Document public

Expertise du bilan intermédiaire d'exploitation du pilote de captage, de transport et de stockage géologique de CO_2 de Lacq-Rousse (64)

Rapport final

BRGM/RP-62819-FR
Septembre 2013

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Expertise du bilan intermédiaire d'exploitation du pilote de captage, de transport et de stockage géologique de CO_2 de Lacq-Rousse (64)

Rapport final

BRGM/RP-62819-FR
Septembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2013

O. Bouc, C. Kervévan, J. Rohmer, M. Delatre, I. Gravaud, H. Fabriol

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : F. Blanchard	Nom : J.L. Foucher
Responsable scientifique de programme, Direction des Risques et de la Prévention	Directeur des Risques et de la Prévention
Date :	Date :
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Avertissement

Ce rapport d'expertise, commandé par TOTAL EP France à la demande de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement d'Aquitaine, est « public à accès différé » : sauf publication à l'initiative du commanditaire, il est considéré comme confidentiel jusqu'à ce qu'une décision administrative s'appuyant sur le contenu de ce rapport soit prise. Lorsque les services de l'Etat auront pris une décision étayée par ce rapport, celui-ci sera rendu public et mis à disposition sur le site Internet du brgm infoterre.brgm.fr.

Mots-clés : CO_2, stockage géologique, risques, tierce-expertise, Rousse, Pyrénées-Atlantiques, Aquitaine

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

Bouc O., Kervévan C., Rohmer J., Delatre M., Gravaud I., Fabriol H. (2013) – Expertise du bilan intermédiaire d'exploitation du pilote de captage, de transport et de stockage géologique de CO_2 de Rousse. Rapport final. BRGM/RP-62819-FR, 62 p., 2 tabl., 3 ann.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La société TOTAL EP France a opéré depuis 2009 un pilote de captage, transport et injection de dioxyde de carbone (CO_2) dans le département des Pyrénées-Atlantiques, premier du genre sur le territoire français. Dans l'optique de l'arrêt de ces opérations d'injection géologique de CO_2 sur le site de Rousse, TOTAL EP France a réalisé un bilan intermédiaire de l'exploitation du pilote. La Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) d'Aquitaine a souhaité obtenir du BRGM un avis sur ce bilan intermédiaire, portant sur :

- L'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection à ce jour ;
- Le programme de surveillance proposé pour la phase post-injection, en distinguant :
  - les objectifs de détection de désordres dans le réservoir ou de fuite vers la surface ;
  - la capacité de ce programme à délivrer, au bout de trois années de surveillance, les données nécessaires à l'étude du confinement à long terme du CO_2 et à la définition du programme de surveillance associé.

Le présent avis d'expertise a été émis au vu du bilan intermédiaire d'exploitation établi en mai 2013 par TOTAL EP France, ainsi que des documents complémentaires communiqués au BRGM par TOTAL EP France. Cette expertise a été réalisée dans le respect de la Charte de l'Expertise du BRGM, conforme aux dispositions de la norme AFNOR NF X 50-110 relative à l'expertise institutionnelle. Elle engage la responsabilité de l'établissement public BRGM.

❖

A l'issue de son examen des documents communiqués par TOTAL EP France :

- Le BRGM estime correctes les conclusions de TOTAL EP France sur l'absence d'effet mécanique mesurable sur le réservoir.
- Le BRGM ne peut se prononcer sur les conclusions de TOTAL EP France quant à l'absence de dégradations significatives du réservoir et de la couverture sous l'effet chimique de l'injection de CO_2. Le BRGM juge nécessaire la réalisation de travaux complémentaires de modélisation pour appréhender les effets chimiques à long terme sur le réservoir et sa couverture.
- Le BRGM reconnaît la capacité du réseau de surveillance micro-sismique à détecter un éventuel dérangement du réservoir. Il recommande néanmoins une analyse rapide des données déjà collectées par l'antenne micro-sismique de fond, afin de statuer sur le niveau de sensibilité du réseau d'écoute de surface. Le BRGM recommande par ailleurs que les incertitudes de localisation soient identifiées pour les 3 événements situés au niveau du réservoir.
- Les expertises réalisées par l'INERIS et l'Université de Pau Pays de l'Adour mènent à recommander, pour la détection de défaillances, la poursuite de la surveillance :
  - Des amphibiens ;

  - De la qualité des eaux de surface sur 3 stations ;
  - De la qualité des eaux souterraines sur 6 stations, en la complétant par une analyse isotopique du carbone du CO_2 ;
  - Des teneurs en CO_2 et CH_4 dans les sols ;
  - Des flux de CO_2 et CH_4 en surface.

- Le BRGM reconnait la validité, pour une étude du confinement à long terme, des différents arguments concernant l'analyse des effets mécaniques, rassemblés dans le dossier consulté. Cependant, le BRGM recommande, dans un souci d'exhaustivité, que TOTAL EP France apporte des précisions et arguments par rapport au mode de perte d'intégrité de la couverture par propagation d'une fracture initiée par traction depuis le réservoir et sa pénétration dans la couverture.

- Afin de disposer de toutes les informations utiles à une étude du confinement à long terme, le BRGM recommande que soient apportées des précisions sur la capacité du réseau micro-sismique à détecter un évènement au niveau de la faille 4V.

- Afin de disposer de toutes les informations utiles à une étude du confinement à long terme, le BRGM recommande que soit mis en œuvre le programme de recherche identifié dans le rapport géomécanique communiqué par TOTAL EP France et qui vise à réduire les incertitudes sur l'état des contraintes et les propriétés géomécaniques des roches.

- Afin de disposer de toutes les informations utiles à une étude du confinement à long terme, le BRGM recommande la réalisation d'un programme de diagraphie de contrôle de l'état du puits à la fin de la période de surveillance avant la fermeture définitive du puits.

Sommaire

1. Introduction 7

2. Avis sur l'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection..... 11

2.1. EFFETS MECANIQUES 11
2.1.1. Résultats de la surveillance micro-sismique.....11
2.1.2. Démarche de TOTAL EP France pour l'étude des risques géomécaniques12
2.1.3. Avis du BRGM sur l'absence d'effet mécanique des opérations d'injection15

2.2. EFFETS CHIMIQUES 17
2.2.1. Analyse de la démarche de TOTAL EP France pour l'étude des effets chimiques 18
2.2.2. Recommandations du BRGM concernant les effets chimiques des opérations d'injection.....24

3. Avis sur le programme de surveillance proposé pour la phase de surveillance 27

3.1. PROGRAMME DE SURVEILLANCE PROPOSE PAR TOTAL EP FRANCE POUR LA PHASE DE SURVEILLANCE POST-INJECTION 27

3.2. CAPACITE A DETECTER DES DEFAILLANCES.....31
3.2.1. Etude des effets mécaniques.....31
3.2.2. Etude des effets chimiques 31
3.2.3. Surveillance du comportement du puits 31
3.2.4. Surveillance des écosystèmes de surface et des eaux 32
3.2.5. Surveillance des gaz en surface et dans les sols 33

3.3. CAPACITE A FOURNIR LES DONNEES NECESSAIRES AUX ETUDES ET A LA SURVEILLANCE DU CONFINEMENT A LONG TERME 33
3.3.1. Etude de l'intégrité mécanique du site de stockage.....34
3.3.2. Etude du comportement hydrodynamique et chimique.....35
3.3.3. Intégrité à long terme du puits.....35
3.3.4. Impacts potentiels sur l'environnement 35

3.4. SYNTHESE DES RECOMMANDATIONS POUR LA PHASE DE SURVEILLANCE 36

4. Conclusions sur le bilan intermédiaire d'exploitation 39

4.1. AVIS SUR L'ABSENCE D'EFFET MESURABLE SUR LE RESERVOIR DES OPERATIONS D'INJECTION 39
4.1.1. Effets mécaniques 39
4.1.2. Effets chimiques 39

4.2. AVIS SUR LE PROGRAMME DE SURVEILLANCE PROPOSE POUR LA PHASE POST-INJECTION 40
4.2.1. Capacité à détecter des défaillances 40
4.2.2. Capacité à fournir les données nécessaires aux études et à la surveillance du confinement à long terme 41

5. Bibliographie 43

Liste des tableaux

Tableau 1 - Comparaison entre le programmes de surveillance pendant l'injection et le programme proposé par TOTAL EP France pour la post-injection 29

Tableau 2 - Comparaison entre le programme de surveillance pendant l'injection et le programme recommandé par le BRGM pour la post-injection 37

Liste des annexes

Annexe 1 Courrier de la DREAL Aquitaine requérant de TOTAL EP France une tierce-expertise du bilan intermédiaire d'exploitation 45

Annexe 2 Liste des études techniques communiquées par TOTAL EP France 51

Annexe 3 Analyse critique du rapport référencé en Annexe 2, [8] 55

1. Introduction

Par arrêté préfectoral n°09/IC/122 du 13 mai 2009, modifié par arrêté préfectoral n°2609-11-62 du 14 novembre 2011, la société TOTAL EP France est autorisée à opérer un pilote de captage, transport et injection de dioxyde de carbone (CO_2) dans le département des Pyrénées-Atlantiques. Le CO_2 est capté sur l'usine de Lacq, puis transporté et injecté dans la formation géologique du Mano, sur le site de Rousse (commune de Jurançon). Ce pilote est le premier du genre sur le territoire français.

Les essais d'injection de CO_2 dans le réservoir du Mano sont autorisés dans le cadre de la concession de mines d'hydrocarbures liquides ou gazeux C20 dite de Meillon, accordée à TOTAL EP France jusqu'au 31 août 2017, dans la limite d'une quantité maximale de CO_2 injectée de 90 000 t. Ils ont débuté en janvier 2010. L'exploitant a été autorisé à exploiter le pilote jusqu'au 8 juillet 2013 ; à l'issue de la période d'injection de CO_2, il est tenu d'assurer la surveillance du réservoir géologique et de son environnement pendant au moins 3 ans. A l'issue de cette période de surveillance, l'exploitant doit fournir un bilan d'exploitation faisant état des effets sur l'environnement et révisant l'étude d'impact et l'étude de dangers.

L'autorisation d'exploiter ce pilote a été délivrée au vu d'un dossier de demande qui avait fait l'objet d'une tierce expertise par le BRGM : celle-ci, traduite par les rapports RC-56440-FR et RP-56998-FR, avait estimé que le projet d'injection de CO_2 à Rousse ne présentait pas de risques majeurs à court terme du point de vue de la sécurité des personnes et de l'environnement immédiat ; elle soulignait en revanche des besoins d'études supplémentaires dans l'hypothèse d'un stockage de CO_2 à long terme, en termes de simulations de réservoir, de plan de fermeture et de surveillance post-fermeture, et d'évaluation des conséquences potentielles et contre-mesures envisageables à long terme.

Par la suite, la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) d'Aquitaine a sollicité auprès du BRGM un avis sur les performances du réseau d'écoute microsismique mis en place par l'exploitant sur le site d'injection. Le BRGM avait alors conclu (rapport RP-57741-FR) que la sensibilité du réseau de 7 capteurs de subsurface était suffisante pour détecter des ruptures sismiques menaçant l'intégrité du réservoir. Ce résultat, associé à une expertise par l'Ecole des Mines de Paris (réf. 2009-10-28.1) des capacités du réseau d'écoute microsismique, permettait de considérer les capteurs sismiques installés par TOTAL EP France en fond de puits comme des instruments renseignant les activités de recherche et développement autour du projet de Rousse, et non comme des composants essentiels à la sécurité du site.

Dans l'optique de l'arrêt des opérations d'injection de CO_2 dans le cadre de l'autorisation de travaux miniers, TOTAL EP France a réalisé, conformément à l'arrêté d'autorisation des opérations, un bilan intermédiaire de l'exploitation du pilote, comprenant notamment une mise à jour des études d'impact et de dangers produites dans le dossier de demande d'autorisation initiale (TOTAL EP France, 2013, ci-après désigné « Bilan intermédiaire »). L'exploitant y propose également une réduction des mesures de surveillance des effets de l'injection de CO_2, par rapport aux prescriptions de l'arrêté d'autorisation. Par courrier en date du 2 avril 2013 (Annexe 1), la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement d'Aquitaine a demandé à l'exploitant de soumettre ce dossier à une tierce expertise, portant sur :

1. L'absence d'effet mesurable sur l'environnement des opérations d'injection, au vu des résultats de la surveillance environnementale ;

2. L'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection, au vu des résultats de la surveillance et des modélisations effectuées ;

3. L'identification d'éventuels nouveaux scénarios de risque au vu de l'accidentologie de 2009 à 2012 sur des opérations similaires, ainsi que l'évaluation du scénario de communication via le puits entre l'aquifère de Lasseube et le réservoir ;

4. Le programme de surveillance pour la phase de surveillance post-injection, et les techniques qui l'appuient. Cette analyse doit se prononcer sur la capacité à détecter les désordres éventuels dans le réservoir ou les fuites en surface pendant cette phase de surveillance, mais aussi sur l'aptitude de ce programme à délivrer toutes les informations nécessaires pour conduire, à l'issue des 3 ans de surveillance, une étude sur le confinement permanent et sûr du CO_2. L'avis d'expertise doit donc se baser sur l'état de l'art de la recherche relative au stockage géologique de CO_2. Il doit aussi intégrer les résultats et propositions de programme 2013-2015 de recherche et développement mené autour du pilote de Rousse.

En concertation avec la DREAL, TOTAL EP France a décidé de confier cette expertise à trois établissements publics :

- L'INERIS, pour les points 1 et 3 ;

- L'Université Pau Pays de l'Adour (UPPA) pour l'analyse de la surveillance des gaz des sols au point 1 ;

- Le BRGM, pour les points 2 et 4.

Le présent rapport présente ainsi les avis du BRGM relativement aux questions soulevées aux points 2 et 4 ci-dessus, concernant le dossier relatif aux travaux miniers sur le site de Rousse. Il ne concerne aucunement les opérations de captage et de transport du CO_2.

