> |
| 7.1. ÉVALUATION DE LA CAPACITE DU SITE A ASSURER LA RETENTION DU GAZ  | 57        |
| 7.2. PERTINENCE ET EXHAUSTIVITE DES SCENARIOS PROPOSES PAR TOTAL.....   | 58        |
| 7.3. IMPACT D'UN SEISME.....  | 59        |
| 7.4. LE PLAN DE SURVEILLANCE .....  | 59        |
| 7.5. CONCLUSION FINALE .....  | 60        |
| <b>8. Bibliographie .....</b>   | <b>63</b> |



## Liste des illustrations

|  |    |
|--|----|
| Illustration 1 : Carte de sismicité instrumentale (catalogue de sismicité LDG-RéNaSS 1980-2008). Le site est représenté par une étoile noire. .... | 42 |
|--|----|

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Evénements de risques génériques identifiés par le BRGM .....   | 28 |
| Tableau 2 : Scénarios de risques identifiés dans l'étude de dangers TOTAL.....  | 29 |
| Tableau 3 : Correspondances entre événements de risque de la liste BRGM et scénarios du dossier de demande d'autorisation de TOTAL.....             | 30 |
| Tableau 4 : Analyse critique des méthodes de surveillance proposées en fonction des scénarios énumérés dans l'étude de dangers .....                | 56 |
| Tableau 5 : Méthodes de surveillance appliquées et compléments au dossier demandés, en fonction des scénarios énumérés dans l'étude de dangers..... | 61 |

## Liste des annexes

|  |     |
|--|-----|
| Annexe 1 Circulaire du MEDAD précisant le cadre réglementaire applicable au pilote de Rousse .....   | 67  |
| Annexe 2 Lettre du DRIRE Aquitaine mandant une tierce expertise du BRGM.....   | 73  |
| Annexe 3 Evaluation de la réactivation des failles bordières par l'effet de la pression seule et par l'effet conjoint de la pression et de la thermique..... | 77  |
| Annexe 4 Evaluation de la surrection liée à l'injection .....  | 87  |
| Annexe 5 Evolution de la réglementation parasismique.....  | 91  |
| Annexe 6 Etude bibliographique sur les accélérations maximales en profondeur .....   | 97  |
| Annexe 7 L'étude de faisabilité de la surveillance microsismique .....   | 103 |
| Annexe 8 Liste des études techniques communiquées par TOTAL.....   | 109 |
| Annexe 9 Résumé non technique .....  | 113 |



# 1. Introduction

La société Total E&P France développe actuellement un projet pilote de captage et stockage géologique de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) autour de ses installations de production d'hydrocarbures situées à Lacq (Pyrénées-Atlantiques). L'objectif de ce pilote est la démonstration d'une chaîne complète de captage, transport, stockage du CO<sub>2</sub>, afin de contribuer à la validation de cette technologie pour la réduction des émissions anthropiques de gaz à effet de serre.

Le projet consiste à :

- convertir une chaudière du site de Lacq en chaudière à oxycombustion permettant le captage du CO<sub>2</sub> ;
- transporter le CO<sub>2</sub> par une canalisation existante, longue de 29 km, vers le site de Rouse (64) ;
- injecter le CO<sub>2</sub>, après compression, par l'intermédiaire d'un puits existant, reconverti à dessein, dans un gisement de gaz naturel en fin d'exploitation, situé à environ 4500 m de profondeur à Rouse.

Ce projet prévoit initialement une durée de 5 ans. Il concerne une quantité de 120 000 t de CO<sub>2</sub>, qui seraient injectées en l'espace de deux ans. Il s'agit là de quantités modérées, correspondant à l'objectif de test de la technologie. Les trois années suivantes seraient dédiées à l'observation et la surveillance du site.

En l'absence d'une législation spécifique à ce type d'opérations, en cours d'élaboration aux niveaux européen et français, une circulaire du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD) en date du 14 février 2008 (cf. annexe 1) a précisé le cadre réglementaire applicable au pilote de Rouse. « Il a été fait le choix d'instruire le projet :

1. au titre de la législation des installations classées, pour ce qui concerne les opérations de captage et de compression du CO<sub>2</sub> ;
2. au titre de la législation minière pour les opérations de transport et de stockage, dans la mesure où la société dispose, du fait de sa concession de gaz, du droit d'utilisation du sol et du sous-sol. »

Plus en détail, la demande d'autorisation au titre du Code Minier doit s'inscrire dans le champ de l'article 3-1, applicable à la recherche de formations géologiques aptes à stocker des « produits chimiques à destination industrielle ». Cette demande doit répondre aux dispositions afférentes aux essais d'injection et de soutirage du décret 2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.

En réponse à ces exigences, la société TOTAL a rédigé un dossier de demande structuré en deux parties, dont l'instruction doit être conduite simultanément, notamment pour la procédure d'enquête publique.

Il est prévu qu'un bilan soit dressé à l'issue des cinq années du projet (2014), impliquant la mise en œuvre de mesures correctives, voire la récupération du gaz injecté, en cas de constat d'écart à l'évolution attendue. Par ailleurs, la concession détenue par TOTAL expire en 2017. Les services de l'Etat pourront alors de nouveau prononcer des mesures dans le cadre de l'abandon de la concession ou, le cas échéant, de son renouvellement.

Par courrier du 2 avril 2008 (annexe 2), le Directeur Régional de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement a demandé à TOTAL de solliciter auprès du BRGM une tierce expertise de son dossier de demande au titre du Code Minier. Le but de cette expertise est de « déterminer que le projet de TOTAL ne présente pas de risque de fuite significatif et qu'aucune incidence notable sur l'environnement ou sur la santé n'est à craindre », ou d'indiquer « les moyens supplémentaires à développer pour atteindre cet objectif de façon préventive ou par le renforcement de la surveillance ».

Le projet pilote de Rousse s'inscrit dans un cadre de recherche et développement ; il constitue le support d'un certain nombre de projets visant à améliorer les connaissances sur le captage et le stockage géologique du CO<sub>2</sub>, en particulier de projets de l'Agence Nationale de la Recherche (GAZ ANNEXES, SENTINELLE). Une collaboration de recherche s'est de ce fait instituée entre TOTAL et le BRGM, qui participent aux projets de l'ANR mentionnés. Afin de garantir l'indépendance des avis émis dans la tierce expertise, celle-ci a été menée au sein du BRGM par une équipe pluridisciplinaire qui n'est pas impliquée dans les projets liés à ce pilote. De même, le dossier de demande d'autorisation de TOTAL se base, entre autres, sur une synthèse hydrogéologique rédigée par l'antenne régionale du BRGM en Aquitaine ; leurs auteurs ne figurent pas parmi les responsables de la tierce expertise, qui sont issus du centre scientifique et technique d'Orléans. Le dossier de TOTAL s'appuie également sur une étude de dangers réalisée par Geogreen, filiale commune à l'IFP, Geostock et au BRGM. Les auteurs de la tierce expertise n'ont pas non plus participé aux travaux réalisés dans le cadre de cette étude de Geogreen.

Les questions posées faisant appel à une évaluation plus large que ce qu'il est possible dans le temps imparti (le BRGM a consacré 30 homme-jours à ce travail), l'expertise porte principalement sur les risques de fuite et non sur leurs impacts potentiels. Le présent rapport a été rédigé au vu de la partie B du dossier de demande d'autorisation déposé par TOTAL auprès de la DRIRE Aquitaine le 30 avril 2008, correspondant aux dispositions au titre du Code Minier et dénommée par la suite « Dossier Mines », ainsi que de diverses études techniques (cf. annexe 8), communiqués au BRGM par TOTAL, qui ont servi de support à la réalisation de ce dossier. Ce « Dossier Mines » inclut la description des installations et des travaux envisagés ; une étude d'impact ; une analyse des incidences sur la ressource en eau ; une étude de dangers et différentes annexes dont le document de sécurité et de santé.

La présente tierce expertise est structurée comme suit, de manière à répondre aux différents points soulevés par le courrier de la DRIRE :

- un avis est d'abord porté sur la démonstration de la capacité du site de Rousse à « assurer la rétention du gaz sans fuite significative » et sur le choix de cet emplacement en termes de risques de relâchement du CO<sub>2</sub> à long terme ;
- dans un second temps, la pertinence et l'exhaustivité des scénarios de risques pour l'homme et l'environnement retenus par TOTAL sont examinées ;
- les éléments relatifs à l'évaluation des conséquences d'un séisme sur le site de stockage font l'objet d'une analyse particulière ;
- l'intérêt et la faisabilité de la mise en œuvre de vannes intermédiaires constituent le point suivant de la demande de la DRIRE ; toutefois, ne relevant pas des compétences du BRGM, le présent rapport ne les traite pas ;
- l'adéquation du programme de surveillance mis en œuvre pour « assurer la protection des population et de l'environnement » ainsi que pour vérifier l'aptitude du site à « assurer la rétention du gaz à long terme » est analysée.
- enfin, une synthèse est dressée au regard de l'objectif général assigné à la tierce expertise du BRGM par le DRIRE.

De plus, un résumé non technique de l'expertise est fourni à l'annexe 9.

Certains des aspects soulevés par la DRIRE relèvent encore du domaine de la recherche. Par ailleurs, nous tentons de garder à l'esprit, au cours de l'expertise, le contexte de la demande d'autorisation, tel que fixé par la circulaire du MEDAD : le dossier constitue une demande d'essais d'injection, au cours desquels la réversibilité doit pouvoir être assurée. Par conséquent, les exigences envers un tel pilote ne correspondent pas à celles d'un projet de stockage à long terme. Nous nous efforçons donc, au sein de chaque chapitre de notre expertise, de faire la distinction entre :

- les compléments à apporter au dossier pour la réalisation du pilote, et les ajouts qui seraient indispensables pour le passage réel à un stockage à long terme, d'une part ;
- les interrogations auxquelles des réponses peuvent être apportées à l'aide des techniques existantes, et les problèmes pour lesquels les connaissances actuelles sont déficientes, où la recherche doit progresser, d'autre part.



## **2. Evaluation du choix du site de Rousse et de sa capacité à assurer la rétention de gaz sans fuites significatives**

Conformément au premier point soulevé par le DRIRE Aquitaine dans sa demande de tierce expertise, ce chapitre se concentre sur la capacité du site à limiter le relâchement du CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère, et donc à remplir efficacement l'objectif de réduction des émissions anthropiques de gaz à effet de serre, en retenant le CO<sub>2</sub> à long terme dans le sous-sol. Ainsi, nous examinons ici le traitement dans le dossier présenté par TOTAL de ce « risque global ».

### **2.1. CHOIX DU SITE**

Le gisement de Rousse, envisagé par TOTAL comme réservoir de stockage du CO<sub>2</sub> dans le cadre de son projet pilote, se situe à environ 4500 m de profondeur à la bordure sud du Bassin Aquitain, sur les premiers contreforts des Pyrénées. Découvert en 1967, il a été mis en production en 1972 et exploité jusqu'à présent.

Ainsi que le souligne le dossier « Mines », cet historique d'exploitation a apporté une excellente connaissance du gisement, en termes :

- de données statiques géologiques et géométriques, issues, entre autres, de mesures géophysiques ou de données de puits ;
- de comportement du réservoir, notamment l'évolution de la pression en réponse à l'exploitation.

Le réservoir de Mano, qui constitue le piège recherché, n'a été perforé que par un seul puits, le puits RSE1, qui sera reconverti pour réaliser l'injection de CO<sub>2</sub>. Le dossier « Mines » s'appuie sur un certain nombre d'arguments pour justifier son étanchéité :

- « l'étanchéité du gisement est prouvée par son existence même, puisque le gaz et l'huile y sont restés piégés depuis des millions d'années » ;
- le confinement est assuré par :
  - o un scellement vertical par une couverture « sur une épaisseur considérable » ;
  - o une fermeture structurale par des failles bordières qui ne remontent pas en surface, ont été scellées et n'ont pas été réactivées ;
- le réservoir est fermé en pression du fait de l'importante déplétion qu'il a subie : d'une valeur initiale de 485 bar environ, il a aujourd'hui atteint une pression

d'une trentaine de bars, et la simulation de l'injection de CO<sub>2</sub> prévoit que la remontée en pression se limitera à environ 70 bar au voisinage du puits. Ceci demeure :

- o inférieur à la pression dans la matrice lointaine du réservoir (170 bar environ) ;
  - o très inférieur aux pressions hydrostatique et géostatique (490 bar environ).
- l'historique de la déplétion a permis de constater l'isolement hydraulique du réservoir.

Certains de ces arguments seront examinés en détail par la suite. Néanmoins, cette première énumération permet de positionner a priori le site par rapport aux éléments de choix de site mentionnés dans Bouc *et al.* (2006), au chapitre 3.

Ainsi, le réservoir présumé répond particulièrement bien aux exigences de connaissance fine de la géologie, de capacité suffisante, d'étanchéité de la couverture et de stabilité de l'environnement géologique. Il se caractérise par une grande profondeur, une bonne correspondance entre réservoir et couverture et l'absence de fractures traversant la couverture. Malgré sa présence dans un secteur géologique plissé, son historique plaide en faveur de son étanchéité. Sa forte sous-pressurisation est un argument fort contre les possibilités de migration du gaz hors du réservoir ; même si de tels mouvements devaient se produire, la profondeur et l'épaisseur de la couverture garantissent des temps de migration très longs associés à une forte atténuation des fuites, avant de parvenir aux aquifères potentiellement exploitables, et plus encore à l'atmosphère.

**Ainsi, sans présumer pour le moment de la qualité du projet, de la composition du dossier de demande d'autorisation et des études qui l'appuient, il apparaît certain que le site choisi présente a priori un certain nombre d'arguments très favorables pour « assurer la rétention du gaz sans fuite significative » à long terme.**

## **2.2. EXAMEN CRITIQUE DES ASPECTS DU TRANSPORT REACTIF DU CO<sub>2</sub> AU SEIN DU RESERVOIR DE STOCKAGE**

Il s'agit ici d'examiner les éléments du dossier relatifs à l'impact éventuel du CO<sub>2</sub> injecté sur les caractéristiques du réservoir (minéralogie, porosité, perméabilité) sous l'effet des interactions chimiques.

Les principaux résultats des études réalisées par TOTAL sur ces aspects sont résumés dans l'étude des dangers (§B7-4.6.5). Les conclusions indiquant que « les simulations géochimiques réalisées ont établi que l'éventuelle perte de porosité associée à ces phénomènes est négligeable » sont reprises dans la présentation générale du projet (§5.2.3) ainsi que dans l'étude d'impact (§B5-3.3.5).



A partir des rapports techniques fournis par TOTAL en complément du document de synthèse que constitue le dossier Mines, nous examinons ici l'argumentation défendue pour parvenir à ces conclusions.

### **2.2.1. Principaux éléments relevés dans les rapports techniques mis à disposition**

Le rapport « modélisation de la réactivité de la matrice minérale du gisement de Rousse suite à l'injection de gaz riche en CO<sub>2</sub> » ([3]) constitue le document technique de référence sur lequel s'appuie TOTAL pour établir ses conclusions sur les aspects interactions eau-roche-CO<sub>2</sub> dans le dossier Mines. Les données utilisées pour les calculs présentés dans ce rapport sont issues, pour l'essentiel, des résultats d'études préliminaires ([1], [2], [10]).

#### **a) Etude préliminaire de 2007**

L'étude [10] réalise la modélisation des équilibres thermodynamiques de la Dolomie de Mano aux conditions initiales (avant mise en production), après déplétion du gisement puis après injection de 150 000 t de CO<sub>2</sub>. L'intérêt majeur de ce travail réside dans la prise en compte d'une minéralogie détaillée de la zone d'injection visée établie à partir de données expérimentales acquises sur des échantillons prélevés *in situ*. Les observations ont permis d'identifier 9 phases minérales : Calcite, Dolomite, Quartz, Apatite, Pyrite, Anatase, Chlorite, Muscovite et Smectite. Après divers ajustements visant à mettre en cohérence minéralogie réelle et contraintes numériques propres au logiciel utilisé pour les calculs (CHESS en l'occurrence), l'auteur met en évidence un potentiel de minéralisation du CO<sub>2</sub> par dissolution de silicates et précipitation de carbonates. Une évaluation en termes de variation de porosité est proposée (diminution de la porosité qui passerait de 3% à 2.9%).

#### **b) Travaux complémentaires (2008)**

Les trois rapports [1], [2], [3] se présentent comme la suite directe des travaux du précédent. Le premier d'entre eux vise à la détermination des constantes cinétiques nécessaires à la modélisation des réactions de précipitation/dissolution de la sidérite et des chlorites ([1]). Le deuxième ([2]) établit les bases d'un modèle maillé destiné aux simulations chimie-transport. Le dernier ([3]) présente les résultats de simulations couplées chimie-transport à l'échelle du réservoir.

Le premier rapport est une synthèse bibliographique qui permet de définir une « valeur acceptable » pour la constante cinétique de précipitation de la sidérite, carbonate de fer pressenti comme ayant un rôle majeur dans la minéralisation du CO<sub>2</sub> injecté, comme montré dans les travaux préliminaires ([10]). Concernant la daphnite, qui est une chlorite riche en fer, les données expérimentales ne permettent pas d'aboutir à des paramètres jugés satisfaisants par l'auteur.

Le second rapport présente les résultats d'une étude visant à définir un modèle maillé de la formation de Mano du champ de Rousse. A partir d'une géométrie simplifiée

comportant 3 zones distinctes et par ajustement des perméabilités, il a été possible de retrouver l'historique des pressions. Les résultats des différentes simulations réalisées ont mis en évidence l'impact de l'équilibre gaz/saumure sur l'évolution des pressions ; par ailleurs, un assèchement de la périphérie du puits a été observé, ce qui laisse augurer de possibles précipitations localisées de minéraux.

Le dernier rapport vise à établir l'impact, à l'échelle du réservoir, de l'injection de CO<sub>2</sub> sur la minéralogie et la porosité de la zone d'injection. Pour ce faire, des modélisations couplées chimie-transport sont réalisées à l'aide du logiciel GEM-GHG (Nghiem *et al.*, 2004). Les paramètres numériques utilisés pour ces simulations ne correspondent pas exactement aux valeurs finalement retenues pour l'exploitation du pilote. En particulier, le débit d'injection simulé est plus élevé, aboutissant à un volume total de CO<sub>2</sub> stocké de 150 000 t, soit 25% de plus qu'anticipé réellement. Les conclusions doivent par conséquent être retenues sur le plan des tendances, plutôt que strictement sur les valeurs. Les calculs réalisés montrent qu'après 8000 ans, jusqu'à 85% du CO<sub>2</sub> injecté pourrait être minéralisé sous forme de sidérite. Cette minéralisation s'accompagnerait localement d'une diminution maximale de porosité à 2.95% (pour une valeur initiale de 3%). La pression finale en fin de période d'injection (*i.e.* au bout de 2 années), moyennant les réserves exprimées ci-dessus, serait alors de 112 bar.

### **2.2.2. Commentaires et propositions de compléments à apporter aux études réalisées**

Cette série de rapports émane d'une démarche de modélisation cohérente : on part de l'étude minéralogique « batch » (même si une approche cinétique aurait été intéressante) pour définir le système initial (avant injection de CO<sub>2</sub>) puis évaluer les réactions chimiques induites par la présence massive de CO<sub>2</sub>, on étudie les paramètres cinétiques de certaines réactions importantes, on définit un modèle maillé du réservoir puis on étudie le couplage entre les différents processus à l'aide d'un modèle chimie-transport. Signalons par ailleurs que les données de terrain disponibles sont ici nombreuses et de qualité.

Compte tenu du fait que les modélisations sont réalisées à l'équilibre thermodynamique et en système fermé, les calculs de variation de porosité présentés en fin du rapport préliminaire ne sont pas extrapolables à l'échelle du réservoir : d'une part, les chemins réactionnels peuvent différer fortement en ne considérant pas les aspects cinétiques et, d'autre part, la non prise en compte des flux de CO<sub>2</sub> limite potentiellement la réactivité. Toutefois, ces limitations sont bien intégrées par l'auteur qui revient en conclusion sur le fait que l'étude ne prend pas en compte notamment « les effets cinétiques et les mouvements en phase gazeuse et aqueuse ». Il présente ainsi ce travail comme une étape préliminaire avant la mise en œuvre de simulations maillées qui permettront de modéliser « la compétition entre les réactions pour l'accès au CO<sub>2</sub> en particulier, les temps caractéristiques des réactions et la spatialisation des effets ».

Le rapport [1] est typique des difficultés couramment rencontrées dans les travaux de modélisation géochimique sur des systèmes naturels lorsqu'il faut faire face à l'absence de données. S'agissant de cinétiques réactionnelles, le modélisateur est très

souvent confronté à ce genre de problème et doit faire des choix entre simuler une cinétique « fausse », faute de données fiables, mais dont on sait qu'elle existe et considérer un équilibre « instantané » dont on sait par contre qu'il ne représente pas la réalité. Malgré tout, l'expérience prouve que la « moins mauvaise » démarche consiste généralement à considérer la première solution incluant la cinétique, quitte à fixer arbitrairement certains paramètres non disponibles ; c'est ce qui a été fait ici ([3]).

Concernant la définition de la géométrie du réservoir telle qu'elle a été définie pour les simulations dans le rapport [2], le pendage du réservoir n'a pas été pris en compte ou même discuté. Toutefois, les calculs réalisés par la suite supposent que l'écoulement concerne la seule phase gaz (la phase aqueuse étant immobile) ; les effets densitaires majeurs rencontrés par exemple dans un aquifère (« bulle » de gaz occupant les hauts topographiques) ne jouent donc pas ici, même si un contraste de densité entre le CO<sub>2</sub> injecté et le gaz initialement en place existe. Pour le reste, les calages semblent cohérents avec les simulations réalisées précédemment avec MBAL. Cependant les choix qui ont été faits pour la discrétisation spatiale du réservoir ne sont pas décrits en détail.

Le rapport [3] intègre les résultats des deux premiers ainsi que ceux de l'étude préliminaire. D'une manière générale, la question de la présence d'eau (eau résiduelle liée à la matrice ou eau « libre ») est un point à éclaircir car, bien que le réservoir soit situé intégralement au-dessus du plan d'eau ([7]), la question de la teneur en eau effective à considérer ne semble pas clairement établie ([9]) compte tenu notamment de l'absence de mesures. S'agit-il d'une eau à saturation résiduelle (et donc immobile) comme supposé dans les simulations ou bien, au contraire, y a-t-il une probabilité non nulle que cette eau puisse être déplacée sous l'effet de l'injection ? Cette incertitude sur la saturation en eau conditionne en partie la cohérence des simulations réalisées : dans l'hypothèse, ici considérée, où l'eau est à saturation résiduelle, on peut par exemple admettre la légitimité de la non prise en compte du processus de transport par diffusion au sein de la phase aqueuse (en admettant qu'existe alors une certaine discontinuité hydraulique). A l'inverse, s'il s'avère que la saturation dépasse la saturation résiduelle, il serait alors nécessaire de refaire des simulations prenant en compte le déplacement de la phase aqueuse sous l'effet de l'injection du CO<sub>2</sub> et les phénomènes de transfert de masse associés (advection, dispersion et éventuellement diffusion dès que la vitesse devient localement peu élevée ou nulle). Il serait alors également important de tenir compte des pressions capillaires jusqu'ici négligées. Les conséquences d'un déplacement d'eau en termes de spatialisation des phénomènes et d'impact chimique sont par contre difficiles à évaluer a priori. On ne sait donc pas si le fait d'être dans un cas ou dans l'autre tend à maximiser ou minimiser les effets sur les variations de porosité. Par conséquent, si rien dans les données dont dispose TOTAL ne permet d'envisager la mobilité potentielle de la phase aqueuse, il n'y a pas lieu de refaire de calculs. Par contre, dans le cas contraire et dans la mesure où l'on ne sait pas a priori le sens des variations induites par le déplacement d'une partie de la phase aqueuse, il nous semblerait souhaitable de refaire des simulations. En tout état de cause, ce point doit être argumenté plus en détail.

Les résultats obtenus par ces modélisations montrent tout l'intérêt de ce type de simulation couplée car ils permettent notamment de visualiser la spatialisation des

phénomènes : on voit ainsi que la zone « proche puits » et la zone dite « fissure » sont le siège des réactions les plus significatives. Les calculs montrent, dès la fin de l'injection, le démarrage du phénomène de minéralisation d'une fraction du CO<sub>2</sub> injecté par précipitation de sidérite, principalement dans la zone « fissure » alors que la zone autour du puits d'injection subit un assèchement induisant la précipitation de halite. Néanmoins, l'impact sur la porosité reste faible (2.95% en moyenne dans la zone la plus impactée au lieu de 3% avant injection), même plusieurs milliers d'années après l'injection lorsque la proportion de CO<sub>2</sub> minéralisé est alors nettement plus importante

Cependant, la taille des mailles dans ces zones d'intérêt reste de notre point de vue relativement grande (100 m de côté environ). L'effet bien connu inhérent à un maillage insuffisamment raffiné est la dispersion numérique : le signal tend ainsi à être moyenné c'est-à-dire que son amplitude est diminuée alors que son étalement dans l'espace est augmenté. Il nous semblerait donc particulièrement intéressant de refaire une simulation similaire en discrétisant cette fois plus finement la zone d'intérêt (« proche puits » et « fissure »). Il s'agirait ainsi de vérifier, notamment, que l'amplitude nécessairement plus forte des minéralisations qui en résulterait ne risque pas d'induire un impact plus important sur la porosité (au risque, éventuellement, d'aller jusqu'à un colmatage localisé de l'espace poral susceptible d'impacter alors significativement l'injectivité et les contraintes mécaniques subies par le réservoir). Si c'était le cas, des études complémentaires seraient nécessaires pour étudier l'impact en termes d'injectivité et de contraintes mécaniques. Des travaux récents de modélisation de l'injection de CO<sub>2</sub> dans un réservoir carbonaté (André *et al.*, 2007) ont ainsi pu montrer, grâce à un maillage raffiné dans les premiers mètres autour du point d'injection, l'impact sur les minéralisations de l'assèchement aux abords du puits et la diminution significative de l'espace poral qui en résultait. A ce propos enfin, il nous semblerait également intéressant de disposer de données relatives à la précipitation de halite sous l'effet de l'assèchement partiel de la zone « proche-puits » : ce phénomène est en effet cité et apparemment pris en compte dans le modèle mais il n'y a pas de donnée quantitative disponible dans le rapport.

Concernant l'aspect « minéralisations », il est un point qu'il nous semblerait opportun de mieux expliciter formellement. En effet, les simulations montrent qu'à échéance de plusieurs dizaines d'années, un phénomène de minéralisation massive du CO<sub>2</sub> sous forme de sidérite est attendu. En termes de sécurité du stockage et sous réserve que les calculs avec un maillage raffiné n'aient pas montré de problèmes localisés de colmatage de l'espace poral, ce phénomène va dans le sens de la sécurité du stockage, le CO<sub>2</sub> ainsi piégé ne pouvant plus fuir. Or, dans le descriptif des travaux de remise en état (§B4), des estimations des quantités et des durées nécessaires à l'extraction d'une partie du CO<sub>2</sub> injecté (mise en œuvre de l'option de réversibilité du système) sont données (cf. tableau non numéroté du §B4). De fait, l'option de réversibilité n'a évidemment de sens que dans la mesure où le CO<sub>2</sub> est toujours accessible et majoritairement sous forme gazeuse. Afin de clarifier cette option de réversibilité, il nous semblerait donc utile de comparer explicitement les échelles de temps de la mise en œuvre de cette option (2 à 4 ans suivant la fin de l'injection) et les temps de dissolution et de minéralisation du CO<sub>2</sub> injecté de manière à renforcer l'argumentaire sur la plausibilité de ce scénario. La figure B7-3 tend à prouver que la proportion de CO<sub>2</sub> minéralisé est négligeable dans les premières années suivant

l'injection. Toutefois, cette figure est un bilan massique à l'échelle du réservoir qu'il nous semblerait utile de compléter avec une figure de même nature sur le bilan massique du CO<sub>2</sub> (minéralisé, dissous, gazeux) restreint à la proximité immédiate du puits (mailles entourant le puits par exemple), afin de s'assurer de l'accessibilité du CO<sub>2</sub> (là encore, l'intérêt des calculs raffinés est évident pour mieux préciser cet aspect).

Les scénarios qui ont été étudiés ici s'intéressent tous au stockage proprement dit, supposant de fait que l'étanchéité du réservoir n'est pas à remettre en cause. L'atteinte à l'intégrité de la couverture par perçage capillaire n'a pas lieu d'être étudiée pour ce site : les conditions de pression rendent physiquement impossible la pénétration de la couverture par la phase gazeuse. En revanche, la diffusion d'eau acide au sein de la couverture est à considérer, pour un stockage à long terme. Elle suppose que l'eau acide puisse physiquement atteindre la couverture ce qui ne semble pas clairement établi au vu des documents à notre disposition. L'hypothèse d'une eau à saturation résiduelle « liée » à la matrice poreuse rend en effet moins probable un tel scénario. Toutefois, dans le cadre d'une approche conservatrice, il nous semble souhaitable d'étudier ce scénario. Ces calculs viseraient à quantifier les interactions chimiques potentielles (précipitations et dissolutions) provoquées par l'eau acide à proximité (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) de l'interface réservoir/couverture et les conséquences mécaniques éventuelles (à préciser par des travaux complémentaires le cas échéant) dans le cas où une ouverture ou une fermeture significative de la porosité seraient observées. Ces calculs sont d'une mise en œuvre beaucoup plus aisée que les calculs « réservoir » s'agissant ici de simuler un transfert réactif par diffusion pure au sein d'un milieu poreux saturé (une modélisation 1D semble adaptée) ; la minéralogie de la couverture ainsi que ses caractéristiques intrinsèques (porosité, coefficient de diffusion) devront toutefois être déterminées préalablement. Il est à noter que ces phénomènes concernent le long terme (plusieurs milliers d'années) dans l'hypothèse où le CO<sub>2</sub> injecté séjournerait définitivement dans le réservoir. Concernant les impacts sur les aquifères sus-jacents, une remontée d'eau acide jusqu'à des niveaux supérieurs sensibles n'est pas à craindre, compte tenu de l'épaisseur de la couverture.

Nous suggérons enfin, pendant la durée d'exploitation du pilote, de réaliser une veille technologique sur le phénomène de réactivité du CO<sub>2</sub> anhydre vis-à-vis des phases minérales et ce, d'autant plus que la présence d'une phase aqueuse effectivement accessible au gaz ne serait pas clairement établie. Ces aspects n'ont toutefois été mis en évidence que très récemment et sont encore très mal connus. On peut citer par exemple l'étude expérimentale de Regnault *et al.* (2005) qui a en particulier mis en évidence des phénomènes de carbonatation en présence d'anorthite et de portlandite par le CO<sub>2</sub> supercritique initialement anhydre : Regnault *et al.* concluent en de possibles problèmes d'altération de l'étanchéité à proximité des têtes de puits et au toit du réservoir. En l'état actuel des connaissances, il n'est cependant pas envisageable de quantifier ces phénomènes et donc a fortiori de les intégrer dans des modèles. Il s'agirait donc plus, à ce stade, de simplement suivre l'avancée des connaissances afin d'anticiper au mieux des éventuels effets sur la couverture ou au niveau du puits. Ceci ne remet pas en cause les mesures de monitoring et de remédiation prévues par ailleurs en cas de défauts d'étanchéité avérés, quelle qu'en soit la cause.

### 2.2.3. Conclusion et recommandations

Au vu de l'ensemble des documents fournis par TOTAL, nous considérons que l'argumentation visant à démontrer le faible impact géochimique de l'injection de CO<sub>2</sub> relève d'une démarche générale tout à fait cohérente et est donc recevable en l'état. Les outils logiciels utilisés sont au standard actuel et n'ont pas à être remis en cause particulièrement ; il n'existe pas aujourd'hui de logiciel meilleur que les autres : chaque code de calcul possède en effet des points forts et des défauts (non prise en compte de certains processus notamment) qui lui sont propres et qu'il faut intégrer dans les hypothèses et l'interprétation des scénarios simulés. Les données disponibles (historiques de pression, analyses de gaz, échantillons, etc.), même si elles sont incomplètes (données sur l'eau de Rouse par exemple), sont propices à la définition de modèles aussi « réalistes » que les logiciels utilisés le permettent.

Par ailleurs, au vu de la composition du gaz naturel initialement présent dans le gisement, une étude de l'influence des éléments traces présents dans le flux de CO<sub>2</sub> (CO, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar) n'apparaît pas nécessaire.

Toutefois, comme le souligne TOTAL en « nota » à la fin du §B7-4.6.5 de l'étude de dangers, compte tenu du fait que les éléments quantitatifs obtenus résultent de simulations, « les résultats doivent donc être interprétés comme des ordres de grandeurs ». Aussi, il nous paraît important de procéder à certaines vérifications à partir des données disponibles et de réaliser quelques calculs complémentaires visant essentiellement à mieux préciser certaines tendances et ordres de grandeurs obtenus par les simulations, avec le souci d'une démarche conservatrice qui doit a priori prévaloir dans une étude de dangers.

Afin de donner plus de poids aux conclusions du dossier qui a été remis à la DRIRE, nous proposons de **réaliser des calculs complémentaires avec le modèle couplé chimie-transport** (en conservant les hypothèses et les données actuelles) **en raffinant le maillage dans la zone estimée comme étant la plus impactée par l'injection de CO<sub>2</sub>** (proche puits et zone dénommée « fissure »). Il s'agira ainsi de réduire les effets de dispersion numérique qui peuvent potentiellement résulter en une minimisation des variations locales de porosité dues aux réactions minérales. Par ailleurs, dans une démarche visant à maximiser les effets possibles sur le long terme (plusieurs milliers d'années) et même s'il n'est pas établi que la phase aqueuse atteindra le toit du réservoir, nous recommandons de réaliser des simulations de diffusion d'eau acidifiée au sein de la roche couverture afin d'estimer l'impact potentiel sur la minéralogie et la porosité.

Sur un second plan, il serait utile de disposer de plus de précisions quant à l'état de saturation en eau dans le réservoir Mano (eau libre/liée, mobile/immobile) dans la mesure où cet aspect conditionne directement les hypothèses de calcul. S'il s'avérait que la présence d'une phase aqueuse potentiellement mobile soit finalement envisageable, de nouvelles simulations couplées diphasiques réactives devraient alors être réalisées.

Enfin, sur la forme, le dossier devrait mentionner de manière plus explicite la différence d'échelle temporelle entre la durée d'exploitation du site pilote (5 ans) et le temps de mise en place d'une minéralisation massive du CO<sub>2</sub> injecté (plusieurs dizaines d'années) de façon à mieux mettre en perspective la faisabilité de l'option de réversibilité du stockage (extraction du CO<sub>2</sub> initialement injecté).

## **2.3. EXAMEN CRITIQUE DES ASPECTS DE DERANGEMENT MECANIQUE DES TERRAINS**

### **2.3.1. Dérangements mécaniques des terrains de couverture sous l'effet de l'injection de CO<sub>2</sub> plus froid que le réservoir**

L'objectif est ici d'analyser la démonstration que l'injection ne remettra pas en cause l'intégrité mécanique de la couverture du réservoir, la rupture de la couverture pouvant créer des chemins préférentiels de fuite du CO<sub>2</sub>.

#### ***a) Risque de fracturation en traction de la couverture***

Le dossier de demande d'autorisation d'exploiter (§B7-4.6.6) met en évidence deux points :

- « L'injection du gaz carbonique pendant deux ans va entraîner une remontée de pression qui restera toutefois largement inférieure à la pression initiale du réservoir (485 bars) ».
- Par ailleurs, d'après l'étude technique sur laquelle s'est basée Total pour l'étude de dangers ([7]), la pression restera inférieure à la contrainte géostatique. Cette dernière est en effet estimée à plus de 490 bar, en tenant compte d'une densité conservative des terrains sus-jacents de 1,1.

Ces deux premiers arguments soulignent que le régime de contrainte restera dans le régime compressif *i.e.* que l'on se place en dessous du critère de fracturation en traction de la couverture. De plus, les observations fournies par Total (*i.e.* tests à la pression de boue) confirment cette prédiction.

Par ailleurs, l'effet de l'injection d'un fluide plus froid que le massif est également étudié sur l'intégrité de la couverture dans un mémo fourni par Total ([4]). Ce dernier met en évidence que **le risque de fracturation en traction de la couverture résultant du gradient de température restera négligeable.**

#### ***b) Risque de réactivation de fractures / failles préexistantes***

Rappelons qu'un tel aspect constitue l'élément clef de plusieurs analyses récentes de risques géomécaniques liés à l'injection de CO<sub>2</sub> (e.g. Streit et Hillis, 2004 ; Vidal-Gilbert *et al.*, 2006, Rutqvist *et al.*, 2007). Deux sources de dérangement des failles existent, à savoir l'effet de la mise en pression du réservoir et l'effet thermique résultant de la différence de température entre le CO<sub>2</sub> injecté et la température du réservoir. Nous

évaluons tour à tour l'effet de la pression seule, et l'effet conjoint des deux sources de dérangement.

- **Risque de réactivation des failles résultant de l'effet de la pression seule**

L'étude géomécanique [5] dont il est fait mention dans le dossier de demande d'autorisation d'exploiter (§B7-4.6.2) démontre que « la forte déplétion du gisement due à la production de gaz n'a a priori pas produit d'activation des failles ». Cet aspect est confirmé par l'examen de la sismicité enregistrée dans la région, qui ne montre « aucune sismicité induite par la production du champ de Rousse (Mano ou Meillon) ». Ces premiers arguments permettent de s'assurer qu'au début de la phase d'injection de CO<sub>2</sub> (*i.e.* la fin de la déplétion), les failles bordières peuvent être considérées comme des joints étanches.

De plus cette étude géomécanique met en évidence que « la surcharge de contrainte induite par la déplétion du réservoir n'ayant pas entraîné de glissement avéré, aucun mouvement n'est attendu pendant la phase d'injection aussi longtemps que la pression du réservoir restera inférieure à sa pression initiale avant déplétion ».

Bien que ces arguments permettent de présumer que le risque de réactivation de faille par la mise en pression restera très faible, il convient, pour l'autorisation du pilote d'injection, de compléter l'appréciation qualitative par une évaluation quantitative sommaire de l'effet de la pression sur les failles bordières.

En annexe 3, nous fournissons une approche préliminaire d'évaluation de l'effet de la pression seule sur les failles bordières. Nous choisissons une évaluation consciemment « conservative », car l'objectif recherché n'est pas une analyse précise de risque, mais des ordres de grandeur afin de mettre en avant la nécessité d'analyses complémentaires.

Nous nous basons sur un critère de réactivation, dont le seuil est fixé à 0.6. Le calcul démontre que le régime des contraintes évalué au niveau des failles reste inférieur au seuil avec une marge de près de 15 %. **L'effet de la pression seule sur les failles bordières est donc jugé négligeable.**

- **Risque de réactivation résultant de l'effet conjoint de la mise en pression et de l'effet thermique**

Dans les documents fournis, il n'est pas porté à notre connaissance d'études spécifiques démontrant la stabilité des failles préexistantes lors de la phase d'injection de CO<sub>2</sub> à une température inférieure à celle du réservoir (augmentation de la pression et différence de température négative). Des contacts ayant été pris par nos soins à ce propos, TOTAL justifie cette absence par la raison suivante : « les failles bordières sont situées à grande distance du puits, de l'ordre du kilomètre. Les variations de température y seraient de ce fait négligeables et ne justifieraient pas une étude thermoélastique ».



Cependant en l'absence d'évaluation de l'extension de la perturbation en température résultant de l'injection du CO<sub>2</sub>, **pour l'autorisation du pilote, une évaluation de l'effet conjoint de la pression et de la température sur les failles bordières nous apparaît nécessaire**. Nous justifions ce point en se basant sur une approche conservatrice à l'image de celle réalisée pour l'évaluation de l'effet de la pression seule (annexe 3).

Le calcul d'ordre de grandeur dans une approche préliminaire montre que lors de l'injection de CO<sub>2</sub> plus froid que le réservoir, les failles bordières pourraient être réactivées. Ce risque est jugé cependant faible, car le calcul montre un dépassement du critère d'à peine 1 %, mais non négligeable.

Qu'elle soit analytique, semi-analytique ou numérique, il est de notre avis qu'une analyse de stabilité des failles / fractures préexistantes **lors de la phase d'injection de CO<sub>2</sub> à une température inférieure à celle du réservoir** devrait être complétée par TOTAL à l'instar de celle réalisée pour évaluer l'étude de stabilité des failles bordières lors de la déplétion.

### **2.3.2. Dérangements mécaniques des terrains en surface sous l'effet de l'injection**

L'objectif est ici d'analyser la démonstration que l'injection n'implique pas de mouvement de terrain (surrection lors d'une injection d'un fluide) en surface, qui risquerait de remettre en cause l'intégrité des installations en surface.

Deux arguments sont mis en avant dans le dossier de Total.

- « L'injection du gaz carbonique pendant deux ans va entraîner une remontée de pression qui restera toutefois largement inférieure à la pression initiale du réservoir (485 bars) ».
- « Les matériaux de couverture (argiles et marnes) ont un comportement mécanique ductile et les déformations entraînées par l'abaissement de pression sont très vraisemblablement restées dans des limites réversibles car aucun mouvement n'a été enregistré au cours de la déplétion ».

Nous fournissons en annexe 4 un calcul préliminaire d'ordre de grandeur, en se basant sur une approche quantitative choisie consciemment « conservatrice ». Il apparaît que les mouvements au niveau du réservoir atteignent environ 4 mm, ce qui correspond à une répercussion en surface négligeable, inférieure au millimètre.

Ces arguments permettent donc d'écarter le risque de surrection trop importante résultant de l'injection. Sur la forme, la fourniture explicite d'un tel ordre de grandeur de la surrection attendue lors de la mise en pression améliorerait le dossier de demande d'exploitation du pilote d'injection.

## 2.4. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 2

**Le site choisi par TOTAL nous paraît présenter des caractéristiques très favorables pour « assurer la rétention du gaz sans fuite significative » à long terme, liées :**

- à la configuration du réservoir (structure, profondeur) ;
- à la connaissance approfondie dont son exploitant en dispose ;
- à son historique d'exploitation ;
- à sa fermeture en pression ;
- aux enseignements des études de transport réactif et de géomécanique.

Les calculs de transport réactifs menés par TOTAL montrent que l'injection de CO<sub>2</sub> n'altérera pas significativement le milieu. Afin d'appuyer davantage cette conclusion, nous proposons d'**apporter des précisions par la réalisation de calculs utilisant un maillage plus raffiné dans la zone la plus impactée par l'injection.**

**Pour un stockage à long terme, nous conseillons également de simuler la diffusion d'eau acidifiée à travers la couverture.**

Il nous semble par ailleurs souhaitable de mieux mettre en perspective, dans le dossier, la possibilité de réversibilité par rapport aux échelles de temps de minéralisation du CO<sub>2</sub>.

Concernant les dérangements en surface résultant de la mise en pression du réservoir, les arguments techniques avancés par Total, complétés par notre évaluation d'ordre de grandeur, montrent que **l'amplitude de surrection sera négligeable**. Par ailleurs, les éléments techniques apportés par Total permettent **d'écarter le risque de fracturation en traction résultant de la mise en pression et de la différence de température entre le CO<sub>2</sub> injecté et la roche**. De même, les arguments techniques de Total, confortés par notre évaluation d'ordre de grandeur, permettent de juger que **le risque de réactivation de faille par l'effet de la pression seule restera très faible**.

En revanche, l'effet conjoint de la mise en pression du réservoir et la différence de température entre le CO<sub>2</sub> injecté et la roche sur la réactivation des failles bordières n'est pas étudié. **Pour l'autorisation du pilote d'injection, une évaluation des effets conjoints de la pression et de la température sur les failles bordières nous apparaît nécessaire, en l'absence d'évaluation de l'extension de la perturbation en température résultant de l'injection du CO<sub>2</sub>**. Un calcul préliminaire d'ordre de grandeur sur la base d'hypothèses conservatives, nous indique que ce risque restera faible, mais non négligeable. Une étude complémentaire (étude opérationnelle, à court terme) est à envisager à l'instar de celle réalisée pour évaluer l'impact de la déplétion.

**Dans l'état actuel des connaissances au sujet du stockage géologique de CO<sub>2</sub>, il ne nous paraît pas faisable de donner une estimation quantitative d'un débit de fuite à long terme.** La validation de l'efficacité du projet pour atténuer les effets des émissions anthropiques de gaz à effet de serre ne peut rester que qualitative : le site a été retenu de sorte que les fuites semblent très improbables ; il n'est pas possible de proposer une démonstration numérique.



### 3. Évaluation du choix des scénarios retenus par TOTAL

Le courrier de la DRIRE Aquitaine demandant à TOTAL de solliciter une tierce-expertise de son dossier par le BRGM mentionne en deuxième point le souhait que « le BRGM se prononce sur le choix des scénarios – pertinence et exhaustivité – retenus par TOTAL dans son dossier, et sur les mesures de prévention lorsqu'elles existent ». Le point de vue est ici avant tout celui du « risque local », c'est-à-dire les risques dans le voisinage du site pour l'homme et l'environnement qui pourraient résulter des opérations de stockage. L'expertise du BRGM se restreint aux risques liés à la partie sous-sol (réservoir et puits), les installations de surface pour le transport et l'injection ne faisant pas l'objet des requêtes de la DRIRE.

L'objet du présent chapitre est de répondre à cette attente. Pour ce faire, nous analysons d'abord quels sont les scénarios traités, puis commentons la façon dont ils le sont.

#### 3.1. APPROCHE ADOPTÉE POUR L'ANALYSE DU DOSSIER

La lettre de la DRIRE Aquitaine mandant la tierce expertise fait référence aux méthodes d'identification de scénarios présentées dans Bouc *et al.* (2006). Plusieurs approches sont mentionnées dans ce rapport, notamment les démarches dites FEPs (Features, Events, Processes), qui y font l'objet d'une discussion critique.

Depuis la parution de l'étude en question, la poursuite des travaux de recherche du BRGM est parvenue à la conclusion suivante : pour vérifier la sécurité d'un projet de stockage de CO<sub>2</sub>, la démarche optimale consiste probablement à contrôler que l'analyse de risques présentée par l'opérateur traite un certain nombre d'événements de risques majeurs. Au besoin, cet examen peut être complété par un audit à l'aide des bases de FEPs, au regard des caractéristiques spécifiques du site, afin de vérifier l'exhaustivité des scénarios retenus.

Compte tenu du délai disponible pour la réalisation de la présente expertise, il n'est pas possible de conduire un tel audit par les FEPs. Nous nous concentrons par conséquent sur la comparaison des scénarios mis en avant par TOTAL avec la liste générique des événements de risques établie au cours des travaux de recherche du BRGM. Le tableau 1 présente cette liste. Il convient toutefois de noter que celle-ci a été élaborée avant tout dans l'optique du stockage de CO<sub>2</sub> en aquifère. Bien qu'elle s'adapte également à l'option du stockage en gisement déplété, qui concerne le cas du pilote de Rousse, elle n'a pas été conçue spécialement dans ce cadre. En particulier, le scénario IV « Dépassement de l'extension latérale prévue » s'applique moins au cas d'un gisement, qui présente une structure fermée, que d'un aquifère, où la migration du CO<sub>2</sub> n'est pas bornée structurellement.

Tableau 1 : Evénements de risques génériques identifiés par le BRGM

|  |      |   |
|--|------|---|
| Evénements liés à la conception de la conduite des opérations                                    | I    | Fuite par puits en exploitation   |
|  | II   | Surpressurisation locale au niveau du puits d'injection   |
| Evénements liés au dimensionnement des opérations par rapport à la réponse du système géologique | III  | Surpressurisation du réservoir à l'échelle régionale  |
|  | IV   | Dépassement de l'extension latérale prévue  |
| Evénements liés à la caractérisation du site   | V    | Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture   |
|  | VI   | Fuite par des failles existantes  |
|  | VII  | Fuite par puits abandonné   |
| Evénements liés à la possibilité d'occurrence d'effets secondaires                               | VIII | Formation d'un stockage secondaire plus proche de la surface suite à une migration verticale non attendue |
|  | IX   | Modification des écoulements verticaux (drainance) suite aux changements des champs de pression           |
| Evénements liés à la vulnérabilité du complexe de stockage à des agressions externes             | X    | Forage ultérieur  |
|  | XI   | Fracturation induite par un séisme naturel  |

De manière générique toujours, le BRGM recommande d'évaluer, comme conséquence possible des événements de risque rassemblés dans ce tableau, les impacts potentiels d'une fuite de CO<sub>2</sub>, en surface et sur les aquifères. Cette évaluation devrait également prendre en considération les possibles impuretés transportées avec le CO<sub>2</sub> ou mobilisées par ses effets.

### 3.2. SCENARIOS RETENUS

Les risques sont étudiés dans la partie « Etude des dangers » du dossier Mines (chapitre B.7). Les risques liés au sous-sol font l'objet de la partie B.7.4. « Dangers liés au puits et au réservoir ». Une étape préliminaire d'identification des dangers a conduit à l'identification de 11 scénarios de risque, rapportés au tableau 2. Une comparaison de ces scénarios à la liste générique proposée par le BRGM est présentée dans le tableau 3.

Tableau 2 : Scénarios de risques identifiés dans l'étude de dangers TOTAL

|    |   |
|----|---|
| 1  | Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture                                     |
| 2  | Fuite par des failles existantes  |
| 3  | Fuite de gaz latérale   |
| 4  | Fuite du puits au niveau des aquifères supérieurs sus-jacents                         |
| 5  | Fuite le long du puits vers la surface  |
| 6  | Dérangements mécaniques du réservoir dus aux réactions géochimiques dans le réservoir |
| 7  | Dérangements mécaniques des terrains dus à l'injection                                |
| 8  | Dérangement mécanique des terrains sous l'effet des séismes                           |
| 9  | Effet d'un séisme sur le puits  |
| 10 | Forage ultérieur d'un puits perforant   |
| 11 | Puits éruptif   |

Tableau 3 : Correspondances entre événements de risque de la liste BRGM et scénarios du dossier de demande d'autorisation de TOTAL

| Événement de la liste BRGM |   | Scénario du dossier Mines |   | Commentaire |
|----------------------------|---|---------------------------|---|-------------|
| I                          | Fuite par puits en exploitation   | 5                         | Fuite le long du puits vers la surface  |             |
|                            |   | 4                         | Fuite du puits au niveau des aquifères supérieurs sus-jacents                         |             |
|                            |   | 11                        | Puits éruptif   |             |
| II                         | Surpressurisation locale au niveau du puits d'injection   | 6                         | Dérangements mécaniques du réservoir dus aux réactions géochimiques dans le réservoir | a           |
| III                        | Surpressurisation du réservoir à l'échelle régionale  | 7                         | Dérangements mécaniques des terrains dus à l'injection                                |             |
| IV                         | Dépassement de l'extension latérale prévue  | 3                         | Fuite de gaz latérale   |             |
| V                          | Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture   | 1                         | Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture                                     |             |
| VI                         | Fuite par des failles existantes  | 2                         | Fuite par des failles existantes  |             |
| VII                        | Fuite par puits abandonné   | -                         |   | b           |
| VIII                       | Formation d'un stockage secondaire plus proche de la surface suite à une migration verticale non attendue | -                         |   | c           |
| IX                         | Modification des écoulements verticaux (drainance) suite aux changements des champs de pression           | -                         |   | d           |
| X                          | Forage ultérieur  | 10                        | Forage ultérieur d'un puits perforant   |             |
| XI                         | Fracturation induite par un séisme naturel  | 8                         | Dérangement mécanique des terrains sous l'effet des séismes                           | e           |
|                            |   | 9                         | Effet d'un séisme sur le puits  |             |

### Commentaires

- a. Le risque de surpressurisation au niveau du puits d'injection ne se pose pas dans les mêmes termes dans le cas d'un gisement déplété et d'un aquifère. Dans le cas présent, il n'est pas nécessaire de mettre la structure en



surpression pour évacuer le fluide en place ; le seul problème peut provenir du colmatage des pores du réservoir en réponse à l'injection, provoquant une diminution de l'injectivité. Ce risque est traité dans le scénario **6**.