Les avis demandés au BRGM ont été forgés au vu du Bilan intermédiaire d'exploitation du pilote de production, de captage, de transport et de stockage de CO_2 réalisé par TOTAL EP France en Mai 2013, ainsi que de diverses études techniques communiquées au BRGM par TOTAL EP France (Annexe 2). Les conclusions des expertises réalisées en parallèle par l'INERIS (Farret *et al.*, 2013) et l'UPPA (Preud'homme, 2013) ont également été intégrées lors de l'analyse des besoins de surveillance post-injection (point 4). Le Bilan intermédiaire d'exploitation se compose d'une présentation du dossier, d'une description des installations, d'une proposition de programme pour la phase de surveillance, d'une étude d'impact et d'une étude de dangers. L'expertise du BRGM a porté plus particulièrement sur l'étude de dangers et la proposition pour la phase de surveillance. Le présent rapport fait état des avis émis par le BRGM au vu de ces différents documents, dans les temps et les délais impartis : le BRGM a consacré 37 personnes-jours à ce travail sur une durée de 3 mois.

Le BRGM, certifié ISO 9001-2000, s'engage sur les conclusions et les recommandations de cette expertise, qui est de type Institutionnel. Sa réalisation est conforme à la Charte de l'expertise du BRGM, elle-même dérivée de la norme AFNOR NF X 50-110 « *Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise* ». 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 au pilote de TOTAL.

La présente tierce-expertise est structurée comme suit, de manière à répondre aux points soulevés par la DREAL et confiés au BRGM :

- un avis est d'abord porté sur l'interprétation des résultats de la surveillance du réservoir (surveillance microsismique, surveillance de la pression et de la température dans le puits) en comparaison des modélisations effectuées (modélisations géomécaniques, calculs en transport réactif), afin de se prononcer sur l'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection ;

- le programme de surveillance proposé par TOTAL EP France pour la phase de surveillance ainsi que les techniques et modèles qui l'appuient sont discutés. Sont distingués à ce sujet, d'une part, les objectifs de détection de désordres dans le réservoir ou de fuite vers la surface, d'autre part, la capacité de ce programme à délivrer, au bout de trois années de surveillance, les données nécessaires à l'étude du confinement à long terme du CO_2 et à la définition du programme de surveillance associé.

Une synthèse récapitule les réponses du BRGM aux questions que lui ont adressées la DREAL et TOTAL EP France.

Au fil de ce rapport, le BRGM se prononce uniquement sur le bilan intermédiaire de fin d'injection établi par TOTAL EP France ; il ne s'agit pas à ce jour de juger le confinement permanent et sûr du CO_2 sur le site de Rousse. Ainsi, l'avis exprimé ne porte pas sur les études complémentaires mises en avant par le BRGM en 2008 (rapport RC-56440-FR) pour un passage à un stockage à long terme, mais sur la capacité du programme proposé par TOTAL EP France à fournir les informations nécessaires à la conduite de telles études.

2. Avis sur l'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection

Dans ce chapitre, le BRGM fournit son analyse en réponse à la question numéro 2 posée par la DREAL Aquitaine, portant sur « l'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection ». Dans un premier temps sont examinés les effets mécaniques potentiels de l'injection sur le réservoir et la couverture, au vu des résultats de la surveillance micro-sismique et des travaux complémentaires d'analyse et de modélisation mécanique effectués. Dans un second temps sont discutés les effets chimiques, au vu des travaux d'analyse et de modélisation hydro-géochimique.

2.1. EFFETS MECANIQUES

Dans cette section sont examinés les arguments, méthodes et approches mis en œuvre par TOTAL EP France afin de « démontrer l'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection » sur la période 2009-2013 par rapport aux risques dits « géomécaniques ». Ces risques sont liés à :

- des réactivations de failles existantes sous l'effet de la remontée de pression (Bilan intermédiaire, chapitre 5 : Etude de dangers, section 4.4.2) ;
- une perte d'étanchéité de la couverture du réservoir (Bilan intermédiaire, chapitre 5 : Etude de dangers, section 4.4.1).

Ces deux risques géomécaniques sont ici analysés ensemble, en raison des fortes similitudes dans la démarche nécessaire pour les caractériser.

Signalons que le BRGM ne se prononce pas dans ce rapport sur les risques liés aux « dérangements mécaniques des terrains provoqués par des fracturations et/ou soulèvements de ceux-ci sous l'effet de la pression » (Bilan intermédiaire, chapitre 5 : Etude de dangers, section 4.4.7) ni sur les « dérangements mécaniques des terrains provoqués par des secousses sismiques » (Bilan intermédiaire, chapitre 5 : Etude de dangers, section 4.4.8), qui ne rentrent pas dans le périmètre de la tierce-expertise qui lui est confiée, puisqu'ils ne concernent pas l'impact des opérations d'injection sur le réservoir.

2.1.1. Résultats de la surveillance micro-sismique

TOTAL EP France met en avant la faible activité micro-sismique au cours de l'injection de CO_2 à partir des observations acquises par le dispositif d'écoute micro-sismique (Bilan intermédiaire, chapitre 5 : Etude de dangers, section 2.11.4 et section 4.4.2). En particulier « En 2011 seuls trois événements localisés au niveau du puits ont été enregistrés avec les équipements de surface […], d'une magnitude $-1,1<M<-0,3$ […] ; Depuis 2011, les événements sismiques régionaux enregistrés par les capteurs de fond ont des magnitudes comprises entre -1,4 et -3,2. […] ».

A l'appui de cet argument, les bulletins semestriels de surveillance depuis le début de l'injection ont été fournis au BRGM pour les besoins de cette tierce-expertise (Annexe 2, [2] à [7]). Sur la période 2010-2012 couverte par les bulletins de surveillance, 25 événements sismiques ont été détectés dans ou à côté du périmètre intérieur de détection, défini par le cercle de 2 km sur

lequel est approximativement positionné le réseau de surveillance microsismique ; sur ces 25 événements, 3 ont eu lieu directement dans la zone du réservoir, et un événement est survenu environ 1,5 km à l'ouest. Les autres événements sismiques se sont produits approximativement le long d'une ligne ouest-est 2 km au nord de l'injection.

2.1.2. Démarche de TOTAL EP France pour l'étude des risques géomécaniques

Afin de caractériser les deux risques géomécaniques en question, la démarche du TOTAL EP France se base sur :

- Des arguments liés à la caractérisation géologique du site ;
- Des observations et mesures lors de l'exploitation ;
- Des résultats de modélisations hydro-mécaniques.

Caractérisation géologique du site

TOTAL EP France souligne sa grande connaissance des composantes essentielles à l'intégrité du stockage, à savoir la couverture et les failles (Bilan intermédiaire, chapitre 5 : Etude de dangers, section 4.4.1), par la combinaison :

- des études sismiques ;
- de l'analyse des 3 forages réalisés sur le champ de Rousse, en particulier l'absence de failles traversant le puits d'injection de CO_2 (Bilan intermédiaire, chapitre 5 : Etude de dangers, section 4.4.9) ;
- de l'analyse des carottes prélevées en forage dans le réservoir et dans la couverture ;
- de l'analyse des diagraphies de puits et des tests de formation effectués dans les puits ;
- de la connaissance accumulée de l'ensemble du bassin d'Arzacq et de son contexte après plus de 40 ans d'exploitation.

Par ailleurs, TOTAL EP France rappelle (Bilan intermédiaire, chapitre 5 : Etude de dangers, section 4.4.1) que « l'existence même du gisement constitue une garantie de l'existence d'une structure parfaitement étanche, puisque le gaz y est resté piégé pendant des millions d'années à une pression supérieure à la pression hydrostatique » et que « [...] les failles affectant le gisement [sont] anciennes, ne traversent pas la couverture et sont scellées par la discordance Base Crétacé Supérieur ».

Observations / mesures lors de l'exploitation

TOTAL EP France met en avant plusieurs observations acquises au cours de l'exploitation de gaz naturel (*i.e.* avant l'injection de CO_2) :

- « La différence de composition des gaz en place entre la structure de Rousse et le gisement de Meillon Saint-Faust au Nord (teneur en soufre et en CO_2 différentes), confirme l'isolement de ces structures par rapport aux structures les plus proches » ;

- « La déplétion (baisse de pression) du gisement durant son exploitation montre, au travers des données d'exploitation et des mesures réalisées, qu'il est étanche, qu'il n'est pas connecté aux aquifères et qu'il n'est pas non plus connecté au réservoir Meillon du champ de Rousse situé 250 m plus bas et qui, lui, est soumis à une activité aquifère ».

Par ailleurs, TOTAL met en avant la faible activité micro-sismique, telle que mentionnée au paragraphe 2.1.1 ci-dessus.

Modélisations hydro-mécaniques

Des modélisations hydro-mécaniques ont été mises en place par TOTAL EP France ; elles font l'objet de la note technique « Intégrité du site de Rousse lors de l'injection de CO_2 » (*cf.* Annexe 2, [1]), dénommée dans la suite « Rapport Géomécanique ». La perte d'intégrité de la couverture y est évaluée selon deux modes principaux, qui peuvent eux-mêmes se développer selon différents processus:

- Fracturation : ouverture hydraulique ou par cisaillement ;
- Réactivation des failles : par ouverture hydraulique ou par glissement en considérant deux scénarios :
  - Si les failles restent étanches pendant la vie du champ ;
  - Si les failles perdent leur étanchéité au cours de la production de gaz ou de l'injection de CO_2.

- **Modèle 1D**

Un premier modèle unidimensionnel, selon la verticale (Rapport Géomécanique, section 3.1.4 à 3.1.7), considére l'initiation et la propagation d'une fracture dans la couverture selon les différents modes de perte d'intégrité résultant à la fois des effets thermiques (liés à la différence de température entre le CO_2 injecté et la roche environnante) et des effets d'augmentation de pression liée à l'injection de CO_2.

Les données d'entrées de ce modèle, à savoir les propriétés des matériaux et les conditions du réservoir et terrain environnants (contraintes initiales, pression de pore), se basent sur un rapport de TOTAL EP France réalisé lors de l'exploitation du gisement, dénommé « Rousse – Evaluation du risque d'activation des failles bordières lors de la déplétion du réservoir », que le BRGM avait examiné lors de son expertise du dossier d'autorisation (Bouc *et al.*, 2008). Quatre scénarios de conditions intiales des contraintes et pression de pore sont considérés.

Ce modèle 1D est appliqué (Rapport Géomécanique, section 3.2) et les résultats sont présentés :

- pour la fracturation sous forme de coefficients de sécurité : l'absence d'initiation ou de propagation est indiquée par un coefficient supérieur à 1 et la marge de sécurité est mesurée par la différence par rapport à 1 ;
- pour la réactivation de failles sous la formes de diagrammes « pression maximale d'injection – orientation de la faille – pendage » en considérant un angle de friction des failles de 30° et une cohésion nulle.

Cette étude permet de mettre en évidence que :

- Les effets conjoints thermiques et hydrauliques peuvent initier des fractures par traction dans le réservoir, mais sans propagation (coefficients de sécurité supérieurs à 1), *i.e.* sans remettre en cause l'intégrité de la couverture puisqu'aucun chemin préférentiel de fuite ne pourra se développer pour des pressions inférieures à 644 bar (Rapport Géomécanique, section 3.2.3.5) ;

- Le critère le plus pénalisant entre les deux modes, en termes de perte d'intégrité, correspond à la réactivation par cisaillement des failles devenues perméables (Rapport Géomécanique, section 3.3) ;

- Ces failles peuvent se réactiver à partir d'une pression d'injection de 500 bars (Rapport Géomécanique, section 3.3).

  - **Modèle 3D**

Afin de pallier les limitations inhérentes au modèle 1D (à savoir : validité seulement au puits ; non prise en compte des variations de pression au sein du réservoir ; non prise en compte des effets géométriques tridimensionnels, Rapport Géomécanique, section 3.3), des modélisations 3D couplées hydromécaniques ont été mises en place par TOTAL EP France (Rapport Géomécanique, chapitre 4).

La démarche consiste à transférer de façon séquentielle le champ de pression résultant de la déplétion et de l'injection de CO_2, calculé par un modèle réservoir (ici Eclipse), au code mécanique en éléments finis (ici VISAGE), avec une fréquence de transfert indiquée au tableau 11 du Rapport Géomécanique.

Les hypothèses principales adoptées dans ces travaux sont les suivantes :

- Le scénario d'injection est constitué d'un « pilote » (cas de base pour tous les scénarios allant du 01/09/1968 au 31/12/2011, comprenant la déplétion et le début de l'injection) et considère quatre hypothèses de pressions d'injection jusqu'à 2020 (400 – 600 bars, Rapport Géomécanique, section 4.6) ;

- Deux options sont considérées pour le réservoir : sans présence de fractures et avec fractures (caractéristiques décrites à la section 4.4 du Rapport Géomécanique, basées sur le rapport de TOTAL EP France « Rousse – Pilote CO_2 : Caractérisation et Modélisation de la fracture du Mano »). Dans les deux cas, les modélisations réservoir ne considèrent pas l'influence hydraulique des failles ;

- La réactivation des failles par cisaillement est évaluée pour quatre scénarios de pressions d'injection (400 – 600 bars, Rapport Géomécanique, section 4.6) en ne considérant que les 8 failles passant à la fois par le réservoir Mano et la couverture (Rapport Géomécanique, section 5.1.3.4) ;

- Les maillages respectifs du code réservoir et du code mécanique sont décrits à la section 4.1 du Rapport Géomécanique. En particulier la géométrie des failles existantes, extraite du logiciel de modélisation géologique Petrel, est représentée sur la Figure 22 ;

- Les hypothèses matériaux sont identiques à celles supposées pour le modèle 1D (Rapport Géomécanique, section 4.2). En particulier, le profil des contraintes initiales utilise le scénario le plus conservatif, à savoir H1 (Rapport Géomécanique, section 4.3) ;

- L'absence de surpression dans la couverture est supposée et les variations de contraintes dans la couverture correspondent aux déformations du réservoir (comme décrit à la section 3.1.2 du Rapport Géomécanique). Cette hypothèse est discutée à la section 3.1.3 du Rapport Géomécanique, en soulignant son caractère conservateur. De plus, l'évaluation est conduite en supposant que les fractures dans la couverture peuvent conduire la pression (Rapport Géomécanique, sections 5.1.3.1 à 5.1.3.3 et 5.2.3.1 à 5.2.3.3). Enfin, deux scénarios d'étanchéité des failles sont considérés : failles étanches et failles ayant perdu leurs étanchéité ;

- Les modélisations 3D sont effectuées à température constante.