- b. L'éventualité d'une fuite par un puits abandonné n'est pas mentionnée dans le dossier. Il n'y a pas actuellement de puits abandonné atteignant le gisement. Toutefois, ce scénario n'étant pas analysé, aucune étude sur la possibilité de fuite à long terme (postérieurement à l'abandon du site) du puits utilisé pour l'injection n'est conduite (cf. §3.3.1.5).
- c. La formation, suite à une fuite du réservoir, d'une accumulation de CO<sub>2</sub> à proximité de la surface n'est pas considérée dans le dossier. Les facteurs favorables prémunissant contre une remontée de CO<sub>2</sub> hors du gisement (barrière hydraulique constituée par le gradient de pression), de même que l'épaisseur des couvertures à traverser justifient que cet événement ait été écarté dans la phase d'identification des dangers.
- d. La modification des écoulements souterrains n'est pas envisagée dans l'étude des dangers. Néanmoins, la notice d'incidence sur la ressource en eau (chapitre B.6-3.3.2 du dossier « Mines ») aborde ce point : l'impact piézométrique sur les eaux souterraines de la remontée en pression du gisement est jugé nul, du fait de l'isolement hydraulique du réservoir.
- e. L'évaluation des conséquences d'un séisme a été scindée en deux scénarios : l'effet sur les terrains dans le scénario **7** et sur le puits dans le **9**.

### **3.3. EVALUATION DES RISQUES ET MESURES PREVENTIVES**

#### **3.3.1. Evaluation de l'occurrence des scénarios de risque**

##### 1. Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture

Les arguments pour écarter ce risque reposent sur les gages de l'intégrité et de l'isolement hydraulique du gisement : la connaissance approfondie du secteur, l'existence même du gisement, la déplétion du réservoir, la pression dans l'aquifère immédiatement sus-jacent, l'absence de failles traversant la couverture, et la remontée en pression très inférieure à la pression initiale du gisement.

Ces garanties s'accompagnent toutefois des réserves mentionnées dans la partie 2.2 sur la nécessité d'envisager la diffusion d'eau acidifiée dans la couverture, afin d'évaluer les effets potentiels sur l'étanchéité de celle-ci. Mais ce défaut ne concerne que le long terme, et sa correction n'est pas indispensable tant que les opérations en restent au pilote.

##### 2. Fuite par des failles existantes

Les considérations permettant d'écarter ce risque reposent sur les mêmes arguments que ci-dessus. Elles sont complétées par les résultats des simulations

excluant tout glissement des failles lors de la déplétion. Le maintien de la pression en dessous de son niveau initial avant déplétion garantirait la non-réactivation des failles lors de l'injection. Les réserves à apporter à cette argumentation figurent dans la partie 2.3.

### 3. Fuite de gaz latérale

Là encore, la structuration du réservoir, les preuves de son étanchéité et de son isolement hydraulique sont mises en avant, ainsi que la fermeture en pression du réservoir pour assurer le confinement latéral du CO<sub>2</sub>.

Pour les scénarios **1, 2 et 3**, le maintien de la pression dans le réservoir bien en deçà de sa pression originelle, surveillé par un enregistrement continu, constitue la mesure préventive majeure.

### 4. Fuite du puits au niveau des aquifères supérieurs sus-jacents

L'étude de ce scénario se base sur l'analyse de la vulnérabilité des aquifères. La contamination des plus sensibles est écartée, car, situés soit au nord, soit au sud-est du site, ils ne sont pas traversés par le puits. Celle des aquifères non exploités nécessiterait des défaillances multiples des constituants du puits ; le dossier souligne qu'elles seraient détectées par le suivi des pressions annulaires, et pourraient donc être corrigées. Cet argument n'est toutefois pas recevable sur le long terme. Le dernier point demeure en revanche valide : le gradient de pression entre les aquifères et le réservoir est défavorable à la migration du gaz.

**En dépit de ces facteurs favorables, il nous paraît nécessaire, pour garantir l'absence d'impacts sur l'environnement, de mettre en place un système de surveillance des aquifères (cf. §3.3.2 et 6.4).**

### 5. Fuite le long du puits vers la surface

Ce risque est considéré comme faible du fait du bon état des composants du puits. Les mesures de prévention correspondent donc aux opérations de contrôle de l'état du puits. Elles sont confortées par le programme de surveillance, notamment le contrôle de la pression des annulaires et les capteurs de CO<sub>2</sub> en surface, qui permettraient l'arrêt de l'injection.

Ces mesures sont tout à fait adaptées pour maîtriser le risque de fuite pendant la phase opérationnelle. En revanche, **elles devraient, pour un stockage de longue durée, être complétées par des dispositions répondant à l'éventualité d'une dégradation à long terme du puits, qui ouvrirait peu à peu la voie à une remontée de CO<sub>2</sub>.**

Dans le cas de la prolongation du stockage au-delà des 5 ans prévus pour le pilote, il semble donc nécessaire de mieux prendre en compte la phase post-injection. Cette question de la dégradation à long terme des puits fait toutefois partie de celles qui relèvent actuellement du domaine de la recherche, bien qu'il existe déjà certaines méthodes de surveillance, de prévention et de correction.

6. Dérangements mécaniques du réservoir dus aux réactions géochimiques dans le réservoir

Ces aspects sont étudiés en détail dans la partie 2.2.

7. Dérangements mécaniques des terrains dus à l'injection

Ces aspects sont étudiés en détail dans la partie 2.3. La mesure de prévention est la limitation de la pression dans le réservoir à un niveau bien inférieur à sa pression originelle.

8. Dérangement mécanique des terrains sous l'effet des séismes

Ces aspects sont étudiés en détail dans le chapitre 4.

9. Effet d'un séisme sur le puits

Ces aspects sont étudiés en détail dans le chapitre 4.

Le rapport qui a servi de support à la rédaction de l'étude de dangers TOTAL ([7]) mentionne comme mesure de prévention l'existence de vannes de sécurité en subsurface.

10. Forage ultérieur d'un puits perforant

Ce scénario ne pourrait être critique qu'à long terme, en cas de perte de la mémoire du stockage. A moyen terme en effet, des travaux de forage atteignant la profondeur du réservoir seraient soumis à une autorisation administrative. Ils ne pourraient être le fait d'un tiers tant que TOTAL détient la concession d'usage du sous-sol sur le périmètre concerné (la concession actuelle court jusqu'en 2017).

Le dossier écarte ce risque à long terme au motif que des opérations susceptibles de toucher le réservoir impliqueraient des moyens lourds, et s'entoureraient nécessairement des mesures de précaution habituellement mises en œuvre au cours de telles activités pour se prémunir de phénomènes plus dangereux qu'une fuite de CO<sub>2</sub>. De plus, les responsables de telles activités disposeraient des compétences nécessaires à la maîtrise de cette fuite, en particulier pour boucher le puits. Nous estimons cette argumentation recevable.

11. Puits éruptif

Ce scénario est jugé extrêmement rare, mais donne tout de même lieu à une évaluation poussée de ses conséquences (voir ci-dessous).

Pendant la phase opérationnelle, la mesure d'intervention commune à l'ensemble des scénarios de risque est l'arrêt de l'injection en relation avec le programme de surveillance :

- de la pression dans le réservoir ;

- de la pression et de la température dans le puits ;
- des événements microsismiques.

La pertinence de ce programme est analysée au chapitre 6.

Cette éventualité d'arrêt s'accompagne de l'option de réversibilité du stockage. Elle n'est pas décrite dans l'étude de dangers, mais à la partie B4 du dossier : « travaux de remise en état du site ». Divers scénarios de reproduction du CO<sub>2</sub> y sont étudiés. Le dossier stipule que la mise en œuvre de la réversibilité conduirait à ré-émettre le CO<sub>2</sub> à l'atmosphère ; de ce fait, cela n'atténuerait pas les effets en matière de « risque global ». De plus, l'exercice de cette option ne peut être efficacement envisagé que durant la période opérationnelle, beaucoup moins en cas de survenue d'un problème à long terme (cf. §2.2.2). **Néanmoins, la prise en compte de la possibilité de réversibilité du stockage dans le dossier d'autorisation constitue un point positif majeur, gage de maîtrise des risques locaux sur le court et le moyen terme.**

### 3.3.2. Evaluation des conséquences des scénarios de risque

La prise en compte dans le dossier de TOTAL, fort des arguments corroborant une très faible probabilité d'occurrence des scénarios envisagés, de leurs effets possibles doit être complétée. Les enjeux de surface et de subsurface (aquifères) sont décrits dans l'étude d'impacts. Toutefois il n'apparaît pas de localisation des aléas par rapport aux enjeux, notamment humains. Ainsi, le dossier ne présente pas d'éléments permettant d'apprécier l'extension du CO<sub>2</sub>, ou du moins l'emprise en surface du réservoir. Il n'est pas effectué non plus d'analyse, en fonction des points de prélèvement d'eau, des populations qui pourraient être affectées en cas de contamination de la ressource.

Dans l'optique d'un stockage à long terme, et bien que les fuites semblent très peu probables, il conviendra de localiser les zones et les enjeux susceptibles d'être impactés par une fuite, en particulier du fait de la proximité d'une agglomération comme celle de Pau. Il faut toutefois souligner que l'état actuel des connaissances ne permet pas de répondre complètement à ces questions : si les effets sur l'homme sont connus, les impacts sur l'environnement d'une exposition chronique à des teneurs élevées en CO<sub>2</sub> font encore l'objet de recherches. De plus il n'est pas possible de prédire la localisation d'un relâchement de CO<sub>2</sub>, dans la mesure où le site a été choisi pour ne pas fuir. Aucune valeur de débit de fuite ne peut être calculée non plus.

Dans le dossier Mines, la seule évaluation des effets concerne le scénario d'éruption de puits : la rupture de la tête de puits conduisant à une éruption de puits est envisagée comme risque majeur de probabilité extrêmement faible, mais d'effets potentiellement importants. Ces conséquences sont étudiées en détail (paragraphe 8.4.8 et annexe 21). Le BRGM ne dispose pas réellement des compétences requises pour juger de la qualité de cette étude. Celle-ci paraît toutefois avoir été réalisée suivant l'état de l'art, notamment :

- en prenant en compte pour le calcul de dispersion atmosphérique des conditions atmosphériques diverses, considérant davantage de couples

{vitesse du vent ; stabilité de l'atmosphère} qu'il n'est d'usage par défaut pour les installations classées ;

- en considérant une composition du fluide représentative du début (100% gaz naturel) ou de la fin (90% CO<sub>2</sub>) de la période d'injection ;
- en ne se limitant pas aux impacts du CO<sub>2</sub>, mais en étudiant aussi l'effet du co-contaminant critique que représente l'H<sub>2</sub>S.

En tout état de cause, le scénario de puits éruptif constitue nécessairement un calcul majorant pour l'ensemble des scénarios de fuite vers l'atmosphère imaginables. Or, dans tous les cas de calcul :

- les effets du CO<sub>2</sub> se restreignent à des distances très faibles : le seuil des effets irréversibles (SEI) est dépassé dans un rayon inférieur à 10 m, le seuil des effets létaux (SEL) sur moins de 2,5 m ; la valeur limite d'exposition professionnelle sur 8 h est atteinte sur un rayon inférieur à 40 m ;
- les seuils critiques pour les effets du H<sub>2</sub>S se limitent au voisinage du puits : 10 m pour le SEL, 40 m pour le SEI ; 120 m pour le seuil de déclenchement du plan de secours ;
- le cas le plus défavorable concerne une éruption en début d'injection, lorsque le gaz s'échappant est le gaz du gisement, du fait de la présence d'H<sub>2</sub>S.

Ces calculs pessimistes démontrent donc des zones d'effets très restreintes. La période d'effets les plus négatifs correspond à la phase opérationnelle, où le risque peut être maîtrisé le plus aisément. Pour une fuite à long terme, les effets du H<sub>2</sub>S diminuent, et la zone de toxicité correspondante, comme celle du CO<sub>2</sub>, demeure contenue à quelques dizaines de mètres du puits. Les effets irréversibles d'une fuite dans la phase post-opérationnelle ne dépassent ainsi pas la dizaine de mètres.

Ces conclusions pourraient être mises en exergue, comme calcul majorant des impacts pour l'ensemble des scénarios de fuite atmosphérique, moyennant des précautions liées à la localisation du point de fuite. Cela pourrait notamment répondre aux interrogations sur le scénario de fuite du puits d'injection à long terme (puits abandonné). **Les calculs montrent en effet que, dans tous les scénarios imaginables, les risques locaux restent très limités, confinés au voisinage immédiat du point de fuite. Ils pourraient probablement être parfaitement maîtrisés**, même si ce point de fuite se situait dans un secteur plus sensible que ne l'est le puits d'injection. Cet argument renforce celui de la faible probabilité d'occurrence de ces scénarios.

Par ailleurs, le risque de contamination des aquifères est envisagé dans le scénario 4 de l'étude des dangers. Cependant, l'occurrence de ce phénomène est écartée ; les effets d'une telle fuite ne sont pas évalués. La maîtrise du risque est justifiée par les mesures préventives adoptées et la faible vulnérabilité des nappes. Mais aucun calcul

des impacts sur les aquifères d'une fuite de CO<sub>2</sub> n'est proposé pour évaluer la gravité du risque, notamment sur le long terme, au cas où il se concrétiserait. De plus, aucune disposition n'est prise pour la surveillance de la qualité de ces aquifères (cf. §6.4).

**Si les impacts d'une fuite en surface nous paraissent convenablement pris en compte par le calcul d'un scénario majorant, il convient de compléter le dossier par une étude des conséquences d'une fuite vers des aquifères exploités ou exploitables, notamment en cas de fuite chronique à long terme. De même, une meilleure identification des enjeux présents dans le secteur et la mise en relation de leur vulnérabilité avec les aléas est recommandée. Ces considérations devraient déboucher sur la mise au point d'un programme de mesures de protection de l'environnement et des populations – même si celui-ci devait rester relativement peu détaillé, du fait de la très faible probabilité d'occurrence des accidents. De la sorte, le dossier reposerait sur les deux composantes du risque que constituent la probabilité et la gravité, alors qu'en l'état il est bâti avant tout sur la première. Signalons toutefois :**

- **que la représentation des effets d'une fuite en surface ou sur les aquifères relève des efforts de recherche actuels, d'une part ;**
- **que l'étude des impacts d'une fuite sur les aquifères concerne la prise en compte du long terme bien plus que la phase opérationnelle du pilote, d'autre part.**

### **3.4. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 3**

Pour l'étude des risques liés au stockage de CO<sub>2</sub> dans une **phase pilote** pendant laquelle **la réversibilité est possible, la pertinence des scénarios retenus par TOTAL ne fait aucun doute.** Il y a globalement une bonne correspondance entre les risques considérés et la liste générique proposée par le BRGM.

Pour la prolongation du stockage **sur le long terme**, nous soulignons **l'absence du scénario de fuite par un puits abandonné**, répondant en particulier à l'hypothèse d'une dégradation progressive des matériaux du puits utilisé pour l'injection ; ce point correspond actuellement à un sujet de recherche. Dans l'absolu, il n'est pas possible de certifier l'exhaustivité d'une liste de scénarios de risques à long terme. Néanmoins, **hormis le défaut signalé, la liste des scénarios considérés dans l'étude de dangers TOTAL paraît complète au regard de l'état de l'art en la matière.** La réalisation d'un audit à partir des bases de FEPs pourrait être un moyen de conforter encore la confiance dans cette liste. Toutefois cet exercice, qui rejoint des travaux de recherches en cours au niveau international, ne semble pas susceptible de mettre à jour de nouveaux scénarios.

Parmi les deux composantes de la criticité d'un risque que représentent la probabilité et la gravité, l'argumentation du dossier TOTAL repose essentiellement sur la première. **L'identification des éléments vulnérables devrait être précisée. Dans l'optique d'un stockage à long terme, leur mode d'exposition possible et les impacts potentiels de fuites devraient être évalués.** Cet effort fait toutefois appel,

pour être mené à bien, à des méthodes et techniques encore à l'état de recherche. Concernant les impacts en surface, le calcul du scénario de puits éruptif, majorant des zones d'effets, montre que celles-ci restent très limitées autour du point de fuite. **Les conséquences d'une fuite atmosphérique demeurerait donc faibles** en matière de risques locaux. De manière équivalente, il faudrait, pour le long terme, **qu'une évaluation des impacts potentiels d'une fuite de CO<sub>2</sub> vers les aquifères démontre qu'ils seraient limités**, bien qu'une telle étude soit délicate en l'état actuel des connaissances. **La mise en place d'un programme de protection des populations et de l'environnement paraît également nécessaire** afin d'améliorer la prise en compte de la vulnérabilité des enjeux aux phénomènes accidentels, bien que ces derniers apparaissent très improbables.

**Un tel programme viendrait compléter les mesures de prévention et de surveillance existantes.** La prévention repose essentiellement sur la limitation de la pression dans le réservoir à un niveau bien plus faible qu'avant la déplétion du gisement, ainsi que sur les opérations d'audit du puits. En relation avec le plan de surveillance de la pression dans les annulaires, de celle du réservoir et du gaz en surface, **ces dispositions paraissent adaptées à la réalité des scénarios de risque envisageable.** Les mesures d'intervention communes à l'ensemble de ces scénarios, pour y remédier et/ou prévenir leur poursuite, sont l'arrêt de l'injection et l'extraction éventuelle du gaz injecté. **Elles garantissent bien la maîtrise des risques locaux au cours de la phase opérationnelle.**





## 4. Avis sur les éléments du dossier relatifs à l'évaluation des conséquences d'un séisme

L'objectif est d'émettre un avis circonstancié sur les éléments présentés par Total dans le cadre du projet de stockage géologique de CO<sub>2</sub> à Rousse (64) relatifs à l'évaluation des conséquences d'un séisme. En particulier, le chapitre 5 (étude d'impact) et le chapitre 7 (étude des dangers) de la demande d'autorisation d'exploiter (partie B) sont analysées.

### 4.1. RECAPITULATIF DES ARGUMENTS PRESENTES DANS L'ETUDE D'IMPACT ET L'ETUDE DES DANGERS FOURNIES PAR TOTAL

Il est indiqué dans l'étude d'impact fournie par Total, dans la partie intitulée « Sismologie » (§B5-1.4) que le site de Rousse est situé en zone de sismicité « faible ». De plus, dans l'étude des dangers fournie par Total, dans la partie concernant l'évaluation des risques liés au puits et au réservoir et en particulier dans le paragraphe traitant du dérangement mécanique des terrains provoqués par des secousses sismiques (§B7-4.6.7) il est indiqué que :

- la région de Rousse est située dans la zone de sismicité qualifiée de « Faible »,
- aucune sismicité n'a été induite par la production du champ de Rousse et aucun séisme important n'a été enregistré,
- les effets des séismes sont insensibles, dès lors que l'on s'éloigne de l'épicentre, pour les formations souterraines profondes,

Enfin dans la partie traitant des effets d'un séisme sur le puits (§B7-4.6.10) il est indiqué que la surcharge induite par un séisme de référence ne peut provoquer ni le glissement d'une faille, ni l'endommagement d'un composant du puits, que se soit une gaine de ciment ou un cuvelage.

Ces éléments sont examinés dans les paragraphes qui suivent.

### 4.2. MOUVEMENTS SISMIQUES DE REFERENCE

Il est indiqué dans l'étude des dangers (§B7-4.6.7) : « *la région de ROUSSE est située dans la zone de sismicité qualifiée de « Faible »*. Dans l'étude d'impact (§B5-1.4) cette classification est précisée à l'aide du zonage sismique en vigueur (décret du 14 mai 1991). De plus l'évolution de la réglementation est évoquée brièvement. Enfin, dans la partie traitant de l'effet d'un séisme sur le puits, il est indiqué que le spectre sismique utilisé a été déterminé « *afin de prendre en compte les effets de la norme récente du BRGM* ». Cependant, comme le rôle du BRGM n'est pas de définir des normes

parasismiques (ceci est du ressort de l'administration et en particulier du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire), il est sans doute ici fait référence à la nouvelle réglementation parasismique qui doit bientôt entrer en vigueur. Cependant on ne trouve pas plus de précisions, en particulier si cette évolution de la réglementation a été considérée ou non.

Il conviendrait ainsi de bien préciser dans l'étude d'impact et dans l'étude des dangers si les mouvements sismiques de référence ont été évalués à l'aide de la réglementation en vigueur (comme indiqué dans l'étude d'impact) ou en utilisant les mouvements de la réglementation future (comme suggéré dans l'étude des dangers). En particulier les mouvements sismiques de référence utilisés dans le cadre des travaux menés pour cette étude des dangers doivent être précisés ainsi que la méthodologie qui a été utilisée pour les obtenir. Un rappel du contexte réglementaire afin de préciser la teneur de la réglementation en vigueur ainsi que la réglementation future est proposé en annexe 5 de la présente expertise.

Le spectre utilisé pour déterminer les mouvements sismiques de référence dans l'étude de l'effet d'un séisme sur le puits ([6]) a été déterminé en multipliant par 2 un spectre majorant déterminé pour la plateforme de Lacq. Total nous a précisé qu'un spectre déterminé selon une méthodologie déterministe classique dans le cas d'installation « à risque spécial » pour le site de Lacq était sur le point d'être actualisé. En attendant les résultats de cette étude, il a ainsi été décidé d'utiliser pour le site de Rousse, comme spectre provisoire, celui initialement déterminé pour le site de Lacq et de le majorer d'un facteur 2, étant donné que :

- l'étude en cours pour le site de Lacq montrait que le nouveau spectre pour Lacq sera plus élevé que l'ancien ;
- le site de Rousse est situé plus proche de la faille nord-pyrénéenne.

Le site de Rousse se situe en effet dans une zone de sismicité plus élevée que le site de Lacq, selon le futur zonage sismique (aléa « moyen » dans le cas du site de Rousse, aléa « modéré » pour le site de Lacq). De plus, le réservoir de Rousse est situé à une distance de l'ordre de 8 km de la zone des failles nord-pyrénéennes occidentales alors que le site de Lacq est situé à 16 km. La distance focale au séisme dimensionnant pour cette zone (SMS lié au séisme du 21 juin 1660) est, du fait de la profondeur de ce séisme estimée à 17 km, de l'ordre de 18 km dans le cas de Rousse et de l'ordre de 24 km dans le cas de Lacq. Ainsi le spectre déterminé à Rousse selon la méthodologie utilisée pour les installations « à risque spécial » serait supérieur à celui du site de Lacq.

Nous recommandons ainsi de calculer le spectre de réponse spécifique au site de Rousse et de vérifier qu'il reste bien inférieur, pour toute la gamme de fréquences considérée, au spectre choisi comme majorant dans le cadre du dossier Mines.

### 4.3. SISMICITE HISTORIQUE ET INSTRUMENTALE POUR LE SITE DE ROUSSE

Concernant la sismicité de la zone d'étude, il est indiqué dans l'étude des dangers (§B7-4.6.7) : «*L'examen de la sismicité enregistrée au niveau de la zone Pau/Rousse montre qu'aucune sismicité induite par la production du champ de Rousse n'a été relevée. Le seul événement sismique historique enregistré à proximité du site date du 22 octobre 1851 (intensité épicentrale V)* ».

Une étude de la sismicité historique de la zone a par ailleurs été fournie par Total ([7]). Elle est très complète, à jour, et donne une bonne idée de la sismicité historique. L'étude montre que la sismicité est beaucoup plus importante pour la zone de Lacq, avec la présence de nombreux événements induits, que dans la zone de Rousse où en particulier on ne recense aucun événement induit notable (ressenti par la population).

Cependant la sismicité historique, basée sur le recensement des effets ressentis par la population, ne constitue pas un catalogue exhaustif pour les petits événements. Cette étude de sismicité historique devrait ainsi être accompagnée d'une étude de la sismicité instrumentale. En effet, la zone concernée est proche de zones sismiques dans les Pyrénées qui sont instrumentées depuis plusieurs décennies. Le Réseau National de Surveillance Sismique (RéNaSS) possède par exemple un réseau de 28 stations courte-période dans les Pyrénées à proximité du site étudié (<http://renass.u-strasbg.fr/>). Une étude rapide de la sismicité instrumentale pourrait en particulier permettre de confirmer qu'aucun séisme de magnitude notable ( $M > 3$ ) n'a été induit par la production dans le voisinage du réservoir.

A titre indicatif une carte de sismicité instrumentale est présentée sur l'illustration 1 (catalogue de sismicité LDG-RéNaSS 1980-2008, même secteur d'emprise que pour l'étude de sismicité historique fournie par Total).

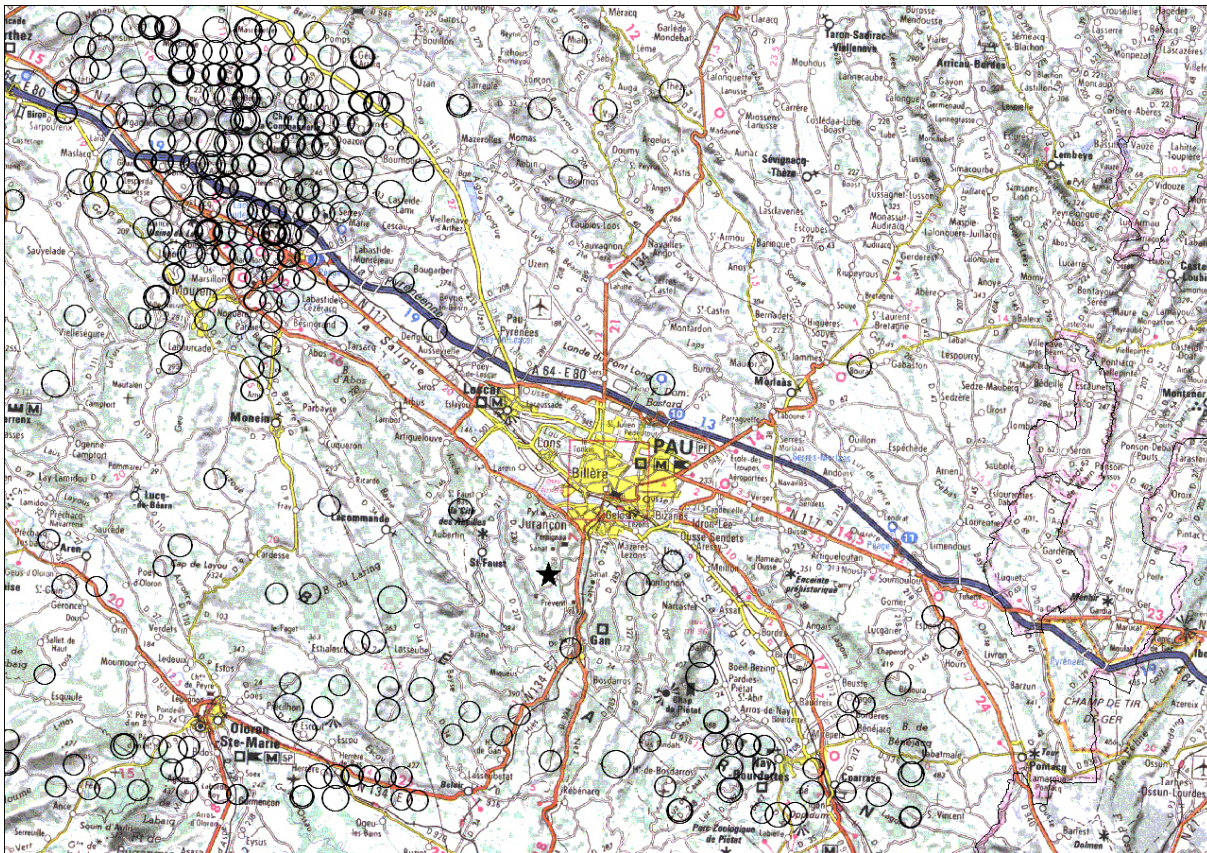


Illustration 1 : Carte de sismicité instrumentale (catalogue de sismicité LDG-RéNaSS 1980-2008). Le site est représenté par une étoile noire.

Cette analyse préliminaire semble confirmer que très peu de sismicité (naturelle ou induite) est notée au niveau du site de stockage de Rouse (au contraire de la zone de Lacq).

Dans l'étude d'impact il est indiqué dans la partie traitant des impacts en surface liés à la remontée en pression du gisement (§B5-3.3.2) : « les éventuelles secousses sismiques potentiellement générées par la réaction du gisement seront en tout état de cause d'une amplitude trop faible pour occasionner des dégâts en surface (pas de séismes enregistrés pendant l'exploitation du gisement) ».

L'étude de sismicité instrumentale préconisée ci-dessus pourra permettre de confirmer cette absence de sismicité induite pendant l'exploitation. Le site de Rouse étant situé à moins de 50 km des stations pyrénéennes du réseau courte-période du RéNaSS les séismes de la zone, même de magnitudes très faibles (comprises entre  $M_L=1$  et  $M_L=2$ ), sont détectés et figurent en théorie dans les catalogues de sismicité instrumentale. Ainsi, à l'issue d'une étude de sismicité instrumentale sur la zone de Rouse (couvrant la période de production du site), l'absence de séismes, en particulier de petites magnitudes, démontrerait l'absence de sismicité induite lors de la production. Ces séismes induits sont en général de magnitudes très faibles et ne sont pas ressentis par

la population. Ils ne figurent pas dans les catalogues de sismicité historique fournis par Total.

De plus il faut noter que le dispositif de surveillance sismique présenté dans le §B7-4.5.1 permettra de détecter et de localiser la sismicité éventuellement induite par l'exploitation du réservoir.

#### **4.4. MOUVEMENTS SISMIQUES EN PROFONDEUR**

Dans le contexte des recherches sur le stockage géologique de CO<sub>2</sub>, la vulnérabilité des stockages souterrains aux séismes apparaît comme l'un des domaines où les connaissances manquent. Les études liées à ce projet pilote permettront ainsi peut-être de mieux quantifier cette vulnérabilité. Les articles sur le comportement prévisible des stockages en réponse à un séisme sont peu nombreux ; de plus, ils portent plutôt sur le comportement du système naturel de stockage, c'est-à-dire sur la modification de l'état de contraintes du réservoir, la réactivation de failles et les possibilités de fuites qui en résultent. Citons à ce propos Yamamoto & Koide (2006) dans le contexte sismo-tectonique japonais (qui constitue l'objet de la plupart des recherches sur le stockage géologique en zone sismique). Ils concluent de leurs travaux que les séismes affectent la stabilité des sites de stockage, mais qu'ils ne peuvent agir que comme déclencheur, et non comme cause majeure. Les risques n'existent que dans des conditions particulières, où la configuration mécanique du site fait que l'état de contraintes est déjà critique.

Concernant les mouvements sismiques en profondeur, il est indiqué dans l'étude des dangers (B7-4.6.7) : *« D'une manière générale, les effets des séismes sont, dès lors que l'on s'éloigne de l'épicentre de ces derniers, insensibles pour les formations souterraines profondes. »*

*En profondeur, la propagation des ondes se traduit par des variations de contraintes et des dilatations élastiques de période trop courte pour permettre aucun déplacement appréciable de la roche, du gaz ou de l'eau. C'est la réflexion de ces ondes à la surface qui, en y engendrant un ventre d'amplitude, peut seulement causer des dégâts que l'on constate dans les séismes ».*

Aucun élément dans cette partie de l'étude des dangers ne vient étayer ces affirmations.

Plusieurs études ont au contraire montré que même si les mouvements sismiques étaient plus faibles en profondeur (parfois de façon notable), ils n'étaient pour autant pas négligeables. En effet, du fait de l'éloignement de la surface du sol, qui constitue une surface libre de réflexion des ondes, les amplitudes des ondes sont bien atténuées en profondeur mais seulement d'un facteur inférieur à 4.

Les études recensées à l'annexe 6 (Douglas, 2006) indiquent que l'accélération en profondeur peut être 3 à 4 fois inférieure à l'accélération en surface. Cependant, étant donné que l'accélération en profondeur est toujours au moins 2 fois inférieure à

l'accélération en surface (du fait du phénomène de surface libre), un facteur **deux** peut être utilisé de façon conservative.

Dans la suite de l'étude des dangers, dans la partie concernant l'étude des effets d'un séisme sur le puits (§B7-4.6.10), il est indiqué que les surcharges induites par un séisme de référence ont été étudiées pour des zones situées en profondeur (2300 m MD, 3200 m MD, 3350 m MD, 4200 m MD). Pour évaluer les mouvements sismiques (vitesses sismiques) à ces profondeurs un facteur de correction utilisant la méthode de Betbeder-Matibet a été utilisé pour tenir compte de l'atténuation des ondes en profondeur. Cette méthodologie est pertinente et permet en effet d'évaluer les mouvements en profondeur à partir des mouvements estimés en surface. Il devrait ainsi être indiqué dans le §B7-4.6.7 de l'étude des dangers que, dans ce cas précis du réservoir de Rouse, une étude ([6]) a montré que, même si des mouvements sismiques sont probables en profondeur, des endommagements des composants du puits en profondeur ou l'activation de failles sont peu probables du fait des effets d'un séisme majorant.

#### 4.5. SYNTHÈSE DES RISQUES LIÉS AU RÉSERVOIR

Suite aux remarques précédentes des précisions doivent être apportées dans le tableau de synthèse des risques liés au réservoir présenté dans l'étude des dangers (Tableau B.7-6) :

Événement redouté : dérangements mécaniques des terrains :

- Colonne « Mesures de prévention des causes » – Le gisement de Rouse se trouve dans une zone d'activité sismique modérée selon la sismicité historique (à confirmer avec une étude de sismicité instrumentale). Le site est classé en zone d'aléa « faible » selon la réglementation en vigueur et dans une zone d'aléa « moyen » selon la future réglementation parasismique ;
- Colonne « Actions/Remarques » – En champ lointain (hors de la zone épiscopentrale), les mouvements sismiques en profondeur sont atténués d'un facteur supérieur à deux par rapport aux mouvements en surface,

Événement redouté : perte d'étanchéité du puits d'injection :

- Colonne « Actions/Remarques » – L'examen de la sismicité historique ne fait apparaître qu'un unique événement dans le secteur de Rouse (à confirmer avec une étude de sismicité instrumentale).

#### 4.6. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 4

Au vu de l'ensemble des éléments fournis et des vérifications faites dans le cadre de cette tierce-expertise, **la sismicité naturelle de la zone du stockage de Rouse apparaît modérée, et la sismicité induite très modérée**. De plus, les mouvements sismiques en profondeur sont atténués par rapport à la surface. Ainsi, **il est probable que les mouvements sismiques** à prendre en considération au niveau du réservoir

soient **relativement faibles** et qu'ils **n'induisent pas d'endommagement d'un composant du puits ni d'activation de failles**, comme indiqué dans la partie « effet d'un séisme sur le puits » dans l'étude des dangers au vu des retours d'expérience cités (séisme du Chili et de Niigata) mais aussi à l'aide d'une étude spécifique fournie par Total ([6]).

Cependant il conviendrait de **préciser l'origine des niveaux sismiques** pris en considération dans cette étude des dangers et en particulier s'ils sont issus de la réglementation en vigueur ou de la future réglementation. De plus il conviendra de calculer le spectre de réponse spécifique pour le site de Rousse et de vérifier que ce spectre **est bien inférieur** au spectre majorant utilisé dans l'étude des effets d'un séisme sur le puits **pour toute la gamme de fréquences considérée**.

Enfin, **une étude de la sismicité instrumentale devrait être menée**, afin de vérifier qu'aucun événement important n'est recensé au niveau du site et afin de confirmer l'absence de sismicité induite.

Soulignons que le comportement d'un stockage souterrain vis-à-vis d'un séisme constitue un sujet encore relativement mal connu ; des travaux de recherche plus théoriques permettront de compléter cette connaissance et d'affiner ainsi l'évaluation de la vulnérabilité, en déterminant notamment les paramètres essentiels à surveiller.





## **5. Intérêt et faisabilité technique de la mise en œuvre de vannes intermédiaires**

Cet aspect ne rentrant pas dans le champ des compétences du BRGM, il n'est pas abordé dans ce rapport d'expertise



## **6. Avis sur le plan de surveillance pour assurer la protection des populations et de l'environnement, et vérifier la rétention du gaz à long terme**

### **6.1. INTRODUCTION**

La surveillance est un aspect primordial dans le stockage géologique du CO<sub>2</sub>, car elle doit renseigner en temps réel sur le devenir du panache de CO<sub>2</sub> et sur les fuites hypothétiques (GIEC, 2005). En cas de détection de fuite, elle est le facteur déclencheur des mesures correctives qui visent à empêcher le CO<sub>2</sub> d'arriver en surface. Le plan de surveillance est bâti dès l'étape de conception du projet à partir de l'analyse des risques et il fait partie intégrante de la gestion des risques.

Le plan de surveillance doit viser le réservoir et les chemins possibles de fuite : puits, couverture, couches intermédiaires entre la couverture et la surface, proche surface et surface. Il doit prendre en compte également les différentes cibles : la population, la faune et la flore, les enjeux économiques et sociaux. Ces cibles sont a priori les mêmes que celles de l'étude d'impact (§ B6 du dossier Mines). Les observations issues de la surveillance sont comparées aux prédictions des simulations du devenir du CO<sub>2</sub> et du comportement du réservoir et de la couverture. Cela permet, d'une part, de mettre à jour les modèles numériques et, d'autre part, de mettre en œuvre les actions correctives nécessaires, en cas de divergence avérée. Le plan de surveillance peut donc faire l'objet de révisions au fur et à mesure de l'avancement du projet, en particulier lors de la fermeture du site.

Le plan de surveillance préconisé par TOTAL est décrit principalement dans les paragraphes B3 -2 (Le plan de surveillance) et B7 -4.5 (Dispositions relatives au contrôle de l'intégrité du réservoir et du puits) du dossier minier. Il comprend :

- Le contrôle des paramètres d'injection en tête de puits et dans le puits :
  - Suivi de la quantité de gaz injecté ;
  - Analyse en continu de la composition du flux injecté ;
  - Suivi de l'écoulement du gaz injecté dans l'ouvrage par des capteurs de pression et de température dans le puits ;
- Le contrôle du puits lui-même ;
- La surveillance de la sismicité induite par un réseau de géophones placés à différentes profondeurs dans le puits injecteur et dans 7 puits ad hoc de 200 m disposés autour ;
- La surveillance périodique des gaz dans les sols et dans l'atmosphère à proximité du puits d'injection.

## 6.2. LE PLAN DE SURVEILLANCE PROPOSÉ

Le contrôle des paramètres d'injection n'appelle pas de commentaires particuliers, dans la mesure où cela correspond aux exigences en vigueur dans le cadre du Code Minier pour les puits d'injection de gaz, si ce n'est que les gaz analysés apparaissent ici spécifiques (*cf.* paragraphe B3.2). Ces deux exigences sont mentionnées par ailleurs de manière explicite dans les deux seuls textes réglementaires existants sur le stockage géologique de CO<sub>2</sub> sous les fonds sous-marins (Protocole de Londres et Convention OSPAR). L'installation de capteurs de pression et de température dans le puits est un plus pour s'assurer de l'intégrité du puits lui-même. Ceux-ci fourniront par ailleurs des éléments d'entrée pour la simulation de l'évolution dynamique de l'injection (modélisation écoulement-transport).

Le contrôle du puits est effectué de deux manières : 1) contrôle continu de la pression dans les annulaires qui permet de détecter des fuites éventuelles au niveau de la cimentation ou du cuvelage ; 2) contrôles de ceux-ci par des diagraphies, si cela est jugé nécessaire par des opérations d'audits (avant, pendant et après l'injection). La première opération est menée en routine sur les forages d'injection de gaz, quant à la seconde elle sera déclenchée si des pertes de pression dans un des annulaires laissent suspecter une anomalie dans l'intégrité du puits. Il revient à TOTAL de s'engager à mener ces opérations d'audit.

Le réseau d'étude microsismique a pour but de détecter les microruptures qui pourraient être déclenchées par l'augmentation de pression dans le réservoir, ainsi que d'enregistrer la sismicité naturelle. Les premières pourraient être localisées à proximité du puits d'injection, dans le réservoir dans les zones d'augmentation de pression interstitielle et dans la couverture (*cf.* chapitre 2.3 du présent rapport) et éventuellement sur les failles bordières NW-SE qui encadrent la structure de Rouse à moins de 500 m au nord et à l'est. Une faille hypothétique est également mentionnée dans la description géologique entre RSE.1 et RSE.3, dans le rapport sur lequel s'est basé TOTAL pour rédiger son étude de dangers ([7]). La surveillance microsismique est la seule méthode proposée pour contrôler l'intégrité du réservoir et de la couverture. Le dimensionnement du réseau a fait l'objet d'une étude poussée ([8], voir ci-dessous). La figure B2-6 du dossier Mines montre les prévisions d'évolution de la pression durant la phase d'injection dans la zone fracturée et dans la matrice proche. Le différentiel ne dépasse pas 4,5 MPa, c'est-à-dire la moitié de la valeur très conservative annoncée dans le rapport ayant servi à l'étude de dangers ([7]) et reprise dans la présente expertise (annexe 3). Cela laisse supposer que la microsismicité, si elle existe, sera de très faible magnitude, c'est-à-dire négative. TOTAL prévoit d'installer le réseau microsismique six mois avant le début de l'injection de manière à avoir un état zéro du bruit de fond sismique.

Concernant les mesures en surface, la surveillance des gaz dans les sols est évoquée de manière succincte dans le plan de surveillance : prélèvements et analyse d'échantillons de gaz en une trentaine de points, situés autour de forage et dans les alentours. Peu de précisions sont apportées quand aux types de mesures réalisés : concentration, flux, gaz autres que le CO<sub>2</sub>, isotopes etc. et la périodicité des prélèvements. Par ailleurs, il est à noter qu'un soin particulier sera apporté à

l'élaboration de l'état zéro : quatre campagnes de mesures seront réalisées à différentes périodes de l'année avant le début de l'injection. Le but est de prendre en compte les variations spatiales et saisonnières qui sont le résultat d'interactions entre l'atmosphère et les franges de sols proches de la surface. Cela est le fruit des récentes recherches effectuées dans ce domaine en France et dans le monde. En appui aux méthodes classiques d'étude des gaz dans les sols, il est fait également référence sans plus de détail au projet SENTINELLE. Ce dernier est un projet de 4 ans, financé par l'Agence Nationale de la Recherche, qui a pour but de tester de nouvelles méthodes de surveillance des gaz dans les sols, en forage et à la surface.

En conclusion du paragraphe sur la surveillance en surface, il est mentionné dans le dossier Mines que « la comparaison des résultats obtenus avant injection à ceux obtenus pendant la phase d'exploitation du pilote pourra donner une information sur d'éventuelles migrations du CO<sub>2</sub> injecté ». Cette comparaison constituant l'un des objectifs du monitoring, l'utilisation des seules méthodes de surface paraît devoir être complétée, au vu du résultat recherché. Cette phrase doit donc figurer dans la conclusion de tout le paragraphe sur le plan de surveillance, en expliquant comment le faisceau de méthodes proposées contribuera à détecter d'éventuelles migrations.

Comme mentionné dans l'introduction, TOTAL comparera les résultats des observations aux prédictions des simulations de manière à évaluer plus finement le devenir du CO<sub>2</sub> et pouvoir infléchir le déroulement du projet. Quant à la durée de la surveillance après l'arrêt de l'injection, elle prendra fin avec le projet, c'est-à-dire au bout de trois ans.

### **6.3. L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ DE LA SURVEILLANCE MICROSISMIQUE**

Le rapport sur la faisabilité de la surveillance microsismique ([8]) visait à :

1. Proposer différentes configurations de réseau ;
2. Les analyser à l'aide de modélisations 3D et 2D, en termes de :
  - i. Localisation optimum des récepteurs dans le sous-sol afin d'éviter des zones d'ombre qui empêcheraient de détecter toutes les ondes émises par la microfracturation ;
  - ii. Capacité de détection des différentes phases (ondes P et S) ;
  - iii. Évaluation de la précision et de la sensibilité des localisations.
3. Conclure en proposant la configuration optimum de réseau.

Une analyse détaillée de ce rapport est fournie dans l'annexe 7. Les auteurs préconisent un réseau mixte avec des capteurs proches de la zone d'injection et un réseau de capteurs proches de la surface. Les meilleures solutions étant celles qui combinent des capteurs dans RSE.1 et RSE.3 et des capteurs intermédiaires dans

RSE.1. Suite à un échange ultérieur avec TOTAL, Les auteurs ont analysé en fin de rapport la configuration retenue en fonction de l'état des puits : un réseau de subsurface et trois capteurs au fond de RSE.1 à 4280, 4380 et 4480 m de profondeur (la zone d'injection est située entre 4544 et 4570 m). Les performances de ce réseau en termes de précision des localisations et de détection des événements se situent au niveau des meilleures configurations analysées dans l'étude, équivalentes à celle du réseau avec un capteur à mi-profondeur dans RSE.1.

Les auteurs proposent également plusieurs solutions techniques pour la mise en œuvre des géophones dans le forage : capteurs entre tubing et casing, capteurs derrière casing au contact direct avec la roche, flûtes de capteurs en bout de câble avec couplage avec la formation par levier mécanique, ressort etc. Finalement, TOTAL a retenu la société Weatherford qui propose un système innovant de capteurs sismiques optiques basés sur les fibres optiques<sup>1</sup>. Ce système sera intégré aux capteurs température-pression étagés dans le puits à 4 niveaux différents. Toutes les données seront envoyées en surface par fibre optique. Le dossier Mines ne fournit pas d'informations sur le type de capteurs utilisés pour le réseau de subsurface, ni sur les modalités de traitement et interprétation des données (système d'acquisition, logiciels utilisés, etc.) ni sur les procédures envisagées pour maintenir la surveillance 24h/24. En revanche, des collaborations futures sont prévues pour le traitement et l'interprétation des données de microsismique.

#### **6.4. ANALYSE DES MÉTHODES DE SURVEILLANCE PROPOSÉES AU REGARD DES SCÉNARIOS ÉNUMÉRÉS DANS L'ÉTUDE DE DANGERS**

Pour évaluer le plan de surveillance eu égard à la protection des populations et de l'environnement, nous avons repris chacun des scénarios identifiés par TOTAL. L'évaluation des risques et les mesures préventives pour chacun des scénarios ont déjà été discutées au paragraphe 3.3. Nous nous concentrons donc sur les méthodes de surveillance proposées par TOTAL et sur quelle serait éventuellement la méthode complémentaire.

##### 1. Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture :

Comme il a été dit au 3.3.1, ce risque peut être considéré comme très faible. TOTAL ne propose donc pas de méthode autre que le suivi de la pression et les mesures de gaz en surface. En tout état de cause, la sismique 3 D répétée ou tout autre méthode géophysique indirecte (gravimétrie par exemple) seraient difficilement efficaces à ces profondeurs, au regard des quantités injectées. Par contre, la remontée du CO<sub>2</sub> dans les aquifères sus-jacents pouvant être utilisés par des captages proches ou à une certaine distance, bien que très peu probable, demande à être contrôlée (voir scénario 4).

---

<sup>1</sup> [http://www.ep-solutions.com/solutions/IW/Clarion\\_Optical\\_Inwell\\_Seismic\\_System.htm#Accelerometer](http://www.ep-solutions.com/solutions/IW/Clarion_Optical_Inwell_Seismic_System.htm#Accelerometer)

## 2. Fuite par des failles existantes

Ce risque est aussi faible que le précédent, mais le suivi microsismique devrait permettre de détecter efficacement toute réactivation de faille qui pourrait indiquer une surpression dans une faille bordière ou la faille hypothétique mentionnée dans le rapport support de l'étude de dangers ([7]). Les remarques sur l'application des autres méthodes géophysiques restent valables ainsi que celle sur la remontée vers les aquifères sus-jacents.

## 3. Fuite latérale de gaz

Mêmes arguments que pour 1 et 2.

## 4. Fuite du puits au niveau des aquifères sus-jacents

De façon similaire aux risques 1 à 3, TOTAL considère ce risque comme négligeable. Comme déjà mentionné au paragraphe 3.3.1, il n'est pas fait mention dans le dossier Mines de disposition de surveillance particulière, mis à part le suivi des pressions annulaires. Cela est pourtant mentionné clairement comme recommandation finale dans la conclusion de la synthèse hydrogéologique réalisée par le BRGM Aquitaine pour TOTAL : « il serait souhaitable d'assurer un suivi piézométrique et chimique des aquifères potentiellement exploitables (Tertiaire jusqu'au Paléocène) ». **Nous recommandons que ce point soit examiné par TOTAL.**

## 5. Fuite le long du puits vers la surface

Les différents dispositifs de contrôle dans le puits (pression et température à différents niveaux), ainsi qu'en surface (pression dans les annulaires, mesures de gaz) permettront de détecter en temps réel toute remontée anormale de CO<sub>2</sub> le long du puits. La mise en œuvre de diagraphies pourra localiser précisément les points faibles éventuels de la cimentation ou du cuvelage.

## 6. Dérangements mécaniques du réservoir dus aux réactions géochimiques dans le réservoir

La surveillance microsismique s'applique ici pleinement, sans nécessité de préconiser d'autres mesures de surveillance.

## 7. Dérangement mécanique des terrains dus à l'injection

Idem à 5. Concernant les déformations éventuelles en surface (surrection liée à la repressurisation du réservoir), il est peu réaliste de recommander des méthodes de mesures par géodésie ou Interférométrie satellitaire, au vu des variations attendues : inférieures au mm (cf. chapitre 2.3.2).

## 8. Dérangement mécanique des terrains sous l'effet des séismes

Si ce dérangement par un facteur externe au site et à l'injection se traduit par le déclenchement de fracturation dans le réservoir et les terrains sus-jacents, la surveillance microsismique sera la méthode de détection la plus indiquée. S'il s'agit, par contre, de déformations non-sismiques (fluage) celles-ci seront difficiles à évaluer si ce n'est par des variations dans les paramètres d'injection : augmentation ou diminution de l'injectivité. Ce risque semble cependant négligeable au vu de l'activité sismique dans la région (cf. chapitre 4).

#### 9. Effet d'un séisme sur le puits

Les différents contrôles du puits, plus éventuellement des diagraphies a posteriori, permettront de déceler tout endommagement du puits suite à un séisme.

#### 10. Forage ultérieur d'un puits perforant le réservoir

Ce scénario ne concerne pas le projet pilote et donc la surveillance à court terme. Seules des mesures de prévention peuvent être préconisées sur le long terme, comme le maintien de la mémoire du stockage de CO<sub>2</sub> ainsi que la maîtrise des opérations de forage suivant les règles de l'art.

#### 11. Puits éruptif

Mis à part les capteurs de détection du CO<sub>2</sub> qui fonctionneront en permanence autour du puits d'injection, un plan de surveillance spécifique devra être mis en place en cas de remontée incontrôlée du CO<sub>2</sub>. Celui-ci devra mesurer la dispersion du panache de gaz dans l'atmosphère (méthode d'Eddy covariance, par exemple) ainsi que les impacts sur la faune et la flore

Ces différentes considérations sont synthétisées dans le tableau 4.