Les différents modes de perte d'intégrité sont évalués en considérant les deux scénarios de fracturation du réservoir (respectivement sections 5.1 et 5.2 du Rapport Géomécanique), à savoir : fracturation par cisaillement ; activation d'une fracture en traction ; réactivation des failles par ouverture hydraulique ; réactivation des failles par cisaillement selon les deux scénarios d'étanchéité des failles.

Cette étude met alors en évidence que :

- Il n'y a aucun risque de fracturation par cisaillement dans la couverture avec un scénario d'injection de CO_2 à 600 bar ;

- La pression maximum avant fracturation hydraulique (ici pression de propagation de fractures) dans la couverture est de 659 bar ;

- Le modèle 3D évalue qu'il y a risque de propagation de fractures devenues perméables dans la couverture à partir de 659 bar ;

- Il n'y a pas de risque de glissement de failles étanches à 600 bar, puisque les contraintes ne varient pas dans la couverture ;

- Le mode de réactivation des failles non étanches est le plus critique par rapport aux autres modes susmentionnés. Les résultats de l'évaluation de ce mode de perte d'intégrité sont synthétisés dans les tableaux 12 et 13 du Rapport Géomécanique, qui donnent la pression maximum avant réactivation (noté Pp) en considérant un angle de friction des failles de 30° et une cohésion nulle, ainsi que l'angle de friction minimum pour maintenir la stabilité de la faille à une pression d'injection de 600 bars ;

- La faille 4V présente le risque de réactivation le plus critique, puisque le seuil de réactivation correspond à sa pression initiale, c'est-à-dire 410 bar. C'est alors la valeur de la pression d'entrée capillaire des failles à l'interface réservoir-couverture qui va définir la pression maximum d'injection, si elle est supérieure à la pression de réactivation des failles (Rapport géomécanique, section 6.1).

2.1.3. Avis du BRGM sur l'absence d'effet mécanique des opérations d'injection

Les résultats de la surveillance micro-sismique ne sont pas assortis d'incertitudes de localisation. Nous nous référons donc ici aux incertitudes évaluées lors de l'expertise spécifique dédiée en 2009 au réseau d'écoute micro-sismique (Gesret et Noble, 2009 ; Fabriol et Delatre, 2009) : une incertitude de localisation d'environ 250 mètres y avait été jugée raisonnable. Les événements sismiques détectés au nord et l'événement à l'ouest sont trop éloignés du réservoir, même en tenant compte d'une telle incertitude de mesure, pour avoir un quelconque effet sur le réservoir et ses failles bordières. Compte tenu de l'extension Ouest-Est de la série

d'événements, et compte tenu de la présence d'une faille tectonique active ayant la même orientation, l'explication avancée par TOTAL EP France, comme quoi **les événements au nord du réseau sont liés à l'activité tectonique liée à la faille, semble donc la plus plausible**.

Les trois événements survenus à proximité immédiate du puits d'injection doivent être discutés plus en détail. **Le très faible nombre d'événements sur 3 ans, ainsi que l'absence observée d'essaim** durant la période pendant laquelle s'est produit l'événement de magnitude -0.3, semblent indiquer **que les failles au niveau du réservoir ne se réactivent pas.**

Par ailleurs, en supposant que l'événement le plus fort, de magnitude -0.3, ait eu lieu dans la couverture, **la longueur de rupture sismique ne dépasserait pas 10 mètres**, d'après la relation longueur – magnitude pour les magnitudes inférieures à 3 validée lors de la tierce-expertise sur le réseau d'écoute micro-sismique (Fabriol et Delatre, 2009). **Cette longueur est largement inférieure à l'épaisseur de la couverture**, estimée à plusieurs kilomètres, ce qui **exclut l'hypothèse d'une perte d'intégrité de la couverture**. De plus, le bulletin de surveillance correspondant à cet événement (2nd semestre 2010, Annexe 2, [3]) indique que tous les événements détectés ont eu lieu sous le réservoir et non dans la couverture, ce qui renforce l'implausibilité d'une perte d'étanchéité.

Soulignons que le BRGM n'a procédé, dans le cadre de cette tierce-expertise, à aucun calcul de vérification de la localisation des événements fournie par TOTAL EP France, et se fie aux localisations communiquées par l'exploitant, considérées issues d'un processus de traitement des données conforme aux dispositions validées lors de l'expertise du dossier de demande d'autorisation (Bouc *et al.*, 2009). Moyennant cette réserve, **les conclusions de TOTAL EP France sur l'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection paraissent donc correctes du point de vue de l'observation microsismique.**

Concernant plus largement la démonstration de l'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection en termes de risques « géomécaniques » (réactivations de failles existantes sous l'effet de la remontée de pression et/ou perte d'étanchéité de la couverture du réservoir) sur la période 2009-2013, au regard des éléments résumés au paragraphe 2.1.2 le BRGM émet l'avis suivant :

- La **démarche d'ensemble**, combinant arguments liés à la caractérisation géologique du site, observations ou mesures lors de l'exploitation et résultats des modélisations hydromécaniques, **est jugée pertinente** au regard de l'objectif poursuivi ; la faible activité micro-sismique enregistrée constitue un argument fort à son appui ;

- Les **approches et techniques mises en œuvre pour les études mécaniques sont en accord avec l'état de l'art** sur ce sujet ;

- Les **hypothèses relatives aux matériaux**, en particulier les propriétés de rupture des failles, sur lesquelles se basent les modèles hydromécaniques **sont jugées** conservatives, et donc **pertinentes** dans une démarche visant à évaluer les conditions d'injection les plus critiques menant à une perte d'intégrité ;

- Les **différents scénarios** testés (contraintes initiales, étanchéité des fractures et failles, écoulement dans le réservoir, prise en compte des effets thermiques) **permettent de borner les principales sources d'incertitudes** et de balayer **un éventail exhaustif des conditions d'injection** menant à une possible perte d'intégrité, à comparer à la pression du réservoir de 90 bars à la date de la tierce-expertise ;

- La **pression du réservoir à la fin de la période d'injection atteint 90 bars** (valeur spécifiée dans le Bilan intermédiaire, chapitre 5 : Etude de dangers, section 4.4.7). Cette valeur est **bien inférieure à la pression d'injection** identifiée par TOTAL EP France comme **la plus critique**, à savoir celle amenant à la réactivation de la faille 4V (410 bars). Au regard des différents scénarios testés, le BRGM juge que **le niveau de confiance associé à cette marge de sécurité est largement suffisant** ;

- Les **différents modes de perte d'intégrité** de la couverture considérés par TOTAL EP France sont jugés **pertinents**. Cependant, compte tenue de la fracturation sub-verticale du réservoir (Rapport Géomécanique, section 4.4, Figure 29), les derniers développements de l'état de l'art suggèrent de considérer un mode additionnel, à savoir la propagation d'une fracture initiée par traction depuis le réservoir et sa pénétration dans la couverture (« dyke-type extension », voir par exemple Leguillon *et al.*, 2013). Dans un souci d'exhaustivité de l'analyse des effets mécaniques par rapport à l'état de l'art le plus récent, et tout en reconnaissant la validité des différents arguments rassemblés dans le dossier de TOTAL EP France, le BRGM estime que des précisions et arguments par rapport à ce mode d'endommagement des formations géologiques renforceraient encore ce dossier.

Au demeurant, dans un souci de faciliter le rapprochement entre les observations micro-sismiques et les études géomécaniques, le BRGM regrette que n'aient pas été fournies, en complément de l'approche par pression maximale admissible proposée, une modélisation mécanique 3D correspondant strictement aux conditions de pression du pilote d'injection (état des contraintes à 90 bars), ni une projection des événements micro-sismiques enregistrés sur un schéma structural du site.

2.2. EFFETS CHIMIQUES

Cette section examine les arguments techniques fournis par TOTAL EP France en vue de démontrer l'absence d'impact significatif de l'injection de CO_2 dans le réservoir, d'une part, et dans la couverture sus-jacente, d'autre part, du fait des interactions chimiques entre la roche et les fluides. Cet examen s'appuie sur les études réalisées à ce sujet par TOTAL EP France entre 2010 et 2013, dont les principales conclusions sont présentées dans le Bilan intermédiaire (Chapitre 5 : Etude de dangers, paragraphes 4.4.5 « risques liés à la réactivité géochimique du réservoir sous l'action du CO_2 » et 4.4.6 « risques liés à la diffusion du CO_2 stocké dans le réservoir au sein de la couverture du stockage » plus particulièrement), et qui sont décrites plus en détail dans quatre rapports d'études mis à disposition du BRGM (*cf.* Annexe 2), portant spécifiquement sur les points suivants :

- Caractérisation minéralogique du réservoir et de sa couverture [9].

- Modélisation géochimique d'un état thermodynamique de référence pour le réservoir avant injection de CO_2 [10] ;

- Modélisation des interactions avec la roche en transport réactif diphasique (eau + gaz) à l'échelle du réservoir suite à l'injection de CO_2 [8] ;

- Modélisation des interactions avec la roche-couverture en transport réactif monophasique (eau) en présence d'une eau acidifiée par le CO_2 injecté [11].

Les rapports [9] et [10] sont des mises à jour d'études antérieures datant de 2010, fournis également par TOTAL EP France à la demande du BRGM ([13] et [14], respectivement).

2.2.1. Analyse de la démarche de TOTAL EP France pour l'étude des effets chimiques

Le Bilan intermédiaire d'exploitation de TOTAL EP France conclut à un impact très mineur des effets chimiques de l'injection de CO_2. Nous analysons ci-dessous les arguments étayant cette conclusion.

En préalable, une des caractéristiques des travaux liés à la réactivité géochimique susceptible d'être induite par l'injection de CO_2 est à noter : seuls les éléments relatifs à la minéralogie du réservoir et de sa couverture proviennent d'échantillons de roche et d'un programme de mesures qualitatives et quantitatives. Pour le reste, les conclusions établies par TOTAL EP France reposent entièrement sur des résultats de simulations numériques. Même si les conditions initiales de ces simulations sont établies à partir des données minéralogiques susmentionnées, ainsi que d'un certain nombre de données physico-chimiques émanant de mesures (historiques de pression et de température, composition des gaz en place et injecté, géométrie du réservoir), cette spécificité est à prendre en compte pour émettre un avis sur la pertinence des conclusions de ces travaux.

Cette problématique n'est pas spécifique au présent dossier : c'est une question d'ordre plus général qui se pose notamment concernant l'étude de la géochimie des systèmes naturels. Pour ces systèmes, il est la plupart du temps difficile, voire impossible, de valider les résultats des modèles par des mesures directes (a fortiori pour des modèles à vocation prédictive travaillant sur des échelles de temps de plusieurs centaines ou milliers d'années). On s'attache alors à juger de la cohérence et de la convergence des résultats des divers calculs réalisés en tant qu'indicateurs fiables de tendances relatives à l'évolution dans l'espace et dans le temps du système {fluides + réservoir + couverture}.

Caractérisation minéralogique du réservoir et de sa couverture (cf. Annexe 2, [9], [13])

L'étude de caractérisation minéralogique du réservoir et de la couverture a été réalisée en préalable aux travaux de modélisation géochimique, afin d'établir des minéralogies de référence avant injection de CO_2. Ces travaux ont notamment eu pour objectif de mettre en cohérence les données établies précédemment (2007-2008) par le laboratoire ISS/LAB de TOTAL EP France et le CREGU (Centre de Recherches sur la Géologie des Matières Minérales et Energétiques) à Nancy (thèse de S. Renard). Il s'agissait en particulier d'aboutir à une caractérisation plus poussée (minéralogie, chimie, pétrographie) de la chlorite du réservoir. Pour ce faire, le laboratoire ISS/LAB a mis en œuvre un nombre très significatif d'analyses sur un total de 25 échantillons (réservoir et couverture) en combinant diverses techniques qualitatives et quantitatives.

Les résultats et la méthodologie analytique mise en œuvre en 2010 sont décrits de manière très détaillée dans [13]. A ce stade, les conclusions concernent principalement la problématique de la présence et de la nature de la chlorite du réservoir. Il apparaît que, contrairement à ce qui avait été établi en 2007 (chlorite-Fe), cette chlorite est magnésienne. De même, la dolomite est exclusivement non-Fe dans la matrice, même si la présence d'une dolomite-Fe est avérée mais limitée aux fractures et en quantité globalement très faible.

Le rapport de 2012 [9] constitue l'actualisation et la synthèse finale de ces travaux de caractérisation. Il vient corroborer et compléter les résultats de 2010. Ainsi, il a été possible d'établir des compositions minéralogiques de référence pour le réservoir (dolomie de Mano) et pour la couverture (Flysh campanien). Compte tenu de sa grande variabilité, la composition

moyenne du Flysh campanien est établie pour l'unité marneuse, d'une part, et pour les interbancs argilo-silteux, d'autre part. Ce dernier faciès est considéré par TOTAL EP France comme le plus représentatif de la couverture efficace au sein de la couverture de Rousse.

La **qualité des travaux réalisés** est à souligner. Les données acquises par le laboratoire ISS/LAB permettent d'établir les conditions initiales pour les modélisations à l'échelle du réservoir et au niveau de la couverture. Une caractérisation aussi fine et de tels efforts de mise en cohérence avec les données émanant de travaux antérieurs sont relativement rares.

Dans la perspective des modélisations géochimiques et de transport réactif, il aurait été très utile également de pouvoir disposer de données analytiques sur la phase aqueuse. Toutefois, à la différence d'un aquifère, le contexte d'un réservoir d'hydrocarbures déplété n'est pas propice à la récupération d'échantillons d'eau. Par conséquent, cela impose de reconstituer par le calcul une eau de référence cohérente avec la minéralogie détaillée établie (paragraphe suivant).