### 6.5. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 6

Au vu des documents présentés par TOTAL, nous pouvons conclure que **les différentes méthodes proposées dans le plan de surveillance sont nécessaires à la sécurité et au bon fonctionnement du projet, car adaptées à la majorité des scénarios identifiés dans l'étude des risques**. Cependant, il convient **de prévoir le contrôle des aquifères sus-jacents** et d'apporter **plus de détails sur certains points** :

- contrôle des aquifères sus-jacents : mettre en œuvre d'un plan de surveillance à partir des puits existants (pétroliers ou autres) à proximité de RSE1 ;
- surveillance microsismique : préciser les méthodes de traitement et d'interprétation des données de microsismicité induite ;
- surveillance des gaz dans les sols et dans l'atmosphère : détailler les méthodes utilisées et la périodicité des mesures ;



- contrôle des impacts sur la faune et la flore : établir un plan de surveillance en cas de fuite avérée jusqu'à la surface (faire le lien avec le chapitre B5 : étude d'impact). Notons que, dans le cas des stockages de gaz, un tel plan ne fait pas partie des exigences systématiques de la réglementation, mais peut faire l'objet de dispositions contenues dans les arrêtés préfectoraux d'autorisation.

Concernant la durée de la surveillance, TOTAL propose de continuer la surveillance trois ans après la fin de l'injection. A la fin de ces trois ans, trois cas pourront se présenter :

- Les conditions de sécurité ne sont pas satisfaites et le CO<sub>2</sub> est extrait ;
- Les observations montrent que la stabilité du stockage est assurée et que les installations peuvent être fermées en toute sécurité.
- Le stockage est maintenu mais il est conclu que la surveillance active doit se poursuivre selon des modalités qu'il conviendra alors de définir.

Dans les deux derniers cas, la durée de trois ans nous paraît insuffisante pour la surveillance. TOTAL devra faire, dans le cadre des études scientifiques accompagnant l'exploitation du pilote, **des propositions plus concrètes sur la durée effective et le contenu du monitoring post-fermeture**. Celles-ci se baseront sur les modélisations à long terme déjà mentionnées dans les chapitres 2 et 3.

Tableau 4 : Analyse critique des méthodes de surveillance proposées en fonction des scénarios énumérés dans l'étude de dangers

|   |    | <b>Scénario</b>   | <b>Méthode de monitoring possible</b>  | <b>Méthode mise en œuvre par TOTAL</b>  |
|---|----|---|--|---|
| Scénarios de perte d'intégrité du réservoir       | 1  | Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture                                     | Sismique 4 D, gravimétrie, sismique passive<br>Contrôle de la pression<br>Contrôle des aquifères sus-jacents | Pas assez de résolution pour la sismique active ou la gravimétrie du fait de la profondeur, sismique passive<br>Oui<br>A préciser par TOTAL |
|   | 2  | Fuite par des failles existantes  | Sismique passive<br>Contrôle des aquifères sus-jacents   | Oui<br>A préciser par TOTAL   |
|   | 3  | Fuite de gaz latérale   | Idem à 1<br>Contrôle des aquifères sus-jacents   | Idem à 1<br>A préciser par TOTAL  |
| Scénarios de perte d'étanchéité du puits          | 4  | Fuite du puits au niveau des aquifères supérieurs sus-jacents                         | Contrôle de la pression<br>Contrôle piézométrique et chimique des aquifères sus-jacents                      | Oui<br>A préciser par TOTAL   |
|   | 5  | Fuite le long du puits vers la surface  | Contrôle du puits, mesures en surface, diagraphies   | Oui   |
| Scénarios de dérangements mécaniques des terrains | 6  | Dérangements mécaniques du réservoir dus aux réactions géochimiques dans le réservoir | Sismique passive   | Oui   |
|   | 7  | Dérangements mécaniques des terrains dus à l'injection                                | Sismique passive<br>Géodésie, GPS, In SAR  | Oui<br>Non (mais déformations attendues en surface << 1mm)  |
| Scénarios d'agressions externes                   | 8  | Dérangement mécanique des terrains sous l'effet des séismes                           | Sismique passive   | Oui   |
|   | 9  | Effet d'un séisme sur le puits  | Contrôle du puits, diagraphies   | Oui   |
|   | 10 | Forage ultérieur d'un puits perforant   | Contrôle du puits perforant, conservation de la mémoire  | Concerne le long terme  |
|   | 11 | Puits éruptif   | Contrôle du puits<br>Mesures atmosphériques, impacts sur la faune et la flore                                | Oui<br>A préciser par TOTAL   |

## **7. Conclusions sur les risques de fuite et les incidences sur la santé et l'environnement présentés par le projet**

Il a été demandé au BRGM de donner un avis sur le dossier Mines de la demande d'autorisation de TOTAL pour un projet de pilote d'injection de CO<sub>2</sub> à Rousse (Pyrénées Atlantiques). L'avis du BRGM a été rédigé au vu du dossier de demande d'autorisation déposé le 30 avril 2008, ainsi que des documents, communiqués au BRGM par TOTAL, qui ont servi de support à la réalisation de ce dossier. Il porte sur :

- la démonstration de la capacité du site de Rousse à « assurer la rétention du gaz sans fuite » et sur le choix de cet emplacement en termes de risques de relâchement du CO<sub>2</sub> à long terme ;
- la pertinence et l'exhaustivité des scénarios de risques pour l'homme et l'environnement retenus par TOTAL ;
- l'évaluation des conséquences d'un séisme ;
- l'adéquation du programme de surveillance mis en œuvre pour « assurer la protection des populations et de l'environnement » ainsi que pour vérifier l'aptitude du site à « assurer la rétention du gaz à long terme ».

### **7.1. ÉVALUATION DE LA CAPACITE DU SITE A ASSURER LA RETENTION DU GAZ**

Le site choisi par TOTAL nous paraît présenter des caractéristiques très favorables pour « assurer la rétention du gaz sans fuite significative » à long terme, liées :

- à la configuration du réservoir (structure, profondeur) ;
- à la connaissance approfondie dont son exploitant en dispose ;
- à son historique d'exploitation ;
- à son confinement en pression ;
- aux enseignements des études de transport réactif et de géomécanique.

Au-delà de ces arguments qualitatifs, une validation quantitative de l'efficacité du projet dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, par rapport aux seuils de taux de fuite proposés par le GIEC (2005), ne nous paraît pas faisable dans l'état actuel des connaissances au niveau international.

Les études de transport réactif démontrent l'absence d'altération significative des propriétés du réservoir suite à l'injection de CO<sub>2</sub>. Des calculs sur un maillage plus raffiné dans la zone estimée comme la plus impactée, ainsi que des précisions sur l'état de saturation en eau du réservoir, sont recommandés pour conforter cette conclusion. Dans l'optique d'un stockage à long terme, il faudrait de plus étudier la diffusion d'eau acidifiée au sein de la couverture.

Sur le plan géomécanique, les documents présentés par TOTAL permettent d'écarter les risques :

- de fracturation en traction de la couverture ;
- de réactivation de faille par l'effet de la pression seule ;
- de surrection.

De façon plus critique, en l'absence d'évaluation de l'extension de la perturbation en température résultant de l'injection du CO<sub>2</sub>, une étude de l'effet conjoint de la pression et de la température sur la réactivation des failles bordières lors de l'injection de CO<sub>2</sub>, similaire à celle qui a été réalisée pour la phase de déplétion, nous paraît nécessaire.

## **7.2. PERTINENCE ET EXHAUSTIVITE DES SCENARIOS PROPOSES PAR TOTAL**

Le recensement des scénarios de risque effectué par TOTAL correspond à l'état de l'art en la matière, si ce n'est, sur le long terme, que l'hypothèse d'une fuite par un puits abandonné n'est pas considérée. En parallèle au déroulement des opérations du pilote, un audit par les bases de FEPs pourrait confirmer l'exhaustivité de cette liste de scénarios, dans l'optique du passage à un stockage à long terme.

En l'état, le dossier présenté par TOTAL repose essentiellement sur la composante « probabilité d'occurrence » du risque. Pour un stockage de longue durée, il nous paraît nécessaire de mieux examiner la composante « gravité », en améliorant :

- l'identification des éléments vulnérables par rapport aux aléas ;
- l'évaluation des impacts potentiels de fuite. Le calcul de scénario de puits éruptif montre que les effets d'une fuite en surface demeureraient limités ; une évaluation similaire doit être menée pour les effets d'une fuite dans un aquifère.

Notons toutefois que ces études suscitent des questions qui relèvent du domaine de la recherche.

Une meilleure prise en compte des conséquences des scénarios de fuite à long terme conforterait les arguments de faible probabilité des événements ; elle serait par exemple une façon de traiter le scénario de puits abandonné. Une telle amélioration passe également par la rédaction, dès le pilote d'injection, d'un programme de protection des populations et de l'environnement.

Un tel plan viendrait compléter les mesures de prévention existantes, qui nous semblent adéquates, ainsi que les mesures d'intervention pendant la phase opérationnelle.

### **7.3. IMPACT D'UN SEISME**

La sismicité naturelle de la zone du projet apparaît modérée, et la sismicité induite inexistante. De plus, il est probable que les mouvements sismiques à considérer au niveau du réservoir soient relativement faibles et n'induisent pas d'endommagement du puits ni de réactivation de faille.

Néanmoins, des précisions nous paraissent devoir être apportées au dossier, pour l'autorisation du pilote de stockage, concernant l'origine des niveaux sismiques pris en considération. En particulier, une étude complémentaire doit être menée pour déterminer le spectre de réponse spécifique au site de Rousse, afin de vérifier qu'il est bien inférieur, pour toute la gamme de fréquences considérée, au spectre utilisé comme majorant dans l'étude des effets d'un séisme sur le puits.

Il nous semble de plus nécessaire de réaliser une étude de la sismicité instrumentale afin de confirmer l'absence de sismicité induite et d'événements importants.

### **7.4. LE PLAN DE SURVEILLANCE**

Les mesures proposées dans le plan de surveillance nous paraissent adaptées pour assurer la sécurité et le bon fonctionnement du projet.

Néanmoins, nous demandons la mise en place d'un programme de surveillance des aquifères sus-jacents à proximité du puits RSE.1, ainsi que la conception d'un plan de contrôle des impacts sur la faune et la flore en cas de fuite avérée en surface.

De plus, dans la perspective d'un stockage à long terme, TOTAL devra formuler des propositions sur le programme de la surveillance post-fermeture et sur sa durée, afin de s'assurer de l'efficacité de la rétention du CO<sub>2</sub>, en s'appuyant sur les études scientifiques accompagnant l'exploitation du pilote.

Par ailleurs, au stade du pilote, des précisions dans le dossier nous semblent nécessaires à propos :

- des méthodes de traitement et d'interprétation des données de microsismicité induite ;
- des méthodes et périodicités des mesures de gaz dans les sols et dans l'atmosphère.

## 7.5. CONCLUSION FINALE

L'examen du dossier de demande d'autorisation et des documents annexes fournis par TOTAL nous amène à conclure que :

- le projet d'injection de CO<sub>2</sub> à Rouse ne présente pas de risques majeurs à court terme du point de vue de la sécurité des personnes et de l'environnement immédiat ;
- le site choisi possède des caractéristiques très favorables à la rétention à long terme du CO<sub>2</sub>. Il n'est cependant pas réalisable, dans l'état de l'art, de calculer des taux de fuite prévisibles afin de valider quantitativement les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Il convient de souligner que le projet ne concerne pour le moment qu'un pilote d'injection, mettant en jeu des quantités de CO<sub>2</sub> limitées pour une courte durée, au cours de laquelle la réversibilité est possible. Les exigences à ce stade diffèrent donc de ce qu'il faudra réclamer si ce pilote est réellement converti en stockage à long terme.

Dans ce contexte, les conclusions de notre expertise, rassemblées dans le tableau 5, sont surtout des demandes de précisions sur le dossier. Le complément majeur que nous demandons pour la conception du projet est la mise en place d'un programme de surveillance des aquifères. Nous recommandons également de réaliser un inventaire des enjeux ainsi que de prévoir des mesures de protection de l'homme et de l'environnement et de surveillance des impacts qu'ils subirait, dans l'éventualité d'une fuite en surface.

Signalons encore que ce pilote sera le support de la poursuite de travaux de recherche. Ceux-ci devraient faciliter la réponse aux points dont le traitement pour une demande de stockage à long terme apparaît incomplet dans le dossier actuel. Un certain nombre d'études supplémentaires seraient requises dans ce cas, en particulier :

- des simulations de réservoir, montrant que le CO<sub>2</sub> reste dans les limites prévues ;
- la rédaction et la mise en œuvre d'un plan de fermeture et d'un programme de surveillance post-fermeture ;
- la meilleure prise en compte de la vulnérabilité des enjeux, en particulier par l'évaluation des impacts potentiels d'une fuite sur l'homme et l'environnement, y compris sur les aquifères.

Ces compléments viendraient ainsi corroborer le caractère négligeable des risques locaux aussi bien que globaux sur le long terme.

Tableau 5 : Méthodes de surveillance appliquées et compléments au dossier demandés, en fonction des scénarios énumérés dans l'étude de dangers

|    | Scénario  | Méthode de surveillance mise en œuvre  | Compléments requis pour le pilote  | Compléments pour un stockage à long terme   |
|----|---|--|--|---|
| 1  | Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture                                     | Sismique passive<br>Contrôle de la pression  | Mise en place de la surveillance des aquifères sus-jacents<br>Précisions sur le traitement des données de sismique passive   | Etude de la diffusion d'eau acidifiée dans la couverture                                  |
| 2  | Fuite par des failles existantes  | Sismique passive   | Etude des effets conjoints de la pression et de la température sur la réactivation des failles<br>Mise en place de la surveillance des aquifères sus-jacents<br>Précisions sur le traitement des données de sismique passive | Programme de fermeture :<br>• durée ;<br>• contenu.                                       |
| 3  | Fuite de gaz latérale   | Sismique passive<br>Contrôle de la pression  | Mise en place de la surveillance des aquifères sus-jacents<br>Précisions sur le traitement des données de sismique passive   |   |
| 4  | Fuite du puits au niveau des aquifères supérieurs sus-jacents                         | Contrôle de la pression  | Mise en place de la surveillance des aquifères sus-jacents   |   |
| 5  | Fuite le long du puits vers la surface  | Contrôle du puits, diagraphies<br>Surveillance des gaz dans les sols et l'atmosphère | Précisions sur la surveillance des gaz en surface  | Simulations de réservoir<br>Identification des éléments vulnérables par rapport aux aléas |
| 6  | Dérangements mécaniques du réservoir dus aux réactions géochimiques dans le réservoir | Sismique passive   | Raffinement du maillage pour les simulations géochimiques<br>Précisions sur le traitement des données de sismique passive  | Etude de la gravité d'une fuite :<br>• en surface ;<br>• sur les aquifères.               |
| 7  | Dérangements mécaniques des terrains dus à l'injection                                | Sismique passive   | Précisions sur le traitement des données de sismique passive   | Programme de protection des populations et de l'environnement                             |
| 8  | Dérangement mécanique des terrains sous l'effet des séismes                           | Sismique passive   | Etude de la sismicité instrumentale<br>Calcul d'un spectre de réponse spécifique au site de Rousse   |   |
| 9  | Effet d'un séisme sur le puits  | Contrôle du puits, diagraphies   | Précisions sur le traitement des données de sismique passive   | Contrôle par les FEPs   |
| 10 | Forage ultérieur d'un puits perforant   | Mesures préventives  |  |   |
| 11 | Puits éruptif   | Contrôle du puits<br>Surveillance des gaz dans les sols et l'atmosphère              | Prévision d'un plan de surveillance des impacts sur la faune et la flore<br>Précisions sur la surveillance des gaz en surface  |   |

NB : les couleurs dans le tableau correspondent simplement à un regroupement thématique





## 8. Bibliographie

- Abercrombie R. E.** (1997). Near-surface attenuation and site effects from comparison of surface and deep borehole recordings. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87(3), 731-744.
- André L., Audigane P., Azaroual M., Menjoz A.** (2007) Numerical modeling of fluid-rock chemical interactions at the supercritical CO<sub>2</sub>-liquid interface during CO<sub>2</sub> injection into a carbonate reservoir, the Dogger aquifer (Paris basin, France). *Energy Conversion and Management*, 48, p. 1782-1797.
- Barton C.A., Zoback M.D., Moos D.** (1995). Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*;23:683–6.
- Biot M. A.** (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics* 12, 155-164
- Bouc O., Bellenfant G., Fauconnier D., Guyonnet D., Jacquemet N.** (2006) Critères de sécurité pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Rapport BRGM/RP-55158-FR, 186 p.
- Brown K.M., Kopf A., Underwood M.B., Weinberger J.L.** (2003) Compositional and fluid pressure controls on the state of stress on the Nankai subduction thrust: A weak plate boundary, *Earth and Planetary Science Letters*; 214; 589-603
- Byerlee J.** (1978) Friction of rocks. *PAGEOPH*;116:615–26
- De Luca G., Del Pezzo E., Di Luccio F., Margheriti L., Milana G., Scarpa R.** (1998). Site response study in Abruzzo (Central Italy): Underground array versus surface stations. *J. Seismology*, 2, 223-236.
- Douglas J.** (2006). Estimating strong ground motions at great depths. *Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Grenoble, France, 30 August-1 September 2006. Paper number : 030
- Engelder T., Fischer, M.P.** (1994). Influence of poroelastic behaviour on the magnitude of minimum horizontal stress, Sh, in overpressured parts of sedimentary basins. *Geology* 22, 949–952.
- Engelder T.** (1993). Stress regimes in the lithosphere. Princeton (NJ): Princeton University Press
- Fukushima Y., Gariel J.-C., Tanaka R.** (1995). Site dependent attenuation relations of seismic motion parameters at depth using borehole data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85(6), 1790-1804.

- Garg S. K., and A. Nur** (1973). Effective stress laws for fluid-saturated porous rocks, *Journal of Geophysical Research*, 78(26), 5911-5921.
- Geertsma, J.** (1973). A basic theory of subsidence due to reservoir compaction: the homogeneous case. *Verhandelingen van het Koninklijk Nederlands geologisch mijnbouwkundig Genootschap*. DEEL Vol.28
- GIEC** (2005) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 p.
- Handin J., Hager Jr R.V., Friedman M., Feather J.N.** (1963). Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: pore pressure tests. *Bull Am Assoc Petrol Geol*; 47(5):717–55.
- Handin J.** (1969) On the Coulomb-Mohr failure criterion. *J Geophys Res*: 74(22): 5343–8.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W.** (1979). *Fundamentals of rock mechanics*. London: Chapman and Hall; p. 593.
- Jaeger J.C.** (1963), Extension Failures in Rocks Subject to Fluid Pressure, *Journal of Geophysical Research*, 68, 6066-6067
- McGarr A., Fletcher J.B.** (2005). Development of ground-motion prediction equations relevant to shallow mining-induced seismicity in the Trail Mountain area, Emery County, Utah. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95(1), 31-47.
- Morris A., Ferril D.A., Henderson D.B.** (1996). Slip tendency analysis and fault reactivation. *Geology* ; 24:275–8.
- NF En 1998-1** (2005) – Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments (P06-030-1), AFNOR.
- NF P 06-013** (1995) – Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS92. *Paris, norme française*, AFNOR.
- Nghiem L., Sammon P., Grabenstetter J., Ohkuma H.** (2004) Modeling CO<sub>2</sub> Storage in Aquifers with a Fully-Coupled Geochemical EOS Compositional Simulator, paper SPE 89474, *Proceedings 2004 SPE/DOE 14<sup>th</sup> Symposium on Improved Oil Recovery*, Tulsa, Oklahoma, 17-21 April.
- Paterson M. S., and Wong T.-F.** (2005), *Experimental Rock Deformation-The Brittle Field*, 346 pp., Springer, Berlin.
- Regnault O., Lagneau V., Catalette H., Schneider H.** (2005) Etude expérimentale de la réactivité du CO<sub>2</sub> supercritique vis-à-vis de phases minérales pures. Implications pour la séquestration géologique de CO<sub>2</sub>. *C.R. Geosciences*, 337, p. 1331-1339.

- Rutqvist J., Birkholzer J., Cappa F., Tsang C.-F.** (2007) Estimating maximum sustainable injection pressure during geological sequestration of CO<sub>2</sub> using coupled fluid flow and geomechanical fault-slip analysis. *Energy Conversion and Management* 48 1798–1807
- Scholz C.H.** (1990) *The mechanics of earthquakes and faulting*. New York: Cambridge University Press.
- Segall P., Fitzgerald S. D.** (1998) A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs, *Tectonophysics* 289 ; 117–128
- Sibson R.H.** (2003) Brittle-failure controls on maximum sustainable overpressure in different tectonic stress regimes. *Bull Am Assoc Petrol Geol*;87:901–8.
- Skempton A.W.** (1961) *Effective stress in soil, concrete and rocks*, in *Pore Pressure and Suction in Soils*, pp. 4-16, Butterworths, London.
- Streit J.E., Hillis R.R.** (2004) Estimating fault stability and sustainable fluid pressures for underground storage of CO<sub>2</sub> in porous rock. *Energy*;29:1445–56.
- Shimizu I., Osawa H., Seo T., Yasuike S., Sasaki S.** (1996) Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine. *Engineering Geology*, 43, 107-118.
- Terzaghi K.** (1943) *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, 528 pp., New York
- van der Lee J.** (1998) Thermodynamic and mathematical concepts of CHESSE. *Technical Report Nr. LHM/RD/98/39*, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France.
- Vidal-Gilbert S., Bemer E., Barroux C., Brosse E.** (2006) Hydromechanical behaviour during CO<sub>2</sub> injection, proceeding of Eurock 2006, Proceeding of EUROCK06 – “Multiphysics Coupling and Long Term Behaviour in Rock Mechanisms”, Belgium, Mars 2006
- Van den Bark E., Thomas O.D.** (1980) Ekofisk : First of the giant oil fields in western Europe. In: Hablbouty, M.T. (Ed.), *Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1968–1978*. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem. 30, 195–224.
- Wiprut D., Zoback M.D.** (2000) Fault reactivation and fluid flow along a previously dormant normal fault in the northern North Sea. *Geology* ; 28:595–8.
- Yamamoto K., Koide H.** (2006) Earthquake related fluid migrations: Mechanism, historical record and lessons learnt. *Eighth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-8)*, Trondheim, Norway, 19-22 June 2006.



## **Annexe 1**

### **Circulaire du MEDAD précisant le cadre réglementaire applicable au pilote de Rousse**



18. FEV. 2008 12:15

EXPLO PRODUCT AH 33 1 44970908

N°514 P. 1/3



**DIRECTION GENERALE DE L'ENERGIE  
ET DES MATIERES PREMIERES**

61 boulevard Vincent Auriol  
75703 Paris CEDEX 13

**DIRECTION DE LA PREVENTION  
DES POLLUTIONS ET DES RISQUES**

20 avenue de Ségur  
75302 Paris 07 SP

**DIRECTION DE L'ACTION REGIONALE,  
DE LA QUALITE ET DE LA SECURITE  
INDUSTRIELLE**

5 place des Vins de France  
75573 Paris CEDEX 12

Paris, le 14 FEV. 2008

HC/2008/02/6801

Le Ministre d'État, Ministre de l'écologie, du  
développement et de l'aménagement durables

à

Monsieur le Préfet des Pyrénées-Atlantiques

**Objet :** réalisation d'une opération pilote pour le captage et le stockage géologique de CO<sub>2</sub> dans la région de Lacq

**Nos réf. :**

A l'horizon d'une quinzaine ou d'une vingtaine d'années, les technologies du captage et du stockage du gaz carbonique pourraient être mises en œuvre de manière massive et grandement faciliter la réduction des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, en complément du recours accru aux énergies renouvelables et des efforts nécessaires d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Des travaux de recherche sont encore nécessaires pour réduire les coûts, du captage notamment, et connaître et maîtriser les risques liés aux sites d'injection. Il est donc important de démarrer, en France, des installations de démonstration de captage, de transport et d'injection souterraine de gaz carbonique.

Dans ce contexte, la société TOTAL envisage de réaliser une opération pilote à proximité de l'usine de Lacq et souhaiterait déposer un dossier de demande d'autorisation avant la fin de l'année. Ce projet mettrait en œuvre les installations suivantes :

- sur le site de Lacq, une installation de production d'électricité existante, qui serait modifiée et complétée par une installation de production d'oxygène (Air Liquide) et par une station de compression du CO<sub>2</sub> ;
- une canalisation de transport existante ;
- une station d'injection à réaliser dans le gisement déplété de « Rousse », sur une concession de gaz naturel en cours de validité (concession dite « de Meillon »).

Ce projet a été examiné par les services de la DPPR, de la DGEMP et de la DARQSI, en liaison avec la DRIRE Aquitaine. Compte tenu des techniques mises en œuvre et du fait que l'expérimentation se situe dans le périmètre d'une concession minière, il a été fait le choix d'instruire le projet :

1. au titre de la législation des installations classées, pour ce qui concerne les opérations de captage et de compression du CO<sub>2</sub> ;

2. au titre de la législation minière pour les opérations de transport et de stockage, dans la mesure où la société dispose, du fait de sa concession de gaz, du droit d'utilisation du sol et du sous-sol.

1. Pour ce qui concerne l'instruction au titre de la législation des installations classées, la demande devra porter sur la chaudière convertie en chaudière en combustion à l'oxygène, sur l'unité de production d'oxygène et sur l'installation nouvelle de captage du CO<sub>2</sub>, ainsi que sur les installations connexes, y compris les dispositifs de déshydratation, purification et compression du flux de CO<sub>2</sub>.

L'installation concernée, bien que mettant en œuvre une technologie innovante, est un assemblage d'éléments qui sont indépendamment déjà réglementés au titre de la législation des installations classées. Vous voudrez bien par conséquent appliquer les procédures existantes d'instruction des demandes d'autorisation. La demande devra être présentée par l'exploitant conformément aux dispositions du décret n°77-1133 du 21 septembre 1977. Elle devra notamment décrire précisément l'ensemble des éléments de l'installation ainsi que leurs interactions et elle précisera les modifications apportées aux installations existantes.

La demande sera instruite en portant une attention particulière aux points suivants :

- rejets spécifiques dans l'air et dans l'eau ;
- composition du flux de CO<sub>2</sub> capté et modalités de suivi de cette composition ;
- risques liés au stockage et à l'utilisation de produits dangereux, notamment l'oxygène ;
- procédés nécessitant une pression élevée.

Par ailleurs, l'installation de combustion concernée est intégrée au deuxième plan national d'affectation des quotas (PNAQ II). A ce titre, vous avez notifié à l'exploitant une quantité de quotas qui lui est affectée pour la période 2008-2012. Chaque année, l'exploitant devra restituer au 30 avril au plus tard une quantité de quotas correspondant aux émissions de CO<sub>2</sub> de son installation l'année précédente. Ainsi, lorsque le captage et le stockage du CO<sub>2</sub> seront opérationnels, les quantités émises à l'atmosphère par cette installation seront très fortement réduites et l'exploitant pourra bénéficier comme il l'entend du surplus de quotas ainsi dégagé. Des lignes directrices spécifiques au captage et au stockage du CO<sub>2</sub> seront édictées par la Commission européenne sous peu pour affiner cette approche générale et déterminer comment tenir compte d'éventuelles fuites de CO<sub>2</sub>. Ces lignes directrices seront transposées en droit français, ce avant le premier exercice de déclaration des émissions pour la période 2008-2012 (soit au plus tard début 2009).

2. Pour ce qui concerne l'instruction au titre de la législation minière, la demande devra porter sur un projet de recherche de formations géologiques aptes à stocker « des produits chimiques à destination industrielle » (article 3-1 du code minier). En application de l'article 104-1 (3<sup>ème</sup> alinéa) du code minier, le détenteur d'une concession de mines d'hydrocarbures est autorisé à effectuer des recherches « sans avoir à demander un permis exclusif de recherche de stockage souterrain ».

Dans ce cadre, la demande d'autorisation d'ouverture des travaux miniers pourra être instruite selon le décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 (travaux miniers), dont l'article 3 - 6° soumet à autorisation, pour les stockages souterrains, « les essais d'injection et de soutirage ». Il conviendra en particulier, en application de l'article 41 - V de ce décret, d'établir un programme annuel de travaux indiquant, notamment, les évolutions du dispositif de contrôle de l'extension du volume de CO<sub>2</sub> dans le sous-sol. Compte tenu du cadre législatif utilisé pour cette opération, l'autorisation minière devra préciser les conditions de l'extraction éventuelle du gaz stocké. Les essais d'injection et de stockage seront régis par les dispositions du règlement général des industries extractives, notamment telles qu'elles résultent du décret n° 2000-278 du 22 mars 2000, ainsi que par les mesures particulières que vous jugerez utiles de prescrire par l'arrêté d'ouverture des travaux.



18. FEV. 2008 12:16

EXPLO PRODUCT AH 33 1 44970908

N°514

P. 3/3

3 / 3

Par ailleurs, s'agissant des canalisations minières, utilisées pour le transport de CO<sub>2</sub>, vous pourrez, en tant que de besoin, appliquer les dispositions de l'arrêté du 4 août 2006, dit « arrêté multifluides ».

Les instructions des demandes au titre de la législation des installations classées et de celle des mines devront être conduites simultanément, notamment en ce qui concerne le déroulement des enquêtes publiques ; en conséquence, l'étude d'impact sera commune aux deux procédures et devra s'attacher à présenter l'opération envisagée dans son ensemble.

Vous voudrez bien nous rendre compte des éventuelles difficultés rencontrées lors de l'instruction de cette demande.

Pour le Ministre d'État et par délégation,

Le Directeur de la prévention  
des pollutions et des risques



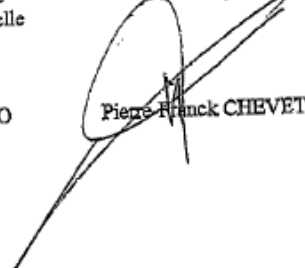
Laurent MICHEL

La Directrice de l'action  
régionale, de la qualité  
et de la sécurité industrielle



Nathalie HOMOBONO

Le Directeur général de l'énergie  
et des matières premières



Pierre-Franck CHEVET

Copie : DIRE Aquitaine



## **Annexe 2**

### **Lettre du DRIRE Aquitaine mandant une tierce expertise du BRGM**





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



AQUITAINE

www.aquitaine.drire.gouv.fr

Service Régional de  
l'Environnement Industriel  
42, rue du Général de Larminat - BP 55  
33035 BORDEAUX CEDEX

Affaire suivie par M. Daniel FAUVRE  
Tél. : 05.56.00.04.43

Courriel: daniel.fauvre@industrie.gouv.fr

DF/ND/EISS /21129 /2008

Bordeaux, le **02 AVR. 2008**

Le Directeur

à

Monsieur le Directeur  
TOTAL E&P FRANCE  
RN 117 – BP 22  
64170 LACQ

Objet : Projet de pilote d'injection de CO<sub>2</sub>.

Réf : Document guide du BRGM - Critères de sécurité pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub>.

Monsieur le Directeur,

Par circulaire du 14 février 2008, le ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables a précisé au Préfet des Pyrénées-Atlantiques les dispositions réglementaires à retenir pour le traitement du projet de pilote de captage et d'injection de CO<sub>2</sub>.

Le BRGM a publié en décembre 2006 un document intitulé : critères de sécurité pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Ce document donne des éléments de référence méthodologiques et techniques pour les projets de stockages mais peuvent aussi avantageusement être exploités dans le cadre d'un pilote tel que celui que vous projetez.

**Une réunion s'est tenue le 21 mars dernier entre vos représentants et mes services en présence du BRGM pour examiner l'état d'avancement du projet.**

Dans la perspective du dépôt du dossier par Total, pour le projet de pilote d'injection de CO<sub>2</sub> sur le site de Rousse, je considère que les éléments de tierce expertise suivants doivent être recueillis auprès du BRGM. Cette expertise devra figurer au dossier soumis à enquête publique et être identifiée en tant que telle. Ainsi le dossier de Total étant attendu pour fin avril 2008, l'expertise en elle-même devra être remise pour le 15 mai afin que l'enquête publique puisse avoir lieu avant l'été. Le choix du BRGM pour procéder à cette expertise a été réalisé en accord avec vous.

Je vous demande donc d'ores et déjà de bien vouloir solliciter cette expertise de la part du BRGM, dont le but sera de déterminer que le projet de Total ne présente pas de risque de fuite significatif et qu'aucune incidence notable sur l'environnement ou sur la santé n'est à craindre. Dans le cas contraire, le BRGM indiquera les moyens supplémentaires à développer pour atteindre cet objectif de façon préventive ou par le renforcement de la surveillance.

1/ En matière de «risque global», c'est-à-dire de relâchement progressif à long terme du CO<sub>2</sub> injecté, au travers de la structure géologique et du puits, je souhaite que le BRGM se prononce sur le choix du site de Rouse et sur la capacité du site a priori à assurer la rétention du gaz sans fuite significative.

Pour cela, il conviendra de tenir compte, au-delà des données historiques relatives à la rétention de gaz naturel assurée par le réservoir, des données descriptives, quantitatives et qualitatives caractéristiques de ce réservoir.

2/ En matière de «risque local», c'est-à-dire de relâchement brutal de CO<sub>2</sub> pouvant nécessiter de prendre des mesures de protection de la population, le BRGM évoque dans le document en référence plusieurs méthodes d'analyses destinées à identifier les scénarios par lesquels une telle fuite pourrait se produire : je souhaite que le BRGM se prononce sur le choix des scénarios -pertinence et exhaustivité- retenus par Total dans son dossier, et sur les mesures de prévention lorsqu'elles existent.

Je souhaite en particulier que le BRGM porte un avis sur les éléments du dossier relatifs à l'évaluation des conséquences d'un séisme, ce point renvoyant à l'analyse du risque local et du risque global.

Sur la question particulière de l'état et de la reconfiguration du puits d'injection, une diagraphie et un diagnostic de l'état métallurgique des tubes devront être réalisés et leurs résultats expertisés par un organisme compétent ayant obtenu l'accord préalable de la DRIRE. Cette expertise pourra intervenir après l'enquête publique compte tenu du planning des travaux sur le puits mais sera nécessaire à l'instruction du dossier.

En outre, je souhaite que l'intérêt et la faisabilité technique de la mise en œuvre de vannes intermédiaires, en complément de la vanne de tête, soient évalués dans le cadre de l'expertise préalable du BRGM.

3/ Le dossier doit présenter un plan de surveillance dont l'objet est de valider l'ensemble du dispositif de captage et de stockage de CO<sub>2</sub>. Outre l'évaluation de la nature, des quantités et de la pression du gaz injecté, il s'agit de vérifier le comportement du stockage notamment par des dispositifs tels que les mesures de micro sismiques, et par la détection de fuites de gaz au niveau du puits et à la surface du sol.

Je souhaite que le BRGM rende un avis sur les moyens mis en œuvre au travers de ce plan de surveillance :

- pour assurer la protection des populations et de l'environnement en précisant notamment si ce plan est adapté aux scénarios de fuite envisageables, et si les mesures prévues (nature et périodicité) leur sont appropriées;

- vis-à-vis de l'objectif consistant à vérifier l'aptitude de ce type de solution à assurer la rétention du gaz à long terme avec un taux de fuite adapté aux enjeux du changement climatique qui vise plus la fonction expérimentation et conduite de celle-ci que la fonction stockage.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Directeur, mes sincères salutations.

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



Daniel FAUVRE

PJ ..... /  
Copie ..... Mr le Préfet des Pyrénées-Atlantiques  
DGEMP/DIREM : 1<sup>ère</sup> sous-direction  
P. RUSSAC  
GS 64  
Classement DEISS ... P:\3 THEMES\32 UEI\328 Bilan de fonctionnement\Actions régionales\cadrage BRGM.doc

## **Annexe 3**

# **Evaluation de la réactivation des failles bordières par l'effet de la pression seule et par l'effet conjoint de la pression et de la thermique**





## a) ASPECTS THEORIQUES

On adopte la convention d'écriture suivante : une contrainte positive correspond à un état de contrainte en compression et donc une contrainte négative correspond à un état en traction.

- **Notion de contrainte effective**

Plusieurs études ont démontré l'influence de l'augmentation de la pression de pore P dans la rupture des roches et dans la réactivation des fractures (Terzaghi, 1943 ; Skempton, 1961 ; Handin *et al.*, 1963 ; Jaeger, 1963 ; Garg and Nur, 1973 ; Paterson and Wong, 2005).

Leurs études montrent que la rupture des roches composées d'un réseau de pores connectés est contrôlée par la contrainte effective  $\sigma'$  de Terzaghi défini comme suit :

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - bP\delta_{ij} \quad (1)$$

Avec  $\sigma$  la contrainte totale, b le coefficient de Biot et  $\delta$  le symbole de Kronecker ( $\delta_{ij}= 1$  si  $i=j$  et 0 sinon).

- **Notion de mode de rupture et critères**

La rupture d'une roche peut survenir selon deux modes : 1) un premier mode de rupture en traction (mode I) et 2) un mode dit « en cisaillement » (mode II). Alors que le premier mode correspond à la création de fractures (et donc de nouveaux chemins préférentiels de fuite du CO<sub>2</sub> par fracturation), on ne considèrera, dans le deuxième mode, que la réactivation par cisaillement de fractures / failles préexistantes, qui est un phénomène « critique » permettant de définir la pression maximale d'injection (Sibson, 2003).

- Mode I : la fracturation est gouvernée par la contrainte effective mineure  $\sigma'_3$ , qui est comparée soit à la résistance en traction  $\sigma_T$  de la matrice rocheuse (ou d'une fracture existante). Le critère de fracturation est donc :

$$\sigma'_3 + \sigma_T \geq 0 \quad (2)$$

Ce critère est activé lorsque la contrainte effective mineure rentre en régime de traction (*i.e.*  $\sigma'_3 < 0$ ).

- Mode II : l'analyse de réactivation des fractures / failles préexistantes est conduite sur la base de l'amplitude et de l'orientation des contraintes principales ( $\sigma_3$  ;  $\sigma_1$ ) en fonction de la pression de pore P dans la fracture et de l'orientation  $\theta$  du plan de fracture (Streit *et al.*, 2003 et Wiprut et Zoback, 2000). En considérant une fracture dans un élément de roche (figure 1a), on définit la contrainte normale  $\sigma_n$  et tangentielle  $\tau$  (dit « contrainte de cisaillement ») au

plan de la fracture. La contrainte normale effective  $\sigma'_n$  s'oppose au glissement de la fracture le long de son plan.

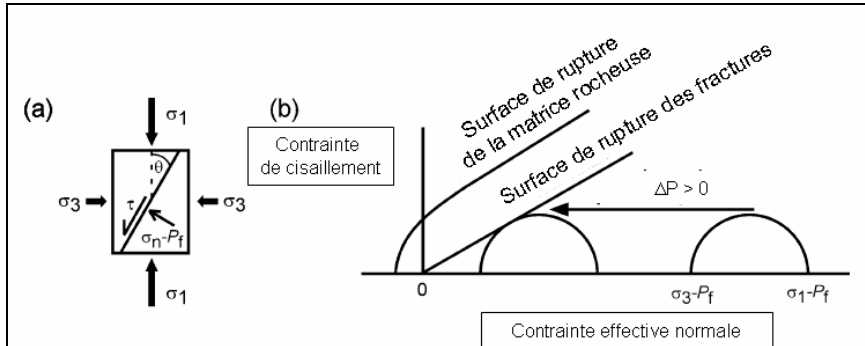


Figure 1 : a) contraintes sur le plan d'une fracture  
b) état de contrainte dans le diagramme de Mohr et effet de l'augmentation homogène de la pression

Le critère de réactivation des fractures / failles préexistantes suit le critère de Coulomb, que l'on écrit comme suit :

$$|\tau| - \mu(\sigma_n - bP) - C \leq 0 \quad (3)$$

Avec C la cohésion et  $\mu$  le coefficient de frottement.

Les observations in situ (e.g. Streit et Hillist, 2004) ont montré que les valeurs de  $\mu$  varient entre 0.6 et 0.85 (Barton *et al.*, 1995). Notons que la borne inférieure de cet encadrement peut être plus basse du fait de la présence de minéraux argileux (Byerlee, 1978 et Handin, 1969 et plus récemment Brown *et al.*, 2003).

Ces deux grandeurs peuvent être définies à partir des contraintes effectives principales telles que (en 2D) :

$$|\tau| = 0.5(\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin(2\theta) \text{ et } \sigma'_n = 0.5(\sigma'_1 + \sigma'_3) - 0.5(\sigma'_1 - \sigma'_3) \cos(2\theta) \quad (4)$$

Avec  $\theta$  l'orientation du plan de la faille / fracture par rapport à la direction de la contrainte principale (voir figure 1a).

Ainsi, l'augmentation uniforme de la pression de pore dans l'échantillon considéré (figure 1a) conduit à la diminution de la contrainte normale effective  $\sigma'_n$  et diminue donc la résistance au cisaillement. Ce phénomène est représenté dans le diagramme de Mohr : l'état des contraintes ( $\sigma'_n$ ;  $\tau$ ) des fractures selon toutes les orientations  $\theta$  est représenté par un demi-cercle (« de Mohr »). On notera que lors d'une augmentation uniforme de pression (figure 1b), le cercle de Mohr est translaté vers la courbe définissant le critère de réactivation sans modification de son rayon.

## b) EVALUATION DES CONTRAINTES INITIALES (AU DEBUT DE L'INJECTION)

Les contraintes initiales sont évaluées en se plaçant dans le régime de contrainte le plus contraignant à la transition entre la couverture de l'Albo-Aptien et le réservoir de Mano sur les coupes EO et NS (d'après le rapport technique d'évaluation de l'effet de la déplétion sur les failles bordières [5]). La tendance à la réactivation est fortement influencée par la différence entre  $\sigma'_1$  et  $\sigma'_3$  *i.e.* le rayon du cercle de Mohr : en effet plus le rayon est important plus la possibilité de rupture est grande. Le régime de contrainte le plus contraignant est celui pour lequel le rapport des contraintes effectives horizontales et celles verticales (dit « coefficient des terres ») est le plus faible, à savoir l'hypothèse H1 et B1. En reprenant les données du mémo technique sur l'effet thermique fourni par Total ([4]), on donne les valeurs des contraintes dans cette configuration pour un coefficient de Biot de 70% :

Table 1 : Etat initial des contraintes dans le plan NS

| Contrainte totale horizontale initiale | Pression de pore initiale | Contrainte effective horizontale initiale | Coefficient des terres NS | Contrainte effective verticale initiale | Contrainte totale verticale initiale |
|--|---------------------------|---|---------------------------|---|--------------------------------------|
| $\sigma_3(0)$                          | $P(0)$                    | $\sigma_3(0)$                             | $K'NS$                    | $\sigma'_1(0)$                          | $\sigma_1(0)$                        |
| [MPa]                                  | [MPa]                     | [MPa]                                     | [-]                       | [MPa]                                   | [MPa]                                |
| <b>68.5</b>                            | <b>47.5</b>               | <b>35.25</b>                              | <b>0.38</b>               | <b>92.76</b>                            | <b>126.01</b>                        |

On remarquera que dans les deux plans EO et NS, nous prenons la même valeur de contrainte horizontale totale initiale (*i.e.* celle fournie dans le mémo technique sur l'effet thermique ([4])), les échelles sur les figures du rapport sur la déplétion ([5]) étant trop importantes pour une lecture précise.

Table 2 : Etat initial des contraintes dans le plan EO

| Contrainte totale horizontale initiale | Pression de pore initiale | Contrainte effective horizontale initiale | Coefficient des terres EO | Contrainte effective verticale initiale | Contrainte totale verticale initiale |
|--|---------------------------|---|---------------------------|---|--------------------------------------|
| $\sigma_3(0)$                          | $P(0)$                    | $\sigma_3(0)$                             | $K'NS$                    | $\sigma'_1(0)$                          | $\sigma_1(0)$                        |
| [MPa]                                  | [MPa]                     | [MPa]                                     | [-]                       | [MPa]                                   | [MPa]                                |
| <b>68.5</b>                            | <b>47.5</b>               | <b>35.25</b>                              | <b>0.37</b>               | <b>95.27</b>                            | <b>128.52</b>                        |

On remarquera que le régime des contraintes dans la couverture reste extensif (coefficient des terres inférieur à 1.0), quelle que soit l'hypothèse considérée. De ce fait, on suppose que lors de l'injection la contrainte effective mineure reste la contrainte horizontale.

## c) EVALUATION DE L'EVOLUTION DE LA CONTRAINTE EFFECTIVE VERTICALE LORS DE L'INJECTION

En se basant sur Engelder (1993), on suppose que la contrainte totale verticale reste inchangée lors de l'injection, car la surface du sol est une surface libre.

$$\sigma_1'(\text{fin\_injection}) = \sigma_1(0) - b(P^{\text{cap}}(0) + \Delta P) \quad (5)$$

Comme la couverture est une couche très peu perméable, la pression de pore finale à la fin de l'injection est difficilement quantifiable analytiquement. On se place dans une configuration très contraignante en supposant que la pression de pore est identique dans le réservoir et dans la couverture. Cette hypothèse se justifie, car les modélisations couplées (e.g. Rutqvist *et al.*, 2007) ont montré qu'il existe une zone de la couverture dont la pression de pore varie selon celle du réservoir (on parlera de zone de transition) *i.e.* la variation de pression entre deux couches aux propriétés hydrauliques différentes n'est pas franche, mais bien graduelle. Dans ce contexte on suppose que la variation de pression de pore dans la couverture correspond à celle dans le réservoir soit :

$$\Delta P = P^{\text{réservoir}}(\text{fin injection}) - P^{\text{réservoir}}(0) = 11.1 - 2.4 = 8.7 \text{ MPa}$$

On notera que l'on a pris la valeur maximale de pression de pore évaluée dans l'étude de sensibilité du rapport qui a servi à Total pour l'étude de dangers ([7]).

#### **d) EVALUATION DE L'EVOLUTION DE LA CONTRAINTE TOTALE HORIZONTALE SOUS L'EFFET DE L'INJECTION**

On se base sur l'étude de Engelder et Fischer (1994), qui considèrent une géométrie simplifiée du réservoir, vu comme une couche horizontale mince et suppose que l'injection a un effet négligeable sur les déformations horizontales. Cela conduit à considérer l'évolution suivante de la contrainte totale mineure :

$$\sigma_3(\text{fin\_injection}) = \sigma_3(0) + \frac{b(1-2\nu)}{1-\nu} \Delta P \quad (6)$$

Avec l'indice 0 correspondant à l'état initial au début de l'injection (donc à la fin de la déplétion),  $b$  le coefficient de Biot,  $\nu$  le coefficient de Poisson, le deuxième terme correspond à l'effet dit « poroélastique ».

#### **e) EVOLUTION DE LA CONTRAINTE TOTALE HORIZONTALE SOUS L'EFFET DE L'INJECTION D'UN FLUIDE FROID**

On se base sur le mémo fourni par Total pour l'évaluation de l'effet thermique ([4]), qui donne l'évolution de la contrainte totale mineure :

$$\sigma_3(\text{fin\_injection}) = \sigma_3(0) + \frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta T \quad (7)$$

Avec  $E$  le module Young,  $\nu$  le coefficient de Poisson,  $\alpha$  le coefficient d'expansion thermique et  $\Delta T$  la différence de température, le deuxième terme correspond à l'effet dit « thermoélastique ».

L'évolution de la contrainte effective mineure prenant en compte à la fois l'effet de la différence de pression et de celle de la température (équation (6) et (7)) est donnée par :

$$\sigma_3'(\text{fin\_injection}) = \sigma_3(0) + \frac{b(1-2\nu)}{1-\nu} \Delta P + \frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta T - b(P^{\text{cap}}(0) + \Delta P) \quad (8)$$

On notera que l'effet thermo- et poro- élastique aura pour conséquence une modification du rayon du cercle de Mohr (figure 2) contrairement à une augmentation uniforme de la pression de pore (figure 1b).

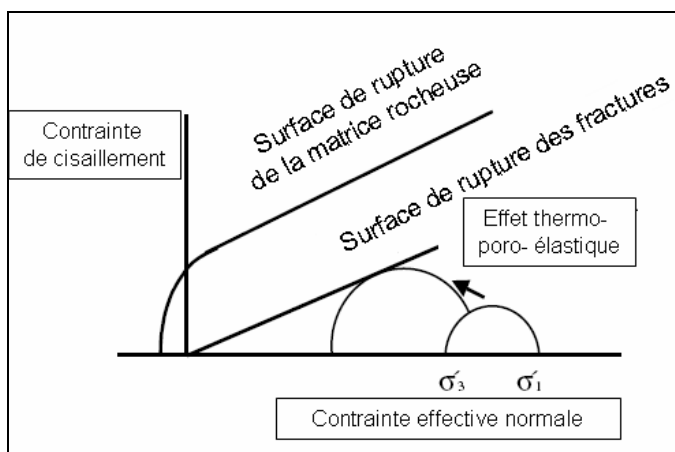


Figure 2 : Exemple d'un effet thermo- et poro- élastique sur le cercle de Mohr

## f) VALIDATION DE L'HYPOTHESE DE DEFORMATION UNIAXIALE

L'hypothèse d'Engelder et Fischer (1994) peut être validée en s'appuyant sur l'étude de Segall et Fitzgerald, 1998, dans laquelle une géométrie plus compliquée (forme ellipsoïdale) du réservoir est introduite. Les facteurs de corrections géométriques introduits font intervenir le ratio entre le rayon  $R$  et la demi hauteur  $h$  du réservoir. En prenant  $h=125/2$  m (valeur du mémo [4]) et  $R$  évalué entre 1000 et 1500 m (d'après les figures fournies dans le rapport [5]), le ratio vaut environ 0.06. Sur le site de Ekofisk (Van den Bark and Thomas, 1980), le ratio vaut 0.04 et les contraintes horizontales mesurées par rapport à celle calculées étaient en accord. Ce résultat valide donc l'hypothèse d'un réservoir semi-infini.

## g) SENSIBILITE A LA REACTIVATION DES FAILLES BORDIERES

Comme suggéré dans Streit et Hillis, 2004, et Morris, 1996, la sensibilité à la réactivation par cisaillement peut être évaluée en estimant le rapport entre la contrainte de cisaillement et la contrainte normale effective. On évalue la sensibilité à la

réactivation des failles en supposant que la cohésion est nulle et que le coefficient de frottement est  $\mu=0.6$ . On gardera à l'esprit que cette valeur peut être plus basse du fait de la présence de minéraux argileux (Byerlee, 1978 et Handin, 1969 et plus récemment Brown *et al.*, 2003), ce qui n'est pas à exclure. Nous rappelons la description donnée pour la couverture est celle d'une brèche à éléments calcaire et ciment marneux.

On reprend les hypothèses sur les propriétés matériaux décrites dans le mémo technique sur l'effet thermique ([4]). On les rappelle dans le tableau suivant:

Table 3 : Propriétés de la couverture

| Module de Young | Coefficient de Poisson | Coefficient d'expansion thermique | Coefficient de Biot |
|-----------------|------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| E               | $\nu$                  | $\alpha$                          | b                   |
| [Gpa]           | [-]                    | [1/°C]                            | [-]                 |
| <b>10</b>       | <b>0.33</b>            | <b>1.00E-05</b>                   | <b>0.7</b>          |

On définit également le chargement suivant :

Table 4 : Chargement

| Différence de pression | Différence de température | Effet poroélastique         | Effet thermoélastique      |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| $\Delta P$             | $\Delta T$                | $b(1-2\nu)/(1-\nu)\Delta P$ | $\alpha E/(1-\nu)\Delta T$ |
| [MPa]                  | [°C]                      | [MPa]                       | [MPa]                      |
| <b>8.70</b>            | <b>-31.00</b>             | <b>3.09</b>                 | <b>-4.63</b>               |

La contrainte effective majeure (*i.e.* verticale) dans le plan EO vaut (équation (5)) :

$$\sigma_1'(\text{fin\_injection}) = \sigma_1(0) + b(P^{\text{cap}}(0) + \Delta P) = 128.52 - 0.7 * (47.5 + 8.7) = 89.18 \text{ MPa}$$

La contrainte effective majeure (*i.e.* verticale) dans le plan NS vaut (équation (5)) :

$$\sigma_1'(\text{fin\_injection}) = \sigma_1(0) + b(P^{\text{cap}}(0) + \Delta P) = 126.01 - 0.7 * (47.5 + 8.7) = 86.67 \text{ MPa}$$

La contrainte effective mineure (*i.e.* horizontale) vaut (équation (8)) :

- Après injection de CO<sub>2</sub>, à la même température que le massif : 32.25 MPa
- Après injection de CO<sub>2</sub>, à la température de 119 °C : 27.62 MPa

On évalue la sensibilité au cisaillement (équation (3,4)) en pourcentage par rapport à  $\mu=0.6$  sur la faille bordière d'orientation 65° dans le plan EO par rapport à l'horizontale d'après les études géologiques fournies par Total.