Modélisation géochimique d'une eau équilibrée avec les minéraux du réservoir (cf. Annexe 2, [10], [14])

Compte tenu de l'absence de données analytiques sur l'eau contenue dans le réservoir, une composition cohérente de la phase aqueuse, supposée initialement en équilibre avec les phases minérales constitutives du réservoir, doit être calculée. Le rapport [10], datant de 2011, complète et détaille l'étude de modélisation de 2010 [14] à cet effet. La démarche proposée par TOTAL EP France dans cette étude est tout à fait cohérente dans son principe, et classiquement utilisée dans les travaux de modélisation géochimique : afin de pallier le manque de données analytiques relatives à la phase aqueuse, la modélisation va permettre de reconstituer une composition en supposant un équilibre avec les phases minérales et gazeuses présentes au sein du réservoir. Chaque donnée disponible va permettre de contraindre un peu plus le système et ainsi limiter le nombre de solutions mathématiques possibles. Dans un second temps, c'est l'expérience du géochimiste et sa connaissance du site qui vont permettre de retenir la ou les quelques solution(s) les plus plausibles et cohérentes.

Ces simulations font nécessairement appel à un code de modélisation thermodynamique adapté. Dans un premier temps, TOTAL EP France a choisi d'utiliser le logiciel CHESS développé par l'Ecole des Mines. Dans un deuxième temps, et dans la perspective des modélisations en transport réactif au sein du réservoir, le code GEM (développé et distribué par CMG) a été utilisé. Cependant, l'utilisation d'un code de calcul, quel qu'il soit, ne se révèle pertinente que s'il dispose d'une base de données thermodynamiques (et éventuellement cinétiques) de qualité et adaptée à la problématique étudiée. Dans le cas présent, le travail de revue bibliographique et de mise à jour de certaines propriétés thermodynamiques et thermocinétiques est remarquable, en particulier sur les constantes d'équilibre des chlorites (minéral clé dans le processus de minéralisation du CO_2 comme cela a été démontré par les calculs) et les constantes cinétiques relatives aux principales phases minérales impliquées. Le travail de modélisation se trouve ainsi grandement facilité par les données minéralogiques de qualité rendues disponibles[1].

Le choix du logiciel CHESS pour la première partie de ces calculs n'appelle aucune remarque particulière de notre part, d'autant plus que certaines données thermodynamiques d'importance

[1] Bien qu'un apparent problème chronologique nous soit apparu à la première lecture des documents (les données minéralogiques de référence ont été publiées dans un rapport datant de 2012 [9] tandis que le rapport final de modélisation à partir de ces données date de 2011 [10]), il nous parait évident que les données de minéralogie ont bien été mises à disposition antérieurement à la rédaction du rapport et aux derniers travaux de modélisation.

pour le problème étudié ont été mises à jour. Toutefois, la manière dont les calculs ont été réalisés [10] pose un certain nombre de questions :

- Une saumure dite « de base » est définie en vue de sa mise à l'équilibre ultérieure avec les minéraux du réservoir ([10], §3.2). Il est ainsi indiqué qu'une concentration en NaCl de 1.2 molaire est représentative de la salinité de l'eau. En l'absence de données analytiques à notre disposition, le BRGM ne peut se prononcer sur la validité de cette hypothèse. Par ailleurs, dans la mesure où la mise à l'équilibre avec les phases minérales fait ensuite varier la teneur en Na et Cl dissous, l'intérêt de fixer cette valeur de concentration au départ ne nous paraît pas clair.

- Il est indiqué ([10], §3.2) que des concentrations en $CO_{2,aq}$ et H_2S_{aq} sont fixées à des valeurs que nous supposons correspondre aux conditions initiales du réservoir (*i.e*. juste avant l'injection du CO_2). Cette hypothèse manque cependant d'argumentation. D'une part, aucun détail n'est fourni sur le modèle utilisé pour déterminer ces concentrations (modèle de Duan ?). D'autre part, il nous semblerait préférable de fixer une fugacité en gaz, cohérente avec la pression et la composition du gaz réellement mesurées, qui restera constante après mise à l'équilibre avec les phases minérales. Ici, une concentration en phase aqueuse est imposée avant mise à l'équilibre, alors qu'il est a priori attendu que cette concentration ne corresponde pas à la même fugacité de gaz en fin de mise à l'équilibre, sous l'effet des réactions chimiques qui se seront produites.

- Après avoir choisi de retirer deux phases minérales mineures du système (ce qui peut être admissible), il est démontré ([10], §3.3) que les équations de lois d'action de masse peuvent toutes s'exprimer en fonction de paramètres supposés constants ou en fonction de l'activité de l'ion H^+. Dans le cas présent, l'auteur exprime les états thermodynamiques possible du système pour différentes valeurs du pH. Le BRGM considère que cette approche n'est pas justifiable d'un point de vue mathématique, dans la mesure où l'équation d'électroneutralité n'a pas été prise en compte dans le système. Or, cette équation, qui traduit une réalité physico-chimique, va de fait fixer la teneur en H^+, de sorte que le système n'a plus aucun degré de liberté et comporte une solution unique. Dans la pratique, il arrive fréquemment que l'on choisisse de passer outre la contrainte d'électroneutralité afin d'intégrer, notamment, les incertitudes inévitables d'une composition d'eau obtenue par des moyens analytiques. Dans le cas présent, en l'absence de données analytiques, l'omission de la contrainte sur la balance électrique ne nous paraît pas justifiée. A minima, cette approche doit être discutée et justifiée par TOTAL EP France afin, le cas échéant, de démontrer que l'inexactitude de la balance électrique n'induit pas de biais préjudiciable à l'interprétation géochimique.

Par la suite, moyennant quelques réajustements de constantes thermodynamiques rendus nécessaires pour recaler certains indices de saturation, l'étude conclut en une composition de la phase aqueuse cohérente avec les données connues (pressions partielles de gaz, température, composition de la roche réservoir, salinité ?) moyennant une valeur de pH fixée à 4,9.

Dans l'ensemble, **face aux fortes incertitudes autour de cette composition d'eau, le BRGM considère que les travaux réalisés manquent d'une étude de sensibilité** sur l'impact de telle simplification (suppression de deux phases minérales par exemple) ou telle hypothèse (concentration en CO_2 supposée constante, électroneutralité non prise en compte). La démonstration d'un impact mineur de ces simplifications/hypothèses donnerait indubitablement plus de poids aux conclusions de ces travaux.

A partir de l'eau de référence ainsi déterminée, les simulations de TOTAL EP France ont ensuite porté sur l'effet d'une dissolution progressive de CO_2 sur les réactions avec les phases minérales. L'approche n'est pas classique (une fugacité en CO_2 variable aurait plus simplement pu être imposée) mais paraît acceptable, et est apparemment imposée par des limitations conceptuelles de l'outil CHESS. Conformément à ce qui avait été observé dans les simulations antérieures (mais avec des compositions chimiques sensiblement différentes), les réactions induites conduisent à une minéralisation d'une partie du CO_2 suite à la dissolution de la sudoite (chlorite magnésienne la plus proche de l'espèce caractérisée pour les échantillons de Rousse), cette fois-ci sous forme de dolomite. Les résultats sont ensuite interprétés en termes d'impact sur la porosité. **Les précautions à prendre, dès lors qu'il s'agit d'extrapoler des résultats de calculs en système fermé (batch), tels que ceux réalisés ici, au comportement potentiel d'un système ouvert** (au sens où il est le siège de phénomènes d'écoulements et de transport de masse) **à l'échelle d'un réservoir, doivent être soulignées**.

Concernant les aspects cinétiques, en prévision des modélisations à l'échelle du réservoir, le modèle CHESS est transféré vers GEM. Pour des raisons essentiellement liées à des problématiques de temps de calcul, le modèle « complet » sous CHESS a dû être simplifié sous GEM, et ce de manière assez significative s'agissant des espèces aqueuses (il ne reste plus que 12 espèces aqueuses). De même, certaines lois cinétiques ont dû être simplifiées pour répondre aux contraintes de temps de calcul de GEM. Afin de valider ces simplifications, une comparaison des résultats obtenus avec le modèle CHESS « complet » et le modèle GEM « simplifié » est proposée. Les tendances observées restent comparables mais certains ordres de grandeur de l'amplitude des phénomènes diffèrent sensiblement (par exemple, la solubilité de la silice diffère d'un facteur 10). Il est cependant difficile d'adhérer totalement aux conclusions de cohérence entre les deux modèles présentés, car **l'extrapolation prévue de ces calculs « batch » à l'échelle du réservoir est a priori très délicate et donc discutable**. Or, pour les simulations en transport réactif à l'échelle du réservoir, il n'existe pas d'éléments de comparaison avec un modèle géochimique « complet ». Il est alors légitime de s'interroger sur le choix du code de calcul utilisé pour les simulations à l'échelle du réservoir. Au vu des éléments présentés, il semble que GEM ne soit sans doute pas le code de calcul le plus adapté pour traiter d'une géochimie complète. Toutefois ce code de calcul présente une compatibilité avec les modèles ECLIPSE, ce qui constitue sans aucun doute un avantage indéniable pour aborder la modélisation réservoir. Il s'agit clairement de trouver le bon compromis entre les simplifications nécessaires au bon déroulement des calculs et le réalisme des simulations compte tenu de ces simplifications. Disposer **d'éléments factuels** plus probants, accompagnés d'une **discussion plus approfondie sur l'impact de ces diverses simplifications** (étude de sensibilité, modèles GEM « 0D » de plus grande complexité, etc.), paraît nécessaire pour éclairer ce choix.

Modélisation en transport réactif diphasique (eau + gaz) à l'échelle du réservoir (cf. Annexe 2, [8])

Le rapport [8] présente, outre une piètre qualité rédactionnelle qui en rend difficile la bonne compréhension, de **nombreuses lacunes aussi bien sur la forme que sur le fond**. Les principaux défauts soulevés par le BRGM sont rapportés à l'Annexe 3. Ils **empêchent de statuer sur la validité des conclusions** établies. Ce rapport semble un rapport d'avancement des travaux de modélisation à l'échelle du réservoir, qui appelle nécessairement une suite. L'auteur n'a masqué aucun des nombreux problèmes numériques auxquels il a été confronté, notamment des bugs de l'outil GEM qui ont été signalés à l'éditeur de ce logiciel, CMG. Il paraît douteux qu'aucun de ces problèmes n'ait été résolu par CMG depuis 2011. Ceci devrait donc permettre à TOTAL EP France de refaire les simulations qui s'imposent, en tenant compte de l'évaporation de l'eau, des précipitations de sels induites et de leurs effets locaux sur la

porosité. En cas d'impossibilité de mener à bien ces simulations pour des raisons inhérentes au code de calcul lui-même, une discussion étayée par des calculs simplifiés et localisés autour de la zone la plus impactée par l'injection de CO_2 devra être proposée.

Modélisation de la diffusion du CO_2 dissous au sein de la couverture du réservoir (cf. Annexe 2, [11])

Ce travail de modélisation [11] est présenté comme la simulation d'un scénario « au pire » considérant qu'une bulle de CO_2, à pression maximale et constante sur plusieurs milliers d'années, reste localisée au toit du réservoir, à proximité immédiate de la couverture. Les conclusions de [8] suggèrent que ce scénario est hautement improbable, dans la mesure où par effet densitaire (le CO_2 est plus dense que le CH_4), le CO_2 doit migrer vers le fond du réservoir. Néanmoins, dans une démarche conservative appropriée à une étude de dangers, et compte tenu, de plus, des lacunes d'argumentation dans [8], il paraît tout à fait pertinent d'aborder ce scénario.

Les hypothèses de calcul ainsi que les résultats sont très clairement présentés dans cette étude. Le modèle prend en compte le couplage entre le transport par diffusion pure au sein de la couverture (dont la très faible perméabilité empêche tout écoulement) et les réactions chimiques entre l'eau de la couverture, acidifiée à sa base par la présence d'un réservoir « infini » de CO_2, et les minéraux en présence. La géométrie est monodimensionnelle verticale, ce qui nous paraît bien approprié pour traiter ce problème. Les simulations ont été réalisées avec PHREEQC. Ce choix nous paraît pertinent dans la mesure où, en comparaison de CHESS ou GEM, PHREEQC est sans doute le plus polyvalent et adaptable pour traiter les problèmes géochimiques complexes. De plus, les auteurs ont fait le choix d'une base de données thermodynamique adaptée pour réaliser leurs calculs.

La démarche décrite met en avant le choix de maximiser les phénomènes en conservant, d'une part, la fugacité maximale de CO_2 (100 bar) et, d'autre part, en imposant l'équilibre thermodynamique entre la phase aqueuse et les minéraux. Cette hypothèse de départ appelle deux critiques de notre part :

- Le BRGM réfute l'idée selon laquelle l'équilibre thermodynamique correspond à une maximisation de l'amplitude des phénomènes réactionnels. En effet, s'il est exact qu'au bout d'un laps de temps donné la dissolution d'une phase minérale sera maximale si l'on considère un équilibre thermodynamique par rapport à une cinétique relativement lente, il en va tout autrement du cas où plusieurs phases sont impliquées. Ainsi, en considérant les aspects cinétiques (qui correspondent à une réalité physico-chimique établie), les chemins réactionnels peuvent être différents de ceux correspondant à un calcul à l'équilibre. Par exemple, telle phase minérale identifiée comme précipitant massivement dans un modèle « à l'équilibre » peut tout au contraire se dissoudre dans une approche intégrant la cinétique réactionnelle, par le jeu de la compétition entre ions communs qui s'établit au cours du temps. Par conséquent, **le BRGM considère incontournable que des simulations soient reconduites en tenant compte d'une cinétique réactionnelle**, comme cela a été fait dans [8] et [10].

- Les auteurs semblent assimiler pression et fugacité. La fugacité correspond à la valeur de la pression partielle d'une espèce gazeuse pondérée d'un coefficient multiplicateur (le coefficient de fugacité) afin de rendre compte de la non-idéalité du comportement de la phase gazeuse à des conditions de pression et de température données. La fugacité correspondra donc à la pression apparente vue par la solution aqueuse et qui sera le déclencheur des réactions chimiques. Ainsi, si l'on tient compte des données de [8], la

pression régnant dans le réservoir en fin d'injection de CO_2 est de l'ordre de 100 bar. Pour une température de l'ordre de 150°C, les modèles de Duan nous indiquent que la fugacité serait alors de 86 bar environ. A contrario, si la fugacité est effectivement de 100 bar, comme indiqué dans [11], cela signifierait que la pression régnant dans le réservoir devrait être d'environ 120 bar. Dans les deux cas, nous notons une incohérence par rapport aux données des autres documents mis à notre disposition. Ceci étant dit, le fait de considérer une fugacité majorée améliore bien le caractère conservatif des calculs effectués. TOTAL EP France devra cependant préciser ce point afin de lever toute ambiguïté.

Dans un modèle de transport réactif basé sur un mode de transport par diffusion pure, comme cela est le cas ici, le paramètre clé régissant la migration des espèces dissoutes depuis l'interface réservoir/couverture (base du modèle) vers les couches supérieures de la couverture est bien évidemment le coefficient de diffusion. Les auteurs ont fait le choix de se référer à la valeur du coefficient de diffusion du $CO_{2(aq)}$ dans l'eau minoré par l'intégration d'un terme de tortuosité. Au final, le coefficient de diffusion effectif retenu est de 10^{-10} m^2/s. Cette valeur nous paraît représentative d'un ordre de grandeur parfaitement admissible. Toutefois, compte tenu de l'impact de la valeur du coefficient de diffusion sur les résultats finaux des simulations**, le BRGM juge nécessaire, a minima, de réaliser deux simulations supplémentaires** pour une valeur inférieure (10^{-11} m^2/s par exemple) et une valeur supérieure (10^{-9} m^2/s par exemple) du coefficient de diffusion. Ainsi, la fiabilité des conclusions s'en trouvera grandement améliorée.

L'examen de la qualité des calculs réalisés soulève un autre point problématique. En effet, les courbes présentées sur la figure 1 semblent montrer une concentration constante d'argon dissous à partir d'une distance de 9 m par rapport à la base de la couverture, correspondant à une pression de 0.5 bar, soit moitié moins que la pression imposée à la base (1 bar). Or, dans ce type de modèle 1D, si la condition à la limite « amont » (à la base de la couverture) est généralement évidente (concentration constante par exemple), il est plus délicat a priori de fixer une condition à la limite « aval » (vers le haut de la couverture) dans la mesure où la concentration va a priori évoluer au cours du temps. Une solution de contournement consiste classiquement à considérer un domaine de suffisamment grande épaisseur pour qu'au bout du temps final des simulations effectuées (10 000 ans dans notre cas), la perturbation n'ait pas encore atteint la limite et qu'une condition de concentration imposée ou de flux nul (de manière équivalente) puisse être imposée sans que cela ne perturbe les calculs dans la zone d'intérêt. Or, pour un coefficient de diffusion de 10^{-10} m^2/s, la solution analytique de la diffusion d'un traceur parfait dans un milieu semi-infini[2] nous montre qu'à une distance de 10 m, la concentration en traceur au bout de 10 000 ans correspondra à 20% de la concentration imposée à la base de la couverture. Il est donc clair dans ce cas qu'imposer une valeur de flux nul ou de concentration constante modifiera très significativement le profil de concentration. La même solution analytique nous apprend en revanche qu'à une distance de 20 m, la concentration tombe à 1% de la concentration imposée à la base du domaine. Au vu de ces résultats, nous pensons que les calculs réalisés dans [11] sont nécessairement entachés d'une erreur imputable à un effet non souhaité de la condition à la limite aval, résultant d'un choix non pertinent de la géométrie du domaine. **Le BRGM considère qu'un domaine d'épaisseur d'au moins 20 ou 30 m serait à prendre en compte** (épaisseur qui serait à réajuster en fonction de la valeur du coefficient de diffusion, en se basant sur des calculs à l'aide de la solution analytique).

[2] Dans le cas d'un milieu 1D semi-infini dans lequel est imposée une concentration constante C_0 à l'une des limites, le profil de concentration C en fonction du temps t et de la distance x à cette limite s'exprime, pour un coefficient de diffusion D, selon l'équation simple suivante : $C = C_0 \cdot erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right)$

Enfin, dans ces simulations TOTAL EP France ne considère aucune phase minérale néoformée, seules les phases initialement présentes étant susceptible d'interagir. **Le BRGM estime que cette hypothèse peut *a priori* avoir des conséquences importantes et demande donc qu'elle soit justifiée**, en effectuant par exemple des simulations « batch » préliminaires visant à calculer les indices de saturation de phases minérales pertinentes compte tenu de la géochimie du système, mais qui ne seraient pas initialement présentes dans la couverture. La précipitation éventuelle de telles phases pourrait alors modifier significativement les chemins réactionnels et, par voie de conséquence, certaines des conclusions de cette étude.

Ainsi, au terme de l'analyse de ce document, le BRGM ne peut se prononcer sur la pertinence des conclusions proposées par TOTAL EP France. Des travaux complémentaires ainsi que certaines précisions doivent impérativement être apportées par TOTAL EP France afin de pouvoir donner un avis étayé sur l'impact mineur de l'injection de CO_2 sur l'intégrité de la couverture du réservoir.

2.2.2. Recommandations du BRGM concernant les effets chimiques des opérations d'injection

A la lecture des rapports techniques qui nous ont été fournis, **le BRGM juge nécessaire la réalisation de travaux complémentaires** en vue de pouvoir rendre un avis définitif sur les conclusions proposées par TOTAL EP France quant à l'absence de dégradations significatives du réservoir et de la couverture sous l'effet de l'injection de CO_2. Par ordre chronologique, ces travaux doivent porter principalement sur les points suivants :

1) Apporter des précisions et, le cas échéant, refaire des simulations visant à démontrer la **pertinence des simplifications faites pour passer du modèle CHESS au modèle GEM**. Par ailleurs, des explications sont attendues pour justifier la non prise en compte de l'équation d'électroneutralité dans les calculs de spéciation initiaux (sous CHESS). Le fait d'imposer des concentrations constantes en CO_2 et H_2S dissous, plutôt que des valeurs de pressions partielles, nécessite également plus d'arguments factuels et chiffrés pour pouvoir juger de la pertinence de ce choix.

2) A partir des résultats éventuellement amendés des travaux de caractérisation de l'état d'équilibre initial du système géochimique, **le BRGM juge indispensable de refaire les simulations à l'échelle du réservoir en prenant en compte, d'une part, l'évaporation de l'eau et, d'autre part, la précipitation des sels. L'impact de ces mécanismes réactionnels sur la porosité du réservoir doit également être clairement établi**.

3) Les **simulations des interactions au sein de la couverture doivent également être reprises en tenant compte des cinétiques de dissolution** et après avoir établi préalablement, sur la base de calculs « batch » (0D), une liste de minéraux non présents initialement et susceptibles de précipiter. De même et afin d'éviter d'induire des perturbations liées à une condition à la limite inappropriée, **les dimensions du domaine d'étude doivent être adaptées** à la valeur du coefficient de diffusion qu'il nous parait nécessaire de faire varier.

Comme indiqué en préliminaire de cette section, la difficulté majeure de l'approche proposée pour caractériser les interactions eau-gaz-roches est qu'elle repose entièrement sur des résultats de modèles. Force est de constater que nous ne disposons pas d'autres outils que la modélisation pour aborder ces aspects, aussi bien qualitativement que quantitativement. Face à

cette difficulté, nous recommandons à TOTAL EP France de s'appuyer sur plus d'éléments factuels afin de donner plus de poids à leur argumentaire. En particulier, le seul élément factuel et incontestable aujourd'hui quant à l'intégrité du réservoir préalablement à l'injection de CO_2 concerne son existence même, qui a permis de piéger efficacement des hydrocarbures pendant des millions d'années. De même, la période d'exploitation du réservoir n'a pas révélé de dégradations mesurables en termes d'efficacité du confinement. Ainsi, en s'appuyant sur ces faits avérés, il semble très utile de **procéder à des simulations réservoir** similaires dans leur principe à celles réalisées dans [8], mais en **occultant la période d'injection du CO_2**. Par la suite, il serait alors possible de tirer bénéfice d'une comparaison de ces simulations « blanches » avec celles intégrant la phase d'injection du CO_2. En l'absence de ces deux séries de simulations, il est en effet très délicat d'attribuer à la seule injection de CO_2 le déclenchement de tel ou tel mécanisme réactionnel, dans la mesure où la variation des pressions pendant la phase d'exploitation a elle aussi déclenché des réactions chimiques. En disposant d'une simulation de référence, et dans la mesure où l'impact calculé ne serait pas plus important en amplitude qu'en l'absence d'injection de CO_2, il serait ainsi plus aisé d'asseoir une argumentation visant à démontrer le faible impact de cette injection.

3. Avis sur le programme de surveillance proposé pour la phase de surveillance

Le présent chapitre a pour objet de présenter l'avis du BRGM sur le programme de surveillance proposé par TOTAL EP France pour la période post-injection et les techniques qui l'appuient, y compris en termes de modélisation du réservoir, en réponse à la question 4 posée par la DREAL Aquitaine. Dans un premier temps, le programme de surveillance proposé par TOTAL EP France pour la période post-injection est brièvement rappelé. Ensuite le BRGM se prononce sur les capacités de ce programme à « détecter des désordres dans le réservoir ou une fuite de gaz vers les milieux en surface ». Puis il émet un avis sur la capacité de ce programme à fournir « toutes les données nécessaires au terme de 3 années après l'arrêt de l'injection » pour conduire une étude de confinement à long terme probante et définir le programme de surveillance à long terme. Ces positions intègrent les recommandations issues des tierces-expertises réalisées en parallèle de celle du BRGM par l'INERIS (Farret *et al.*, 2013) et par l'Université de Pau Pays de l'Adour (Preud'homme, 2013).

3.1. PROGRAMME DE SURVEILLANCE PROPOSE PAR TOTAL EP FRANCE POUR LA PHASE DE SURVEILLANCE POST-INJECTION

Les dispositions de surveillance pour la phase post-injection font l'objet du chapitre 3 du Bilan intermédiaire, et des précisions et justifications y sont apportées dans les chapitres 4 et 5. Les programmes de surveillance au cours de l'injection et post-injection sont résumés et comparés dans le Tableau 1, fourni par TOTAL EP France. Outre les mesures figurant dans ce tableau, les dispositions de sécurité sur le site de Rousse seront maintenues actives durant la phase post-injection :

- La détection veilleuse torche ;
- Les détections intrusion, effraction tout comme la vidéosurveillance et l'éclairage ;
- Les détections CO_2 et H_2S.

De plus, concernant la surveillance du puits, TOTAL EP France indique au chapitre 3 du Bilan intermédiaire (section 2.1.2) que :

- « la pression dans l'espace annulaire EA1 sera contrôlée périodiquement ». L'étude de dangers (Bilan intermédiaire, chapitre 5, section 2.11.2) suggère que le rythme quotidien de contrôle de cette pression annulaire soit maintenu, toutefois ceci appelle confirmation de la part de TOTAL EP France.
- « l'intégrité du puits, ainsi que l'évolution de l'état de ses équipements, pourra être contrôlée grâce à des opérations d'audits déclenchées pendant la phase de surveillance ».

Enfin, TOTAL EP France avait mis en place dans le puits d'injection des dispositifs de mesure supplémentaires à des fins de recherche et développement :

- 3 capteurs micro-sismiques de fond de puits ;

- des capteurs de pression – température à 4 profondeurs différentes (1100 m, 2200 m, 3300 m, 4400 m).

L'étude de dangers (Bilan intermédiaire, chapitre 5, section 2.12) précise que ces dispositifs de recherche et développement seront maintenus en place pendant la phase post-injection, sauf en cas d'interruption non intentionnelle de leur fonctionnement : dans ce cas ils ne seraient pas remplacés, n'étant pas jugés nécessaires à la sécurité du site.

			Surveillance pendant la période d'injection			Surveillance post-injection		
Méthode	**Milieu**	**Technique employée**	**Paramètres mesurés**	**Points de mesures**	**Fréquence**	**Paramètres mesurés**	**Points de mesures**	**Fréquence**
Surveillance des écosystèmes	**Biotope Faune /Flore** Flore et habitats naturels Amphibiens Insectes	Etude faune flore (étude du stress des végétaux)	Contacts identifiés	33 stations	annuelle	Il est proposé de ne pas maintenir ce suivi pendant la phase de surveillance.		
				20 stations d'écoute nocturne 51 stations de relevé	annuelle			
				33 stations	annuelle			
Surveillance de la qualité des eaux de surface	**Eaux de surface**	Prélèvements et Analyses				Il est proposé de ne pas maintenir ce suivi pendant la phase de surveillance.		
	L'Arribeu		Physico-chimiques Bio-indicateurs : IBGN/IBD	2 stations	semestrielle			
	Ru d'Ollé Laprune		Physico-chimiques Bio-indicateurs : IBGN/IBD	1 station	semestrielle			
	La Juscle		Physico-chimiques Bio-indicateurs : IBGN/IBD	1 station	semestrielle			
	Confluence de l'Arribeu avec las Hies		Physico-chimiques	1 station	semestrielle			
Surveillance de la qualité des aquifères environnants	**Eaux souterraines**	Prélèvements et Analyses				Il est proposé de ne pas maintenir ce suivi pendant la phase de surveillance.		
	Nappe perchée		Physico-chimiques	3 sources	semestrielle			
	Nappe gave de Pau		Physico-chimiques	3 forages	semestrielle	Il est proposé de ne pas maintenir ce suivi pendant la phase de surveillance.		
	Nappe Sables infra-Molassiques		Physico-chimiques	3 forages	semestrielle	Il est proposé de ne pas maintenir ce suivi pendant la phase de surveillance.		
	Calcaire de Lasseube		Physico-chimiques	3 forages	semestrielle	Physico-chimiques	3 forages	annuelle
Suivi des émanations de CO_2 venant du sol	Air de surface	Mesure de flux dans une chambre d'accumulation	CH_4 et CO_2	35 points de mesures	semestrielle	Il est proposé de ne pas maintenir ce suivi pendant la phase de surveillance.		
Surveillance des gaz dans les sols	Sols de surface	Concentration des gaz dans le sol	CH_4, CO_2 et O_2	35 points de mesures	semestrielle	CH_4, CO_2 et O_2 Rapport isotopique du Carbone	35 points de mesures	annuelle
Surveillance sismique de surface	**Sismique de surface** Mouvements de la roche	Sismomètre en surface	Ecoute en continu	5 antennes	continue	Ecoute en continu	5 antennes	continue

Tableau 1 - Comparaison entre le programmes de surveillance pendant l'injection et le programme proposé par TOTAL EP France pour la post-injection