Table 5 : Sensibilité au cisaillement de la faille bordière dans le plan EO

| Contrainte de cisaillement (effet pression) | Contrainte effective normale (effet thermique) | Ratio cisaillement / contrainte normale | pourcentage / $\mu=0.6$ | Contrainte de cisaillement (effet thermique et pression) | Contrainte effective normale (effet thermique et pression) | Ratio cisaillement / contrainte normale (effet pression et thermique) | pourcentage / $\mu=0.6$ |
|---|--|---|-------------------------|--|--|---|-------------------------|
| $\tau$                                      | $\sigma'n$                                     | $\tau/\sigma'n$                         |                         | $\tau$   | $\sigma'n$   | $\tau/\sigma'n$   |                         |
| [MPa]                                       | [MPa]  | [-]                                     | [%]                     | [MPa]  | [MPa]  | [-]   | [%]                     |
| <b>21.81</b>                                | <b>42.42</b>                                   | <b>0.51</b>                             | <b>-14.32</b>           | <b>23.57</b>   | <b>38.61</b>   | <b>0.61</b>   | <b>1.74</b>             |

On évalue la sensibilité au cisaillement (équation (3,4)) en pourcentage par rapport à  $\mu=0.6$  sur les failles bordières d'orientation 60° dans le NS par rapport à l'horizontale d'après les études géologiques fournies par Total.

Table 6 : Sensibilité au cisaillement de la faille bordière dans le plan NS

| Contrainte de cisaillement (effet pression) | Contrainte effective normale (effet thermique) | Ratio cisaillement / contrainte normale | pourcentage / $\mu=0.6$ | Contrainte de cisaillement (effet thermique et pression) | Contrainte effective normale (effet thermique et pression) | Ratio cisaillement / contrainte normale (effet pression et thermique) | pourcentage / $\mu=0.6$ |
|---|--|---|-------------------------|--|--|---|-------------------------|
| $\tau$                                      | $\sigma'n$                                     | $\tau/\sigma'n$                         |                         | $\tau$   | $\sigma'n$   | $\tau/\sigma'n$   |                         |
| [MPa]                                       | [MPa]  | [-]                                     | [%]                     | [MPa]  | [MPa]  | [-]   | [%]                     |
| <b>23.56</b>                                | <b>45.85</b>                                   | <b>0.514</b>                            | <b>-14.35</b>           | <b>25.57</b>   | <b>42.38</b>   | <b>0.603</b>  | <b>0.54</b>             |

## h) ANALYSE ET SYNTHÈSE DES RESULTATS

Ce calcul d'ordre de grandeur met en évidence deux points :

- L'effet de la pression seule sur les failles bordières restera faible : le seuil de réactivation n'est pas atteint (dans le plan NS ou EO) et la marge par rapport au seuil est évalué à près de 15 %.
- L'effet conjoint de la pression et de la thermique est plus contraignant. Le seuil de réactivation est atteint et dépassé. Par contre, le dépassement du seuil reste faible (environ 1 % dans le cas EO). Le risque de réactivation des failles par cet effet conjoint est jugé, certes faible, mais non négligeable en particulier dans l'optique de demande d'autorisation d'exploiter.





## **Annexe 4**

# **Evaluation de la surrection liée à l'injection**



L'évaluation se base sur l'étude de Geertsma, 1973 en supposant que l'ensemble du massif reste dans le domaine élastique. Il est établi que le ratio des déplacements verticaux en surface et ceux au niveau du réservoir vaut environ 1.5 A (pour un coefficient de Poisson de 0.3), A étant un coefficient tabulé qui dépend de la géométrie considérée (rayon du réservoir et profondeur d'injection). Ainsi pour un réservoir de rayon environ 1500 m et une injection à 4500 m, le ratio vaut environ 5 %.

On évalue les déplacements verticaux au niveau du réservoir lors de l'injection en se basant sur le critère établi pour l'évaluation de la compaction lors de la déplétion du réservoir dans le mémo fourni par Total sur l'évaluation de l'impact de la thermique ([4]).

$$\Delta H = b \frac{(1-2\nu)*(1+\nu)}{E(1-\nu)} H \Delta P \quad (9)$$

Avec b le coefficient de Biot,  $\nu$  le coefficient de Poisson, E le module de Young, H la hauteur du réservoir et  $\Delta P$ , la variation de pression de pore dans le réservoir.

Nous utilisons les valeurs des données matériaux du dit mémo, à savoir  $b=0.37$ ,  $\nu=0.3$ ,  $E=75$  GPa et  $H=125$  m. On considère une pression initiale avant injection de 2.4 MPa et une pression finale maximale attendue telle que  $P_f=11.1$  MPa, soit  $\Delta P=8.7$  MPa (d'après l'étude [7] qui a servi de support à Total pour l'étude de dangers).

Cela correspond à une valeur très faible de 4 mm et donc une répercussion en surface négligeable inférieure au millimètre.



## **Annexe 5**

# **Evolution de la réglementation parasismique**



## a) LA REGLEMENTATION EN VIGUEUR

Les stockages de gaz souterrains sont en général soumis à l'octroi d'un permis, accordé en Conseil d'Etat, au titre du Code Minier. Ils peuvent ainsi être considérés « à risque spécial » selon la terminologie de la réglementation parasismique en vigueur. Dans la description des effets d'un séisme sur le puits il est indiqué que le spectre retenu est « *un spectre sismique majorant utilisé pour déterminer le risque sismique de la plateforme de Lacq* ». Il semblerait donc que le site de Rousse soit assimilé à un site « à risque spécial » (comme c'est le cas de la plateforme de Lacq). **Si c'est le cas**, le site est donc soumis à l'arrêté ministériel du 10 mai 1993 fixant les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les installations classées. Si ce n'est pas le cas, la réglementation pour les installations « à risque normal » s'applique. Il s'agit des règles dites « règles PS92 » (AFNOR, 1995) qui fournissent les mouvements sismiques réglementaires pour les bâtiments selon leur classe d'importance et la catégorie de sol sur laquelle ils sont situés et la zone sismique dans laquelle ils se trouvent.

Comme indiqué dans l'étude d'impact, le puits d'injection est situé sur la commune de Jurançon et le réservoir s'étend, sur environ 2 km<sup>2</sup>, sur la commune de Jurançon et éventuellement sur les communes de Saint-Faust, Gan et Gelos. Ces communes sont toutes classées en zone de sismicité Ib (« sismicité moyenne ») selon l'article R363-4 du Code de l'Environnement (décret n°2007-1467 du 12 octobre 2007) qui reprend le décret n°91-461 du 14 mai 1991.

**Dans le cas où le site serait classé « à risque spécial »**, il serait alors préconisé de suivre les termes de la réglementation française, régie par le décret n°91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique et plus particulièrement par l'arrêté ministériel du 10 mai 1993 fixant les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les ouvrages à "risque spécial", ainsi que par sa circulaire d'application du 27 mai 1994.

Comme précisé dans les articles 2 et 3 de l'arrêté du 10 mai 1993, le mouvement sismique retenu doit correspondre à un Séisme Maximum Historiquement Vraisemblable (SMHV) avec la majoration de 1 degré conduisant au Séisme Majoré de Sécurité (SMS). Cette démarche est basée sur une évaluation déterministe de l'aléa sismique régional.

Cette étude débouche sur l'évaluation des niveaux des SMHV et SMS à retenir sur le site.

Pour information, l'approche spécifique consiste pour ce type d'étude à :

- identifier les sources sismiques, par une analyse sismotectonique ;
- définir l'intensité du SMHV (séisme maximum historiquement vraisemblable) et du SMS (séisme majoré de sécurité) sur le site. Cette définition conduit à fixer les hypothèses de sollicitations sismiques (caractéristiques des sources, distance focale) à retenir pour le calcul

des spectres de réponse élastique horizontaux au rocher horizontal affleurant ;

- calculer les spectres de réponse élastique horizontaux pour une condition standard de sol (rocher horizontal affleurant) ;
- calculer les spectres de réponse élastique horizontaux tenant compte des conditions géotechniques particulières du site.

## b) EVOLUTION DE LA REGLEMENTATION

Cette réglementation parasismique est en cours de modification. Les deux principaux éléments de la prise en compte de l'aléa sismique, le zonage sismique d'une part et les mouvements sismiques de référence d'autre part seront ainsi modifiés. Les spectres réglementaires seront définis dans le futur arrêté relatif à la législation parasismique dont la publication est prévue au plus tôt pour le second semestre 2008. Cette future réglementation est basée sur les Eurocode 8 (EC8) dont l'annexe nationale vient d'être publiée en décembre 2007 (AFNOR NF EN 1998-1/NA).

Concernant le zonage, le site du « Plan Séisme » ([www.planseisme.fr](http://www.planseisme.fr)) précise ainsi cette évolution de la réglementation (comme il est rappelé dans l'étude d'impact) :

« L'ancien zonage, qui date de 1985, est basé sur une approche de type **statistique**. L'évolution des connaissances scientifiques et de la réglementation parasismique à l'échelle européenne (Eurocode 8) a nécessité une réévaluation du zonage en se basant sur une approche de type **probabiliste** (prise en compte des périodes de retour). Ce nouveau zonage facilitera également l'application des nouvelles normes de construction parasismique EC8 (Eurocode 8) : ces règles européennes sont aussi basées sur une approche probabiliste et permettent une harmonisation des normes avec d'autres pays européens.

De plus, contrairement au précédent zonage qui était basé sur des limites cantonales, ces limites seront désormais communales. ».

Ainsi une nouvelle carte de l'aléa sismique établie selon une méthodologie probabiliste a été présentée en conférence de presse le 21/11/2005 par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. La future carte du zonage sismique réglementaire devrait être très proche de cette carte de l'aléa sismique (voir figure 3).

Concernant les mouvements forfaitaires, ils seront précisés dans un arrêté ministériel qui sera publié au second semestre 2008 au plus tôt. Un arrêté précisera également les mouvements de références pour les installations « à risque spécial ». Cependant, une version de travail de cet arrêté a déjà été soumise début avril 2008 aux industriels concernés dans le cadre d'une consultation en vue de la publication prochaine de cet arrêté.

Le MEEDDAT invite les industriels à essayer d'anticiper le plus tôt possible l'utilisation de l'Eurocode 8 dans leurs projets en tenant compte de l'évolution du zonage.



A titre indicatif, voici la carte de l'aléa sismique de la France pour la région du stockage de Rousse :

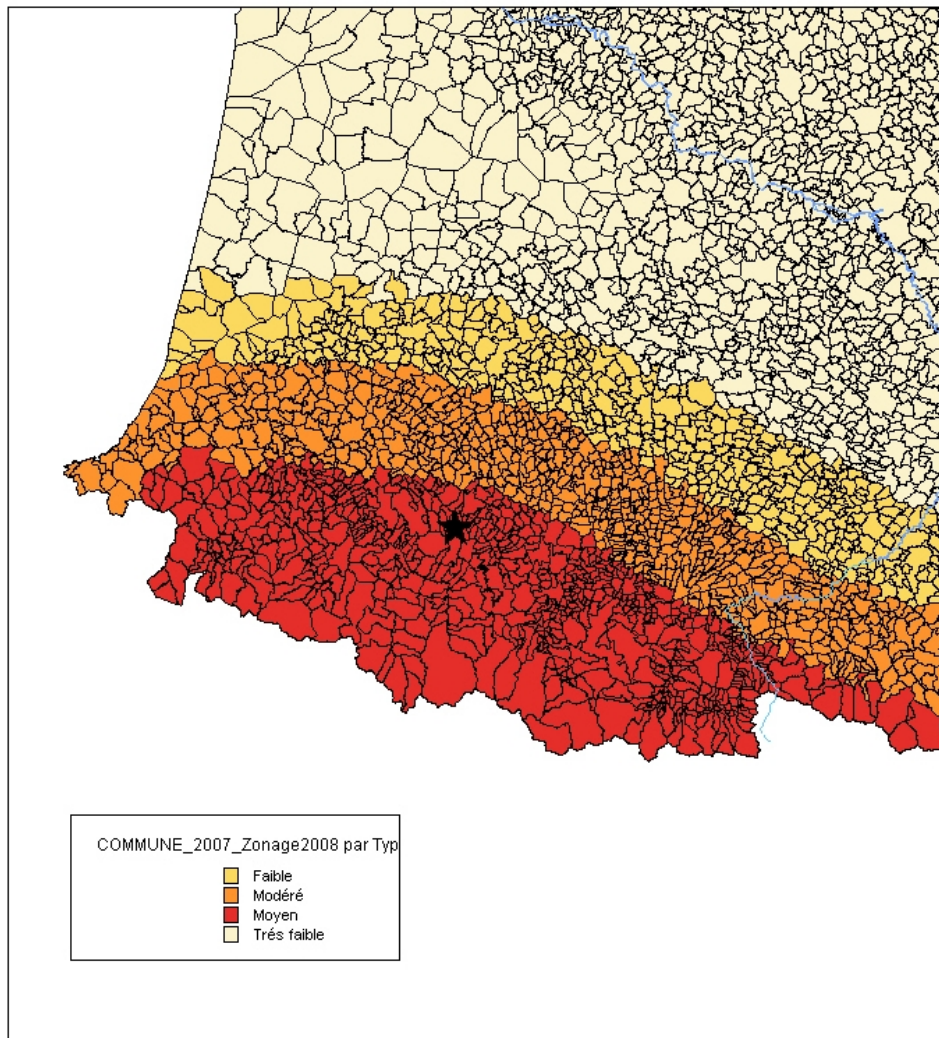


Figure 3 : Aléa sismique de la France (MEEDDAT) – Région du stockage de Rousse (étoile noire)

Sur cette carte d'aléa le site du stockage de Rousse est situé dans la zone d'aléa « moyen », qui constitue la zone d'aléa la plus élevée pour la France métropolitaine et ainsi la zone sismique réglementaire associée impliquera des niveaux d'accélération relativement élevés (accélérations de calage de l'ordre de 1.6 m/s<sup>2</sup> selon les projets de texte).

**c) PRISE EN COMPTE DU CONTEXTE REGLEMENTAIRE DANS L'ETUDE DES DANGERS**

Dans l'étude des dangers fournie par Total, la prise en compte du contexte réglementaire se limite à la carte du zonage sismique de 1991, sans référence aux mouvements sismiques associés utilisés dans les études.

Il conviendrait ainsi de prendre en compte le contexte réglementaire en vigueur, quelque soit le statut des installations au niveau du stockage de Rousse (installations « à risque spécial » ou « à risque normal ») et indiquer clairement les valeurs d'accélération utilisés. Il pourrait par ailleurs être judicieux d'anticiper la publication de la nouvelle réglementation parasismique et le nouveau zonage sismique, comme cela a semble-t-il été fait dans l'étude sur les effets d'un séisme sur le puits. En effet dans ce zonage, la région du site est placée dans la zone de sismicité la plus élevée pour la France métropolitaine.

## **Annexe 6**

# **Etude bibliographique sur les accélérations maximales en profondeur**



Une étude des mouvements forts à grande profondeur a été menée par Douglas (2006). Elle est résumée ci-dessous :

### **a) INTRODUCTION**

Indépendamment de la distance, le mouvement sismique en profondeur n'est pas le même que celui observé en surface (e.g. Fukushima *et al.*, 1995). Les raisons en sont les suivantes :

1. l'effet de surface libre, en théorie, diminue d'un facteur deux le mouvement en profondeur par rapport au mouvement en surface ;
2. le rocher en surface est, en général, moins dur – les vitesses de propagation des ondes y sont plus faibles – que celui en profondeur, le mouvement en surface peut subir une amplification ;
3. l'atténuation des hautes fréquences du sol est moindre en profondeur qu'en surface (Abercrombie, 1997) ;
4. l'effet d'interférence entre les ondes montantes et descendantes et des phénomènes de diffraction peuvent aussi atténuer le mouvement en profondeur.

Nous supposons que le mouvement sismique dans le site de stockage peut être considéré comme un mouvement sismique en profondeur.

Des articles existent sur l'évaluation du mouvement en profondeur, mais la plupart d'entre eux présentent des expériences sur des mouvements enregistrés à une profondeur inférieure à 100 m avec fréquemment des remplissages sédimentaires au dessus. Le site web: <http://www.crustal.ucsb.edu/~steidl/research/ArrayTable.htm> donne une liste des instruments en profondeur du monde actualisée en mars 2001. Il liste les réseaux comprenant des instruments installés à des profondeurs supérieures à 100 m dans le rocher, *i.e.* : Whitshell Pinarig, Manitoba (Canada) (420 m en granite) ; Vineyard Canyon, Parkfield, (Etats Unis) (198 m au rocher) ; Tomioka (Japon) (950 m en grès) ; Shiroyama (Japon) (239 m au rocher) ; Oroville (Etats Unis) (475 m au rocher fracturé) ; Joaquim North, Parkfield (Etats Unis) (198 m au rocher) ; Iwaki (Japon) (330 m en grès) ; Cajon Pass (Etats Unis) (2900 m au rocher mou). Enfin, le réseau accélérométrique japonais KiK-Net ([http://www.kik.bosai.go.jp/kik/index\\_en.shtml](http://www.kik.bosai.go.jp/kik/index_en.shtml)) possède plusieurs instruments en profondeur, mais aucune comparaison n'a été encore publiée sur ces données.

Quatre articles ont été publiés avec des études sur le mouvement à des profondeurs de l'ordre de plusieurs centaines de mètres. Il s'agit de : De Luca *et al.* (1998), Fukushima *et al.* (1995), McGarr et Fletcher (2005) et Shimizu *et al.* (1996).

### **b) DE LUCA ET AL. (1998)**

De Luca *et al.* (1998) donnent le rapport des spectres de Fourier entre le mouvement du sol en surface et le mouvement à une profondeur maximum de 1410 m sous une

montagne (Massif Gran Sasso en Italie). Cette montagne est composée du calcaire de faible résistance mécanique. Ils trouvent que les mouvements aux différentes stations sous la montagne, à différentes profondeurs (environ 400 m jusqu'à 1410 m), sont assez similaires. La figure 4 montre les rapports calculés entre les spectres de Fourier en surface et les spectres de Fourier en profondeur. Il y a un facteur maximal d'environ 4 entre les spectres en surface et en profondeur.

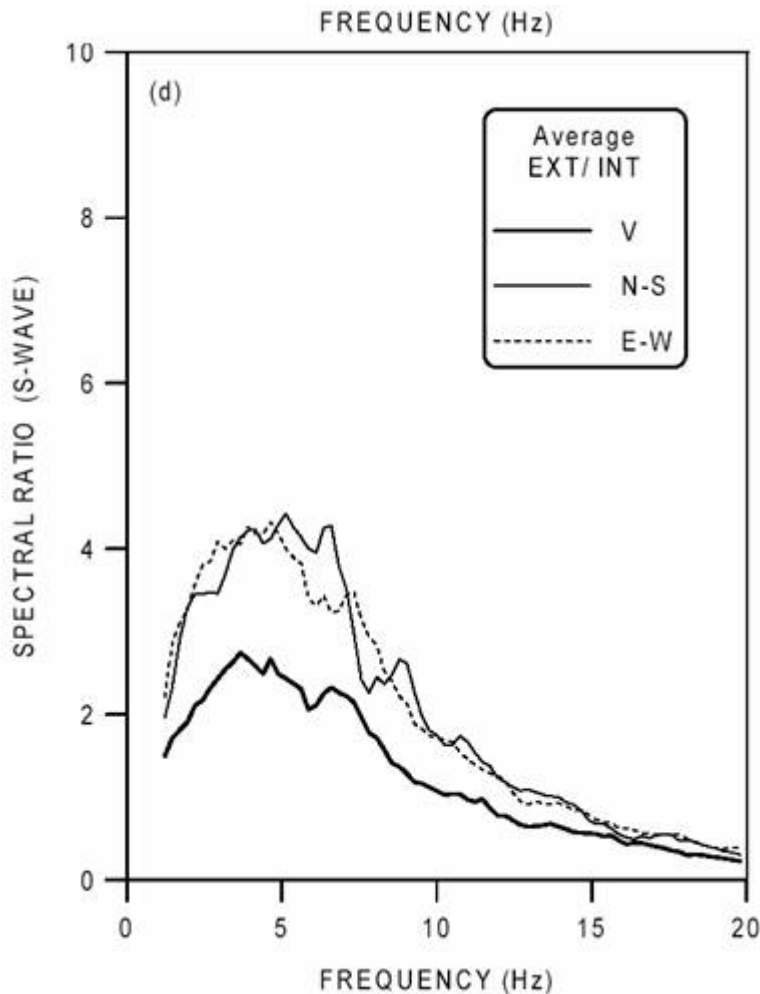


Figure 4 : rapports entre les spectres de Fourier en surface et les spectres de Fourier en profondeur sous le Massif Gran Sasso en Italie - données de 10 séismes, 9 stations en surface et 12 stations en profondeur (De Luca et al., 1998).

### c) FUKUSHIMA ET AL. (1995)

Fukushima *et al.* (1995) étudient le mouvement sur trois sites au Japon: Iwaki (instruments en surface, à 20 m, à 70 m, à 130 m, à 200 m et à 330 m), Tomioka (instruments en surface, à 6 m, à 100 m, à 251 m, à 660 m et à 950 m) et Etchujima (instruments en surface, à 40 m et à 100 m).

Le site d'Iwaki est composé de grès jusqu'à environ 300 m de profondeur et de granite au-delà. Les vitesses des ondes (S) augmentent de 840 m/s en surface à 2800 m/s en profondeur. Ce site peut être considéré comme rocheux.

Le site de Tomioka est composé de grès, siltstone (microgrès) et tuf. Les vitesses d'ondes (S) augmentent de 520 m/s en surface à 2800 m/s plus en profondeur. Ce site peut également être considéré comme rocheux.

Le site d'Etchujima est composé de sables et limons. Les vitesses d'ondes (S) varient entre 110 m/s et 460 m/s. Il s'agit d'un sol mou.

Fukushima *et al.* (1995) donnent les valeurs du rapport moyen entre l'accélération maximale en profondeur et l'accélération maximale en surface calculées sur 20 séismes (Iwaki), 16 séismes (Tomioka) et 23 séismes (Etchujima) (table 7).

| Station                | Profondeur (m) | Rapport ( $A_{\max \text{ PROF}} / A_{\max \text{ SURF}}$ ) |
|------------------------|----------------|---|
| Iwaki                  | 20             | 0.63  |
|                        | 70             | 0.50  |
|                        | 130            | 0.50  |
|                        | 200            | 0.55  |
|                        | 330            | 0.43  |
| Tomioka                | 6              | 0.58  |
|                        | 100            | 0.33  |
|                        | 251            | 0.21  |
|                        | 660            | 0.23  |
|                        | 950            | 0.23  |
| Etchujima<br>(sol mou) | 40             | 0.37  |
|                        | 100            | 0.30  |

Table 7 : Rapports entre l'accélération maximale en profondeur et l'accélération maximale en surface donnés par Fukushima *et al.* (1995).

Pour les trois sites dans l'étude de Fukushima *et al.* (1995), le rapport entre l'accélération en profondeur et en surface ne change pas beaucoup avec la profondeur. Par exemple pour le site de Tomioka, le rapport varie entre 0.33 et 0.23 pour des profondeurs respectivement comprises entre 100 et 950 m.

#### d) MCGARR ET FLETCHER (2005)

McGarr et Fletcher (2005) étudient les mouvements sismiques créés par l'activité de mines de charbon très près (distance focale inférieure à 10 km) de leurs instruments.

Toutes les stations sont au rocher dur (vitesse des ondes de cisaillement supérieure à 1.5 km/s). Ils calculent le rapport moyen entre les accélérations maximales en surface (huit stations) et les accélérations maximales en profondeur (profondeur d'environ 600 m, une station). Ils trouvent un facteur de 2.2 qu'ils attribuent à un effet de surface libre.

#### **e) SHIMIZU ET AL. (1996)**

Shimizu *et al.* (1996) étudient les mouvements sismiques dans une mine (Kamaishi Mine au Japon) en surface et aux profondeurs de 140 m, 315 m et 615 m. La géologie dans la région consiste en des formations sédimentaires (Paléozoïque et Mésozoïque) et du granite (Crétacé). Ils calculent les rapports entre l'accélération maximale en surface et en profondeur pour 41 séismes. Ils trouvent que l'accélération maximale varie avec la profondeur. Les rapports sont entre deux et quatre pour une profondeur de 615 m et entre un et deux pour des profondeurs de 140 et 315 m.

#### **f) CONCLUSION**

Sur la base de ces études, un facteur de deux entre l'accélération maximale en surface et l'accélération maximale en profondeur peut être choisi de façon conservative. Il correspond essentiellement à l'effet de surface libre.



## **Annexe 7**

# **L'étude de faisabilité de la surveillance microsismique**



Le rapport sur la faisabilité de la surveillance microsismique [8] visait à :

1. Proposer différentes configurations de réseau ;
2. Les analyser à l'aide de modélisations 3D et 2D, en termes de :
  - ii. Localisation optimum des récepteurs dans le sous-sol afin d'éviter des zones d'ombre qui empêcheraient de détecter toutes les ondes émises par la microfracturation ;
  - iii. Capacité de détection des différentes phases (ondes P et S) ;
  - iv. Évaluation de la précision et de la sensibilité des localisations.
3. Conclure en proposant la configuration optimum de réseau.