3.2. CAPACITE A DETECTER DES DEFAILLANCES

3.2.1. Etude des effets mécaniques

L'observation sur la période 2010 – 2012 a permis de constater que le réseau de surveillance micro-sismique est capable de détecter des séismes d'une magnitude pouvant descendre jusqu'à -1, ce qui correspond à une rupture de faille d'environ 3 mètres. L'expertise du réseau d'écoute micro-sismique conduite en 2009 (Fabriol et Delatre, 2009) avait montré qu'une telle sensibilité, avec les incertitudes de localisation établies par TOTAL EP France, était **largement suffisante pour détecter un éventuel dérangement du réservoir. Les conclusions majeures de cette expertise restent inchangées au regard de l'analyse des observations et des événements détectés au cours de la phase d'injection.**

Cependant, nous notons que le seuil minimal théorique de magnitude détectable par le réseau de surveillance sans antenne de fond est de -1,5. Or aucun événement de magnitude comprise entre -1,5 et -1,1 n'a été enregistré durant la période 2010 – 2012. Bien qu'il soit possible qu'aucun événement entre -1,5 et -1,1 n'ait eu lieu sur cette période, il ne peut être exclu, à ce stade, que le réseau en place soit un peu moins sensible que prévu. Cette baisse possible de sensibilité n'affecte pas la capacité du réseau à remplir sa mission de surveillance par rapport aux risques géomécaniques identifiés précédemment ; cependant, lever l'incertitude est possible et peu coûteux en examinant les données recueillies par l'antenne de fond durant sa période de fonctionnement. **Le BRGM recommande ainsi une analyse rapide des données déjà collectées par l'antenne micro-sismique de fond, afin de déterminer si un événement de magnitude comprise entre -1,5 et -1,1 n'a pas échappé au réseau de surveillance de surface.** Il ne s'agit pas d'incorporer l'antenne de fond de puits au dispositif de surveillance opérationnel, mais de mettre à profit les données qu'elle a produites comme support de validation **afin de statuer sur le niveau de sensibilité du réseau d'écoute de surface.**

D'autre part, les bulletins de surveillance ne font pas apparaître les incertitudes de localisation, ce qui nous interdit d'évaluer les performances du réseau de surveillance à cet égard. Il est très peu probable, compte tenu des analyses effectuées dans la tierce expertise du réseau d'écoute micro-sismique (Fabriol et Delatre, 2009), que l'incertitude de localisation soit telle qu'elle fausse l'interprétation faite par TOTAL EP France comme dans la présente expertise. Néanmoins, afin de conclure sans ambiguïté sur ces enregistrements micro-sismiques, **le BRGM recommande que les incertitudes de localisation soient identifiées pour les 3 événements situés au niveau du réservoir.**

3.2.2. Etude des effets chimiques

Comme indiqué à la section 2.2, aucune mesure ne permet de valider les évolutions chimiques appréhendées par la modélisation numérique, qui présentent des échelles de temps longues. Compte tenu des conditions du réservoir, en particulier sa profondeur, l'éventualité de prélèvements in situ doit être écartée, car elle créerait sans doute davantage de risques qu'elle n'aurait d'avantages. Ainsi, l'étude des risques liés aux effets chimiques se limite à l'amélioration du programme de simulations numériques.

3.2.3. Surveillance du comportement du puits

Les opérations de contrôle menées en 2006 et 2009 (avant l'injection de CO_2), ainsi qu'en 1967 (au moment du forage du puits), montrent :

- le bon état des deux tubages les plus profonds (absence de corrosion) : le liner 5'' et le cuvelage 7'' (par mesure au caliper, ou par extrapolation pour la partie 4436m-4400m).

- la bonne qualité de la cimentation de ces deux tubages dans les parties inférieures, donc au niveau du réservoir. La cimentation du cuvelage 7'' n'est de moins bonne qualité qu'au-dessus de 4000 m, c'est-à-dire plusieurs centaines de mètres au-dessus du réservoir et de la standing valve prévue.

- la bonne qualité du bouchon de ciment mis en place en 1985 en fond de puits entre les réservoirs Meillon et Mano, qui fait plus de 400 m d'épaisseur.

Ces éléments montrent ainsi un état satisfaisant du puits avant le début de l'injection de CO_2. La résistance des tubages et de la cimentation au contact du CO_2 est extrapolée à partir du bon état de ces éléments après 40 ans d'exposition à un milieu acide, le gaz naturel de Rousse contenant 4% de CO_2. Lors de l'injection de CO_2, le ciment et les tubages sont en contact avec une plus grande quantité de CO_2, mais sous forme relativement peu réactive. Au cours de la période de surveillance, il n'y a donc pas lieu de modifier le programme de surveillance du puits mis en place au cours de l'injection. Le BRGM recommande ainsi de poursuivre pendant cette phase les dispositions en vigueur :

- le contrôle **quotidien** de la pression annulaire ;

- la détection de CO_2 et H_2S en surface autour du puits, comme proposé par TOTAL EP France ;

- la mise en œuvre d'opérations de vérification de l'état du puits en cas de détection de fuite par une anomalie de la pression annulaire ou détection de gaz en surface ;

- la mise en œuvre d'opérations de vérification de l'état du puits en cas de détection de séisme de magnitude supérieure à 5 dans la zone sismotectonique[3] du puits.

3.2.4. Surveillance des écosystèmes de surface et des eaux

Au terme de son examen des données de surveillance des écosystèmes de surface ainsi que des eaux souterraines et de surface, l'INERIS (Farret *et al.*, 2013) recommande :

- Le **maintien de la surveillance des amphibiens**, en réduisant le nombre de sites mais en renforçant la méthode suivie ;

- L'arrêt de la surveillance de la flore et de celle des insectes, bien que cette dernière pourrait fournir des informations complémentaires à la surveillance des amphibiens ;

- Le **maintien de la surveillance** des paramètres physico-chimiques et biologiques **des eaux de surface sur 3 des 5 stations** suivies jusqu'à présent (sur l'Arribeu et la Juscle) ;

- Le **maintien de la surveillance physico-chimique de 6 des 12 stations de suivi des eaux souterraines** (nappes des Sables infra-molassiques et du Gave de Pau), au

[3] Zone considérée homogène du point de vue tectonique, et donc du point de vue des mouvements sismiques qui peuvent y être générés, telle qu'issue d'une étude spécifique comme celle de GEOTER (2002).

moins pour les paramètres liés à la chimie du CO_2 ; et de les **compléter par une analyse isotopique du carbone du CO_2** pour discriminer ses origines possibles.

3.2.5. Surveillance des gaz en surface et dans les sols

A l'issue de son examen des résultats de la surveillance des gaz en surface et dans les sols, Preud'homme (2013) conclut qu'il est nécessaire pendant la phase de surveillance :

- De maintenir une surveillance annuelle des teneurs en CO_2 et CH_4, par un relevé en début de saison hivernale, idéalement entre le 2 et le 8 décembre chaque année, sur 34 des 35 points suivis jusqu'alors, à l'exclusion du point n°23, trop souvent noyé pour fournir des informations utiles ;

- Compte tenu de cet échantillonnage hivernal, de baisser les seuils correspondants de vigilance (valeur enregistrée sur 3 stations) à 2% (au lieu de 5,4%) et d'anomalie (valeur enregistrée sur 1 station) à 5% (au lieu de 7,3%) ;

- De **réaliser une caractérisation isotopique du carbone du CO_2** systématiquement sur les points 1, 2, 16, 24, 25, 28, et sur les autres points en cas de teneur supérieure à 2%, en abaissant les seuils sur cette isotopie à $\delta^{13}C$ < (-26 ‰) pour la vigilance, $\delta^{13}C$ < (-28 ‰) pour l'anomalie ;

- De **réaliser une caractérisation isotopique du carbone du CH_4 en cas de teneur supérieure à 10 ppm** ;

- De **maintenir une surveillance annuelle des flux de CO_2 et CH_4** en surface, par un relevé en début de saison hivernale, idéalement entre le 2 et le 8 décembre chaque année, sur 34 des 35 points suivis jusqu'alors, à l'exclusion du point n°23, trop souvent noyé pour fournir des informations utiles

- Compte tenu de cet échantillonnage hivernal, de baisser les seuils correspondants de vigilance (valeur enregistrée sur 3 stations) à 5 $cm^3.min^{-1}.m^{-2}$ (au lieu de 7,4 $cm^3.min^{-1}.m^{-2}$) et d'anomalie (valeur enregistrée sur 1 station) à 9 $cm^3.min^{-1}.m^{-2}$ (au lieu de 9,5 $cm^3.min^{-1}.m^{-2}$) ;

- De **réaliser une caractérisation isotopique du carbone du CO_2 en cas de dépassement du seuil d'anomalie** sur le flux.

3.3. CAPACITE A FOURNIR LES DONNEES NECESSAIRES AUX ETUDES ET A LA SURVEILLANCE DU CONFINEMENT A LONG TERME

L'objet de la présente tierce-expertise n'est pas de se prononcer sur le confinement sûr et permanent du CO_2, mais sur le bilan intermédiaire d'exploitation. Néanmoins, la DREAL Aquitaine et TOTAL EP France souhaitent recueillir un avis sur la faculté du programme, mis en place pour la post-injection, à fournir les données permettant de démontrer le confinement sûr et permanent. Il est évidemment très délicat de se prononcer par anticipation sur les données qui seront produites et la capacité d'en tirer une démonstration sur le comportement à long terme. Au regard des échelles de temps en jeu pour les différents phénomènes impliqués dans l'évolution du site, notamment les phénomènes chimiques et de migration, la durée totale du projet pilote est très limitée. Le confinement permanent ne pourra ainsi pas être démontré par des résultats de surveillance seuls. L'objet de la surveillance est bien de fournir des éléments de renseignement pour les simulations numériques qui feront nécessairement partie de la

démonstration. A cet égard, la surveillance vise l'acquisition d'informations de natures diverses ; l'enjeu pour TOTAL EP France pour la fermeture du site est de montrer que les faisceaux de ces informations et des modèles qu'elles appuient convergent vers la prévision d'une situation de stabilité à long terme.

Dans cette section, le BRGM formule des **recommandations sur les mesures et études qui lui paraissent souhaitables**, au vu du bilan intermédiaire d'exploitation ainsi que des tierces expertises réalisées en parallèle par l'INERIS et l'UPPA, afin d'éclairer les éléments du dossier qui manquent encore de certitude. Le **BRGM ne s'engage aucunement sur l'exhaustivité** du programme résultant de ces recommandations : il ne peut être exclu qu'à l'issue des 3 années de surveillance, d'autres besoins en données apparaissent pour conclure sur le confinement à long terme du CO_2.

3.3.1. Etude de l'intégrité mécanique du site de stockage

Dans la perspective de l'étude d'intégrité mécanique à long terme du site de stockage, le BRGM émet les recommandations suivantes par rapport aux études du bilan intermédiaire d'exploitation :

- Comme évoqué au paragraphe 2.1.3, dans un souci d'exhaustivité de l'analyse des effets mécaniques, **le BRGM recommande que TOTAL EP France apporte des précisions et arguments par rapport au mode de perte d'intégrité de la couverture par propagation d'une fracture initiée par traction depuis le réservoir et sa pénétration dans la couverture** (« dyke-type extension », voir par exemple Leguillon et al., 2013).

- Les modélisations géomécaniques identifient clairement la faille 4V comme la plus critique, car la pression maximale qu'elle supporterait est celle de son état initial, dans le cas où elle deviendrait passante. La pression maximale admissible est donc déterminée soit par cette valeur, *i.e.* 410 bars (bien plus que la pression atteinte à la fin du pilote d'injection), soit par la pression d'entrée capillaire du CO_2 entre le réservoir et la couverture (Rapport Géomécanique, section 6.1). La note transmise par TOTAL EP France sur cette pression d'entrée capillaire dans la couverture (*cf.* Annexe 2, [15]) montre que sa mesure s'est révélée non concluante, mettant en évidence la difficulté de mesurer ce paramètre. Dans l'optique de disposer de toutes les informations utiles à une étude de confinement à long terme, **le BRGM recommande à TOTAL EP France d'intégrer l'information de vulnérabilité de la faille 4V dans la démarche d'évaluation de risque et de surveillance** ; plus spécifiquement, **le BRGM recommande que soient apportées des précisions sur la capacité du réseau micro-sismique à détecter un évènement au niveau de la faille 4V.**

- Le Rapport Géomécanique (*cf.* Annexe 2, [1]) présente dans sa synthèse (section 6.2) un programme de caractérisation complémentaire des paramètres géomécaniques. Ce programme est jugé exhaustif et adéquat par le BRGM, dans l'optique de mieux caractériser les sources d'incertitudes non prises en compte par les scénarios testés. Afin de disposer de toutes les informations utiles à une étude du confinement à long terme, **le BRGM recommande que soit mis en œuvre le programme de recherche identifié dans ce document.**

3.3.2. Etude du comportement hydrodynamique et chimique

Comme mentionné au paragraphe 3.2.2, il ne peut être attendu de mesure permettant de conforter l'appréhension des effets chimiques à long terme.

Les données de pression et de température en fond de puits fournissent un élément de calage de l'aspect hydrodynamique des modélisations. Leur exploitation peut ainsi permettre de renforcer la confiance dans les modèles utilisés. La reproduction par les modèles du comportement lors de la déplétion puis de l'injection de CO_2 jusqu'à présent étant correcte, la confiance dans cet aspect des simulations est déjà significative, et les données enregistrées au cours de la phase de surveillance, bien qu'intéressantes, ne semblent pas devoir revêtir une importance décisive.

3.3.3. Intégrité à long terme du puits

Dans le dossier de TOTAL EP France, la résistance à long terme des tubages et de la cimentation en contact avec le CO_2 stocké est extrapolée à partir du bon état de ces éléments après 40 ans d'exposition à un milieu acide, le gaz naturel contenant 4% de CO_2. Les études géochimiques montrent une diminution du pH dans le réservoir à proximité du puits d'injection. L'historique du puits suggère que les matériaux des tubages et de la cimentation sont à même de résister à cette acidité. Pour autant, une évolution chimique des ciments à long terme sous l'effet du CO_2 ne peut être exclue ; une carbonatation du ciment n'entraîne pas forcément une dégradation de ses propriétés (possibilité de bouchage de porosité dans le ciment par précipitation de calcite), mais la possibilité de création d'un chemin de fuite ne peut être formellement écartée, notamment après la phase de surveillance. D'après les études de TOTAL EP France, ceci ne mènerait pas à une remontée de CO_2, mais dans le cas le plus défavorable à un transfert d'eau de l'aquifère de Lasseube vers le réservoir de Mano.

Eu égard aux échelles de temps relatives aux évolutions chimiques du réservoir et des composants du puits, la durée de surveillance pendant 3 années à l'issue de l'injection paraît insuffisante pour statuer avec certitude sur l'intégrité du puits. Néanmoins, afin de disposer du maximum de données pour les études de stabilité à long terme, et en accord avec les dispositions en vigueur du Règlement Général des Industries Extractives, **la réalisation d'un programme de diagraphie de contrôle de l'état du puits paraît indispensable à la fin de la période de surveillance avant la fermeture définitive du puits**.

3.3.4. Impacts potentiels sur l'environnement

Les mesures réalisées en surface et sur les eaux souterraines au cours de la phase de surveillance doivent permettre de mieux appréhender leur pertinence et de dégager des tendances sur l'effet ou l'absence d'effet. Néanmoins, elles ne peuvent pas être un outil de démonstration du confinement à long terme : tout au plus permettent-elles de constater qu'il n'y a pas eu de défaillance ni d'erreur d'analyse du comportement à court terme. De plus, la durée totale du projet, y compris la durée de 3 ans prévue pour la phase de surveillance, est très courte par rapport aux échelles de temps d'une remontée de CO_2 et d'impacts sur l'environnement. Un bilan devra être réalisé à l'issue de la période de surveillance pour établir de nouvelles recommandations pour le long terme.

3.4. SYNTHESE DES RECOMMANDATIONS POUR LA PHASE DE SURVEILLANCE

Pour résumer les paragraphes ci-dessus, le BRGM, en tenant compte des avis exprimés par l'INERIS et l'UPPA, recommande de suivre le programme de surveillance décrit au Tableau 2, au lieu de celui proposé par TOTAL EP France au Tableau 1. Nous n'y faisons pas figurer les dispositions relatives à la surveillance du puits, mentionnées aux paragraphes 3.2.3 et 3.3.3.

			Surveillance pendant la période d'injection			Surveillance post-injection		
Méthode	**Milieu**	**Technique employée**	**Paramètres mesurés**	**Points de mesures**	**Fréquence**	**Paramètres mesurés**	**Points de mesures**	**Fréquence**
Surveillance des écosystèmes	**Biotope Faune /Flore** Flore et habitats naturels Amphibiens Insectes	Etude faune flore (étude du stress des végétaux)	Contacts identifiés	33 stations	annuelle	Flore et habitats naturels	-	-
				20 stations d'écoute nocturne 51 stations de relevé	annuelle	Amphibiens	20 stations	annuelle
				33 stations	annuelle	Insectes	-	-
Surveillance de la qualité des eaux de surface	**Eaux de surface**	Prélèvements et Analyses						
	L'Arribeu		Physico-chimiques Bio-indicateurs : IBGN/IBD	2 stations	semestrielle	Physico-chimiques Bio-indicateurs : IBGN/IBD	2 stations	semestrielle
	Ru d'Ollé Laprune		Physico-chimiques Bio-indicateurs : IBGN/IBD	1 station	semestrielle	-	-	-
	La Juscle		Physico-chimiques Bio-indicateurs : IBGN/IBD	1 station	semestrielle	Physico-chimiques Bio-indicateurs : IBGN/IBD	1 station	semestrielle
	Confluence de l'Arribeu avec las Hies		Physico-chimiques	1 station	semestrielle	-	-	-
Surveillance de la qualité des aquifères environnants	**Eaux souterraines**	Prélèvements et Analyses						
	Nappe perchée		Physico-chimiques	3 sources	semestrielle	-	-	-
	Nappe gave de Pau		Physico-chimiques	3 forages	semestrielle	Physico-chimiques Rapport isotopique du Carbone	3 forages	semestrielle
	Nappe Sables infra-Molassiques		Physico-chimiques	3 forages	semestrielle	Physico-chimiques Rapport isotopique du Carbone	3 forages	semestrielle
	Calcaire de Lasseube		Physico-chimiques	3 forages	semestrielle	-	-	-
Suivi des émanations de CO_2 venant du sol	Air de surface	Mesure de flux dans une chambre d'accumulation	CH_4 et CO_2	35 points de mesures	semestrielle	CH_4, CO_2 Rapport isotopique du Carbone si flux de CO_2>9 $cm^3.min^{-1}.m^{-2}$	34 points de mesures	annuelle
Surveillance des gaz dans les sols	Sols de surface	Concentration des gaz dans le sol	CH_4, CO_2 et O_2	35 points de mesures	semestrielle	CH_4, CO_2 Rapport isotopique du Carbone du CO_2 sur les points 1, 2, 16, 24, 25, 28, et en cas de teneur >2% sur les autres points Rapport isotopique du Carbone du CH_4 en cas de teneur >10 ppm	34 points de mesures	annuelle
Surveillance sismique de surface	**Sismique de surface** Mouvements de la roche	Sismomètre en surface	Ecoute en continu	5 antennes	continue	Ecoute en continu	5 antennes	continue

Tableau 2 - Comparaison entre le programme de surveillance pendant l'injection et le programme recommandé par le BRGM pour la post-injection

4. Conclusions sur le bilan intermédiaire d'exploitation

Dans l'optique de l'arrêt des opérations d'injection de CO_2 sur le site pilote de Rousse (Pyrénées-Atlantiques), la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement d'Aquitaine a sollicité auprès du BRGM un avis sur le Bilan intermédiaire d'exploitation établi par l'opérateur de ce pilote, TOTAL EP France. L'avis du BRGM a été rédigé au vu de ce bilan intermédiaire établi en mai 2013 (TOTAL EP France, 2013), ainsi que des documents complémentaires communiqués au BRGM par TOTAL EP France, listés à l'Annexe 2. Il porte sur :

- L'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection à ce jour ;
- Le programme de surveillance proposé pour la phase post-injection.

4.1. AVIS SUR L'ABSENCE D'EFFET MESURABLE SUR LE RESERVOIR DES OPERATIONS D'INJECTION

4.1.1. Effets mécaniques

Au vu des documents examinés, **les conclusions de TOTAL EP France** sur l'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection **paraissent correctes du point de vue de l'observation microsismique**. Le BRGM juge pertinente la démarche d'ensemble d'analyse et d'évaluation des risques géomécaniques, et les approches et techniques mises en œuvre pour les études mécaniques sont en accord avec l'état de l'art sur ce sujet. Les différents scénarios testés permettent de borner les principales sources d'incertitudes et de balayer un éventail exhaustif des conditions d'injection menant à une possible perte d'intégrité ; les hypothèses relatives aux matériaux sont jugées pertinentes. Il apparaît que la pression du réservoir à la fin de la période d'injection est bien inférieure aux niveaux susceptibles de remettre en cause l'intégrité de la couverture ; **le BRGM considère largement suffisant le niveau de confiance associé à cette marge de sécurité**. Les différents modes de perte d'intégrité de la couverture considérés par TOTAL EP France sont jugés pertinents et les différents arguments rassemblés dans le dossier consulté sont validés. Cependant, dans un souci d'exhaustivité de l'analyse des effets mécaniques par rapport à l'état de l'art le plus récent, le BRGM estime que des précisions et arguments par rapport au mode de perte d'intégrité de la couverture par propagation d'une fracture initiée par traction depuis le réservoir et sa pénétration dans la couverture renforceraient encore ce dossier.

4.1.2. Effets chimiques

Au vu des documents examinés, le BRGM ne peut se prononcer sur les conclusions proposées par TOTAL EP France quant à l'absence de dégradations significatives du réservoir et de la couverture sous l'effet chimique de l'injection de CO_2. Le BRGM juge nécessaire la réalisation de travaux complémentaires de modélisation, portant principalement sur :

- la justification de la **pertinence des simplifications faites pour passer du modèle CHESS au modèle GEM** et des hypothèses retenues pour l'établissement de l'état d'équilibre initial ;

- la réalisation de nouvelles **simulations à l'échelle du réservoir prenant en compte, d'une part, l'évaporation de l'eau et, d'autre part, la précipitation des sels, et établissant l'impact de ces mécanismes réactionnels sur la porosité du réservoir ;**

- la reprise des **simulations des interactions au sein de la couverture en tenant compte des cinétiques de dissolution,** après avoir établi une liste de minéraux non présents initialement et susceptibles de précipiter, et en adaptant **les dimensions du domaine d'étude.**

En l'absence de possibilité de vérification par des mesures des évolutions chimiques du réservoir, ces compléments au programme de modélisation numérique paraissent indispensables pour statuer sur l'absence d'effet significatif à long terme.

4.2. AVIS SUR LE PROGRAMME DE SURVEILLANCE PROPOSE POUR LA PHASE POST-INJECTION

4.2.1. Capacité à détecter des défaillances

Comme l'avait estimé l'expertise du BRGM en 2009 (Fabriol et Delatre, 2009), **la sensibilité du réseau de surveillance micro-sismique est largement suffisante pour détecter un éventuel dérangement du réservoir.** Néanmoins, **le BRGM recommande une analyse rapide des données déjà collectées par l'antenne micro-sismique de fond, afin de statuer sur le niveau de sensibilité du réseau d'écoute de surface. Le BRGM recommande par ailleurs que les incertitudes de localisation soient identifiées pour les 3 événements situés au niveau du réservoir.**

Par ailleurs, le BRGM recommande le maintien des dispositions en vigueur pendant la période d'injection pour le suivi du puits : contrôle **quotidien** de la pression annulaire ; détection de CO_2 et H_2S en surface autour du puits ; mise en œuvre d'opérations de vérification de l'état du puits en cas d'anomalie de la pression annulaire, de détection de gaz en surface ou de séisme de magnitude supérieure à 5 dans la zone sismotectonique du puits.

Concernant la surveillance de l'environnement autour du stockage, les expertises de l'INERIS (Farret *et al.*, 2013) et de l'UPPA (Preud'homme, 2013) mènent à un avis défavorable sur l'allègement du programme proposé par TOTAL EP France ; elles recommandent la **poursuite de la surveillance** :

- Des **amphibiens** ;

- De la **qualité des eaux de surface sur 3 stations** (sur l'Arribeu et la Juscle) ;

- De la **qualité des eaux souterraines sur 6 stations** (nappes des Sables infra-molassiques et du Gave de Pau), en la **complétant par une analyse isotopique du carbone du CO_2** ;

- Des **teneurs en CO_2 et CH_4 dans les sols**, avec une caractérisation isotopique du carbone du CO_2 systématique sur 6 points et en cas de dépassement du seuil de 2% sur les autres points, ainsi qu'une caractérisation isotopique du carbone du CH_4 en cas de dépassement du seuil de 10 ppm ;

- Des **flux de CO_2 et CH_4** en surface, complétée par **une caractérisation isotopique du carbone du CO_2** en cas de dépassement du seuil d'anomalie.

4.2.2. Capacité à fournir les données nécessaires aux études et à la surveillance du confinement à long terme

Au vu du dossier consulté et des avis émis par ailleurs par l'INERIS (Farret *et al.*, 2013) et l'UPPA (Preud'homme, 2013) sur ce dossier, le BRGM formule les recommandations suivantes sur les mesures et études qui lui paraissent souhaitables dans l'optique d'une démonstration sur le comportement à long terme ; il **ne s'engage** toutefois **aucunement sur l'exhaustivité** du programme résultant de ces recommandations : il ne peut être exclu qu'à l'issue des 3 années de surveillance, d'autres besoins en données apparaissent pour conclure sur le confinement à long terme du CO_2. Dans l'optique de disposer de toutes les informations utiles à une étude du confinement à long terme :

- **Le BRGM recommande que TOTAL EP France apporte des précisions et arguments par rapport au mode de perte d'intégrité de la couverture par propagation d'une fracture initiée par traction depuis le réservoir et sa pénétration dans la couverture**.

- **Le BRGM recommande que soient apportées des précisions sur la capacité du réseau micro-sismique à détecter un évènement au niveau de la faille 4V.**

- **Le BRGM recommande que soit mis en œuvre le programme de recherche** identifié dans le rapport géomécanique communiqué par TOTAL EP France (*cf.* Annexe 2, [1], section 6.2) et qui vise à réduire les incertitudes sur l'état des contraintes et les propriétés géomécaniques des roches.

- **Le BRGM recommande la mise en œuvre d'un programme de diagraphie de contrôle de l'état du puits à la fin de la période de surveillance avant la fermeture définitive du puits.**

5. Bibliographie

Bouc O., Fabriol H., Kervévan C., Rey J., Rohmer J. (2008) Expertise du dossier « Code Minier » pour l'autorisation du pilote de CO_2 à Rousse (64). Rapport BRGM/RC-56440-FR, 126 p.

Bouc O., Fabriol H., Kervévan C., Rey J., Rohmer J. (2009) Avis sur les compléments apportés au dossier « Code Minier » pour l'autorisation du pilote de CO_2 à Rousse (64). Rapport BRGM/RC-56998-FR, 50 p.

Fabriol H., Delatre M. (2009) Avis sur les performances du réseau d'écoute sismique TOTAL à Rousse (64). BRGM/RP-57741-FR, 35 p.

Farret R., Pucheux N., Chaumette S., Lafortune S. (2013) Tierce expertise du bilan intermédiaire d'exploitation du pilote d'injection de CO_2 à Rousse. Impact environnemental et sélection des scénarios de risque. Rapport d'étude INERIS N° DSC-13-139996-10787A, 43 p., 1 annexe.

GEOTER (2002) Révision du zonage sismique de la France – Etude probabiliste. Rapport final n° GTR/MATE/0701–150.

Gesret A., Noble M. (2009) Expertise du dossier « Stockage géologique de CO_2 sur le site de Rousse - Réseau d'écoute micro-sismique ». Ecole des Mines de Paris 2009-10-28.1.

Leguillon D., Karnaeva E.,·Baroni A., Putot C. (2013) Tight sedimentary covers for CO_2 sequestration. Int J Fracture, DOI 10.1007/s10704-013-9840-5

Preud'homme H. (2013) Tierce-expertise « Gaz de Sol » après injection de CO_2 pour stockage géologique à Rousse (64), 7 p.