Les configurations de réseaux analysées utilisent des capteurs en forage exclusivement (100 m de profondeur minimum) pour éviter les bruits de surface et sont de trois types :

1. Avec des capteurs situés uniquement dans la zone d'injection au fond des forages RSE.1 et RSE.3 ;
2. Un réseau de subsurface (6 stations réparties sur un hexagone centré sur RSE.1 et de rayon 2 km) ;
3. Différentes combinaisons des deux.

Pour réaliser les points 2.i et 2.ii les auteurs ont utilisé un modèle 2D de propagation des ondes par différence finies. Le modèle de vitesse est issu de l'interprétation sismique et est donc connu avec une assez grande précision. Les auteurs n'indiquent pas si c'est le dernier modèle utilisé pour la révision de la sismique 3D en 2006, mais cela est d'importance secondaire pour l'étude de faisabilité. Trois types d'événement microsismiques sont considérés :

1. Les microruptures à proximité du puits qui sont liées à l'injectivité dans le réservoir ou à l'effet thermique et qui peuvent être comparées à des fracs de stimulation hydraulique. Magnitudes attendues :  $-3 \leq M \leq -2$
2. La microsismicité induite par la progression du panache de CO<sub>2</sub> dans le réservoir. Cet aspect est important car ce sera le seul moyen de suivre la migration du CO<sub>2</sub>, dans la mesure où ce type de sismicité se produira réellement. Magnitudes attendues :  $-2 \leq M \leq -1$
3. La microsismicité dans la couverture et les couches situées entre le réservoir et la surface. Cet aspect est plus hypothétique, suite à ce qui a été dit dans le chapitre 2.3. Magnitudes attendues :  $M \leq -1$

A noter que les auteurs n'apportent pas d'information sur la probabilité d'occurrence des différents types de microsismicité et ne justifie pas les fourchettes des magnitudes attendues. C'est l'étude approfondie de la réponse mécanique du réservoir et de son environnement qui pourraient apporter des éléments de réponse. Les fourchettes de magnitude ne sont pas mentionnées dans le Dossier minier et ne peuvent donc être considérés ici que comme de simples hypothèses de calcul pour l'étude de faisabilité.

Les principaux résultats des étapes 2.i et 2.ii montrent que, quel que soit le type d'événement :

- Les ondes P et S sont facilement identifiables ;
- Il n'y a pas d'interférences majeures entre ondes ascendantes et ondes réfléchies sur la surface, excepté entre 600 et 1500 m de profondeur ;
- Les erreurs de pointés devraient être minimum, de l'ordre de la fréquence d'échantillonnage. Ce point est discutable, dans la mesure où les capteurs situés dans le puits d'injection devraient être bruités par la circulation du CO<sub>2</sub> injecté. Cela est reconnu implicitement dans le chapitre sur la sensibilité de la détection dans lequel le niveau de bruit des capteurs de fond est trois fois celui du réseau de subsurface et 3,75 fois celui dans RSE.3.

L'étape 2.iii de l'analyse a été réalisée avec la modélisation en 3 D des temps de propagation des différents événements et la comparaison avec des critères fixés initialement. Trois événements types ont été choisis à des positions en accord avec leur origine. Suivant le type d'événement, la précision de localisation recherchée est la suivante :

- Événements situés à proximité du puits dans la zone d'injection : 50 m ;
- Événements liés à la migration du panache de CO<sub>2</sub>, situés au niveau de l'injection mais à 1600 m en distance horizontale de RSE1 : 100 m ;
- Événements situés dans la couverture, à proximité de RSE.1 et à 3000 m de profondeur : 250 m.

Comme pour les valeurs des fourchettes de magnitudes attendues, les valeurs d'erreur admissible sur les localisations ne sont pas argumentées. Elles sont plus liées à la précision attendue en fonction de la position des récepteurs par rapport aux zones où se produirait la microfracturation qu'à des exigences de contrôle. En effet, la précision est plus élevée pour les événements situés le plus près de la zone d'injection et à proximité des capteurs situés en fond de RES.1. En corollaire, la précision des localisations diminue au fur et à mesure que les événements « s'éloignent » des capteurs en fond de puits dans RSE.1. Ce qui est le cas pour les événements hypothétiques liés à la migration du panache et qui pourraient être localisés en bordure

de la zone d'emprise du réseau de surface. L'étude ne fait cependant pas de lien avec la simulation à long terme de l'extension maximum du panache. L'ajout de capteurs au fond de RSE.3 augmente la capacité de détection des événements proches du puits mais n'améliore pas de façon significative la précision de leur localisation.

La précision requise pour les événements situés dans la couverture est moins élevée, car ceux-ci sont plus éloignés des capteurs de fond. Cependant, les réseaux combinant capteurs de fond – réseau de subsurface permettent de contraindre les localisations de ces événements lorsqu'ils sont centrés autour de RSE.1, voire d'obtenir des erreurs de localisation moitié de celle des événements situés dans le réservoir en périphérie de la zone d'emprise du réseau de surface. Il serait donc préférable de viser des erreurs de la localisation identiques pour les événements de type 2 (migration du panache) et événements du type 3 (microruptures dans la couverture), c'est-à-dire de l'ordre de 100 m. D'ailleurs, la surveillance des événements dans la subsurface sera plus critique que celle des événements dans le réservoir, dans la mesure où l'occurrence de microséismes serait le seul moyen de mettre en évidence des fuites à travers la couverture et de déclencher, éventuellement, des mesures correctives.

En conclusion, les auteurs préconisent un réseau mixte avec des capteurs proches de la zone d'injection et un réseau de capteurs proches de la surface. Les meilleures solutions étant celles qui combinent des capteurs dans RSE.1 et RSE.3 et des capteurs intermédiaires dans RSE.1. Suite à un échange ultérieur avec TOTAL, les auteurs ont analysé en fin de rapport la configuration retenue en fonction de l'état des puits : un réseau de subsurface et trois capteurs au fond de RSE.1 à 4280, 4380 et 4480 m de profondeur (rappel : la zone d'injection est située entre 4544 et 4570 m). Les performances de ce réseau en termes de précision des localisations et de détection des événements se situent au niveau des meilleures configurations analysées dans l'étude, équivalentes à celle du réseau avec un capteur à mi-profondeur dans RSE.1.

Les auteurs proposent également plusieurs solutions techniques pour la mise en œuvre des géophones dans le forage : capteurs entre tubing et casing, capteurs derrière casing au contact direct avec la roche, flûtes de capteurs en bout de câble avec couplage avec la formation par levier mécanique, ressort etc. Finalement, TOTAL a retenu la société Weatherford qui propose un système innovant de capteurs sismiques optiques basés sur les fibres optiques<sup>2</sup>. Ce système sera intégré aux capteurs température-pression étagés dans le puits à 4 niveaux différents. Toutes les données seront envoyées en surface par fibre optique. Le dossier Mines ne fournit pas d'informations sur le type de capteurs utilisés pour le réseau de subsurface, ni sur les modalités de traitement et interprétation des données (système d'acquisition, logiciels utilisés, etc.) ni sur les procédures envisagées pour maintenir la surveillance 24h/24. En revanche, des collaborations futures sont prévues pour le traitement et l'interprétation des données de microsismique.

---

<sup>2</sup> [http://www.ep-solutions.com/solutions/IW/Clarion\\_Optical\\_Inwell\\_Seismic\\_System.htm#Accelerometer](http://www.ep-solutions.com/solutions/IW/Clarion_Optical_Inwell_Seismic_System.htm#Accelerometer)



## **Annexe 8**

### **Liste des études techniques communiquées par TOTAL**





- [1] Etude bibliographique des cinétiques de réaction de la Sidérite et de la famille des Chlorites. TOTAL, Réf. P/311/07/054/AT, 17 p, 2008.
- [2] Simulation de la production du champ de rousse – Géométrie simplifiée pour l'étude phénoménologique de l'injection de CO<sub>2</sub>. TOTAL, Réf. P/311/07/054/AT, 17 p, 2008.
- [3] Modélisation chimie-transport de l'injection de CO<sub>2</sub> dans le gisement de Rousse. Approche phénoménologique. TOTAL, Réf. P/311/07/054/AT REV 1, 44 p., 2008.
- [4] Thermal fracturation on RSE1. Memo, TOTAL, 3 p, 2006.
- [5] Rousse – Evaluation du risque d'activation des failles bordières lors de la déplétion du réservoir. TOTAL, Rapport 2006.10.02.d, 70 p., 2006.
- [6] Rousse - Evaluation du risque d'activation de failles et de perte d'intégrité du puits RSE1 lors d'un événement sismique. TOTAL, Rapport 2008.05.01.d, 131 p., 2008.
- [7] TOTAL – Pilote d'injection de CO<sub>2</sub> de Rousse – Contribution à l'étude des dangers – Etude des dangers réservoir. Geogreen, GG/TOT11/2007-0001 rév. 3. 58 p., 2008.
- [8] Microseismic monitoring feasibility study, modelling and network design. TOTAL, MAG/06/763, Septembre 2006, 62 p.
- [9] FRANCE – ROUSSE / UCHA-LACOMMANDE – 3D Geological Model 2006. *Rapport TOTAL* réf. DGEP/GSR/VDG/GEOL No. 06-223. 58 p., 2006.
- [10] Modélisation thermodynamique de l'injection de CO<sub>2</sub> dans la Dolomie de Mano à Rousse. *Memo TOTAL* GSR/VDG/MET # 07-289. 20 p., 2007.



## **Annexe 9**

### **Résumé non technique**



La société Total E&P France développe actuellement un projet pilote de captage et stockage géologique de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) autour de ses installations de production d'hydrocarbures situées à Lacq (Pyrénées-Atlantiques). L'objectif de ce pilote est la démonstration d'une chaîne complète de captage, transport, stockage du CO<sub>2</sub>, afin de contribuer à la validation de cette technologie pour la réduction des émissions anthropiques de gaz à effet de serre.

Le projet consiste à :

- convertir une chaudière du site de Lacq en chaudière à oxycombustion permettant le captage du CO<sub>2</sub> ;
- transporter le CO<sub>2</sub> par une canalisation existante, longue de 29 km, vers le site de Rousse (64) ;
- injecter le CO<sub>2</sub>, après compression, par l'intermédiaire d'un puits existant, dans un gisement de gaz naturel en fin d'exploitation, situé à environ 4500 m de profondeur à Rousse.

Ce projet prévoit initialement une durée de 5 ans. Il concerne une quantité de 120 000 t de CO<sub>2</sub>, qui seraient injectées durant deux ans. Il s'agit là de quantités modérées, correspondant à l'objectif de test de la technologie. Les trois années suivantes seraient dédiées à l'observation et la surveillance du site.

En l'absence d'une législation spécifique à ce type d'opérations, en cours d'élaboration aux niveaux européen et français, une circulaire du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD) en date du 14 février 2008 a précisé le cadre réglementaire applicable au pilote de Rousse. « Il a été fait le choix d'instruire le projet :

1. au titre de la législation des installations classées, pour ce qui concerne les opérations de captage et de compression du CO<sub>2</sub> ;
2. au titre de la législation minière pour les opérations de transport et de stockage, dans la mesure où la société dispose, du fait de sa concession de gaz, du droit d'utilisation du sol et du sous-sol. »

Plus en détail, la demande d'autorisation au titre du Code Minier doit s'inscrire dans le champ de l'article 3-1, applicable à la recherche de formations géologiques aptes à stocker des « produits chimiques à destination industrielle ». Cette demande doit répondre aux dispositions concernant les essais d'injection et de soutirage du décret 2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.

En réponse à ces exigences, la société TOTAL a rédigé un dossier de demande structuré en deux parties, dont l'instruction doit être conduite simultanément, notamment pour la procédure d'enquête publique.

Il est prévu qu'un bilan soit dressé à l'issue des cinq années du projet (2014), impliquant la mise en œuvre de mesures correctives, voire la récupération du gaz injecté, en cas de constat d'écart à l'évolution attendue. Par ailleurs, la concession détenue par TOTAL expire en 2017. Les services de l'Etat pourront alors de nouveau prononcer des mesures dans le cadre de l'abandon de la concession ou, le cas échéant, de son renouvellement.

Par courrier du 2 avril 2008, le Directeur Régional de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement a demandé à TOTAL une tierce expertise par le BRGM de son dossier de demande au titre du Code Minier. Le but de cette expertise est de « déterminer que le projet de TOTAL ne présente pas de risque de fuite significatif et qu'aucune incidence notable sur l'environnement ou sur la santé n'est à craindre », ou d'indiquer « les moyens supplémentaires à développer pour atteindre cet objectif de façon préventive ou par le renforcement de la surveillance ».

Le projet pilote de Rouse s'inscrit dans un cadre de recherche et développement ; il constitue le support d'un certain nombre de projets visant à améliorer les connaissances sur le captage et le stockage géologique du CO<sub>2</sub>, en particulier de projets de l'Agence Nationale de la Recherche (GAZ ANNEXES, SENTINELLE). Une collaboration de recherche s'est de ce fait instituée entre TOTAL et le BRGM, qui participent aux projets de l'ANR mentionnés. Afin de garantir l'indépendance de la tierce expertise, celle-ci a été menée au sein du BRGM par une équipe pluridisciplinaire qui n'est pas impliquée dans les projets liés à ce pilote. De même, le dossier de demande d'autorisation de TOTAL se base, entre autres, sur une synthèse hydrogéologique rédigée par l'antenne régionale du BRGM en Aquitaine ; leurs auteurs ne figurent pas parmi les responsables de la tierce expertise, qui sont issus du centre scientifique et technique d'Orléans. Le dossier de TOTAL s'appuie également sur une étude de dangers réalisée par Geogreen, filiale commune à l'IFP, Geostock et au BRGM. Les auteurs de la tierce expertise n'ont pas non plus participé aux travaux réalisés dans le cadre de cette étude de Geogreen.

Le BRGM a consacré 30 homme-jours à ce travail. L'expertise porte principalement sur les risques de fuite et non sur leurs impacts potentiels. Le présent rapport a été rédigé au vu de la partie B du dossier de demande d'autorisation déposé par TOTAL auprès de la DRIRE Aquitaine le 30 avril 2008, correspondant aux dispositions au titre du Code Minier et dénommée par la suite « Dossier Mines », ainsi que de diverses études techniques, communiqués au BRGM par TOTAL, qui ont servi de support à la réalisation de ce dossier. Ce « Dossier Mines » inclut la description des installations et des travaux envisagés ; une étude d'impact ; une analyse des incidences sur la ressource en eau ; une étude de dangers et différentes annexes dont le document de sécurité et de santé.

Certains des aspects soulevés par la DRIRE relèvent encore du domaine de la recherche. Par ailleurs, nous tentons de garder à l'esprit, au cours de l'expertise, le contexte de la demande d'autorisation, tel que fixé par la circulaire du MEDAD : le dossier constitue une demande d'essais d'injection, au cours desquels la réversibilité doit pouvoir être assurée. Par conséquent, les exigences envers un tel pilote ne

correspondent pas à celles d'un projet de stockage à long terme. Nous nous efforçons donc, au sein de chaque chapitre de notre expertise, de faire la distinction entre :

- les compléments à apporter au dossier pour la réalisation du pilote, et les ajouts qui seraient indispensables pour le passage réel à un stockage à long terme, d'une part ;
- les interrogations auxquelles des réponses peuvent être apportées à l'aide des techniques existantes, et les problèmes pour lesquels les connaissances actuelles sont déficientes, où la recherche doit progresser, d'autre part.

La présente tierce expertise est structurée de manière à répondre aux différents points soulevés par le courrier de la DRIRE.

#### **a) ÉVALUATION DE LA CAPACITE DU SITE A ASSURER LA RETENTION DU GAZ**

Le site choisi par TOTAL nous paraît présenter des caractéristiques très favorables pour « assurer la rétention du gaz sans fuite significative » à long terme, liées :

- à la configuration du réservoir (structure, profondeur) ;
- à la connaissance approfondie dont son exploitant en dispose ;
- à son historique d'exploitation ;
- à son confinement en pression ;
- aux enseignements des études réalisées.

Au-delà de ces arguments qualitatifs, une validation quantitative de l'efficacité du projet dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, en référence aux seuils de taux de fuite proposés par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, ne nous paraît pas faisable dans l'état actuel des connaissances au niveau international.

Les études géochimiques démontrent l'absence de modification significative des propriétés du réservoir suite à l'injection de CO<sub>2</sub>. Nous recommandons, pour conforter cette conclusion, de reprendre avec un maillage plus fin les simulations dans la zone estimée comme la plus influencée. Dans l'optique d'un stockage à long terme, il faudrait de plus étudier la diffusion d'eau acidifiée au sein de la couverture.

Les documents présentés par TOTAL permettent d'écarter les risques :

- de fracturation de la couverture ;
- de réactivation de faille par le seul effet de la pression ;
- de soulèvement des terrains en surface.

De façon plus critique, en l'absence d'évaluation de l'étendue du refroidissement dans le réservoir consécutif à l'injection de CO<sub>2</sub>, une étude de l'effet conjoint de la pression et de la température sur la réactivation des failles lors de l'injection de CO<sub>2</sub>, similaire à celle qui a été réalisée pour la phase d'exploitation du gaz naturel, nous paraît nécessaire.

## **b) PERTINENCE ET EXHAUSTIVITE DES SCENARIOS PROPOSES PAR TOTAL**

Le recensement des scénarios de risque effectué par TOTAL nous semble correspondre à l'état de l'art en la matière, si ce n'est, sur le long terme, que l'hypothèse de la dégradation à long terme du puits utilisé pour l'injection n'est pas considérée. En parallèle au déroulement des opérations du pilote, un audit à l'aide d'outils existants dans la communauté scientifique internationale pourrait confirmer l'exhaustivité de cette liste de scénarios, dans l'optique du passage à un stockage à long terme.

En l'état, le dossier présenté par TOTAL repose essentiellement sur la démonstration de la faible probabilité des risques. Pour un stockage de longue durée, il nous paraît nécessaire de mieux examiner leur gravité, en améliorant :

- l'identification des cibles potentielles par rapport aux événements de risque ;
- l'évaluation des conséquences potentielles de fuites. Le calcul du scénario d'éruption de puits montre que les effets d'une fuite en surface demeureraient limités ; une évaluation similaire doit être menée pour les effets d'une fuite dans une nappe d'eau souterraine.

Notons toutefois que ces études suscitent des questions du domaine de la recherche.

Une meilleure prise en compte des conséquences des scénarios de fuite à long terme conforterait les arguments montrant la faible probabilité des événements. Une telle amélioration passe également par la rédaction d'un programme de protection des populations et de l'environnement, dès la phase pilote.

Un tel plan viendrait compléter les mesures de prévention existantes, qui nous semblent adéquates, ainsi que les mesures d'intervention pendant la phase opérationnelle.

## **c) IMPACT D'UN SEISME**

La sismicité naturelle de la zone du projet apparaît modérée, et la sismicité induite inexistante. De plus, il est probable que les mouvements sismiques à considérer au niveau du réservoir soient relativement faibles et n'entraînent pas de dommage au puits ni de réactivation de faille.

Néanmoins, des précisions nous paraissent devoir être apportées au dossier pour l'autorisation du pilote de stockage, concernant l'origine des niveaux sismiques pris en



considération. En particulier, une étude complémentaire doit être menée pour déterminer un spectre de réponse spécifique au site de Rousse, afin de vérifier qu'il est bien inférieur, pour toute la gamme de fréquences considérée, au spectre majorant utilisé dans l'étude des effets d'un séisme sur le puits.

Il nous semble de plus nécessaire de réaliser une étude de la sismicité instrumentale afin de confirmer l'absence de sismicité induite et d'événements importants.

#### **d) LE PLAN DE SURVEILLANCE**

Les mesures proposées dans le plan de surveillance nous paraissent adaptées pour assurer la sécurité et le bon fonctionnement du projet.

Néanmoins, nous recommandons la mise en place d'un programme de surveillance des eaux souterraines à proximité du puits d'injection, ainsi que la conception d'un plan de contrôle des impacts sur la faune et la flore, en cas de fuite avérée en surface.

De plus, dans la perspective d'un stockage à long terme, TOTAL devra formuler des propositions sur le programme de la surveillance post-fermeture et sur sa durée, afin de s'assurer de l'efficacité de la rétention du CO<sub>2</sub>, en s'appuyant sur les études scientifiques accompagnant l'exploitation du pilote.

Par ailleurs, au stade du pilote, des précisions dans le dossier nous semblent nécessaires à propos :

- des méthodes de traitement et d'interprétation des données issues de la surveillance microsismique ;
- des méthodes et fréquences des mesures de gaz dans les sols et dans l'atmosphère.

#### **e) SYNTHÈSE**

L'examen du dossier de demande d'autorisation et des documents annexes fournis par TOTAL nous amène à conclure que :

- le projet d'injection de CO<sub>2</sub> à Rousse ne présente pas de risques majeurs à court terme pour la sécurité des personnes et l'environnement immédiat ;
- le site choisi possède des caractéristiques très favorables à la rétention à long terme du CO<sub>2</sub>. Il n'est cependant pas réalisable, dans l'état de l'art, de calculer des taux de fuite prévisibles pour les comparer aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Il convient de souligner que le projet ne concerne pour le moment qu'un pilote d'injection, mettant en jeu des quantités de CO<sub>2</sub> limitées pour une courte durée, au cours de laquelle il est possible de récupérer le fluide injecté. Les exigences à ce stade diffèrent donc de ce qu'il faudra réclamer si ce pilote est réellement converti en stockage à long terme.

Dans ce contexte, les conclusions de notre expertise, rassemblées dans le tableau A, sont surtout des demandes de précisions sur le dossier. Le complément majeur que nous demandons est la mise en place d'un programme de surveillance des nappes d'eau souterraines. Nous recommandons également de réaliser un inventaire des enjeux ainsi que de prévoir des mesures de protection de l'homme et de l'environnement et de surveillance des impacts qu'ils subiraient, dans l'éventualité d'une fuite en surface.

Signalons encore que ce pilote sera le support de la poursuite de travaux de recherche. Ceux-ci devraient faciliter la réponse aux points dont le traitement pour une demande de stockage à long terme apparaît incomplet dans le dossier actuel. Un certain nombre d'études supplémentaires seraient requises dans ce cas, en particulier :

- des simulations de réservoir, montrant que le CO<sub>2</sub> reste dans les limites prévues ;
- la rédaction et la mise en œuvre d'un plan de fermeture et d'un programme de surveillance post-fermeture ;
- la meilleure prise en compte des éléments vulnérables aux risques, en particulier par l'évaluation des impacts potentiels d'une fuite sur l'homme et l'environnement, y compris sur les nappes d'eau souterraines.

Ces compléments renforceraient ainsi la démonstration du caractère négligeable des risques locaux aussi bien que globaux sur le long terme.

Tableau A : Méthodes de surveillance appliquées et compléments au dossier demandés, en fonction des scénarios énumérés dans l'étude de dangers

|    | Scénario  | Méthode de surveillance mise en œuvre   | Compléments requis pour le pilote   | Compléments pour un stockage à long terme   |
|----|---|---|---|---|
| 1  | Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture                                     | Surveillance microsismique<br>Contrôle de la pression                                 | Mise en place de la surveillance des nappes d'eau souterraine<br>Précisions sur le traitement des données de surveillance microsismique   | Etude de la diffusion d'eau acidifiée dans la couverture  |
| 2  | Fuite par des failles existantes  | Surveillance microsismique  | Etude des effets conjoints de la pression et de la température sur la réactivation des failles<br>Mise en place de la surveillance des nappes d'eau souterraine<br>Précisions sur le traitement des données de surveillance microsismique | Programme de fermeture :<br>• durée ;<br>• contenu.   |
| 3  | Fuite de gaz latérale   | Surveillance microsismique<br>Contrôle de la pression                                 | Mise en place de la surveillance des nappes d'eau souterraine<br>Précisions sur le traitement des données de surveillance microsismique   | Simulations de réservoir  |
| 4  | Fuite du puits au niveau des aquifères supérieurs sus-jacents                         | Contrôle de la pression   | Mise en place de la surveillance des nappes d'eau souterraine   | Etude des impacts d'une fuite sur les nappes d'eau souterraine<br>Identification des éléments vulnérables aux risques |
| 5  | Fuite le long du puits vers la surface  | Contrôle et inspection du puits<br>Surveillance des gaz dans les sols et l'atmosphère | Précisions sur la surveillance des gaz en surface   | Etude de la gravité d'une fuite :<br>• en surface ;<br>• sur les nappes d'eau souterraine.                            |
| 6  | Dérangements mécaniques du réservoir dus aux réactions géochimiques dans le réservoir | Surveillance microsismique  | Reprise des simulations géochimiques avec un maillage plus fin<br>Précisions sur le traitement des données de surveillance microsismique  |   |
| 7  | Dérangements mécaniques des terrains dus à l'injection                                | Surveillance microsismique  | Précisions sur le traitement des données de surveillance microsismique  |   |
| 8  | Dérangement mécanique des terrains sous l'effet des séismes                           | Surveillance microsismique  | Etude de la sismicité instrumentale<br>Calcul d'un spectre de réponse spécifique au site de Rousse  | Programme de protection des populations et de l'environnement   |
| 9  | Effet d'un séisme sur le puits  | Contrôle et inspection du puits   | Précisions sur le traitement des données de surveillance microsismique  | Audit de la liste des scénarios   |
| 10 | Forage ultérieur d'un puits perforant   | Mesures préventives   |   |   |
| 11 | Puits éruptif   | Contrôle du puits<br>Surveillance des gaz dans les sols et l'atmosphère               | Prévision d'un plan de surveillance des impacts sur la faune et la flore<br>Précisions sur la surveillance des gaz en surface   |   |

NB : les couleurs dans le tableau correspondent simplement à un regroupement thématique







**Centre scientifique et technique**  
**Service Aménagement et Risques Naturels**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34