TOTAL EP France (2013) Projet Pilote CO_2 – Travaux Miniers – Bilan intermédiaire d'exploitation du pilote de production, de captage, de transport et de stockage géologique de CO_2, Mai 2013, 5 chapitres, 5 annexes.

Annexe 1

Courrier de la DREAL Aquitaine requérant de TOTAL EP France une tierce-expertise du bilan intermédiaire d'exploitation

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PREFET DES PYRENEES-ATLANTIQUES

Direction Régionale de l'Environnement,
de l'Aménagement et du Logement
Région Aquitaine

Unité Territoriale des Pyrénées-Atlantiques

Affaire suivie par Yves Boulaigue

yves.boulaigue@developpement-durable.gouv.fr
tél : 05 47 41 31 05 – fax : 05 47 41 31 24

PAU, le 2.4.13

Le Chef de l'UT 64

à

Monsieur le Directeur de T.E.P.F.
BP 22
64170 LACQ
A l'attention de M.TERRAZ

OBJET : Pilote CO_2 - Bilan intermédiaire d'exploitation

REFER : Votre transmission en date du 31 janvier

Monsieur le Directeur,

Par lettre en référence vous m'avez communiqué votre bilan intermédiaire de l'exploitation du pilote CO_2.

Le document est en effet requis par l'article 1.5.6.2 de l'arrêté préfectoral du 13 mai 2003. Il comprend notamment une mise à jour des études d'impact et des dangers produites dans le dossier de demande d'autorisation initiale.

A ce stade votre dossier n'appelle pas de remarque particulière de ma part, mais je souhaite que vous le soumettiez à une tierce expertise, après avoir complété le bilan de la surveillance pour les données de toute l'année 2012.

Je joins en annexe la liste des questions auxquelles le tiers expert devra répondre. Le cas échéant vous pourrez choisir plusieurs tiers experts en fonction des questions posées. Ceux-ci pourront s'appuyer sur le document transmis ainsi que sur tout document dont vous disposeriez en support. Je vous demande de bien vouloir me soumettre le choix du ou des tiers experts.

Cette analyse devra permettre à la DREAL de proposer au Préfet une mise à jour des conditions de surveillance des installations après l'arrêt de l'injection de CO_2 dans la perspective de l'arrêt définitif des travaux à l'issue de cette période de surveillance.

D'ores et déjà et en parallèle de cette tierce expertise je vous demande de m'indiquer de façon précise les conditions dans lesquelles vous appliquerez l'article 1.5.3 de votre arrêté préfectoral à

Horaires d'ouverture : 8h30-12h00 - 13h30-16h30
Tél. : 05 47 41 31 00 – fax : 05 47 41 31 24
Cité administrative - rue Pierre Bonnard - CS87564 64075 PAU cedex

l'échéance de l'arrêt de vos installations de traitement de gaz à Lacq. Cet article est destiné à garantir la disponibilité des installations qui permettraient de traiter, à Lacq, le gaz injecté à Rousse si celui-ci devait être extrait.

Vous m'indiquerez ainsi quelles seront les installations qui pourraient assurer cette fonction, et les garanties réglementaires dont ces installations disposent à cet effet.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Directeur, l'expression de ma considération distinguée.

Le chef de l'UT 64

Yves Boulaigue

Liste de questions soumises à tierce expertise

1 - Le bilan intermédiaire établit le résultat de la surveillance environnementale exercée sur :
– les eaux de surface
– les eaux souterraines
– les gaz du sol
– la faune et la flore
et conclut à l'absence d'impact des opérations d'injection sur l'environnement.

Le tiers expert devra se prononcer sur l'absence d'effet mesurable sur ces milieux des opérations d'injection, au regard des résultats de surveillance acquis.

2 - Le bilan intermédiaire établit le résultat de la surveillance du réservoir géologique dans lequel a été injecté le gaz au moyen :
– du réseau de surveillance micro sismique
– des sondes de pression et de température dans le puits.

Le tiers expert devra se prononcer sur l'absence d'effet mesurable sur le réservoir des opérations d'injection au regard de ces résultats de surveillance y compris par comparaison avec les modélisations effectuées.

3 - Le bilan intermédiaire n'identifie pas de risque ou de danger nouveau, à l'issue de la période d'injection, y compris en réexaminant le retour d'expérience international.

Le tiers expert indiquera si, au regard de l'accidentologie de 2009 à 2012 sur ce type d'opération de nouveaux scénarios sont à considérer.

Il portera également un avis sur l'évaluation faite par Total du scénario de fuite de l'aquifère Lasseube dans le réservoir mano via le puits.

4 - TEPF propose de réduire la surveillance exercée par rapport aux prescriptions fixées par l'arrêté du 13 mai 2009.

Le tiers expert indiquera si le programme de surveillance proposé et les techniques -y compris de modélisation du réservoir- sur lesquelles il s'appuie lui paraissent adaptés au regard des deux objectifs suivants:
– détecter des désordres dans le réservoir ou une fuite de gaz vers les milieux en surface en phase de post injection,
– disposer de toutes les données nécessaires au terme de 3 années après l'arrêt de l'injection pour pouvoir d'une part conclure que tous les éléments disponibles tendent à prouver que le CO2 injecté restera confiné de façon permanente et sûre et d'autre part définir le programme de surveillance à long terme.

Ce second objectif pouvant également dépendre de travaux de R&D en cours, TEPF présentera au tiers expert le bilan de ces travaux et le programme pour la période 2013-2015. Le tiers expert se prononcera sur l'adéquation de celui-ci à l'objectif visé.

Annexe 2

Liste des études techniques communiquées par TOTAL EP France

[1] Intégrité du site de Rousse lors de l'injection de CO2. Note TOTAL Exploration Production EP/OPS/FP/EP/MR/ 11-0233, Octobre 2011, 100 p.

[2] Bulletin de surveillance sismique du 1er semestre 2010, 8 p.

[3] Bulletin de surveillance sismique du 2nd semestre 2010, 7 p.

[4] Bulletin de surveillance sismique du 1er semestre 2011, 7 p.

[5] Bulletin de surveillance sismique du 2nd semestre 2011, 6 p.

[6] Bulletin de surveillance sismique du 1er semestre 2012, 5 p.

[7] Bulletin de surveillance sismique du 2nd semestre 2012, 7 p.

[8] Rousse Mano reservoir modeling H_2O evaporation, gas dissolution and chemical transport by GEM. Memo TOTAL Exploration Production EP/DEV/GIS/RES/ 11-297, 12 Août 2011, 17 p.

[9] Pilote d'injection de CO_2 de Rousse : Composition minéralogique de référence du réservoir (Dolomie de Mano) et de sa couverture. Memo TOTAL Exploration Production EP/EXPLO/TE/ISS/RGM M-2012-052, 10 Septembre 2012, 8 p., 7 tableaux, 11 figures.

[10] Projet Géomodélisation de Rousse / Action 3.4.1 : Mise à jour du modèle géochimique suite aux études de caractérisation de la chlorite. Memo TOTAL Exploration Production EXPLO/TE/ISS/RGM - M2011-032, 19 Juillet 2011, 29 p.

[11] Modélisation de la diffusion du CO_2 stocké dans le réservoir de Rousse au sein de la couverture du stockage. Memo TOTAL Exploration Production EP/EXPLO/TE/ISS/RGM 2013-088, 29 Juillet 2013, 11 p.

[12] Données Q P T Rousse 01012012_10122012.xlsx : tableur de données d'injection du 01/01/2012 au 10/12/2012.

[13] Projet Géomodélisation de Rousse / Action 3.4.1 : Résultats 2009-2010 sur la minéralogie du réservoir et de la couverture de Rousse. Memo TOTAL Exploration Production DGEP/GSR/TG/ISS/CLAS M010-034, 2 juin 2010, 29 p.

[14] Projet Géomodélisation de Rousse / Action 3.4.1 : Construction d'un modèle géochimique initial sous CHESS thermodynamiquement équilibré. Memo TOTAL Exploration Production SCR/RD/MGR 2010-161, 16 septembre 2010, 14 p.

[15] Mesure de la pression d'entrée – Projet ROUSSE – Essais 2011. Note technique IFPEN R0310R/PB/mj-007-12, 1er février 2012, 9 p.

Annexe 3

Analyse critique du rapport référencé en Annexe 2, [8]

Le rapport référencé en Annexe 2, [8] présente, outre une piètre qualité rédactionnelle qui en rend difficile la bonne compréhension, de nombreuses lacunes aussi bien sur la forme que sur le fond. Nous rapportons ici les principaux défauts soulevés par le BRGM.

Cette étude se consacre d'abord à la description du transfert de deux modèles ECLIPSE vers GEM. De ces deux modèles, dénommés Maxi et Mini, seul le dernier semble pouvoir fonctionner sous GEM sans problème majeur de convergence. Cependant aucun détail ne figure quant à la nature exacte de ces deux modèles de base : leurs noms laissent imaginer que Maxi représente un modèle maillé plus finement que le modèle Mini, à moins qu'il ne concerne un domaine plus étendu ?

Les courbes de perméabilité relative ont dû être modifiées pour des raisons d'incompatibilité des profils ECLIPSE dans GEM. Il est indiqué dans le rapport que l'impact de ces modifications est faible sur les résultats globaux. Le BRGM estime qu'il manque d'éléments factuels permettant la comparaison (courbes, tableaux de valeurs, etc.).

Un ajustement de la valeur de la transmissivité de la faille principale séparant les régions A et B du modèle permet d'aboutir à un « history matching » sur les pressions de fond de puits jugé satisfaisant pour le modèle Mini. Pour le modèle Maxi, la valeur de transmissivité a dû être réajustée (en référence à un mémo que le BRGM n'a pas eu à sa disposition). En l'absence de données plus détaillées, le BRGM ne peut émettre d'avis sur la validité du transfert ECLIPSE-GEM.

Pour traiter de la prise en compte simultanée des processus de dissolution des gaz dans la phase aqueuse et d'évaporation de l'eau dans la phase gaz, il est tout d'abord fait référence à une validation des calculs du rapport eau/gaz (WGR) par l'intermédiaire d'un logiciel interne à TOTAL EP France (BEST). En l'absence de plus d'informations chiffrées et d'explications, les conclusions du rapport quant à la validité des calculs de WGR par GEM ne peuvent être vérifiées par le BRGM. De même, la seule figure n°5 nous paraît manquer d'explications pour valider les conclusions du calcul du LGR (Liquid-Gas Ratio). Les résultats relatifs aux calculs d'évaporation de l'eau montrent que la zone à proximité immédiate du puits d'injection s'est asséchée quasi-complètement depuis le début des années 1990, sous l'effet de la déplétion du réservoir. Les simulations montrent que ce phénomène a vu son extension croître pendant la phase d'injection du CO_2. La zone réellement impactée par les diverses injections (quelques mailles autour du puits d'injection apparemment, *cf.* figure 7) aurait gagné à faire l'objet d'une vue plus détaillée. Par ailleurs, une échelle spatiale fait défaut sur cette figure. S'agissant des calculs de dissolution des gaz (CO_2, H_2S et CH_4), là encore la zone réellement impactée concerne une relativement faible proportion de la surface géométrique représentée sur la figure 9. Un modèle plus limité dans son extension mais également plus raffiné aurait sans doute permis d'améliorer la précision de ces calculs et, sans aucun doute, de donner plus de clarté aux arguments de TOTAL EP France. D'une manière générale, aucune indication n'est fournie sur le modèle géométrique : les figures 7, 9, 10 et 15 n'indiquent pas le sens de la géométrie du réservoir représentée (coupe 2D verticale ou coupe 2D horizontale) ; aucune donnée sur le nombre et la taille des mailles n'est fournie, aucune précision sur l'extension du modèle (dimensions) et sur sa nature 2D ou volumique (3D) n'est disponible. L'absence d'information sur ces points empêche de conclure sur la qualité des travaux réalisés.

Concernant le couplage des processus précédemment modélisés avec les réactions chimiques, la définition des conditions initiales repose sur les données établies dans [10]. Suite à des problèmes de convergence, l'option d'évaporation de l'eau a dû être désactivée. Ces difficultés sont imputables, semble-t-il, aux concentrations extrêmes en sels dissous (jusqu'à plus de 300 mol/kg) calculées par le modèle dans les zones de forte évaporation de l'eau.

L'impossibilité dans un modèle géochimique d'autoriser la précipitation de sels dissous (halite à minima) paraît étonnante. Ce point a apparemment fait l'objet d'une remontée de bug auprès de CMG, développeur et distributeur de GEM, restée sans réponse à la date de rédaction du rapport. De même, des difficultés de convergence sont apparues à cause de la forme des courbes de perméabilités relatives. Une fois ces dernières modifiées à nouveau (par rapport à la version de référence utilisée dans le modèle ECLIPSE) et le pas de temps réduit, la convergence a finalement été atteinte au prix de temps de calcul très conséquents (près d'une vingtaine de jours pour simuler l'évolution du système entre 1970 et 2171, date à laquelle la simulation a cessé de converger). Il est clair que de tels temps de calcul interdisent les études de sensibilité sur les paramètres clés du système modélisé. Enfin, les résultats présentés sur la réactivité de la roche montrent un impact important sur les différentes phases minérales dès la période de déplétion du réservoir, à cause notamment de la diminution de la pression en CO_2 qui déstabilise rapidement les équilibres initiaux. Au vu de la faible durée de la phase d'injection du CO_2 (3 ans), il est difficile d'en appréhender réellement l'impact sur les phases minérales, d'autant plus que bilan massique global à l'échelle du réservoir (figure 13) montre un sens réactionnel inverse aux résultats établis (en calcul batch) dans [10]. Une maille proche du puits d'injection (figure 15) présente en revanche un comportement des phases minérales plus cohérent avec ce qui était attendu au regard de l'étude précédente [10]. La comparaison des figures 16 et 17 (bilans massiques des différentes phases minérales depuis le début de l'injection) ne paraît, elle, pas recevable en l'état, du fait d'échelles différentes. Enfin, aucune donnée de variation de la porosité n'a pu être fournie au terme de ces simulations, encore une fois pour cause de bug de GEM, signalé à CMG. Cette absence semble regrettable au vu des objectifs de l'étude.

Centre scientifique et technique
Direction Risques et Prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr