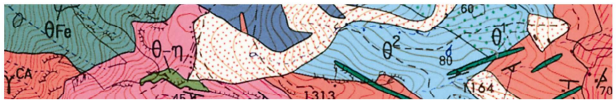
Document confidentiel



Maîtrise des impacts et risques liés à l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère : enjeux, verrous et pistes de recherche

Rapport Final

BRGM/RP-60312-FR
Septembre 2011

IFP Energies nouvelles

INERIS

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document confidentiel

Maîtrise des impacts et risques liés à l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère : enjeux, verrous et pistes de recherche

Rapport Final

BRGM/RP-60312-FR
Septembre 2011

Étude réalisée dans le cadre de la
Convention MEDDTL – BRGM n°2100498545

L. de Lary[a], H. Fabriol[a], I. Moretti[b], F. Kalaydjian[b], C. Didier[c]
Avec la collaboration de
M. Azaroual[a], Y. Barthélémy[a], Y. Benoit[b], D. Bonijoly[a], D. Seyedi[a], N. Dorfliger[a], P. Negrel[a], J. Perrin[a], O. Serrano[a], R. Vernier[a], R. Vially[b]

[a]BRGM, [b]IFP Energies nouvelles, [c]INERIS

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : O. Bouc	Nom : H. Modaressi
Date : 03/10/2011	Date : 7/10/2011
Signature :	Signature : H. Modaressi

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : hydrocarbures de roche-mère, impacts, risques, MEDDTL

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
L. de Lary, H. Fabriol, I. Moretti, F. Kalaydjian, C. Didier. (2011) Maîtrise des impacts et risques liés à l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère : enjeux, verrous et pistes de recherche. BRGM/RP-60312-FR.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La loi n°2011-835 du 13/07/11 interdit l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures par fracturation hydraulique et abroge les permis de recherche ayant recours à cette technique. Cette loi crée en son article 2, une Commission nationale d'orientation de suivi et d'évaluation des techniques d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures qui a notamment pour objet d'évaluer les risques environnementaux liés aux techniques de fracturation hydraulique et d'émettre un avis public sur les conditions de mise en œuvre des expérimentations, réalisées à seules fins de recherche scientifique sous contrôle public.

La présente note, issue d'un groupe de travail initié par le MEDDTL avant la promulgation de la loi 2011-835, fait suite aux préconisations du rapport intermédiaire du Conseil général de l'industrie, de l'énergie et des technologies et du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGIET/CGEDD, 2011). Elle a aussi pour finalité de nourrir les travaux de la Commission nationale d'orientation de suivi.

Dans ce cadre, la présente note analyse les spécificités des techniques d'exploration et d'exploitation des gaz et huiles de roche-mère (GHRM) en ce qui concerne les impacts potentiels sur l'environnement ainsi que les risques. Elle a pour objectifs :

- d'identifier les enjeux environnementaux et les risques liés à l'exploitation des GHRM ;

- de proposer des actions de recherche scientifique permettant d'examiner les différents risques posés par cette technique et d'examiner s'il est possible de lever des verrous existant aujourd'hui.

Des éléments de contexte encadrant la réflexion sont présentés en début de note. A ce titre, les caractéristiques de l'exploration et de l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère sont évoquées. Une brève étude bibliographique des préoccupations environnementales qui ont émergées aux Etats-Unis en raison des activités d'extraction des GHRM est réalisée. A ce propos, uniquement des sources officielles ont été consultées.

De plus, la compréhension du milieu géologique constitue un prérequis indispensable à toutes réflexions sur les risques liés l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère. Ainsi, une partie intermédiaire de la note se focalise sur l'analyse des manques de connaissances dans ce domaine et sur les actions de recherche scientifiques envisageables pour apporter des réponses aux questions soulevées.

Sur la base des éléments précédents, la note appréhende les risques et les impacts potentiels sur l'environnement. Des actions de recherche scientifique sont proposées pour analyser en détail les risques ou impacts évoqués ou pour examiner la possibilité de lever des verrous scientifiques ou technologiques mis en évidence. Les mesures de maitrise du risque sont aussi intégrées dans la réflexion.

L'ensemble des enjeux, des verrous et des pistes de recherche associées est présenté sous forme de tableau de synthèse. Parmi ces sujets, dix ont été identifiés comme « prioritaires », pour lesquels les recherches scientifiques correspondantes pourraient être débutées dans le court terme afin de progresser dans la connaissance des risques et impacts. Ces dix sujets sont :

- Analyse détaillée de retours d'expérience.
- Référentiel commun d'analyse des risques permettant d'encadrer des actions de recherche scientifique.
- Bilan environnemental global avec une attention particulière sur l'eau et les gaz à effet de serre. Comparaison avec les autres sources d'énergie.
- Toxicité et éco-toxicité des additifs.
- Cartographie de la zone affectée par la fracturation hydraulique.
- Capacité de détection des additifs et mise en œuvre pratique sur le terrain.
- Etude des éléments à risque que les roches-mères françaises pourraient relarguer suite à l'opération de fracturation hydraulique.
- Inventaire rapide des aquifères profonds qui pourraient être utilisés comme ressources en eau et/ou qui pourraient être affectés par une exploitation de GHRM située à proximité.
- Utilisation partagée du sous-sol.
- Acquisition de lignes de base.

Conformément à la loi n°2011-835 du 13/07/11 les actions de recherches scientifiques mentionnées dans cette note ne pourraient être envisagées que dans le cadre mis en place par la Commission nationale d'orientation de suivi et d'évaluation.

Sommaire

1. Préambule 9

2. Rappel du contexte.....11

2.1. BREF HISTORIQUE DES GAZ ET HUILES DE ROCHE-MERE 11

2.2. METHODES D'EXPLORATION-EXPLOITATION 13

2.3. RETOUR D'EXPERIENCE NORD-AMERICAIN EN MATIERE DE FRACTURATION HYDRAULIQUE DANS LE CADRE DE L'EXPLOITATION DES HYDROCARBURES DE ROCHE-MERE 15

2.4. PRINCIPALES CONCLUSIONS TECHNIQUES DU RAPPORT PROVISOIRE CGIET/CGEDD 19

3. Compréhension du milieu géologique 21

3.1. ROCHE-MERE 21

3.2. MILIEU ENCAISSANT 26

3.3. ETAT DE CONTRAINTE - FAILLES - FRACTURATION NATURELLE 27

3.4. CONNAISSANCE DE LA RESSOURCE EN EAU.....28

4. Identification des risques et nuisances.....31

4.1. LA FRACTURATION HYDRAULIQUE 31

4.2. UTILISATION DE PRODUITS CHIMIQUES (INVENTAIRE, TOXICITE) 40

4.3. IMPACTS POTENTIELS SUR LA QUALITE DE L'EAU 42

4.4. TRAITEMENT ET DEVENIR DES EFFLUENTS 44

4.5. NUISANCES POUVANT RESULTER DES PHENOMENES DE SISMICITE INDUITE 45

4.6. MIGRATION NON MAITRISEE DE GAZ VERS LA SURFACE 47

4.7. ANALYSE DES RISQUES LIES AUX INSTALLATIONS DE SURFACE 48

4.8. IMPACTS ET NUISANCES DE L'EXPLOITATION SUR L'ENVIRONNEMENT49

4.9. BILAN ENVIRONNEMENTAL GLOBAL 52

5. Maîtrise des risques : bilan des pratiques actuelles 57

5.1. METHODOLOGIE DE L'EVALUATION DES RISQUES 57

5.2. GESTION INTEGRÉE DE L'EXPLOITATION 58

5.3. SURVEILLANCE (METHODES, LIGNES DE BASE, QUANTIFICATION) 62

5.4. MESURES CORRECTIVES ET DE REPARATION 68

6. Programme de recherche 71

6.1. LISTE DE SUJETS DE RECHERCHE 71

6.2. SELECTION DE SUJETS DE RECHERCHE « PRIORITAIRES » 79

7. Glossaire 89

8. Références 91

Liste des illustrations

Illustration 1 - A gauche: carte des bassins susceptibles de contenir des gaz de roche mères aux USA GWPC and ALL Consulting (2009). A droite en haut progression de la production de gaz non conventionnels au USA, la part prédominante vient des réservoirs faiblement perméables mais les gaz de schiste sont en augmentation très rapide depuis 2007. Le pourcentage se rapporte à la production totale de gaz du pays.A droite en bas: estimation de la croissance puis du déclin de la production de gaz de schiste sur les bassins nords américains. Actuellement les Barnett Shale sont les plus prolifiques mais on attend une montée en puissance du bassin d'Haynesville (Nord-est Texas) et Marcellus à l'Est du pays. 12

Illustration 2 - A gauche échelle d'observation selon les appareils. A droite photographie au MEB de la porosité nanométrique dans les argiles des Barnett shale (Loucks et al., 2009). La partie gris foncée est la matière organique, la partie gris clair la matrice minérale qui la contient. 24

Illustration 3 - Passage d'un ordre absolu à un ordre relatif dans la succession verticale des entités du référentiel hydrogéologique V2 (Seguin, 2009). 29

Illustration 4 - La distance entre drain horizontal dépend du rayon effectif de la fracturation hydraulique (Tyndall Center, 2011). 32

Illustration 5 - Cartographie de la zone affectée par la fracturation hydraulique (Zoback et al., 2010). 33

Illustration 6 - Cartographie des microséismes lors d'une fracturation hydraulique. (Source: Oilfield Service Company). 33

Illustration 7 - Modélisation de la propagation d'une fracture (Source : Chesapeake). 34

Illustration 8 - Histogramme Fréquence-Magnitude des microséismes (Zoback et al., 2010). 45

Illustration 9 – Valeurs « plausibles » pour les émissions additionnelles générées par les gaz de roche-mère (par rapport aux gaz conventionnels) d'après Tyndall Center (2011). 53

Illustration 10 – Exemple de recensement de risques potentiels des différentes phases d'exploitation d'un réservoir GHRM, des normes et des contraintes règlementaires. Ce tableau n'est pas exhaustif. 60

Illustration 11- Synthèse des sujets de recherche proposés dans la présente note. 78

Liste des annexes

Annexe 1 - Propos sur la pertinence d'une analyse intégrée des risques....95

1. Préambule

La loi n°2011-835 du 13/07/11 interdit l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures par fracturation hydraulique et abroge les permis de recherche ayant recours à cette technique. Cette loi crée une Commission nationale d'orientation de suivi et d'évaluation des techniques d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures qui a notamment pour objet d'évaluer les risques environnementaux liés aux techniques de fracturation hydraulique et d'émettre un avis public sur les conditions de mise en œuvre des expérimentations, réalisées à seules fins de recherche scientifique sous contrôle public. La nomination, les modalités de fonctionnement et les missions seront précisées par décret.

La présente note constitue le livrable d'un groupe de travail regroupant BRGM, IFPEN et INERIS sur la problématique des risques potentiels liés à l'exploration et la production des gaz et huiles de roche-mère (GHRM), initié par une demande conjointe du Directeur Général de la Prévention des Risques, du Directeur Général de l'Energie et du Climat et du Directeur Général de l'Aménagement, du Logement et de la Nature en date du 22 mars 2011. Cette commande est donc antérieure à la promulgation de la loi n°2011-835 du 13/07/11. Le groupe de travail s'est réuni quatre fois entre le 28 avril et le 8 septembre 2011, sous la présidence du Bureau Sol et Sous-sol de la Direction Générale de la Prévention des Risques.

Cette note analyse les spécificités des techniques d'exploration et d'exploitation des gaz et huiles de roche mère en ce qui concerne les impacts potentiels sur l'environnement ainsi que les risques. Elle a pour objectif :

- d'identifier les enjeux environnementaux et les risques liés à l'exploitation des GHRM;
- d'identifier les verrous scientifiques et technologiques concernant la maitrise des risques et les impacts potentiels sur l'environnement ;
- de proposer des actions de recherche scientifique permettant d'examiner les différents risques posés par cette technique et s'il est possible de lever des verrous existant aujourd'hui.

La présente note fait suite aux préconisations du rapport intermédiaire du Conseil général de l'industrie, de l'énergie et des technologies et du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGIET/CGEDD, 2011) qui recommande de lancer un programme de recherche scientifique sur les risques et les impacts environnementaux de l'exploitation des hydrocarbures par fracturation hydraulique. De plus, cette présente note a aussi pour objectif de nourrir les travaux de la Commission nationale d'orientation de suivi et d'évaluation instituée à l'article 2 de loi n°2011-835 du 13/07/11.

Conformément à la loi n°2011-835 du 13/07/11 les actions de recherches scientifiques mentionnées dans cette note ne pourraient être envisagées que dans le cadre mis en place par la Commission nationale d'orientation de suivi et d'évaluation.

2. Rappel du contexte

2.1. BREF HISTORIQUE DES GAZ ET HUILES DE ROCHE-MERE

2.1.1. Caractéristiques d'un système pétrolier et gazier

Une roche-mère résulte de l'accumulation de matières minérales (en général des argiles) et de matières organiques (plantes, planctons, animaux) qui se déposent au fond des lacs et des océans. Sous l'effet de la subsidence, cette roche-mère est enfouie progressivement, la matière organique se transforme alors en kérogène, puis en huile et en gaz. Plus légers que l'eau, les hydrocarbures peuvent être expulsés de l'argile et migrer vers la surface. Mais, en raison, entre autres de la faible perméabilité des roches, une partie non négligeable ne sera jamais extraite de la roche-mère. C'est cette fraction qui constitue les gaz et huiles de roche-mère (GHRM).

Dans le sous-sol, tout l'espace poreux est occupé par de l'eau. Si une fraction des hydrocarbures est expulsée de la roche mère, elle migrera alors vers la surface puisque les hydrocarbures sont plus légers que l'eau. Au cours de cette migration, ces hydrocarbures peuvent être retenus par une roche imperméable dans une structure dont ils ne peuvent plus sortir et que les géologues pétroliers nomment piège. Si les hydrocarbures s'accumulent dans une roche disposant d'une bonne porosité, l'ensemble roche-hydrocarbure constitue un réservoir pétrolier classique. Si la roche est peu perméable, on parle alors d'un réservoir "tight" et leur exploitation est alors considérée comme non conventionnelle car ne pouvant pas utiliser les méthodes classiques. Une des méthodes couramment utilisée pour augmenter la perméabilité des roches consiste en particulier à créer une perméabilité artificielle par fracturation hydraulique.

Dans la roche-mère, la transformation thermique de la matière organique va générer d'abord une majorité d'hydrocarbures liquides, puis de plus en plus de gaz. La proportion de l'un et de l'autre dépend du type de matière organique ; à l'extrême limite, les roches charbonneuses, très pauvres en hydrogène, ne génèrent que du gaz. Si la température de la roche encaissante augmente, les hydrocarbures liquides continuent leur évolution et se transforment en gaz.

2.1.2. Gaz et huiles de roche-mère (GHRM)

Ce sont donc les hydrocarbures retenus dans la roche-mère où ils ont été générés. Avec quelques subtilités : (1) l'huile initiale peut être transformée en gaz si la température évolue, ce gaz se mêle alors au gaz directement issu de la roche-mère, (2) des bactéries peuvent se nourrir de matière organique ou de pétrole liquide et rejeter du méthane – ce gaz dit biogénique est parfois exploitable.

L'accumulation se fait dans la porosité mais aussi par adsorption du gaz sur la matière organique et, en plus petite quantité, sur les argiles elles-mêmes. Le volume de roche-mère est énorme, bien supérieur au volume des pièges qui contiennent les réserves conventionnelles d'hydrocarbures. Les volumes estimés de gaz en place sont donc eux aussi conséquents et ont changé les perspectives des ressources récupérables de gaz disponibles pour le siècle à venir.

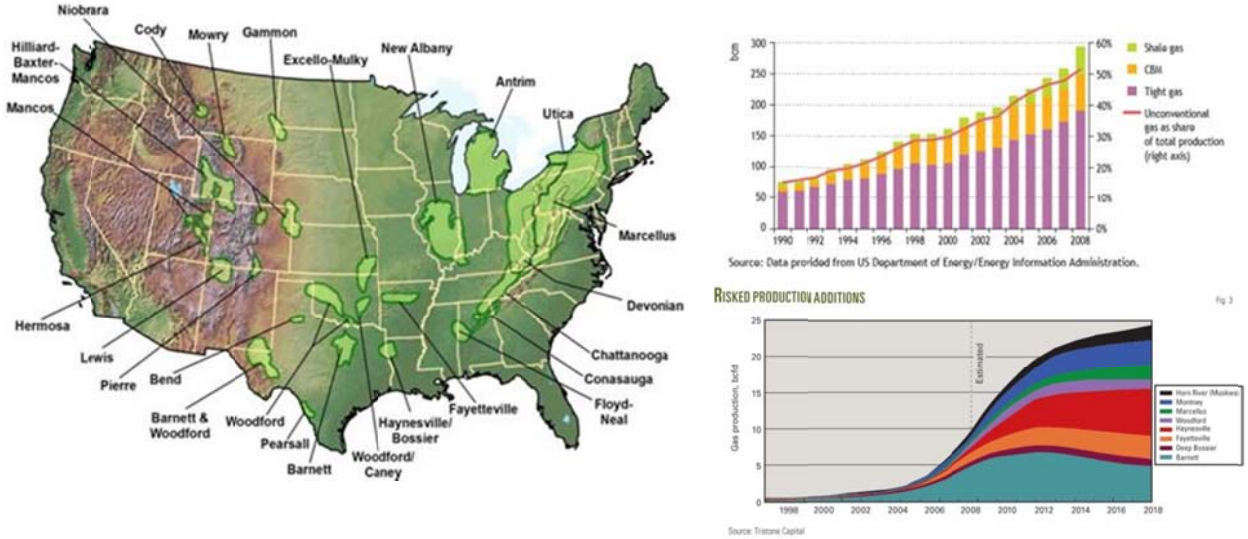


Illustration 1 - A gauche: carte des bassins susceptibles de contenir des gaz de roche mères aux USA GWPC and ALL Consulting (2009). A droite en haut progression de la production de gaz non conventionnels au USA, la part prédominante vient des réservoirs faiblement perméables mais les gaz de schiste sont en augmentation très rapide depuis 2007. Le pourcentage se rapporte à la production totale de gaz du pays.A droite en bas: estimation de la croissance puis du déclin de la production de gaz de schiste sur les bassins nords américains. Actuellement les Barnett Shale sont les plus prolifiques mais on attend une montée en puissance du bassin d'Haynesville (Nord-est Texas) et Marcellus à l'Est du pays.

L'exploitation des gaz de roche-mère a démarré dès le XIXème siècle, mais elle s'est accélérée à partir de 2005. A peu près tous les bassins sédimentaires nord-américains sont concernés, du Texas à la frontière canadienne (Illustration 1). L'huile de roche-mère est essentiellement produite dans le bassin de Williston (Formation Bakken) et ce depuis une quinzaine d'années. Actuellement, vu le prix élevé de l'huile et faible du gaz, beaucoup d'opérateurs produisent de préférence les zones où huile et gaz sont présents.

Tous les pays qui ont une roche-mère mature ont des ressources : les USA mais aussi le Canada et l'Argentine, la Pologne, la France (et ailleurs pour l'Europe), la Chine et en Afrique. Pour la production, seuls les Etats-Unis sont concernés actuellement.

2.2. METHODES D'EXPLORATION-EXPLOITATION

2.2.1. Exploration: estimation du potentiel d'une zone

Pour être intéressantes, les roches-mères doivent être:

- initialement très riches en matière organique ;
- dans la bonne fenêtre de maturité ;
- assez épaisses pour pouvoir être exploitées.

Il faut de plus que l'on puisse créer une perméabilité artificielle par fracturation hydraulique et pour ce faire que la minéralogie et les propriétés pétrophysiques de la roche-mère répondent à certains critères de fracabilité (aptitude d'une roche à être fracturée de manière artificielle). Par ailleurs l'économie du système est à rechercher entre les coûts d'exploration et la productivité des puits. Ceci réduit les zones économiquement explorables à celles qui remplissent les critères précédents et sont situées à terre avec une érosion post maturation qui a remonté la roche-mère à une profondeur moindre (environ entre 500 et 3000 mètres).

Dans la phase d'exploration les opérateurs cherchent aussi à connaître toutes les failles du secteur d'étude et les fractures naturelles. Ils déterminent également le champ de contrainte pour s'assurer de la stabilité des puits et de l'interconnexion entre les fractures naturelles et celles qu'ils vont ensuite chercher à créer pour augmenter la perméabilité.

Après une phase de collecte des données antérieures, les opérateurs ont besoin d'un certain nombre de puits d'exploration pour prélever des échantillons de roche dans le sous-sol et mesurer tous les paramètres indispensables. Le nombre de ces puits est supérieur à celui d'un gisement traditionnel. D'une part, parce que la zone potentiellement exploitable est plus grande et, d'autre part, parce qu'il faut définir l'hétérogénéité des roches à une échelle où l'interprétation des images sismiques et de ses anisotropies n'est pas encore complètement opérationnelle. Pour ce faire, on doit acquérir et modéliser plusieurs types de données:

- Analyse lithologique des carottes, des déblais et des cuttings[1];
- Teneur en matière organique de la roche-mère ;
- Caractéristiques pétro-physiques des roches (porosité, perméabilité...) ;
- Caractéristiques physico-chimiques des roches (capacité d'échange cationique des argiles), adsorption, désorption, absorption, … ;
- Mesures par diagraphies et par imagerie dans les puits ;
- Contraintes in situ;
- Mesures géophysiques entre puits, et/ou puits-surface.

A la suite de cette phase une estimation des hydrocarbures en place peut être faite. Des tests de fracturation hydraulique et des tests de production permettent de plus une

[1] Cf. Glossaire

estimation du taux de récupération et donc des ressources récupérables. La validation du potentiel réel de la zone peut alors se faire et l'opérateur prend la décision ou non d'exploitation, en fonction de l'économie du système.

2.2.2. Exploitation

A la suite des études de la phase d'exploration, si la décision de mise en production est prise, les ingénieurs réservoirs définissent alors l'architecture des puits d'exploitation :

- Position des puits dans les zones les plus favorables

Ces décisions sont prises en fonction de la richesse de la roche-mère, de sa pétrographie mais aussi de la possibilité de réaliser les « fracs » (les opérations de fracturation hydraulique). Sont prises en compte en particulier la distance aux failles, l'absence d'aquifère, l'absence de zone karstique et l'occupation des sols. Une sismique 3D peut s'avérer nécessaire à cette étape.

- Nombre de puits et déports horizontaux

On recherche systématiquement à minimiser l'impact au sol et donc de nombreux puits sont forés à partir de la même plateforme. Du fait des grands déports horizontaux possibles actuellement (jusqu'à 5 km), des bouquets jusqu'à une quinzaine de puits peuvent être forés de la même plateforme. L'orientation des puits est ajustée en fonction de la géologie, de la contrainte régionale et de l'orientation du réseau des fractures naturelles de façon à optimiser la production tout en assurant la stabilité du réseau de fractures créée par fracturation hydraulique. La technique du forage horizontal permet d'augmenter la distance entre les plateformes de forage qui peuvent être maintenant éloignées de près d'une dizaine de kilomètres et ainsi d'en réduire le nombre. Comme la perméabilité est faible, la zone de drainage est limitée et par conséquent la productivité des puits est faible par rapport à ceux d'un gisement classique.

- Fracturation hydraulique[2]

La fracturation hydraulique consiste à créer des fractures dans la roche-mère en injectant de grands volumes de fluide (eau + sable + additifs chimiques) sous forte pression entre obturateurs (packers[3]), de manière à augmenter la perméabilité et drainer en retour les GHRM. Cette injection de fluides sous fortes pressions entraîne

[2] La fracturation hydraulique ne doit pas être confondue avec la stimulation hydraulique utilisée par exemple en géothermie haute enthalpie, où un réseau naturel de fractures situé à grande profondeur (plus de 5 000 m à Soultz, en Alsace) est stimulé pendant plusieurs semaines de façon à créer un échangeur thermique souterrain

[3] cf. Glossaire.

une perturbation du milieu à proximité du puits qu'il est indispensable de bien contrôler. Cette étape dure d'un à deux jours.

La composition du fluide de frac, la nature des agents de soutènement (proppants), la position des fracs le long du puits et le nombre de fracs sont ajustés au mieux en fonction de l'état de contrainte local, de la fracturation naturelle, de l'épaisseur de la zone à fracturer et de la rhéologie de la roche.

- Production

Les puits sont ensuite mis en production. Pour ce faire, il est d'abord nécessaire de repomper le fluide injecté. En fonction de la nature de la roche mère, seule une partie du fluide est immédiatement récupérée (de 30 à 60%). Ce fluide nécessite un stockage et un traitement spécifiques. Pendant toute la durée de la production, le fluide produit est un mélange d'eau et d'hydrocarbures qui est séparé en surface.

- Courbes de production

La durée de production d'un puits reste une grande incertitude. Par expérience, la décroissance de la production des puits est exponentielle. Après 5 ans, les productions sont généralement très faibles. Elle s'estime encore essentiellement par comparaison avec les puits voisins. De gros efforts de recherche, en particulier via des marqueurs géochimiques sont en cours.

- Traitement du gaz

La rétention et l'adsorption des hydrocarbures dans les roches-mères dépendent de leur composition chimique. Dans l'ensemble des produits générés à l'origine par une roche-mère certains seront plus facilement expulsés que d'autres. Cela crée une différence entre les gaz restant en place (qui pourront être produits comme GHRM) et ceux qui ont migré vers les pièges conventionnels.

2.3. RETOUR D'EXPERIENCE NORD-AMERICAIN EN MATIERE DE FRACTURATION HYDRAULIQUE DANS LE CADRE DE L'EXPLOITATION DES HYDROCARBURES DE ROCHE-MERE

2.3.1. Éléments de contexte

Deux éléments de contexte méritent d'être soulignés concernant les expériences nord-américaines de fracturation hydraulique dans le cadre de l'exploitation des GHRM :

- Premièrement, le nombre conséquent de puits forés chaque année aux États-Unis. L'Environment Protection Agency (EPA, 2010b) estime qu'environ 10 000 puits de gaz avec fracturation hydraulique ont été réalisés au total au cours de

l'année 2007. D'après une étude réalisée sur le bassin d'alimentation en eau potable de New York (NYC DEP, 2009a), une opération individuelle de fracturation hydraulique entrainerait des risques de nuisances relativement faibles. Cependant, si on prend en compte une densité d'opérations et un rythme de développement égaux à ceux des formations les plus exploitées, le risque cumulé de dégradation de la qualité de l'eau potable de la ville de New York pourrait devenir significatif (NYC DEC, 2011 ; NYC DEP, 2009a).

- Deuxièmement, la réglementation. La réglementation fédérale impose peu de contraintes aux opérateurs. En effet, de nombreuses exemptions aux lois fédérales existent en ce qui concerne l'exploitation de gaz et la fracturation hydraulique (NYC DEP, 2009a). Les activités de fracturation hydraulique sont principalement réglementées au niveau des Etats (EPA, 2011 ; GWPC et ALL Consulting, 2009). Or, d'un Etat à l'autre, les exigences de la réglementation semblent contrastées. Certains États (Colorado, Nouveau-Mexique, New-York…) ont été amenés à ajouter des exigences supplémentaires lors des demandes de permis afin de mieux tenir compte d'enjeux environnementaux (NYC DEP, 2009a ; NYC DEP, 2009b). Des exigences supplémentaires sont parfois imposées au niveau local par les contés, les villes, les tribus ou encore les instances responsables de la gestion de l'eau au niveau régional (GWPC et ALL Consulting, 2009).

En ce qui concerne la situation nord-américaine, une des difficultés majeures rencontrée est l'accès aux données permettant d'exploiter le retour d'expérience[4].

2.3.2. Principales préoccupations environnementales évoquées et manques de connaissances soulignés

Cette partie est une brève étude bibliographique des préoccupations environnementales qui ont émergé aux Etats-Unis en raison des activités d'extraction d'hydrocarbures de roche-mère. Elle s'appuie uniquement sur des sources officielles.

- Impacts quantitatifs sur les ressources en eau. La grande quantité d'eau consommée par les opérations de fracturation hydraulique a pu mener à des impacts quantitatifs sur la ressource. Ces impacts sont principalement dus à des insuffisances de la réglementation en ce qui concerne les prélèvements d'eau (NYC DEP, 2009b). Par exemple, en l'absence de contrôles, on rapporte que plusieurs cours d'eau ont été asséchés (NYC DEP, 2009a). Il convient de remarquer que l'impact quantitatif dépend des ressources de chaque bassin versant, des autres usages, des politiques de gestion de l'eau... Il est donc difficile de transposer cette situation à d'autres contextes (la France). De plus, aux États-Unis, les modalités de gestion des prélèvements d'eau sont contrastées d'un bassin versant à l'autre et/ou d'un Etat à l'autre. Par exemple,

[4] http://coloradoindependent.com/88519/natural-gas-industry-keeping-water-testing-data-from-researchers

dans certains endroits, les prélèvements doivent être approuvés par une commission alors que dans d'autres, seul le bilan des quantités prélevées est nécessaire (NYC DEP, 2009b).

- Pollution de l'eau par migration de fluides en sub-surface. Il existe des exemples de pollutions reconnus officiellement comme étant liés à l'exploitation des gaz de roche-mère (e.g. COGCC, 2004 ; Ohio Department of Natural Resources, 2008 ; PA DEP, 2009). Ces cas sont le plus souvent dus à des erreurs humaines, au non-respect de la réglementation (forage, construction des puits) ou encore à une méconnaissance du milieu géologique (NYC DEP, 2009b). Des contraventions de montants importants ont déjà été imposées à des opérateurs ayant entrainé des pollutions par non-respect de la réglementation (COGCC, 2004). Néanmoins, dans beaucoup de cas de pollutions suspectées, l'origine des hydrocarbures était naturelle (échappements de gaz biogénique) ou n'a pas (encore) été déterminée avec certitude. En effet, les causes à l'origine de la pollution ou les chemins de migration (dans l'éventualité d'une contamination) sont souvent inconnus (ATSDR, 2010 ; EPA, 2010a ; NYC DEP, 2009a). L'EPA (2011) propose dans son programme de recherche de faire des investigations sur plusieurs sites où des pollutions sont suspectées afin de déterminer si ces pollutions sont en relation avec les opérations de fracturations hydrauliques, et, le cas échéant, les causes exactes de ces pollutions. Enfin, un rapport bien documenté de l'Ohio Department of Natural Resources (2008) présente un cas particulier où des problèmes de surpressions dans l'annulaire d'un puits et de cimentation ont entrainé la migration et l'accumulation de gaz dans des aquifères de surface par le biais de fractures naturelles provoquant une explosion dans une maison habitée.

- Pollution de l'eau en surface. Des milliers d'incidents entrainant des déversements de liquides potentiellement polluants en surface ont été répertoriés (NYC DEP, 2009a). En effet, les opérations de forages et de fracturations nécessitent le transfert de grandes quantités de liquide ce qui accroit la probabilité de déversement dans le milieu. Les causes principales évoquées sont : l'erreur humaine, le dysfonctionnement d'un dispositif, l'accident ou encore le non-respect de la réglementation.

- Gestion des effluents (entendus ici comme les fluides récupérés juste après fracturation et avant la phase d'exploitation des hydrocarbures). La gestion de la grande quantité d'effluents a pu s'avérer problématique. Aux États-Unis, des déversements illégaux dans le milieu ont été constatés (NYC DEP, 2009b). D'après l'EPA (2011), la réinjection est la principale solution dans la plupart des zones exploitées (cette pratique est très contrôlée en France). La réutilisation des effluents pour de nouvelles opérations de fracturation après un prétraitement est de plus en plus commune (EPA, 2011). Parmi les autres solutions mises en place aux Etats-Unis, on note le traitement par des procédés spécifiquement dédiés (e.g. osmose inverse, distillation, précipitation…) ou le traitement dans des stations d'épuration des eaux usées si l'exploitation à lieu à proximité de centres urbains (EPA, 2011). Les opérateurs étudient aussi la

possibilité d'utiliser de l'eau salée pour les hydrofracturations afin de limiter les impacts sur l'environnement. D'après l'EPA (2011), l'efficacité des procédés visant à éliminer certains constituants (e.g. radionucléides[5], additifs) n'est pas bien connue.

- Sismicité induite. A notre connaissance, les opérations de fracturation hydraulique stricto sensu dans le cadre des GHRM n'ont pas engendré de dommage matériel par le biais de la sismicité induite. Ce point est abordé en détail dans le paragraphe 4.5.

- Gaz à effets de serre résultant de l'exploitation des GHRM. Ce sujet est souvent abordé et est sujet à controverses. Assez peu de données sont disponibles sur les émissions de gaz à effet de serre résultant de l'exploitation des gaz de roche-mère.

- Perturbations diverses. Des perturbations en surface, en raison de l'emprise et de l'activité du site de forage, ont été rapportées (dommages aux écosystèmes, imperméabilisation du sol, érosion, endommagement de voiries...) (NYC DEP, 2009a). Ces impacts sont liés aux conditions propres à chaque site : il est donc difficile de les transposer à d'autres situations.

2.3.3. Principaux enjeux liés au retour d'expérience nord-américain

- La difficulté d'accès à des données fiables semble être une difficulté majeure. En particulier, il manque des données sur :
  - les lignes de base pour connaitre l'état des sites avant les débuts de l'exploration là où un impact est suspecté ;
  - la façon dont la situation a été gérée en amont par les autorités compétentes (application de la réglementation, fréquence des contrôles).

- Les causes exactes des problèmes environnementaux ne sont pas toujours (ou encore) identifiées. Il s'agit là d'une difficulté supplémentaire pour l'analyse critique du retour d'expérience. Des travaux sont actuellement en cours dans ce domaine pour clarifier la situation (e. g. EPA, 2011). Les principales interrogations portent sur l'origine de la pollution ou plus généralement des impacts environnementaux : est-elle liée à l'exploitation des GHRM, à d'autres activités anthropiques ou à des processus naturels ? Si l'exploitation des GHRM est en cause, on peut se demander quels sont les mécanismes mis en jeu, en particulier : quels sont les chemins de migration des polluants ?

[5] Par exemple, la formation des « *Marcellus Shales* », aux Etats-Unis, contiendrait des concentrations importantes en radionucléides (Kargbo *et al.,* 2010)

2.4. PRINCIPALES CONCLUSIONS TECHNIQUES DU RAPPORT PROVISOIRE CGIET/CGEDD

Le Conseil général de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGIET) et le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) ont reçu pour mission d'étudier 4 points principaux concernant les hydrocarbures de roche-mère : 1) le potentiel de développement des hydrocarbures de roche-mère ainsi que les opportunités économiques et les enjeux géopolitiques associés 2) les techniques d'exploitation, 3) les enjeux sociétaux, 4) le cadre légal, fiscal et réglementaire applicable. Un rapport provisoire a été réalisé : CGIET/CGEDD (2011). Nous rapportons ci-dessous les principales conclusions et recommandations de ce rapport en ce qui concerne les manques de connaissances et les risques :

- Les ressources en gaz et huiles de roche-mère françaises restent largement inconnues. La France pourrait être parmi les pays les plus prometteurs au niveau européen (EIA, 2011 ; IEA, 2010). La part de ces ressources économiquement exploitables est inconnue à ce jour.
- D'après le rapport, il reste encore des progrès et des innovations à réaliser pour optimiser les performances des forages, aussi bien en termes d'exploitation de la ressource qu'en termes de performances environnementales.
- Il est indispensable de réaliser des travaux de recherche et des tests d'exploration.
- Il est préconisé d'instaurer d'un comité scientifique national constitué d'un noyau d'experts du BRGM, de l'IFPEN et de l'INERIS. Ce comité aurait dans ses missions, une fois identifiés l'ensemble des thèmes de recherche en relation avec les hydrocarbures de roche-mère, de les prioriser au sein d'un programme de recherche scientifique unique.
- La mission recommande de ne pas utiliser la technique de fracturation hydraulique avant d'avoir obtenu les résultats du programme de recherche (hormis dans le cadre d'expérimentations menées au sein de celui-ci).
- Les travaux de recherches concerneraient notamment :
  - Les techniques de fracturation hydraulique et leurs impacts environnementaux.
  - La connaissance du bassin du Sud-Est et en particulier de ses aquifères.
  - L'étude des propriétés physico-chimiques des roches mères explorées.
  - La réalisation de puits expérimentaux « sur-instrumentés » et très contrôlés (par le Comité scientifique national).
  - Le suivi des résultats des études lancées par l'EPA en février 2011 sur la qualité des eaux et l'évaluation de leur transposition en France.
  - L'établissement d'une liste de molécules dont l'emploi sera autorisé dans les opérations de fracturation hydraulique.
- Enfin, la mission préconise d'actualiser la réglementation (notamment en utilisant les travaux de recherche précités) pour l'adapter à la recherche et l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère.

3. Compréhension du milieu géologique

3.1. ROCHE-MERE

Constat

Les caractéristiques des roches-mères montrent des variations à toutes les échelles, depuis l'échelle microscopique à celle du bassin. Dans les roches mères, il existe la partie minérale "l'argile" et une partie organique. Sur la partie minérale, en France, l'essentiel des études menées sur ces roches, l'a été dans le cadre d'études pour le stockage de déchets nucléaires, pour la dépollution ou pour la production de matériaux et non pour l'exploitation des hydrocarbures. Les fluides issus de ces formations ont été quant à eux essentiellement étudiés dans le cadre d'études pour la prospection minérale ; l'expulsion des eaux connées[6] lors de la subsidence des bassins étant à l'origine de la constitution de gîtes minéraux exploités (gisements de « couverture » en bordure des bassins sédimentaires). Si l'on envisage de forer directement dans la roche-mère il faut connaître ses hétérogénéités tant minérales qu'organiques à l'échelle microscopique (pour la porosité et la compréhension des phénomènes), métrique, pour le forage, comme kilométrique pour l'estimation des réserves. Ces hétérogénéités ont un impact sur le gaz en place, les ressources, mais aussi sur la maîtrise des impacts d'une éventuelle exploitation de ces hydrocarbures sur l'environnement. Certaines données existent mais elles doivent être reprises avec les nouveaux concepts.

Enjeux

- Hétérogénéité des dépôts de matière organique

Besoin de modèle de dépôt permettant de prédire la minéralogie des roches argileuses et la répartition de la matière organique dans ces dépôts.

- Évolution de cette matière organique du fait de l'activité bactérienne et de la température

Pendant l'enfouissement, tant que la température n'est pas trop élevée, l'activité bactérienne est intense; la matière organique se dégrade, du gaz biogénique est généré. Beaucoup de ces phénomènes restent à quantifier et à intégrer dans les modèles de bassin.

- Porosité des argiles contenant la matière organique et évolution de cette porosité avec l'enfouissement

[6] cf. Glossaire.

Durant l'enfouissement, la porosité des roches diminue du fait de l'augmentation de la contrainte et de l'expulsion d'eau qui en résulte. Une réorganisation mécanique des grains a lieu (compaction mécanique) suivie de réactions aux contacts entre grains (compaction chimique). A l'inverse, la transformation de la matière organique en hydrocarbures va créer une nouvelle porosité, qui est loin d'être négligeable. Elle peut représenter plus de la moitié de la porosité résiduelle, dans le cas d'argiles riches en matière organique. L'observation de ce phénomène ainsi que la quantification du type de réseau poreux ainsi créé sont en cours. Cela nécessite des moyens d'observation à l'échelle nanométrique comme la technique FIB (Focused Ion Beam couplée à la microscopie).

- Perméabilité et transport

La perméabilité d'une roche dépend de sa porosité et de la connectivité de l'espace poreux. Ces connexions entre pores peuvent être plus ou moins étroites au point de ne pas laisser passer un flux d'hydrocarbure; c'est au final la structure 3D de la porosité qui va être cruciale. Par ailleurs, les gaz peuvent se déplacer par diffusion et/ou se dissoudre dans les autres fluides. Le flux darcéen, étendu aux fluides multiphasés, considéré comme une approximation valable pour représenter la circulation des fluides dans une roche poreuse, ne l'est pas pour des roches aussi compactes. La compréhension du déplacement des fluides dans des roches de faible perméabilité est à améliorer et d'énormes efforts de recherche sont faits actuellement dans ces domaines par les compagnies pétrolières.

- Capacité de désorption des éléments chimiques adsorbés dans les roches mère

Les argiles sont des minéraux très singuliers dénommés phyllosilicates en raison de leur structure cristallographique. En fonction de la distance entre ces feuillets, on identifie 4 familles d'argiles dont deux d'entre elles sont électriquement équilibrées (familles des kaolinites et des chlorites) et les deux autres chargés négativement (les illites et les smectites). Comme ces matériaux recherchent l'équilibre ionique, ils vont adsorber tous les ions présents dans leur milieu de dépôt, et plus particulièrement :

- les éléments métalliques,
- les éléments radioactifs,
- l'eau.

De plus, en présence de matière organique, les argiles forment des complexes organo-minéraux.

La fixation des métaux lourds dépend :

- de la minéralogie des argiles, ainsi les capacités d'adsorption pour le zinc sont décroissantes pour les minéraux suivants : sépiolite > bentonite > palygorskite > illite > kaolinite ;
- de la variation du pH, exemple, à Oklo, l'acidification des eaux entrainent une augmentation de la Capacité d'Echange Cationique (CEC) des argiles, c'est ce phénomène qui est à l'origine du piégeage du l'U235 dans la pile naturelle d'Oklo ;
- de la charge des argiles.

En conséquence, une désorption de ces éléments métalliques est facilitée par un changement :

- de pH du milieu ;
- de la composition du fluide et des gaz en place ;
- de pression.

Toutes ces modifications sont susceptibles d'intervenir lors de l'injection du fluide de fracturation et lors de la production de gaz.

Il est donc primordial de disposer d'une caractérisation aussi précise que possible de la minéralogie des argiles et de la capacité de désorption des différents éléments adsorbés.

Le méthane est adsorbé sur ces minéraux et sur la matière organique. Mais il se retrouve également en proportion variable dans les fractures présentes dans la roche-mère. Sa désorption est quant à elle facilitée soit par une chute de pression, soit par une augmentation de la température. Dans les roche-mères argileuses se trouvent des gaz, (éthane, propane, …), mais aussi de l'eau, des gaz non hydrocarbures et parfois des métaux. La compétition de ces éléments sur les sites d'adsorption est à étudier si l'on veut obtenir une quantification raisonnable du gaz en place et des risques de désorption d'autres éléments moins désirés.

- Hétérogénéité de la minéralogie et donc de la fracabilité des argiles

Des méthodes sont en cours de développement pour extrapoler via certaines caractéristiques du signal sismique les mesures faites en puits sur la pétrophysique et l'anisotropie des roches. En parallèle, les modèles numériques de simulation de la sédimentation peuvent être utilisés pour prédire la minéralogie : par exemple le pourcentage de quartz, de carbonate et d'argiles en fonction des environnements de dépôt.

<u>Pistes de réflexion</u>

- Caractérisation minéralogique et géochimique des diverses roche-mères

La caractérisation cristallographique et géochimique des argiles est un pré-requis indispensable. Il en est de même pour la caractérisation des capacités d'échange

cationique (CEC) à l'origine de la fixation des éléments métalliques et gazeux et les conditions de désorption.

- Caractérisation des propriétés mécaniques et hydrauliques des roches-mères

Les propriétés géomécaniques et hydrauliques des argiles ont été souvent étudiées dans le cadre de projets de stockage souterrain, en particulier en France. Des synergies avec les recherches menées par le CEA, l'ANDRA ou l'IRSN sont à rechercher dans ce nouveau contexte et les résultats acquis à exploiter. Les sites des premiers forages seront à sur-instrumenter et à accompagner par :

- des mesures en laboratoire,
- une modélisation numérique,
- la construction de modèles 3D (milieu géologique et fractures, anisotropie, ...) partagés.

- Besoin d'observations à petite échelle

Pour décrire les propriétés de matériaux nanoporeux et/ou nanostructurés on ne peut plus se contenter d'un simple changement d'échelle à partir de lois macroscopiques puisque les propriétés physiques peuvent changer de manière drastique à une échelle où les effets de surface deviennent dominants. Le développement des techniques d'imagerie et traitement 3D, des méthodes de résolution numérique et de la puissance de calcul a permis d'ouvrir un champ d'investigation à la croisée des disciplines qui permet de simuler des propriétés physiques de matériaux directement à partir de l'images 3D de leur structure. Des travaux autour des nanotechnologies ont vu le jour dans plusieurs domaines ; ils doivent être étendus à l'étude de la matière organique comme à la mécanique des matériaux, à l'écoulement et au confinement en milieux poreux.

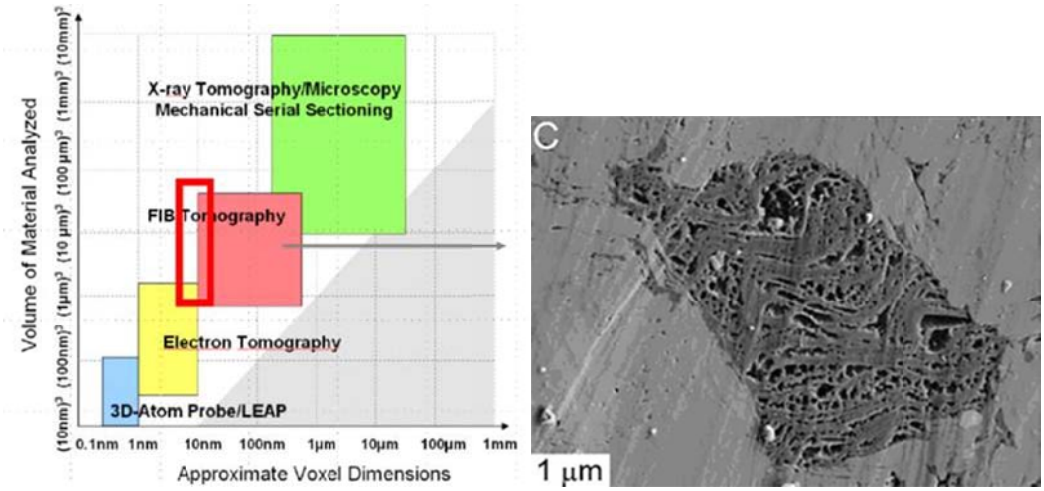


Illustration 2 - A gauche échelle d'observation selon les appareils. A droite photographie au MEB de la porosité nanométrique dans les argiles des Barnett shale (Loucks et al., 2009). La partie gris foncée est la matière organique, la partie gris clair la matrice minérale qui la contient.

- Besoin d'observation d'analogues

Une meilleure compréhension des dépôts de matière organique et de son évolution en fonction de la chimie de l'eau et de l'activité bactérienne dans les premiers kilomètres passe d'abord par l'étude du produit fini, les roches-mères actuelles, mais aussi par celui des roches-mères en train de se former. Pour ce faire, une valorisation des carottes réalisés dans le cadre de projets scientifiques nationaux ou internationaux est à envisager (exemple : série à kérogènes du forage scientifique de Rennes, carottages de type International Ocean Drilling Program, IODP). Ils intéressent une large communauté : spécialistes du vivant, paléoclimatologues, hydrogéologues, géochimistes et géologues.

- Modélisation

Dans la nature, tous les phénomènes interfèrent. Une fois la compréhension individuelle de chacun d'entre eux acquise, il est fondamental d'intégrer les équations qui régissent leur physique dans un modèle (dit de bassin ou de réservoir selon l'échelle à laquelle on travaille) qui les prend toutes en compte et permet de voir leurs évolutions couplées. Par exemple, l'activité bactérienne et la transformation de la matière organique dépendent de la température, laquelle varie avec la profondeur, de l'activité tectonique mais aussi des fluides circulant dans la roche. De nombreux logiciels ont été développés par les équipes scientifiques françaises (IFPEN, BRGM, ENSMP, ENSG, …) et font partie des standards internationaux de la profession. Cependant, des améliorations sont à apporter pour une meilleure prise en compte des phénomènes comme l'hétérogénéité des roches mères et le transport dans les matériaux nanoporeux.

Du point de vue physico-chimique, les systèmes triphasiques offrent des difficultés particulières. Des avancées significatives ont été réalisées récemment sur le transport réactif multiphasique avec le développement des processus physiques et physico-chimiques aux interfaces des phases (roches – eaux – gaz – « micro-organismes & nanoparticules »). La géochimie des systèmes confinés avec des effets de surface et de salinité apportera des connaissances clefs pour le transport réactif et la dynamique des systèmes des fluides dans les micro-nano-pores. Des approches de modélisation géochimique commencent à intégrer ces phénomènes, qui nécessitent d'être considérés également lors des changements d'échelle et de simulations numériques du domaine du proche puits et du réservoir des GHRM.

- Signature géophysique des roches-mères et de leurs caractéristiques

Les caractéristiques de vitesse des ondes sismiques dépendent de l'élasticité du milieu. Certaines des caractéristiques géomécaniques (coefficient de Poisson, module d'Young) sont donc déductibles de la sismique, mais doivent être validées par des mesures directes (en laboratoire sur échantillon ou sur diagraphies soniques). Par ailleurs la recherche est active pour déduire du signal sismique d'autres paramètres comme l'état de contrainte et le contenu en fluide.

3.2. MILIEU ENCAISSANT

Constat

Autour de la roche-mère, les séries encaissantes ont un grand impact sur la quantité d'hydrocarbures non expulsée, sur la réussite, ou l'échec, de la fracturation hydraulique ainsi que sur les risques de fuites. Elles doivent donc être elles aussi étudiées. Les critères de confinement sont relativement proches entre les conditions qui ont assuré un bon piégeage des hydrocarbures durant les temps géologiques et celles qui vont permettre une bonne fracturation. En cas de non confinement des fractures dans la couche argileuse il y aura des fuites. Dans le cas du bassin de Fort Worth aux USA, dans la zone la plus intéressante, les Barnett shales se situent entre deux formations calcaires très compactes. Au contraire, là où les formations carbonatées encaissantes sont karstiques comme c'est le cas en certains endroits sous les Barnett Shale, des pertes de fluides ont eu lieu lors de la fracturation.

Par ailleurs, l'utilisation du sous-sol par différents acteurs (stockage de déchets, fournisseurs d'eau industrielle et potable, les gisements thermo-minéraux, production d'hydrocarbures, stockage saisonnier de gaz ou permanent de CO_2, géothermie) nécessite que ces connaissances soient validées et partagées.

Enjeux

- Caractérisation des formations encaissantes des GHRM : propriétés de confinement, propriétés hydrauliques, voire karstiques, des niveaux aquifères : tout risque de fuite pendant la fracturation doit être anticipé et évalué.
- Cartographie des réseaux de failles régionales et documentation de leur rôle sur l'hydrogéologie.
- Étude des réseaux de fractures existants (architecture, remplissage, densité orientation…).

Pistes de réflexion

Des modèles de bassin à l'échelle régionale autour des réservoirs GHRM, prenant en compte les fluides en place et les recharges actuelle, les failles et les caractéristiques des roches permettraient d'apprécier les circulations actuelles et les risques de perturbation en cas d'exploitation et les conflits d'usage potentiels. Des modèles à plus petite échelle pourraient ensuite en être extraits pour simuler le rôle hydraulique des failles et des couloirs de fracturation.

3.3. ETAT DE CONTRAINTE - FAILLES - FRACTURATION NATURELLE

Constat

La connaissance du champ de contrainte est un élément important, mais celui-ci est connu de manière très incomplète à l'échelle d'un pays comme la France. Le champ de contrainte régional est estimé en fonction du contexte géologique (extensif, compressif) et de mesures disponibles dans des bases de données. De plus, il est loin d'être réellement connu en 3D et ses variations en fonction de la profondeur doivent être précisées localement par des mesures dans les puits. Les contraintes au niveau local peuvent être influencées par les réseaux des fractures ou des fissures et à un degré moindre par l'activité humaine (pompage dans les nappes souterraines, mise en place de tunnel ou de barrage, forages pétroliers et fracs dans ces forages). La présence de plusieurs puits et autant de tests de fracturation peuvent aider à construire un modèle de la variation de l'état des contraintes in-situ.

Pistes de réflexion

De nombreux outils de simulation numérique existent pour établir le modèle mécanique (statique) d'un site donné. Ces modèles, établis préalablement à l'exploitation, devront être ajustés en fonction des résultats des tests, de l'exploitation et des données de monitoring, de la microsismicité induite, des mesures des contraintes et des déformations dans les puits et éventuellement en surface.

Les failles sont très souvent modélisées comme des objets distincts. Cependant, une faille est très souvent constituée de plusieurs zones hétérogènes avec des comportements hydromécaniques différents. Le développement des modèles théoriques et numériques capables de prendre en compte l'effet de la complexité géologique des zones de failles sur leur comportement hydromécanique constitue une piste de recherche. Ces modèles doivent être capables de simuler l'évolution de la réponse de la faille quand elle est affectée par des surpressions engendrées par des opérations de fracturation hydraulique. La confrontation de ces modèles avec des tests in-situ sera indispensable pour vérifier leur validité et leurs domaines d'application.

3.4. CONNAISSANCE DE LA RESSOURCE EN EAU

État des connaissances

Les ressources en eau de surface et souterraine à l'échelle de la France sont généralement connues à partir d'une part des bases de données[7] des référentiels tels que le référentiel hydrogéologique des masses d'eau souterraine avec BDRHF[8], et, d'autre part, des modélisations d'aquifères de tailles diverses et des interprétations multicritères de l'espace considérant le modèle numérique de terrain, les propriétés des sols et du sous-sol.

Pour les eaux de surface, la connaissance des bassins versants de premier ordre est bien établie ; au niveau des sous-bassins, cette connaissance est variable en fonction des enjeux (risque inondation, relations eaux de surface – eaux souterraines, gestion des bassins versants, étiage des cours d'eau). Un référentiel hydrographique existe (cf. Sandre, Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau). Les documents de spécification sur ce référentiel visent à décrire les entités hydrographiques présentes sur le territoire français afin de constituer un référentiel national permettant d'inventorier les cours d'eau, décrivant les stations de prélèvement et la qualité des cours d'eau, les données physico-chimiques, microbiologiques et biologiques.

Pour les eaux souterraines, le référentiel des masses d'eau souterraine correspond à l'unité d'évaluation de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau) ; il comprend, d'une part l'ensemble des données géographiques du découpage du territoire national en entités hydrogéologiques (BDRHF évoluant vers BD LISA), d'autre part des données acquises au niveau des points d'eau, et leur description. Les stations de mesure des eaux souterraines sont référencées au sein de ce référentiel avec des données relatives aux points d'eau (puits, sources, forages), leur localisation, des coupes géologiques, hydrogéologiques et techniques, des données piézométriques et des données physico-chimiques et microbiologiques. Ce référentiel contient plusieurs niveaux, les entités étant ordonnées suivant un ordre croissant (ordre 1 pour les entités affleurantes, ordre 2 pour les entités situées juste au-dessous, etc.) sur la verticale. Le numéro d'ordre qui est affecté aux entités permet de suivre la progression de chacune d'elles en profondeur et de la localiser en un point dans la pile des entités hydrogéologiques. Actuellement, il n'y a pas de notion d'épaisseur dans ce référentiel de version V2 (J.J. Seguin, avec la collaboration de V. Mardhel, 2009). Le référentiel, assemblage dans les 3 dimensions d'espace des entités délimitées, peut être considéré comme un « modèle hydrogéologique » d'une réalité complexe, accessible à l'aide d'une information disponible à un moment donné (cartes géologiques et logs de forages) et parfois interprétée faute de données suffisantes.

---

[7] BDHydro pour les eaux de surface avec les débits enregistrés au niveau de stations de jaugeages, ADES pour les eaux souterraines - quantité avec niveaux piézométriques, débits de source en tant qu'exutoire de systèmes aquifères, et qualité de l'eau des points d'eau souterraine.

[8] BDRHF : Base de Données sur le Référentiel Hydrogéologique Français.

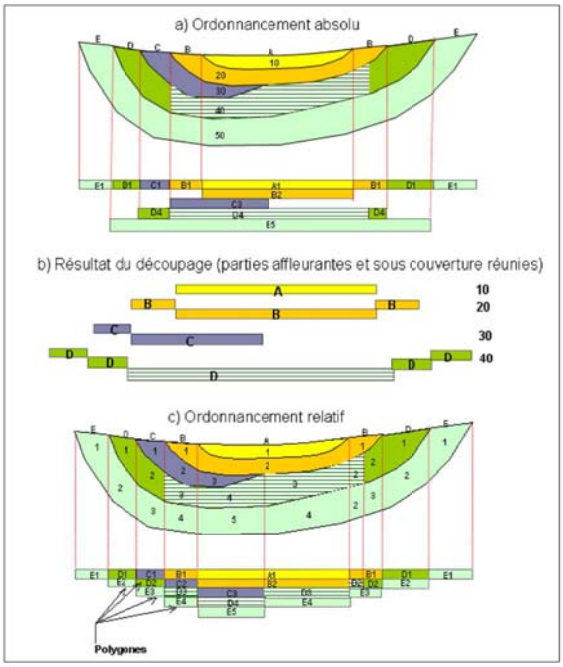


Illustration 4 - Passage d'un ordre absolu à un ordre relatif dans la succession verticale des entités

Illustration 3 - Passage d'un ordre absolu à un ordre relatif dans la succession verticale des entités du référentiel hydrogéologique V2 (Seguin, 2009).

Par ailleurs, il existe de nombreux modèles hydrogéologiques réalisés à l'échelle de bassins sédimentaires, de nappes alluviales, d'aquifères de socle et des formations karstiques. Ils ont généralement été conçus pour la gestion des ressources en eau souterraine. Plusieurs modèles maillés régionaux ont par ailleurs été réalisés au cours des vingt dernières années ; les modèles réalisés depuis 2000 ont été répertoriés dans le cadre d'une réflexion menée par le BRGM pour la Direction de l'eau et de la biodiversité du MEDDTL sur un projet de création d'un pôle national de modélisation en hydrogéologie (Barthélémy Y. et Seguin JJ., 2011).

Même si plusieurs de ces modèles impliquent des aquifères multi-couches et des aquifères profonds, la connaissance des aquifères situés à plus de 1000 m de profondeur reste très partielle. Elle est en générale limitée à des prospections pétrolières, minières ou géothermiques (ex. Bassin de Paris), car les captages d'eau potable, industrielle ou agricole n'atteignent que rarement des profondeurs importantes (> 500 m ou 1000 m).

Enjeux et verrous

Les enjeux sur les ressources en eau souterraine portent principalement sur la connaissance des aquifères profonds, au-delà de 500 m de profondeur. Pour progresser, il faut, d'une part, valoriser toutes les données hydrogéologiques existantes (paramètres hydrodynamiques issus des interprétations d'essais

hydrauliques ; propriétés hydrochimiques des eaux) et, d'autre part, les mettre en regard de la géométrie des bassins sédimentaires, par le biais d'un référentiel hydrogéologique dédié aux aquifères profonds.

Les verrous principaux portent sur la caractérisation des incertitudes relatives aux propriétés hydrogéologiques et géochimiques et aux potentialités hydrauliques des aquifères, parce que les données disponibles sur les aquifères profonds sont partielles et localisées, associées à des investigations pétrolières et géothermiques.

Pistes de réflexion

- Réaliser un référentiel hydrogéologique dédié aux aquifères profonds selon les spécifications du BDRHF, en valorisant toutes les données disponibles sur un ou deux secteurs à définir, en lien avec le paragraphe 3.2 (et qui aura des utilisations autres largement au-delà des GHRM).
- Développer une approche de caractérisation des incertitudes, à l'aide de méthodes statistiques et géostatistiques, appliquées aux paramètres hydrogéologiques et aux potentialités en eau souterraine.

4. Identification des risques et nuisances

4.1. LA FRACTURATION HYDRAULIQUE

Les hydrocarbures de roches-mères sont piégés dans des couches à dominante argileuse où ils ont été générés au cours des temps géologiques. De nature minéralogique très différente, ces couches ont la particularité d'être peu poreuses et pratiquement imperméables. Pour produire des hydrocarbures dans des quantités économiquement intéressantes, il faut créer autour du puits une "perméabilité" artificielle par fracturation hydraulique, qui va permettre aux hydrocarbures tant liquides que gazeux de se déplacer dans la formation en direction du puits. Cette injection de fluide sous pression entraîne une perturbation du milieu à proximité du puits qu'il est indispensable de bien contrôler. Cette technique est employée depuis une cinquantaine d'années pour stimuler d'autres réservoirs de mauvaise perméabilité tant par l'industrie pétrolière qu'en géothermie et pour la production d'eau.

Dans les premières phases de l'exploitation des GHRM aux USA, la fracturation hydraulique était réalisée sur des puits verticaux. Depuis quelques années la majorité des fracturations hydrauliques se font le long de forages horizontaux, ce qui augmente considérablement la production des puits.

4.1.1. L'extension spatiale des fractures

<u>Constat</u>

La fracturation hydraulique ayant pour but de créer une fracturation artificielle en mettant à profit le réseau de fractures préexistant et en s'appuyant sur la connaissance préalable de la lithologie et du champ de contrainte pour augmenter la perméabilité de la couche, il est indispensable d'en contrôler l'extension :

- Pour s'assurer que les fractures restent dans la zone de production et ne risquent pas de mettre en communication la zone exploitée avec d'autres couches par l'intermédiaire de niveaux perméables ou de discontinuités géologiques (discordance, faille).
- Pour optimiser la production. L'emploi massif de puits horizontaux dans l'exploitation des hydrocarbures de roche-mères conduit à l'élaboration de séries de drains à géométrie complexe. L'implantation de nouveaux drains nécessite une bonne connaissance de la zone déjà fracturée par les précédents drains afin d'optimiser leur implantation. Une implantation trop rapprochée risque d'entraîner des interférences entre drains, une implantation trop éloignée laissera des zones non drainées.
- Enfin, il convient de s'assurer que lors de la fracturation hydraulique la partie du puits située à proximité des zones d'injection n'est pas endommagée.

La modélisation prédictive accompagnée de suivi géophysique permet d'évaluer les conséquences des opérations de la fracturation. Pour ce faire, la construction d'un modèle hydromécanique est nécessaire. Les paramètres de ce modèle doivent être identifiés à partir des données de terrains : carottes de roche provenant de la zone d'intérêt, tests de la fracturation pour déterminer l'état des contraintes in-situ, sections géophysiques, etc. Ce modèle prend en compte également l'état de la fracturation naturelle du massif, car l'étendue, l'architecture et les propriétés hydrauliques des fractures initiales influencent les opérations de fracturation hydraulique.

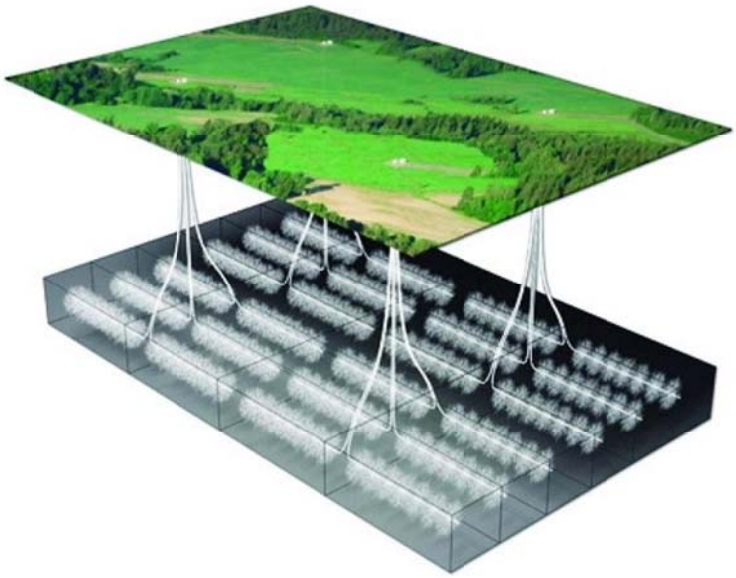


Illustration 4 - La distance entre drain horizontal dépend du rayon effectif de la fracturation hydraulique (Tyndall Center, 2011).

Avec le développement massif de l'exploitation des hydrocarbures de roche-mères, les outils de suivi de la fracturation hydraulique se sont perfectionnés notamment en ce qui concerne l'écoute sismique passive des microséismes induits par la fracturation hydraulique. La progression des fractures dans le sous-sol induit des "microséismes"[9] qu'il est possible de localiser en temps réel grâce à des capteurs permanents ou temporaires implantés à proximité, principalement dans les puits situés aux alentours (cf. § 5.3.1). On obtient ainsi une cartographie tridimensionnelle de la zone affectée par la fracturation hydraulique (Illustration 5 ; Illustration 6). Ce suivi de l'extension de la fracturation permet d'adapter l'opération de fracturation et de contrôler au mieux l'extension des fractures. La détermination de la localisation de cette fracturation dépend naturellement du maillage des récepteurs et de la bonne connaissance du

[9] Pour certaines configurations particulières des contraintes in situ et de la fracturation naturelle, il est possible que la fracturation hydraulique ne produise pas de microsismicité détectable. Cela pose un problème de suivi et donc de contrôle des fractures ainsi créées.

champ de vitesse dans la zone étudiée. En phase d'exploration ou de début d'exploitation, la localisation du champ de fracture sera de ce fait moins précise.

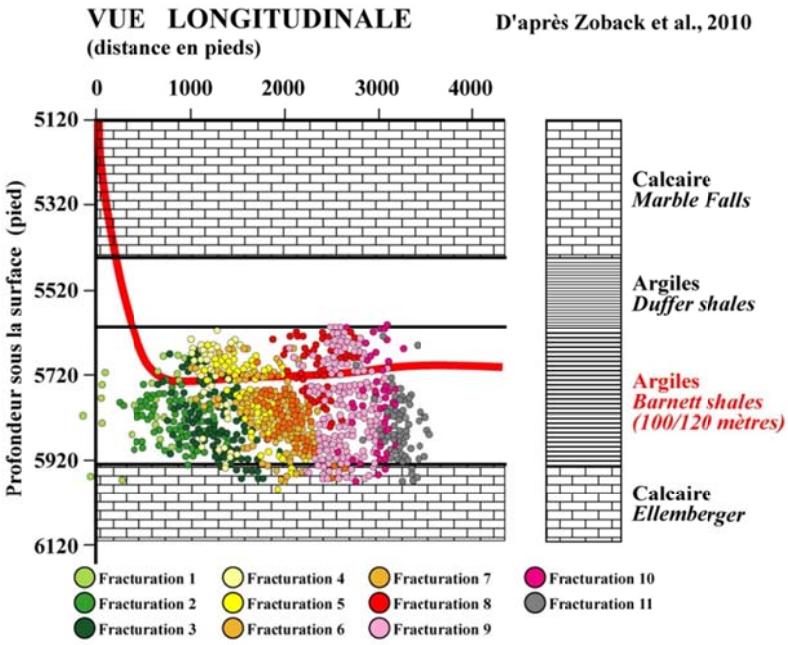


Illustration 5 - Cartographie de la zone affectée par la fracturation hydraulique (Zoback et al., 2010).

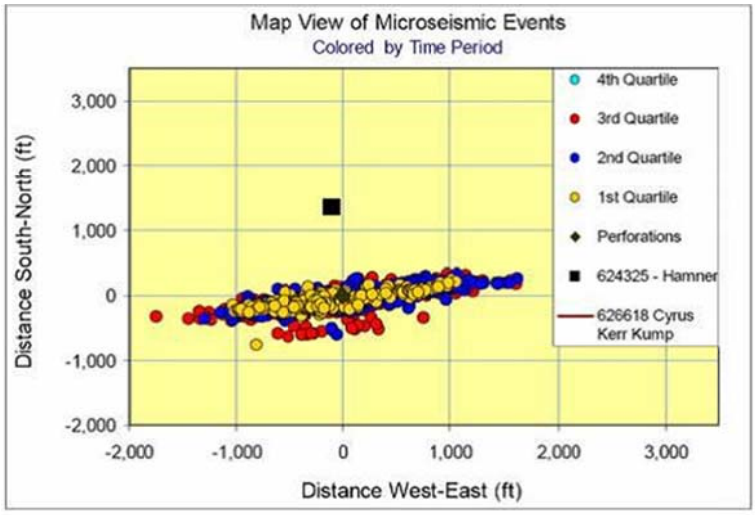


Illustration 6 - Cartographie des microséismes lors d'une fracturation hydraulique. (Source: Oilfield Service Company).

La géométrie du réseau de fractures induites est extrêmement variable, elle dépend directement de la lithologie des couches ainsi que de l'état des contraintes *in situ* (Illustration 7). Aux profondeurs d'exploitation des hydrocarbures de roche-mères, (>

800 m), les opérations de « frac » sont conçues pour que les fractures induites soient limitées verticalement à la couche "argileuse". Elles s'étendent latéralement sur des distances allant jusqu'à plusieurs centaines de mètres, suivant une direction préférentielle dépendant de l'état des contraintes.

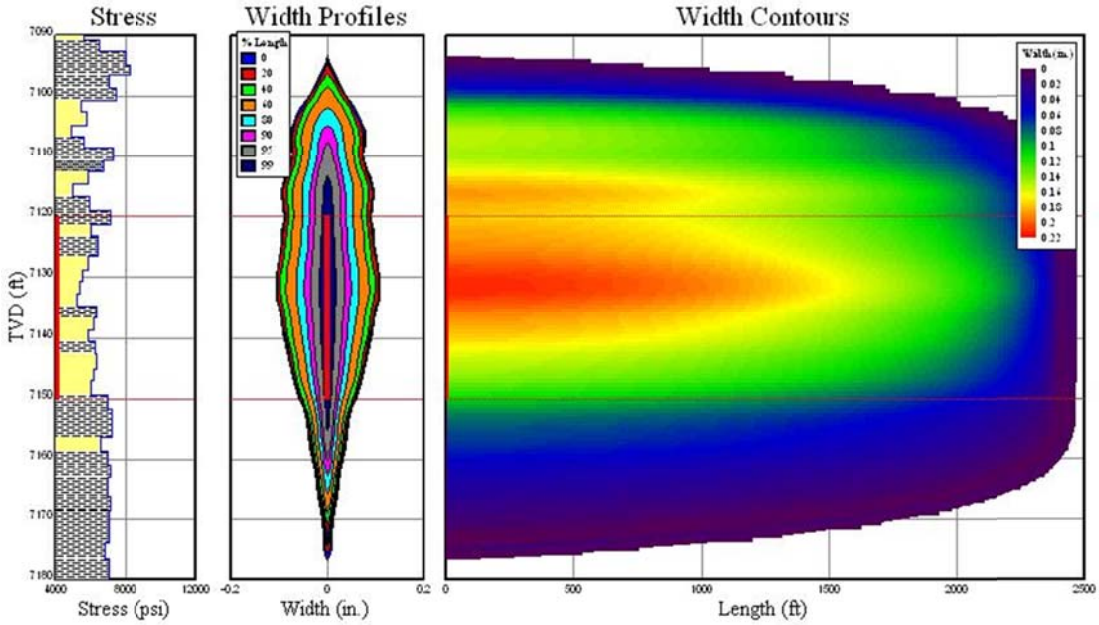


Illustration 7 - Modélisation de la propagation d'une fracture (Source : Chesapeake).

La compréhension de la modification locale des contraintes par la fracturation hydraulique est aussi un facteur important dans le développement des exploitations. Les premiers drains fracturés modifient les contraintes locales et donc le développement des fractures pour les drains suivants. La prise en compte de ces changements est recommandée pour l'optimisation de l'exploitation. Un tel modèle, doit simuler l'effet des fractures sur l'état des contraintes. Différentes techniques numériques telles que les modèles d'endommagement, les modèles discrets ou les éléments finis enrichis peuvent être utilisées à cette fin. Les expériences dans d'autres domaines d'application comme la fragmentation dynamique peuvent présenter d'éventuelles pistes de progrès.

<u>Enjeux</u>

La connaissance précise de la zone affectée par la fracturation hydraulique est donc tout à la fois une exigence pour la prévention des risques mais aussi pour l'optimisation de la production. Pour une production identique, les enjeux sont la connaissance préalable du milieu (état de contrainte, réseau de fractures naturelles), le contrôle de l'extension verticale des fractures et une diminution du nombre de drains forés et donc de l'impact environnemental de cette exploitation.

Piste de réflexions

- Développement des méthodes géologiques/géostatistiques pour la reconstruction 3D des réseaux des fractures préexistants et des discontinuités sédimentaires.
- Développement/amélioration des modèles théoriques et numériques de simulation de la formation et propagation des réseaux de fractures :
    - prise en compte de l'hétérogénéité des milieux géologiques ;
    - interaction entre les fractures initiées et existantes ;
    - évolution de la perméabilité des réseaux de fractures dans le temps (fluage, couplages chimio-mécaniques, …).
- Etudier les effets des différents scénarios de fracturation hydraulique sur le développement d'une sismicité induite et ses impacts.
- Impact de la fracturation hydraulique sur la sismicité naturelle dans les zones d'activité sismique non négligeable.
- Etudier l'endommagement potentiel à moyen et long terme d'origine mécanique et chimique des couches fracturées hydrauliquement en relation avec les scénarios de fracturation et la nature des fluides injectés restant dans le sous-sol à l'issue de l'exploitation.

L'ensemble de ces modèles permettront de :

- définir a priori la meilleure fracturation en fonction des objectifs fixés ;
- suivre grâce à l'écoute passive de la fracturation la progression de cette fracturation et ainsi s'assurer que cette fracturation est conforme aux prévisions ;
- mettre en place des mesures correctives en cas de "dérive" de la fracturation par rapport au programme initial. Il conviendra aussi de s'interroger sur le temps de réaction nécessaire à la mise en place de ces mesures correctives en cas d'écart à la prévision ;
- dans un stade plus mature des recherches ce modèle permettra d'optimiser la localisation des drains horizontaux et de diminuer ainsi l'impact environnemental.

4.1.2. Interactions entre le milieu fracturé, les fluides et le puits

Constat

L'injection lors de la fracturation hydraulique d'eau sous pression contenant des agents de soutènement ("proppants") tels que du sable mais aussi des additifs chimiques va aussi perturber le milieu géologique dont la minéralogie est complexe (matrice + hydrocarbures).

Enjeux

Dans le cas des hydrocarbures de roches-mères, les hydrocarbures sont piégés dans

une roche à dominante argileuse. Les argiles sont des minéraux hydrophiles qui ont des capacités d'adsorption remarquables. Grâce à leurs propriétés électro-chimiques, les argiles ont la capacité de former des complexes organo-minéraux, de piéger des éléments métalliques ainsi que des éléments radioactifs. Ces capacités dépendent directement de la minéralogie des argiles mais aussi des conditions du milieu. Ainsi on peut noter une désorption facilitée par un changement du pH du milieu, par un changement de concentration de l'eau de formation ainsi que par des changements de pression et de température.

L'injection d'un fluide de fracturation sous forte pression va entraîner une modification plus ou moins importante des conditions d'équilibre dans la couche fracturée.

Cette modification est importante car elle va influencer :

- La nature des effluents puisqu'une partie de l'eau de forage et de l'eau de fracturation (entre 20 et 70%) est refoulée lors de la phase de "flowback" (période durant de quelques heures à quelques jours succédant à la phase de fracturation hydraulique et qui précède la mise en production du puits). Cet effluent contient du fluide de fracturation qui a pu se charger d'autres éléments du fait des modifications physico-chimiques du milieu. Ainsi on peut retrouver des métaux lourds ou des éléments radioactifs si l'encaissant en contient. Cet effluent doit être retraité avant tout autre usage. Plus la nature de l'effluent sera complexe, plus le retraitement sera coûteux.
- L'efficacité de la fracturation hydraulique, car des processus tels que la floculation et la création de dépôts dans les fractures peuvent nettement réduire la production du puits.

Pistes de réflexions

En ce qui concerne les hydrocarbures de roche-mère en France, il est indispensable d'avoir une analyse détaillée de la minéralogie des roches encaissantes. Si l'analyse unitaire est indispensable il faudra aussi étudier l'interaction avec différents fluides de fracturation dans les conditions de fond afin de définir le fluide le plus efficace pour l'effectivité de la fracturation tout en restant le moins réactif avec le milieu.

Par ailleurs, il faudrait caractériser toutes les interactions possibles entre les fluides injectés pour la fracturation hydraulique, les puits (tubage et ciment), la roche et les eaux des aquifères sus-jacents. Ces études devront permettre d'en déduire les impacts possibles sur les puits et l'environnement souterrain depuis la phase du forage jusqu'après la fin de l'exploitation.

De plus, le processus de fracturation hydraulique mis en œuvre pour permettre l'exploitation d'hydrocarbures perturbe l'état d'équilibre instauré au sein des roches-mères, ainsi, la fin de l'exploitation ne correspond pas obligatoirement à un retour à l'équilibre. Au-delà de la phase d'exploitation, il conviendrait donc de s'interroger sur l'évolution à long terme du milieu dont l'équilibre a été perturbé par la fracturation hydraulique. L'étude de cette évolution sur le long terme permettrait d'appréhender des processus lents (exemple : dissolution) pouvant avoir des répercussions sur les

roches-mères et sur les matériaux des puits (corrosion des aciers, dégradation des annulaires cimentés et des bouchons…), et d'en déduire les risques associés.

4.1.3. Les besoins en eau

Constat

Les volumes d'eau nécessaires pour l'exploration et l'exploitation des gisements de GHRM dépendent du type de formation et de la configuration des opérations de fracturation (profondeur des puits, propriétés des fluides de fracturation) et de la conception de la fracturation hydraulique. Les besoins en eau pour la fracturation hydraulique des gisements de GHRM sont compris entre 8 000 et 16 000 m^3 par forage (American Petroleum Institute, 2010 ; GWPC et ALL Consulting, 2009 ; Satterfield et al., 2008). Une comparaison des besoins en eau pour des fracturations hydrauliques réalisées sur différentes roches mères aux Etats-Unis et situées à des profondeurs variant de 1200 m de profondeur à plus de 4110 m, a été effectuée par GWPC et ALL Consulting en 2009. Les volumes d'eau pour la fracturation par puits sont compris entre 10 000 et 14 750 m^3 (on rappelle que plusieurs puits sont forés par plateforme).

Afin de satisfaire ces besoins en eau ponctuels mais importants, l'eau est généralement stockée dans des réservoirs mobiles ou des retenues d'eau, au niveau des sites d'exploitation (GWPC et ALL Consulting, 2009 ; EPA, 2011). L'eau stockée provient soit des aquifères soit d'autres exploitations pétrolières où elle est produite avec les hydrocarbures, soit des bassins versants (eau de surface), selon le contexte hydrogéologique et hydrologique des sites d'exploitation. Au vu des volumes d'eau nécessaires, des solutions de recyclage des eaux refoulées sont utilisées. Deux semaines après la fracturation, entre 10 à 40 % des fluides injectés peuvent être récupérés (Ewing, 2008 ; Vidic, 2010). Par contre sur l'ensemble du cycle de vie du puits, la récupération peut être totale voire supérieure en tenant compte des eaux de formation. Pour pallier cette tension sur la ressource en eau potable ou potabilisable, des recherches sont menées pour utiliser des eaux profondes et fortement salées, donc impropres à la consommation humaine sans traitement.

Le prélèvement d'un volume d'eau aussi important a un impact du point de vue quantitatif sur la ressource en eau (eaux souterraines, eaux de surface), variable selon le contexte géographique, climatique, géologique, et donc hydrologique et hydrogéologique. La mobilisation d'un volume d'eau important dans une zone aride, où la recharge des aquifères par les précipitations efficaces ainsi que le ruissellement dans les bassins versants sont faibles, peut être une contrainte sur les ressources disponibles pour l'alimentation en eau potable. Le prélèvement de volumes d'eau significatifs peut conduire à des diminutions de niveau piézométrique, voire à des dénoyages de forages utilisés pour l'adduction d'eau potable (AEP) (y. c. approfondissement de puits en Louisiane, près de Shreveport (EPA, 2011)), à des diminutions de débit des cours d'eau et à des réductions des volumes d'eau stockés dans des réservoirs naturels. L'exploitation des GHRM pourrait donc impacter la disponibilité des ressources en eau pour l'alimentation en eau potable ou pour d'autres usages (EPA, 2011). A l'échelle du Texas, la consommation de l'industrie pétrolière,

non conventionnelle et conventionnelle réunies, représente 6% de la consommation totale.

Enjeux et verrous

- Identifier, caractériser et quantifier les ressources en eau, superficielles et souterraines, disponibles à proximité des gisements de GHRM. Évaluer leur aptitude à satisfaire aux besoins de la fracturation hydraulique, en quantité et en qualité, et évaluer l'impact environnemental dans le cycle hydrologique et les services environnementaux rendus au sens large.
- Assurer une gestion de la ressource en eau durable dans l'environnement du site d'exploitation du gisement GHRM conformément à la loi LEMA (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques du 30 décembre 2006) ainsi qu'à la Directive Cadre sur l'Eau, y compris la directive fille sur les Eaux souterraines.
- Réduire les besoins en eau pour la fracturation hydraulique sur les sites de production, en optimisant la réutilisation des eaux refoulées, en poursuivant les travaux de R&D sur la réutilisation des eaux refoulées, d'eaux usées, ou encore d'eaux hypersalines d'aquifères profonds, pour effectuer de nouveaux cycles de fracturation. Gérer les questions associées au stockage temporaire des eaux refoulées.

Pistes de réflexion

- Sur la base d'un retour d'expérience des sites d'exploitation aux Etats-Unis et du Canada, analyser les pratiques actuelles de gestion des ressources en eau.
- Analyser les données collectées au niveau d'un référentiel hydrogéologique des aquifères profonds, les données du référentiels BDRHF-V2 et de la base de données ADES pour les aquifères de subsurface, en mettant en évidence les relations hydrauliques possibles entre les différentes couches des référentiels et établir des bilans hydrologiques pour des périodes d'observation données.
- Analyser les données existantes concernant les eaux de surface pour les sites sélectionnés.
- Analyser les usages en cours, et caractériser la vulnérabilité des masses d'eau (surface et souterraine).
- Caractériser l'impact de prélèvements sur la disponibilité de la ressource, en fonction du type de ressource, en considérant la variabilité spatiale et temporelle à l'aide d'outils statistiques et de systèmes d'information géographique (SIG).
- Identifier les impacts possibles sur la disponibilité de la ressource liés aux grands volumes d'eau à prélever pour la fracturation hydraulique, pour des contextes climatiques et hydrologiques différents.
- Utilisation des eaux des aquifères salés profonds.

4.1.4. Améliorations possibles de la fracturation hydraulique

Constat

Bien que la fracturation hydraulique date des années 1940, et qu'actuellement plus de 2 millions de fracturation aient déjà été effectuées dans le monde, tant pour des gisements conventionnels que non conventionnels, les actions de R&D sur le sujet sont nombreuses, tant pour améliorer les techniques et réduire leur impact sur l'environnement que sur la recherche de nouvelles formes de fracturation.

Les axes de recherche sont nombreux notamment sur la recherche de nouveaux additifs chimiques (par exemple "Clean Suite" d'Halliburton) moins agressifs pour l'environnement. On peut envisager que la "chimie verte" fournisse rapidement de nouveaux produits. Les techniques de fracturation pourraient aussi évoluer avec une utilisation optimale de la ressource en eau nécessaire, du retraitement du "flowback" et de l'eau de production.

Enjeux

La fracturation hydraulique est actuellement la technique utilisée pour produire de façon économique des hydrocarbures à partir d'une couche peu poreuse et imperméable. L'amélioration de cette méthode en termes d'impact environnemental et de risques est indispensable à un développement de ces ressources.

Pistes de réflexions

- Réduction de l'empreinte environnementale de la fracturation hydraulique : optimisation du volume d'eau nécessaire à la fracturation en fonction des conditions géologiques et mécaniques.
- Analyser la faisabilité et les avantages des techniques envisagées au Canada visant à remplacer l'eau d'injection par des gaz liquéfiés (GPL), des gels de propane, ou du CO_2 avec ou sans ajout azote, etc. Outre l'avantage de réduire considérablement l'utilisation de l'eau (ressource et traitement), cette alternative serait en effet de nature à limiter l'effet de lixiviation des terrains en place et donc à limiter les résidus remontés en surface. A ce sujet, le BAPE du Québec est d'avis que « *le Gouvernement du Québec devrait favoriser le développement de technologies sécuritaires visant le remplacement de l'eau de fracturation ainsi que l'usage de produit chimiques environnementalement acceptables* ».
- Étudier les alternatives à la fracturation hydraulique : la fracturation hydraulique (au sens large d'injection de fluides sous pression quel que soit le fluide) n'a pas pour le moment de véritables alternatives. Les pistes de réflexions restent donc totalement ouvertes.

4.2. UTILISATION DE PRODUITS CHIMIQUES (INVENTAIRE, TOXICITE)

Constat

La fracturation hydraulique d'une formation géologique requiert des formulations comprenant des additifs chimiques (0.5% environ) pour créer la fracture par montée en pression et pour développer son extension, puis maintenir l'ouverture de la fracture par transport et dépôt de particules solides (proppants). Les additifs peuvent avoir des rôles divers : augmenter la viscosité du fluide, diminuer la friction, faciliter le retour du fluide, limiter la prolifération de microorganismes, restaurer la perméabilité en fin d'opération (oxydants et enzymes), inhiber la corrosion des tubages, contrôler le pH,… . Parmi les dizaines d'additifs référencés, certains peuvent présenter des propriétés toxiques, voire cancérigènes selon leur concentration et le temps d'exposition. A noter qu'en Europe, l'utilisation de ces additifs est régie par le règlement REACH.

Les types et concentrations des proppants et des additifs chimiques varient en fonction des conditions et propriétés du gisement. Ils sont déterminés à partir de modélisation des propriétés des réservoirs et de la simulation de la fracturation considérant la composition des fluides, les débits de pompage et les concentrations des proppants.

Une liste des additifs chimiques connus publiquement existe dans différents documents (Annexe D, EPA, 2011). Différents type de formulations existent utilisant des types d'additifs différents. Même si il n'y a pas encore de classification générale, ces additifs chimiques peuvent être classés selon leurs propriétés (fonctions) dans le procédé ou leurs familles chimiques et groupements fonctionnels. La première est la plus utilisée. Elle est formulée de la façon suivante :

- *Les particules solides :* Appelées proppants, ce sont des particules solides destinées à maintenir ouvertes les fractures créées lors de l'opération. Le plus souvent constituées de sable ou d'oxyde d'aluminium, elles peuvent être enrobées de résines (formaldéhyde phenol polymer, novolac, resole, resol…), afin de les consolider et d'éviter le retour dans l'effluent de production.
- *Les acides (essentiellement HCl)* : pour nettoyer les abords du puits qui pourraient être endommagés par les résidus de boue de forage et de ciment. L'acide est injecté à faible débit, pour ne pas dépasser la pression de fracturation, et ce pendant une assez longue période.
- *Les polymères* : Les polymères utilisés sont le plus souvent des gommes de guar, éventuellement modifiées (CMHPG par exemple), ou des dérivés de la cellulose. Leur mise en solution aqueuse peut être difficile, et c'est pourquoi ils sont parfois conditionnés en émulsion dans un solvant organique.
- *Les réticulants (ou agents gélifiants)* : La réticulation des polymères permet de conférer à la solution des propriétés rhéologiques intéressantes, à savoir la capacité à maintenir les proppants en suspension ainsi qu'une faible pénétration dans la formation. Ce peuvent être des sels métalliques divalents comme le zirconium et le titane, ou encore du borax. Les produits utilisés contiennent en outre des solvants (Gazole, éthylène glycol, méthanol…).

- *Les Breakers* : Ces produits permettant de réduire la viscosité des gels de polymères après la création de la fracture (en les dégradant) sont composés généralement d'oxydants. Des enzymes peuvent aussi être employés pour catalyser l'hydrolyse des polymères.
- *Les biocides (plusieurs produits organiques dont glutaraldéhyde, etc. mais aussi les chlorures d'ammonium, etc.)* : ces produits permettent de stériliser le milieu et d'empêcher le développement bactérien qui peut dégrader les propriétés de certains polymères (gomme de guar) utilisés. La non-utilisation de ces produits chimiques fait courir également un risque important d'acidification du milieu par le dégagement de gaz acides (i.e., H_2S, etc.) généré par la réduction bactérienne du soufre. Ce problème est récurrent dans les réservoirs d'hydrocarbures.
- *Les inhibiteurs de corrosion (isopropanol, acide formique, diméthyle formamide, etc.)* : ces produits chimiques sont souvent rajoutés dans les acides pour éviter la corrosion du casing[10] des puits. En effet, les acides augmentent le risque de corrosion.
- *Les atténuateurs (réducteurs) de frictions (i.e., polyacrylamide, distillat de pétrole, etc.)* : Connus sous le nom de "drag reducers additives" (DRA), ce sont le plus souvent des polymères de haute masse moléculaire, en général des polyacrylamides en milieu aqueux ou des oléfines en milieu organique, qui permettent de diminuer notablement les pertes de charge lors des écoulements en régime turbulent, en interagissant avec la structure de la turbulence (tourbillons) près des parois. Ces produits injectés à de très faibles concentrations (quelques ppm) induisent des gains importants en énergie à fournir pour la frac mais aussi en équipement (pompes, etc.).
- *Les réducteurs d'oxygène (i.e., bisulfure d'ammonium)* : ces produits permettent d'éviter la corrosion des tubages des puits par les réactions d'oxydo-réduction faisant intervenir l'oxygène. Sans ces additifs, le risque de corrosion devient réel et l'intégrité des puits est compromise.
- *D'autres produits usuels dans l'industrie de production du pétrole et de la géothermie* : régulateurs de pH, anti-dépôts (anti-scale), stimulateurs chimiques essentiellement acides, contrôleur des teneurs en fer, surfactants, etc.

On peut énumérer quelques centaines de produits chimiques organiques et inorganiques qui sont utilisés souvent à l'état de traces (entre 0,0001 à 1 ppm). Les formulations peuvent aller des plus simples (formulations type slickwater : eau + peu de sable + réducteur de friction) aux plus complexes selon la formation concernée par la fracturation.

<u>Enjeux et verrous</u>

- Avoir connaissance de la composition chimique des eaux de fracturation, de la concentration, de la biodégradablilité et de la toxicité des additifs, de façon à

[10] Cf. Glossaire

évaluer et quantifier les risques sanitaires et environnementaux.

- Déterminer les besoins de traitement avant rejet et les conditions d'utilisation à respecter. Identifier les paramètres environnementaux à contrôler.
- Développer l'usage de fluides de fracturation efficaces et d'additifs chimiques à faible impact environnemental.
- Réglementer et/ou adapter l'usage des additifs dont les impacts sanitaires et environnementaux ne sont pas encore évalués par le règlement REACH. Restreindre le nombre d'additifs utilisables et proposer des études R&D sur ces additifs pour évaluer leur impact. Envisager la mise en place d'une liste positive en fonction des tonnages utilisés.
- Maitriser la réactivité chimique et la cinétique de dégradation/fixation des produits chimiques utilisés.
- Chercher à développer la notion de *compatibilité* de certains produits chimiques utilisés avec le contexte minéralogique, géochimique et physico-chimiques des réservoirs de GHRM afin d'éviter l'émanation de gaz indésirable et de rationaliser les concentrations « stœchiométriques ».
- Identifier les mécanismes, les zones de réaction et les modes d'action des substances injectées et les éléments relargués afin de maitriser la portée de ces produits ainsi que leur devenir dans la boucle de production mais aussi dans le milieu artificiellement fissuré à moyen et long terme.

Pistes de réflexion

- Exploiter le retour d'expérience en faisant une synthèse approfondie des produits utilisés dans le contexte des champs nord-américains.
- Essayer d'évaluer les réactivités physique et physico-chimique des produits utilisés dans les systèmes complexes de GHRM, notamment sous les effets de température et de pression attendues lors la fracturation hydraulique.
- Estimer le temps de vie de ces produits chimiques et l'impact des substances finales (stables) et/ou intermédiaires à durée de vie longue.
- Rechercher les produits de substitution (moins nocifs) pouvant assurer les mêmes effets selon les contextes géologiques et hydrogéochimiques des GHRM et qui minimisent les besoins en eau.
- Initier des études cinétiques et de simulation du transport réactif des substances chimiques qui pourraient s'avérer incontournables et surtout nécessaires pour le contexte des GHRM.

4.3. IMPACTS POTENTIELS SUR LA QUALITE DE L'EAU

Constat

La contamination des eaux de surface et souterraines par l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère peut résulter d'activités réalisées en surface : déversement accidentel de produits chimiques ou d'eaux usées, fuites de liquides

provenant des équipements et véhicules, boues de forage, traitement inadéquat des eaux de fracturation et des eaux usées. La contamination peut aussi résulter de mécanismes souterrains pendant les phases de forage, fracturation hydraulique et exploitation de gaz.

Enjeux et verrous

- Réglementer l'utilisation, le stockage, le traitement et le rejet des fluides sur les sites de production de façon à éviter la contamination des eaux souterraines et superficielles.
- Définir les objectifs environnementaux de rejet dans les cours d'eau en considérant les effets cumulatifs des rejets.
- Définir les bonnes pratiques permettant de concevoir et dimensionner des dispositifs de surveillance des sites de production dans le but de détecter précocement d'éventuelles contaminations des eaux et pouvoir réagir rapidement si un problème surgit et évaluer s'il est besoin de les améliorer (cf. § 5.3.2 et 5.3.3).
- Étudier les impacts potentiels de la fracturation hydraulique sur les ressources en eau potable et sur la santé publique.
- Appréhender les propriétés hydrogéologiques des formations aquifères profondes formant les encaissants des gisements de gaz et en caractériser les écoulements souterrains.
- À partir du contexte géologique, structural (fractures, failles), hydrogéologique et sismique de la zone considérée, évaluer les risques de contamination des eaux souterraines par le fluide de fracturation et le gaz, à court, moyen et long termes.
- Reformuler, si nécessaire, des besoins spécifiques par rapport aux puits (complétion, rebouchage).

Pistes de réflexion

- Etablir un référentiel géochimique et un état zéro des zones et des domaines d'intérêt pour l'exploration et l'exploitation des GHRM avant l'octroi des autorisations. Ce référentiel se veut aussi complet que possible en essayant de mesurer les concentrations en différents éléments chimiques organiques et inorganiques des eaux superficielles et des nappes aquifères des eaux souterraines (qualité initiale de l'eau).
- Dresser la liste précise des produits chimiques acheminés sur le site ainsi que les usages envisagés afin de pouvoir établir un plan de surveillance et de protection des aquifères.
- Réaliser des études amont des différents produits chimiques ainsi que les mélanges envisagés afin d'identifier l'évolution du système, les espèces chimiques impliquées et les produits intermédiaires (de dégradation). La maîtrise de ces processus est nécessaire pour pouvoir adapter les méthodes

de surveillance et cibler les substances à mesurer (traçage).

- Développer/adapter le concept du traçage chimique non réactif en utilisant des substances stables pouvant signaler l'arrivée des fuites et des connexions entre masses d'eau et aquifères.

4.4. TRAITEMENT ET DEVENIR DES EFFLUENTS

Constat

Le fluide de production, une fois séparé du gaz exploitable, est traité avant d'être réutilisé ou rejeté. La nature physicochimique et (éco)toxicologique des adjuvants chimiques introduits dans les fluides, de même que celle des éléments ou substances chimiques naturels susceptibles d'être remontés en surface, varie fortement suivant les contextes géologique et d'exploitation (Veil et al., 2004 ; Vidic, 2010). Elle doit être étudiée a priori et suivie attentivement lors des travaux d'extraction, de manière à préciser et maîtriser les risques environnementaux et sanitaires associés.

Enjeux et pistes de réflexion

Plusieurs pistes de réflexion peuvent être mises en avant :

- Établir un retour d'expérience détaillé sur la base des informations disponibles sur la nature et la quantité des effluents recueillis lors d'exploitations aux Etats-Unis. Certaines données précises sont en effet disponibles (Hayes, 2009) ;
- Faire un inventaire des agents et adjuvants chimiques habituellement utilisés par l'industrie lors de la mise en œuvre des injections et déterminer leur propriétés toxicologiques et écotoxicologiques de manière à recommander des mesures adaptées ;
- Prendre en compte les caractéristiques géologiques du milieu d'injection et caractériser une typologie des massifs permettant d'anticiper la nature des minéraux et substances organiques susceptibles d'être présents dans les eaux de reflux du fait du processus de lixiviation des terrains induit par le fluide injecté pour la fracturation. La nature et la teneur de ces substances influeront en effet directement sur le type de traitement des "boues" à envisager ;
- Estimer les volumes d'eau souillée à traiter et adapter les moyens de stockage transitoires de manière à maîtriser les procédés de réutilisation et de traitements des effluents, les risques de pollution du milieu naturel et les risques sanitaires (notamment émanations gazeuses à partir des installations, risques de pollution des eaux potables ou potabilisables) autour des installations de traitement en surface ;
- Identifier les meilleures technologies disponibles ou développer, au cas par cas (avec études génériques préalables), des méthodes / procédés de prétraitement des eaux usées permettant ensuite :
  - soit de diriger les eaux usées vers les centres de traitement municipaux ;
  - soit de traiter in situ la totalité des volumes souillés.
- La faisabilité et la capacité de traitement des stations de traitement des eaux

(vis-à-vis de la salinité, la nature et caractéristiques chimiques des molécules présentes, la nature et l'importance des matières en suspension) devront être considérées en regard des besoins spécifiques liés aux substances en présence et des rythmes irréguliers de production (West Virginia Water Research Institute, 2010 ; Stephan et al., 2010, etc.).

4.5. NUISANCES POUVANT RESULTER DES PHENOMENES DE SISMICITE INDUITE

Constat

Le processus de fracturation hydraulique mis en œuvre pour permettre l'exploitation d'hydrocarbures de roche-mère perturbe l'état d'équilibre instauré au sein du massif rocheux. Dans le paragraphe 4.1 nous avons vu que la création et la propagation des fractures lors de la fracturation hydraulique générait dans la plupart des cas des microséismes. Ces microséismes sont de très faibles amplitudes (Illustration 8). Une étude statistique portant sur un grand nombre de fracturations hydrauliques montre que la magnitude des microséismes engendrés par les opérations de fracturation hydraulique s'échelonne de M= -1,5 à M= -3,6, ce qui est particulièrement faible et nécessite un réseau de capteurs de haute sensibilité installés à proximité de la zone de fracturation (cf. § 5.3.1).

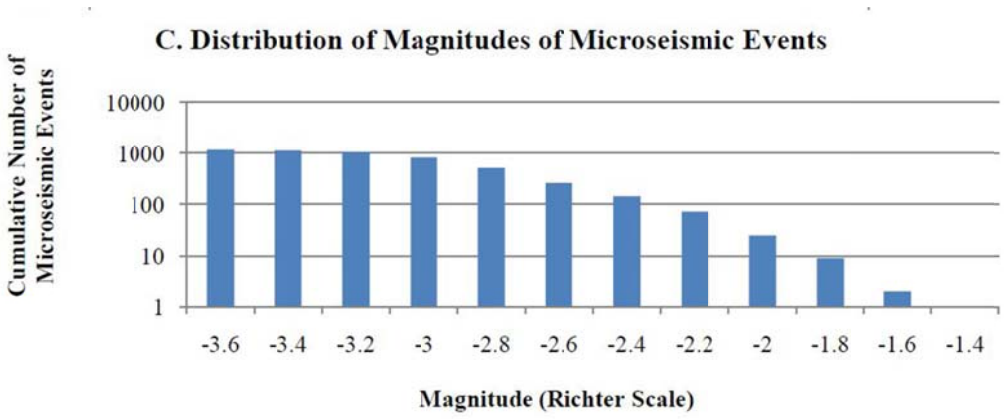


Illustration 8 - Histogramme Fréquence-Magnitude des microséismes (Zoback et al., 2010).

La sismicité directement induite par la fracturation hydraulique telle qu'elle est utilisée pour les GHRM ne présente a priori pas de danger en surface, d'autant plus que les objectifs de l'exploration des hydrocarbures se situent généralement à des profondeurs supérieures à 1500 mètres.

Par ailleurs, des séismes ont été mis en relation avec la fracturation hydraulique au Texas ou près de la ville de Guy en Arkansas, mais il n'est pas exclu que, dans les

deux cas, ce soit dû à l'injection de saumure (NYC DEC, 2010 ; Wikipédia : Guy). Plus récemment (avril et mai 2011) deux séismes de faible magnitude (M=2,3 et M=1,5) pourraient être liés d'après le British Geological Survey à la fracturation hydraulique dans un puits d'exploration dans la région de Blackpool en Grande Bretagne. Une étude est en cours sur le sujet.

Il existe dans la littérature d'autres exemples de sismicité ressentie en surface à proximité d'exploitations de GHRM. Cependant, il est indiqué clairement que celle-ci est liée à la réinjection de fluide (par exemple de saumure d'exploitation) en grande quantité dans des formations autres que la roche-mère (BSSA, 2011 ; NYC DEC, 2011).

Enjeux et pistes de réflexions

La fracturation hydraulique peut modifier localement l'état des contraintes. Dans certains cas particuliers, notamment en présence de failles préexistantes proches de la rupture, cette modification locale des contraintes associées à l'injection d'un fluide sous pression peut entraîner le rejeu d'une ou plusieurs failles et entraîner des séismes dont la magnitude serait notable.

Il est donc indispensable d'avoir une bonne vision du sous-sol et notamment de la géométrie en profondeur du réseau de failles notamment en utilisant la sismique réflexion 3D. Cette description géométrique est indispensable mais doit être couplée avec une reconstruction de l'histoire des contraintes et une description fine des contraintes actuelles. C'est en fonction de cette analyse, propre à chaque site qu'il sera possible de définir les zones où la fracturation hydraulique pourra être réalisée sans impact mécanique majeur.

La modélisation du déclenchement possible de phénomènes de sismicité induite et, à plus forte raison, des caractéristiques associées (lieu, magnitude, énergie dissipée, fréquence et vitesse particulaire) et des impacts possibles en surface, dus entre autres à des effets de site, pour les évènements les plus importants est une opération délicate du fait des nombreuses incertitudes pesant sur les caractéristiques des massifs rocheux.

Pour ce faire, les travaux proposés se baseraient en particulier sur :

- l'analyse en retour d'expérience d'évènements survenus dans un contexte similaire, mais également d'évènements survenus dans des contextes différents, de travaux sur les massifs rocheux (exploitation des mines profondes, remplissage des barrages, géothermie avec stimulation hydraulique …) ;
- le développement d'outils de modélisation numérique capables de prendre en compte les phénomènes complexes de couplage thermo-hydro-mécanique et intégrant une dimension dynamique. De tels modèles nécessiteront d'être conçus et caractérisés par des expériences spécifiques de laboratoire. Ils permettront de progresser dans la connaissance des phénomènes physiques et du comportement dynamique des roches et, en particulier, des discontinuités.

4.6. MIGRATION NON MAITRISEE DE GAZ VERS LA SURFACE

Constat

Les scénarios de migration non maîtrisée de gaz vers la surface, susceptible d'induire des risques d'inflammation, d'explosion, d'asphyxie, d'intoxication et, dans certaines configurations, d'exposition aux rayonnements ionisants (par exemple en présence de radon au sein des gisements), devront être précautionneusement analysés. On focalisera notamment l'analyse sur deux hypothèses principales :

- Fuites liées à des défauts d'étanchéité des puits d'exploitation ou d'autres puits environnants (rupture de tubage, défaut de valve, défaut de cimentation, surpression accidentelle, fuite par puits abandonnés…). Le rapport de l'EPA de février 2011 cite plusieurs exemples pour lesquels il semble que les migrations de polluants (gaz et produits chimiques) vers les nappes aquifères sont la conséquence de défauts durant les phases de forage, de tubage, de cimentation, d'exploitation ou d'abandon des puits (Pennsylvania Department of Environmental Protection, 2010 ; Mc Mahon et al., 2011 ; EPA, 2010c ; State of Colorado Oil and Gas Conservation Commission, 2009).
- Fuites liées à une remontée par le biais de discontinuités géologiques (chenaux karstiques, failles, cavités…), en présence de formations perméables ou du fait d'une altération du caractère imperméable des couches qui séparent le gisement de gaz des formations supérieures (fracturation mal maîtrisée, subsidence).

Le recours à des injections sous forte pression pour assurer la fracturation des roches profondes peut, dans certaines configurations défavorables évoquées plus haut (présence de discontinuités géologiques, de couches perméables), contribuer, par effet piston, à initier la migration de gaz au travers des terrains jusqu'à certains aquifères, voire jusqu'en surface (Yang et al., 2004). La forte pression du gaz in situ piégé dans le réservoir (de 3 MPa (Antrim, Michigan) à près de 30 MPa (Barnett, Fort Worth) ; Jenkins et Boyer (2008)) peut également contribuer à entretenir le phénomène. Le gaz ainsi libéré peut dès lors migrer vers les formations environnantes ou sus-jacentes (American Petroleum Institute, 2009) et éventuellement s'accumuler dans des cavités naturelles ou anthropiques peu profondes (caves ou réseaux enterrés par exemple), voire se manifester en surface. Une étude réalisée en Alberta (Bexte et al., 2008) considère que, de 2005 à 2007, de 7 à 19 % des puits d'exploitation présentaient une migration de gaz. Diverses mesures tendant à améliorer le processus de cimentation des ouvrages afin de limiter les migrations non contrôlées de gaz ont, de fait, été définies pour être imposées aux exploitants.

L'interaction du processus avec divers ouvrages anthropiques (puits AEP, forage d'exploration géologique, anciens puits d'exploitation, mines souterraines…) doit également être considérée avec la plus grande attention pour analyser les risques de migration préférentielle.

Enjeux et pistes de réflexions

L'analyse des scénarios de migration non maîtrisée de gaz au travers des terrains de recouvrement requerra de solides connaissances des contextes géologiques et hydrogéologiques concernés qui s'appuieront à la fois sur des reconnaissances in situ (nature des terrains, caractérisation des aquifères, discontinuités géologiques) ainsi que sur des campagnes de laboratoire (caractéristiques physiques des formations géologiques et des discontinuités majeures).

Cette analyse devra également bénéficier d'une connaissance approfondie des techniques envisagées pour la réalisation des puits d'exploitation (localisation des puits en profondeur, techniques de forage, de tubage, de cimentation et de traitement après abandon).

L'analyse sera dès lors menée sur la base de modèles représentatifs du milieu considéré permettant d'étudier l'influence des conditions d'exploitation sur la tenue des puits, mais également sur la libération et la migration des gaz par le processus de fracturation hydraulique.

Menée en étroite collaboration avec les travaux sur l'analyse de la propagation des fractures au sein de la roche-mère, la démarche permettra de définir des « périmètres de sécurité » permettant d'isoler la zone influencée par l'exploitation des discontinuités naturelles (failles) ou anthropiques (forages, cavités) existantes susceptibles de faciliter la migration des gaz libérés.

La pérennité des différentes barrières mises en place dans les puits pour assurer l'étanchéité (cimentation primaire dans les annulaires, Bridge Plug, bouchons de ciments pour l'abandon) devra être contrôlée. Les contrôles devront permettre de s'assurer du respect des règlementations mais aussi de vérifier l'évolution sur le long terme des différents matériaux du puits (corrosion des aciers, dégradation des ciments) en tenant compte notamment de l'historique des sollicitations mécaniques et physico chimiques.

4.7. ANALYSE DES RISQUES LIES AUX INSTALLATIONS DE SURFACE

Constat

Comme toute exploitation pétrolière, l'extraction d'hydrocarbures de roche-mère exige le déploiement et l'exploitation d'installations de surface qui, pour certaines d'entre elles, peuvent être mobiles. Il s'agit notamment :

- des moyens de forage ;
- des installations de collecte de gaz et de fluides ;
- des installations de traitement de gaz et de fluides ;
- des installations de stockage de gaz et de fluides ;
- des installations de transport de gaz et de fluides.

Les installations de surface associées à l'extraction d'hydrocarbures non conventionnels sont similaires aux installations associées à l'extraction conventionnelle, mis à part principalement :

- les installations de stockage, de mélange (eau + sable + réactifs) et d'injection d'eau sous haute pression nécessaires au processus de fracturation de la roche-mère ;
- les installations de récupération, de stockage et de traitement de l'eau « usée ».

Les principaux enjeux consisteront à identifier les risques, spécifiques au caractère « non conventionnel » de l'exploitation, à la fois sur les hommes (travailleurs et riverains), les biens et l'environnement naturel.

Enjeux et pistes de réflexions

Plusieurs démarches devront être entreprises :

- Identification des dangers liés aux conditions opératoires spécifiques aux produits chimiques utilisés (notamment pression, sous-produits présents dans le fluide extrait,…) ;
- Identification des spécificités intrinsèques à l'exploitation d'hydrocarbures non conventionnels en termes d'installations de surface ;
- Mise en œuvre d'une analyse des risques intégrée sur ces installations spécifiques durant les différentes phases d'exploitation. L'analyse, menée à l'échelle de la filière, reprendra l'ensemble des composantes du procédé industriel, en intégrant notamment les procédés d'extraction, le transport, le traitement de l'eau, le tout pour l'ensemble du cycle de vie ;
- Identification d'éventuels verrous scientifiques ou techniques pour lesquels un développement des connaissances sera nécessaire. On citera, à titre d'exemple, l'effet des adjuvants chimiques sur l'intégrité des puits ou des pipelines, de même que la conséquence d'une rupture de canalisations à très haute pression ;
- Définition ou validation de mesures de sécurité (spécification de conception, barrières de sécurité, distances d'isolement…) dédiées à la sécurité des travailleurs et/ou aux enjeux environnants (riverains, environnement naturel…).

4.8. IMPACTS ET NUISANCES DE L'EXPLOITATION SUR L'ENVIRONNEMENT

Dans une logique d'analyse intégrée de la chaîne de production, il conviendra de caractériser l'ensemble des impacts induits pas la filière sur le milieu environnant. Ces différents sujets ne constituent probablement pas une priorité en termes d'études préliminaires mais ne devront pas, pour autant, être négligés dans une logique d'évaluation intégrée de la filière et de définition de mesures d'atténuation ou de prévention adaptées.

Impact sur la qualité de l'air ambiant

Ceci concerne, par exemple, l'impact des dispositifs de production sur la qualité de l'air. Outre les fuites de méthane dans l'atmosphère citées plus haut (cf. § 4.6), une étude réalisée par l'Etat de New York en 2009 montre que le carburant consommé pour alimenter les sites de production ainsi que le brûlage du gaz à la torchère peuvent entraîner l'émission d'oxydes de soufre (SOx), d'azote (NOx), de particules, de même que de produits potentiellement toxiques (comme le benzène) autour des sites de production.

Ces émissions peuvent également résulter de la mise en contact avec l'atmosphère des eaux de fracturation refoulées par le forage (composés organiques volatils notamment). Ceci pose, de fait, la question connexe de l'émission d'odeurs. On ajoutera enfin, les rejets issus de la circulation potentiellement importante des engins de chantier indispensables au développement de l'exploitation (approvisionnement en eau, en produits chimiques…).

Nuisances sonores

Selon l'Association pétrolière et gazière du Québec, le niveau sonore provenant des opérations effectuées sur un site d'exploration pourrait dépasser 90 dB. Sachant que l'OMS a établi des valeurs cibles, notamment de nuit, inférieures à 60 dB à l'extérieur d'une résidence et à 30 dB à l'intérieur, et que le niveau sonore diminue de 6 dB à chaque fois que la distance entre la source sonore et la cible double, il est possible de définir le niveau de nuisance attendu et de prévoir, en tant que de besoin, la mise en œuvre de dispositifs d'atténuation requis, tels que les murs antibruit d'utilisation déjà systématique.

Outre les installations industrielles, les nuisances sonores concernent également la circulation d'engins abordée ci-après.

Circulation d'engins

L'augmentation temporaire mais importante du trafic routier représente l'une des préoccupations principales des riverains (étude menée sur les comtés de Wise et Johnson au Texas). Il est difficile d'estimer, même grossièrement, l'intensité du trafic engendré puisque celui-ci dépend étroitement du contexte. Ainsi, l'Association pétrolière et gazière du Québec estime à environ 1000 à 2000 passages de camions par puits sur une période de 20 jours, près de la moitié résultant de la circulation de camions citerne pour le transport d'eau, lequel n'est pas systématiquement requis (pompages sur place, aqueducs).

Avec une augmentation sensible, même temporaire du trafic, divers impacts en termes de dégradation des voies de circulation, de fluidité du trafic et de sécurité routière mériteront d'être considérés afin de définir des mesures d'atténuation adéquates. De plus, les accidents potentiels lors des transports par camions sont susceptibles

d'entrainer des déversements de polluants (principalement additifs, hydrocarbures) dans le milieu pouvant contaminer les eaux de surfaces (NYC DEC, 2011).

D'autres types d'impacts/nuisances liés à la circulation d'engins ou de camions ont pu être relevés dans la littérature (NYC DEC, 2011 ; NYC DEP 2009a):

- Perturbations significatives de certaines zones particulièrement sensibles dédiées aux loisirs ou à la protection de l'environnement. Il s'agit là d'une des raisons pour lesquelles, l'état de New York a proposé d'interdire l'exploitation des GHRM dans certains domaines de l'Etat en raison d'incompatibilité d'usages.
- Rejets atmosphériques (NOx, COV, Gaz à effets de serre). Il conviendrait de les quantifier précisément.
- Augmentation du nombre d'opérations de maintenance et des couts d'entretien des routes et des ponts. De plus, il peut être nécessaire d'élargir et de renforcer certaines routes trop étroites ou inadaptées au passage d'engins lourds.
- Enfin, le nombre important de trajets nécessaires à l'exploitation des GHRM a été identifié aux Etats-Unis comme un vecteur potentiel de dissémination d'espèces invasives terrestres ou aquatiques. L'introduction d'espèces invasives peut avoir des impacts significatifs sur l'environnement.

Impact paysager

Les tours de forage constituent l'élément majeur en termes d'impact paysager transitoire. Une fois la perforation et la fracturation achevées (après quelques semaines pour un puits), la tour de forage est remplacée par une tête de puits de hauteur nettement plus limitée dont l'accès est condamné par des grillages pour interdire la pénétration du public sur le site de production. A ceci, on ajoutera le déboisement éventuel et le terrassement requis pour la réalisation de routes ou de pistes indispensables à la circulation des engins, ainsi que l'installation de pipe-lines pour amener ou évacuer les substances utilisées ou produites. Enfin, on citera l'entreposage en surface des produits chimiques ainsi que de la charge (sable, céramique) utilisés pour la fracturation hydraulique de même que l'entreposage ou l'épandage des eaux ou boues recueillies après l'exploitation.

Limitation d'usage des terrains de surface

Le développement d'activité d'extraction gazière ou pétrolière est susceptible de générer quelques difficultés par rapport aux usages préexistants. Si l'on peut raisonnablement envisager que ce développement se ferait préférentiellement en secteur agricole, il conviendra d'identifier les impacts et nuisances d'une potentielle cohabitation entre ce type d'extraction (en intégrant l'ensemble de la filière de production et de transport) et les activités agricoles voisines.

Il conviendra également de bien définir l'interaction entre les processus d'exploration ou d'exploitation et les zones protégées par différentes dispositions légales (espèces protégées, réserves naturelles, parcs naturels régionaux, etc.).

Enfin, l'impact sur le patrimoine foncier des propriétaires du sol concernés par les possibles exploitations devra également être considéré, au regard notamment des effets à court et plus long terme induits par l'exploitation sur les terrains.

Lien entre déformation dans la formation exploitée et la surface

Le bilan volumique des quantités de matières introduites, mais également de celles extraites, peut mettre en évidence deux effets : soit une augmentation du volume total si la quantité de produit injectée est supérieure à celle extraite, une fois prise en compte la compressibilité, soit une diminution dans le cas contraire.

Parmi les nombreuses références bibliographiques traitant du procédé de fracturation hydraulique, aucune, à notre connaissance, ne fait état du développement possible de déformations en surface du sol, alors que ce sujet est prioritaire pour d'autres types d'exploitations (mines souterraines, hydrocarbures, géothermie ou stockage de CO_2…). A ce titre, on notera toutefois que, les amplitudes attendues seraient bien moindres que dans le cas d'autres types d'exploitation.

L'évaluation a priori de possibles effets d'une exploitation des hydrocarbures de roche-mère en terme de déformations de surface n'est probablement pas une priorité en l'état. Toutefois, en fonction de l'occupation des secteurs où elle pourrait être envisagée à terme, une analyse plus précise de cette thématique pourrait être entreprise. Elle exigerait le recours à des modélisations multi-physiques du phénomène afin d'appréhender l'interaction des différents mécanismes susceptibles d'intervenir dans le processus.

4.9. BILAN ENVIRONNEMENTAL GLOBAL

4.9.1. Gaz à effets de serre

Constat

Très peu de données sont disponibles sur les émissions de gaz à effet de serre résultant de l'exploitation des gaz de roche-mère. Nous présenterons donc principalement une étude dite « provisoire » du Tyndall Center (2011) qui est, à notre connaissance, la plus détaillée. Cette étude fait l'hypothèse que les gaz de roche-mère et les gaz conventionnels génèrent des émissions de gaz à effet de serre identiques à l'exception des émissions liées aux spécificités de l'exploitation. Ainsi, d'après cette étude, les émissions supplémentaires générées par les gaz de roche-mère proviennent des points suivants :

- Les techniques utilisées (forage horizontal, fracturation hydraulique) ;
- La production de produits chimiques ;
- Les transports d'eau et/ou de saumure ;
- Les émissions directes de gaz dans l'atmosphère (par les effluents, pendant le forage) ;

- Le traitement des eaux.

L'étude du Tyndall Center insiste sur le fait que la quantification de ces différentes sources d'émission est problématique en raison du faible nombre de données fiables disponibles. Toutefois, des valeurs « plausibles » ont été proposées et sont présentées à l'Illustration 9. Il faut souligner que de nombreuses hypothèses (non présentées ici) ont été faites pour obtenir ces valeurs.

Principales sources additionnelles d'émission	*Emissions additionnelles (en tonnes de CO_2eq/puits)*
Forage horizontal	**15 - 75**
Fracturation hydraulique	**295**
Produits chimiques de fracturation	**Non connu**
Emissions directes dans l'atmosphère	**Non connu**
Transport d'eau	**26,2 - 40,8**
Transport de saumure	**11,8 - 17,9**
Traitement de l'eau	**0,33 - 9,4**
Total par puits	**348-438**

Illustration 9 – Valeurs « plausibles » pour les émissions additionnelles générées par les gaz de roche-mère (par rapport aux gaz dits « conventionnels ») d'après Tyndall Center (2011).

A partir de ces résultats, l'étude conclut que les émissions supplémentaires générées par l'exploitation des gaz de roche-mère (par rapport aux hydrocarbures conventionnels) sont faibles et représenteraient 0,2 à 2,9 % des émissions générées lors de la combustion du gaz. Toutefois, dans cette étude, certaines sources d'émission –notamment les émissions directes dans l'atmosphère- n'ont pu être estimées. A ce titre, un article d'Howart et al. (2011) estime que les émissions directes de méthane dans l'atmosphère pendant certaines phases du forage ou la phase de récupération des effluents après fracturation sont conséquentes et pourraient même représenter 1,6 % de la quantité totale de méthane produit par le puits au cours de son exploitation. Néanmoins, les estimations de cet article sont basées sur peu de données et sont peu documentées. D'après les facteurs d'émission de l'EPA (2010b), la réalisation de puits par fracturation hydraulique engendrerait une plus grande émission de gaz à effet de serre (de méthane en particulier) que celle de puits de gaz conventionnels. Toutefois, là encore l'EPA précise qu'il existe de grandes incertitudes sur la quantification de ces émissions.

Enfin, il convient de préciser que des techniques et pratiques existent pour réduire sensiblement les émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, la technologie du « reduced emission completion » (en français : réduction des émissions pendant la réalisation du puits) proposée par certaines entreprises permettrait de réduire de façon importante les émissions directes de méthane dans l'atmosphère lors de la réalisation du puits (EPA, 2007).

Enjeux et pistes de réflexions

Etant donné les manques de connaissance et les nombreuses incertitudes précitées, les enjeux suivants se détachent :

- Quantifier de façon fiable et complète les émissions de gaz à effet de serre liées à la recherche et l'exploitation des GHRM. En particulier, l'évaluation des émissions directes de méthane dans l'atmosphère lors de la période de récupération des effluents ou de certaines phases du forage est sujette à controverse (article de Howart et al., 2011). De plus, la quantification des émissions pourrait aussi s'étendre à l'ensemble des travaux connexes nécessaires au développement de l'activité (réalisation de routes, canalisations, élagage éventuel…).
- Identifier les techniques ou pratiques pouvant être mises en place pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

4.9.2. Bilan environnemental relatif aux ressources en eaux

Constat

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode standardisée pour mesurer l'impact environnemental d'un produit ou d'un service. Après une évaluation de toutes les émissions associées et la consommation de ressources, l'impact est exprimé à l'aide d'un certain nombre de facteurs. Cet impact est supposé refléter les principales questions sociétales et les priorités environnementales. Du fait du rôle central de l'eau dans les processus environnementaux, les questions hydrologiques et hydrogéologiques sont prises en considération dans les ACV (Bayer et al., 2008).

L'analyse du cycle de vie relative à la gestion des ressource en eau associée à l'exploitation d'un GHRM comprend plusieurs phases qui doivent être analysées (Daniel Arthur J., 2009) : (i) l'accès aux sources d'approvisionnement en eau (surface ou souterraine), avec l'impact sur les hydrosystèmes pour des conditions climatiques données, (ii) le transport (camion, aqueduc, transport ferroviaire) avec les questions environnementales et les coûts, et le stockage de l'eau à proximité du ou des sites (perturbation de surface, coût), (iii) l'eau utilisée pour la foration et la fracturation et l'eau refoulée, de qualité différente, (iv) l'élimination des eaux refoulées après traitement (coût, bénéfices environnementaux, volume d'eau concerné), la réutilisation ou la réinjection (capacité des station d'épuration et proximité, réglementation et conformité pour élimination par réinjection). Si les ACV analysent les impacts en termes d'écotoxicité sur l'environnement, les impacts sur la santé humaine, sur la qualité des écosystèmes et sur les ressources doivent être analysés en parallèle. Peu d'études d'ACV concernent les ressources en eau, les ACV ayant été développées

dans le cadre de projets industriels dans des contextes climatiques où les ressources en eau ne manquaient pas.

Des méthodologies ont été développées pour évaluer les impacts environnementaux liés à l'usage de l'eau pour l'agriculture par exemple (Pfister et al., 2009) – culture du coton, à différentes échelles (problématique de la régionalisation). Ces méthodes d'ACV considèrent les dommages sur différents secteurs de protection : santé humaine, qualité des écosystèmes et ressources en eau. Si les quantités d'eau utilisées pour un usage sont considérées dans des ACV sur le cycle de l'eau, les types d'usage, les sources d'approvisionnement et la localisation géographique doivent également être considérées. Les questions de consommation en eau et de dégradation de la qualité de l'eau suite à son usage nécessitent la mise en œuvre d'inventaires détaillés à l'échelle régionale.

L'évaluation des bénéfices environnementaux des eaux de surface ou souterraines est une procédure requise pour l'évaluation économique des programmes de mesures de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) ; elle intervient dans le processus de justification des dérogations lorsque les coûts des mesures s'avèrent exagérément coûteux au regard des bénéfices qu'elles sont susceptibles de générer (analyse coûts-bénéfices). L'application de l'analyse des bénéfices environnementaux est rendue difficile par l'absence de données détaillées relatives aux bénéfices associés aux mesures de restauration du bon état des masses d'eau (ME) ou aux mesures pour la préservation du bon état des ME. Chaque district regroupant plusieurs centaines de masses d'eau, il n'est matériellement pas possible de réaliser des analyses économiques à l'échelle des ME, en s'appuyant sur des données primaires et des analyses économiques réalisées pour chaque ME, puis en les concaténant. Une solution opérationnelle consiste donc à évaluer, à travers un nombre limité d'études de cas, des valeurs standards pour les bénéfices, puis de transférer ces valeurs obtenues à d'autres ME sur lesquelles des mesures similaires doivent être mises en œuvre pour le retour au bon état ou pour leur préservation. Le transfert de valeur nécessite de réaliser des ajustements pour prendre en compte les caractéristiques spécifiques du site sur lequel on souhaite transférer la valeur. Ces approches d'évaluation des bénéfices environnementaux pourraient être développées et adaptées pour apporter des éléments additionnels à l'analyse du cycle de vie de la gestion des ressources en eau.

<u>Enjeux et verrous</u>

Au vu des manques d'indices spécifiques et de techniques d'analyses pour mener à bien des ACV relatives à la gestion des ressources en eau liée à l'exploitation des GHRM et au vu des inquiétudes concernant leur impact sur l'environnement et sur les populations, les enjeux principaux sont :

- développer des ACV prenant en considération les spécificités de la gestion de la ressource en eau associée à l'exploitation des GHRM, en lien avec les méthodes standardisées et considérant des impacts non seulement sur les ressources en eau, mais aussi sur les écosystèmes et la santé humaine, avec des approches pluridisciplinaires ;
- évaluer la possibilité d'adapter et de mettre en œuvre les approches d'évaluation des bénéfices environnementaux pour les masses d'eau

concernées au niveau régional autour de sites d’exploitation de GHRM.

5. Maîtrise des risques : bilan des pratiques actuelles

5.1. METHODOLOGIE DE L'EVALUATION DES RISQUES

Constat

Aux Etats-Unis aucune étude de risque (à proprement parler) n'est nécessaire pour réaliser des travaux de fracturation hydraulique. Certains États ajoutent néanmoins des spécificités aux demandes de permis. Par exemple, ils peuvent demander un plan de prévention de la pollution, ou tenir compte d'enjeux environnementaux (aquifères, cours d'eau, infrastructures...) lors de l'instruction des demandes de permis. Ainsi, peu de données bibliographiques sont disponibles sur les méthodologies de l'évaluation des risques liés aux opérations de fracturation hydraulique.

Approche de l'EPA

L'EPA (2011) entend utiliser l'approche par scénarios d'évolution pour évaluer les impacts potentiels de la fracturation hydraulique sur les ressources en eau. Les scénarios traiteront de l'évolution normale ou altérée et seront évalués par modélisation. Ces scénarios seront nourris par les leçons tirées d'études de cas. Les scénarios qui seront étudiés comprennent notamment:

- Migrations imprévues dues à une perte d'intégrité des puits;
- Migrations imprévues de fluides par des chemins naturels ou artificiels (failles, puits abandonnés, fracturation en dehors de la formation cible).

Enjeux et pistes de réflexions

Des verrous ont été identifiés pour chacune des principales étapes d'une évaluation du risque :

- Identification des cibles et des potentiels de dangers. Diverses cibles (hommes, ressources en eau, écosystèmes, infrastructures, etc...) sont souvent évoquées dans les rapports consultés (EPA, 2011 ; NYC DEP, 2009a ; NYC DEP, 2009b). Toutefois, aucune étude ne semble recenser de façon exhaustive l'ensemble des cibles pertinentes à prendre en compte. En ce qui concerne les potentiels de danger, certains sont encore assez méconnus (par exemple les effets de substances dangereuses).
- Le retour d'expérience est habituellement une donnée très utile pour les études de risques. Or, le retour d'expérience de l'exploitation des GHRM aux États-Unis est plus ou moins instructif étant donné qu'il est souvent difficile de remonter aux causes exactes qui sont à l'origine du dysfonctionnement présumé et de son impact éventuel.
- L'identification des scénarios de risque pertinents pour l'exploitation des GHRM par fracturation hydraulique est actuellement limitée. Les « scénarios » les plus

cités sont les migrations imprévues de fluides vers un aquifère ou la surface (dues à une défaillance de puits, à des fractures...) et les déversements de produits toxiques en surface (EPA, 2011). Toutefois, à notre connaissance, il existe peu d'études recensant de façon exhaustive et hiérarchisée l'ensemble des scénarios de risques pertinents.

- La quantification des scénarios de risques, c'est-à-dire l'évaluation de la probabilité des évènements redoutés, de l'intensité des phénomènes et de la vulnérabilité des cibles semble un domaine encore peu abordé dans le cadre de l'exploitation des GHRM par fracturation hydraulique.
- Des mesures de maitrises du risque adaptées aux scénarios de risques ne sont que partiellement disponibles.
- D'autres données nécessaires à l'analyse de risque semblent aussi faire défaut (e.g. incertitudes, échelles de gravité, acceptabilité du risque, risques cumulés...).

L'objectif global de la démarche sera d'élaborer un référentiel d'évaluation des risques validé par différentes parties.

5.2. GESTION INTEGRÉE DE L'EXPLOITATION

La définition d'un plan de gestion de l'exploitation repose sur une évaluation des risques propre à chacune des étapes, de l'exploration à la fermeture des puits. Elle débute par une étude d'impact qui permet d'identifier les cibles potentielles (humaines, environnementales), les vecteurs (eau, air, sol) et de définir un plan de prévention incluant les points majeurs à mettre sous surveillance. L'évaluation des risques sera effectuée successivement pour les étapes de forage, de production et d'abandon des puits. Un exemple de recensement (non exhaustif) de risques potentiels des différentes phases d'exploitation d'un réservoir GHRM ainsi que des normes et des contraintes réglementaires associées est présenté dans le tableau suivant (Illustration 10).

Mise en Exploitation	Fluides utilisés	Volume	Empreinte au sol	Risques opérationnels (exemples)	Principales Règlementations
Forage horizontal	-Boue de forage OBM, SBM ou WBM[11]. -Matériaux de cimentation (eau, ciment portland, additifs) -Fluide de complétion -Formulation sur place	- 100 à 600 m^3 de fluide - Jusqu'à 1600 tonnes de cuttings souillés - 100 à 150 m^3 de ciment	- 2 à 3 bacs de fluides formulés sur place - 1000 m^3 d'eau nécessaire - Traitement des cuttings (camions) ou réinjection	- Pertes de fluide -"Blow out" (éruption incontrolée) -Mauvaise cimentation	- Code minier - Loi sur l'eau - Ospar,… -Réglementation sur les déchets (code de l'environnement : ISDI, installations de stockage de déchets dangereux/non dangereux -Code du travail et règlement général des industries extractives (RGIE) : principalement chapitres forage et règles générales -Décret 2006-649
Fracturation hydraulique	-Eau + solides (proppants) + additifs (0,5%) * -Formulation sur place	- 10000 à 20000 m^3 par puits horizontal	- Bacs de rétention - Transport de l'eau - Traitement de l'eau nécessaire (unité de traitement sur place) pour réutilisation et avant rejets ultime 2 à 3 hectares	-"Perte" de fluide (reproduit au cours de la vie du puits) -Extension des fractures -Endommagement de la cimentation (fissuration de la gaine de ciment) et mise en connexion des aquifères	- Code minier -« Reach" pour les produits. -Loi sur l'eau

[11] Différents types de Boues. WBM: Water Based Mud (boue de forage à l'eau) ; OBM Oil Based Mud ; SBM Synthetic Based Mud (le fluide de forage est une huile synthétique)

	Nature des effluents produits	Volume /durée de production	Equipement en surface	Risques (exemples)	Principales réglementations
Production	-"Gaz naturel" majoritairement du méthane -Mais possible présence d'eau et d'hydrocarbures plus lourds, de minéraux acides, d'H_2S	-Des chiffres de 10% à 25 % du gaz en place économiquement extractible sont cités (BAPE, Marcellus Shales Report)	-Conduites d'eau et connexion à un réseau - "Train de procédés" si présence phase liquide eau/hydrocarbure - Nécessité de traitements des rejets aqueux	-Produits: présence de composés BTEXs, de sulfites et d' H_2S -Remontée de composés radioactifs -Technique: risque opérationnel majeur de fuite non contrôlées (étanchéité du puits)	-Code minier -Loi sur l'eau -Décret 2006-649 - Code du travail et règlement général des industries extractives (RGIE) : chapitres forage principalement et règles générales

	Fluides utilisés	Volume	Empreinte au sol	Risques opérationnels (exemples)	Principales règlementations
Fermeture/abandon	-Matériau de cimentation (eau, ciment portland, additifs)	-10 à 60 m^3	-Idem forage	- Pendant la mise en place des bouchons : pas de risque (autre que celui de rater la mise en place) - Sur le long terme : quelle évolution des matériaux du puits (corrosion des aciers, dégradation des annulaires cimentés et des bouchons) ? -Si endommagement : mise en connexion de différents horizons géologiques (fuite de polluants)	- RGIE, Chapitre Forage - Recommandations de bouchage des puits, Chambre syndical de l'exploration-production d'hydrocarbures (1996) -Code minier -Décret 2006-649 -Décret 2006-648

Illustration 10 – Exemple de recensement de risques potentiels des différentes phases d'exploitation d'un réservoir GHRM, des normes et des contraintes règlementaires. Ce tableau n'est pas exhaustif.

5.2.1. Critères d'exclusion dans le choix d'un site

Constat

Aux Etats-Unis, différents critères d'exclusions existent en fonction des états afin d'interdire d'exploitation des gaz de roche-mère dans des zones à enjeux particuliers. L'état de New York est en train de réaliser une étude d'impact générique conséquente afin d'actualiser les conditions d'exploitation des GHRM (NYC DEC, 2011). Parmi les zones exclues proposées, on peut citer à titre d'exemple :

- Le bassin d'alimentation en eau potable de la ville de New York ainsi qu'une zone tampon autour de ce bassin.
- Des aquifères (au nombre de 18) actuellement utilisés et identifiés comme étant des sources principales d'alimentation en eau potable. L'étude propose d'interdire l'exploitation au droit de ces aquifères et sur une zone tampon.
- Certaines propriétés de l'état, pour lesquelles l'exploitation des gaz de roche-mère est incompatible avec la vocation de ces zones (usage récréatif par le public, conservation d'habitats ou d'espèces…).
- Les zones inondables par une crue centennale.
- Une zone de 500 pieds (environ 150 m) autour des puits privés ou des sources utilisées pour l'eau potable.

Enjeux

L'enjeu principal consisterait à définir des critères d'exclusion de sorte à interdire l'exploitation des GRHM dans des zones où les risques seraient trop élevés (ou difficilement maitrisables) ou encore dans des zones où il y aurait une incompatibilité avec d'autres usages (dans ce dernier cas, un arbitrage entre différents usages pourrait néanmoins être nécessaire).

Pistes de réflexion

La définition de critères d'exclusion pourrait provenir de plusieurs types de considérations. Quelques suggestions de critères d'exclusions, à titre d'exemples, sont proposées ci-dessous :

- La présence d'éléments particulièrement vulnérables : Zones à enjeux (exemple : aquifères stratégiques, agglomérations, établissements classés SEVESO, etc.) ou protégées (Sites Natura 2000, Parc Nationaux, Réserves naturelles etc.).
- Un aléa trop important, dû à la présence de caractéristiques particulières, ne permettant pas une bonne maîtrise des risques (exemples : karst, proximité de failles, couverture insuffisante, sismicité naturelle modérée à moyenne etc.).
- Une incompatibilité avec d'autres usages, notamment du sous-sol (exemple : la géothermie, le stockage de CO_2 etc.).

5.3. SURVEILLANCE (METHODES, LIGNES DE BASE, QUANTIFICATION)

Parmi les mesures de maîtrise du risque (MMR), la surveillance occupe une place cruciale pour détecter tout signe précurseur de dysfonctionnement du système permettant de déclencher la mise en œuvre de mesures correctives. La surveillance aura vocation à couvrir plusieurs domaines et milieux.

Pour ce qui concerne la surveillance de nature géochimique (eau, gaz…), une logique « d'état zéro » devra être systématisée avant tout projet d'exploitation. L'objectif sera de caractériser de manière aussi précise que possible le bruit de fond géochimique caractéristique du secteur concerné et de pouvoir ainsi identifier, à terme, la part due à l'exploitation dans la présence de substances dans l'environnement.

5.3.1. Surveillance du processus de fracturation hydraulique

Constat

Pour s'assurer que le procédé de fracturation hydraulique est convenablement maîtrisé et n'est pas susceptible de générer une fracturation des terrains sur des distances ou dans des directions non souhaitées, et à même de remettre en cause l'intégrité des formations encaissantes imperméables au toit et au mur de la zone exploitée, le recours à des techniques de surveillance et de localisation de la fracturation est de première importance.

Parmi celles-ci, l'écoute micro-sismique en forage s'avère très utile. Il s'agit d'une technique déjà éprouvée dans d'autres contextes : détection de signaux précurseurs d'instabilités dans les mines actives ou abandonnées, surveillance de cavités de stockage de gaz naturels et d'hydrocarbures, suivi de l'exploitation de ressources par forages, notamment géothermiques. Elle présente l'intérêt de localiser l'initiation et le développement de fractures au sein d'un massif rocheux sollicité par un processus d'extraction ou d'injection évoluant au cours du temps.

La précision de la localisation des évènements varie essentiellement en fonction :

- de la géométrie du réseau d'écoute (nombre de sondes, couverture de la zone sismogène) ;
- des incertitudes sur les vitesses de propagation des ondes P (compression) et S (cisaillement) des différents horizons géologiques traversés par les signaux acoustiques émis lors de la fracturation des roches. Ces vitesses peuvent changer en fonction de la stimulation de la roche-mère ;
- de la qualité « signal/bruit » des signaux enregistrés, susceptible de dégrader la précision du « pointé » des temps d'arrivée des signaux sur les différentes voies.

La précision de localisation des évènements microsismiques peut ainsi varier d'au moins un ordre de grandeur (de la dizaine de mètres à quelques dizaines de mètres) suivant le caractère favorable ou non de la configuration.

Dans le contexte du suivi de l'exploitation de gaz ou huiles de roche-mère, compte tenu de la profondeur potentiellement élevée des travaux de fracturation, un réseau d'écoute de surface, même dense, s'avèrerait insuffisant. Il conviendra donc de privilégier l'installation de sondes à proximité de la zone de fracturation, tirant bénéfice des puits d'exploration et d'extraction ainsi que, dans la mesure du possible, de forages de suivi spécifiques. A ce titre, on gardera en mémoire que l'alignement des sondes au sein d'un seul et même puits n'est pas favorable à une localisation précise d'évènements, notamment dans la direction verticale. Le couplage de diverses « flutes de capteurs » dans différents sondages devra donc être privilégié autant que faire se peut.

Enjeux et pistes de réflexions

Un travail approfondi devra être engagé sur l'identification de l'échelle d'observation et de la gamme de précision attendue, en fonction des contextes géologiques et de la géométrie d'exploitation (plus le volume de terrains vierges laissés autour de l'exploitation et notamment à son aplomb est restreint, plus une localisation très précise de la fracturation devient cruciale).

Une analyse par modélisation numérique permet de simuler l'impact des différentes options sur la précision de localisation des évènements. Ceci peut être fait dans un but d'optimiser la géométrie du réseau de même que la nature des sondes mises en place en termes de ratio « coût/efficacité ».

Par ailleurs une adaptation des procédures de localisation des évènements microsismiques intégrant notamment des techniques automatiques d'association d'essaims[12] et de localisation relative pourra être entreprise en adaptant le cahier des charges aux spécificités de l'exploitation d'hydrocarbures de roche-mère.

De même, un état de l'art technologique devra être mené pour adapter le conditionnement des matériels (sondes, câblage), à un environnement profond et potentiellement agressif.

A plus moyen terme, le caractère amovible des chaines d'acquisition (permettant un réemploi au fur et à mesure de l'avancement des travaux), devra être par ailleurs compatible avec les exigences sur l'étanchéité des puits et les sollicitations de pression auxquels ils seront soumis.

Toujours dans l'optique d'une analyse intégrée, le suivi et l'interprétation de la sismicité mesurée devront être mis en perspective avec l'acquisition synchronisée de divers autres paramètres relatifs à la technique (débit, pression d'injection…), le modèle dynamique de comportement géomécanique du massif stimulé et avec le risque sismique en surface (cf. § 4.5).

[12] Essaim : série d'évènements microsismiques ayant lieu à proximité les uns des autres dans le temps et dans l'espace.

La réflexion devra déboucher sur le développement de bonnes pratiques concernant l'acquisition des données microsismiques et leur interprétation durant les opérations de fracturation et d'exploitation ultérieure. L'enjeu est de diminuer l'incertitude sur la localisation de la zone affectée par la fracturation, afin d'en diminuer les risques de propagation incontrôlée.

5.3.2. Surveillance des aquifères profonds

Constat

Les aquifères sus-jacents aux formations ciblées pour l'extraction de gaz seront les premiers à être impactés par d'éventuelles fuites de gaz et/ou de produits injectés (eau et additifs chimiques). Cependant, il s'agit là d'aquifères potentiellement profonds (plusieurs centaines à un ou deux milliers de mètres) et les techniques de mesures de paramètres physico-chimiques et de prélèvement d'eau déjà utilisées par le monde pétrolier, la géothermie ou le stockage de CO_2 demandent à être perfectionnées pour ces gammes de profondeur. Seuls quelques paramètres physiques de type température ou conductivité électrique peuvent être mesurés in situ sans envisager de technique lourde : on peut toutefois se demander si ces paramètres seront de grande utilité pour la problématique de détection d'arrivée de gaz ou de produits chimiques au sein d'aquifères généralement salins et chauds.

A l'instar du problème soulevé par l'injection de CO_2 dans les aquifères salins profonds, dans le cadre du stockage géologique de CO_2, il est possible que des fuites s'accompagnent de la migration de certains éléments traces (As, Pb, Zn, Cu, actinides…) en provenance du réservoir profond ou qu'elles induisent, dans les aquifères profonds sus/sous-jacents, des perturbations favorisant la remobilisation de ces éléments (Rillard et al., 2010 ; Zuddas 2009). Par ailleurs, l'impact de l'introduction de produits issus de la surface sur la population bactérienne des aquifères profonds et, pour certains riches en matière organique, demeure à ce stade quasiment inconnu.

Enjeux et pistes de réflexions

Les principales pistes de développement sont les suivantes :

- choix de critères d'identification d'une « nappe-cible » profonde susceptible de constituer le témoin d'une propagation éventuelle d'éléments non désirés (gaz, adjuvants chimiques) et établissement d'un « état zéro » des caractéristiques physico-chimiques et bactériologique de cette nappe ;
- réalisation d'au moins deux piézomètres recoupant la nappe cible profonde, l'un en amont et l'autre piézomètre en aval hydraulique de chaque site d'exploitation (forage et zone affectée par la fracturation hydraulique ou son équivalent) ;
- expérimentation d'un protocole de prélèvement et d'analyse d'échantillons d'eau prélevés à grande profondeur sans créer d'altération significative de leurs caractéristiques entre le lieu (ou le moment) de prélèvement et le laboratoire (ou l'appareil d'analyse) situé en surface ;
- développement de sondes et d'outils permettant d'analyser à forte profondeur

des caractéristiques physico-chimiques utiles à la détection de fuites issues des roches mères (concentration en gaz dissous, analyses isotopiques - par exemple du ^{13}C - pour identifier l'origine des gaz…) ;
- définition d'un programme analytique (fréquence et répartition géographique des analyses) afin de garantir une connaissance satisfaisante du fonctionnement de l'aquifère profond à des coûts de mise en œuvre proportionnés ;
- évaluation du risque de remobilisation d'éléments traces (As, Pb, Zn, Se, Sb, Cu…), voire d'actinides, au sein des aquifères profonds sus-jacents aux réservoirs exploités en cas de fuite de gaz et/ou de produits injectés.

5.3.3. Surveillance des aquifères sensibles

Constat

Les aquifères d'eau douce situés à proximité de la surface ou à profondeur moyenne (moins de 500 m) sont généralement captés pour les activités humaines (alimentation en eau potable, agricole ou industrielle) ou inscrits sur la liste des aquifères patrimoniaux à conserver dans un bon état écologique.

La principale problématique consiste à apprécier, au sein de ces aquifères sensibles, l'impact de fuites (de gaz et/ou de produits injectés) éventuellement modifiées par la traversée des terrains sous-jacents, notamment des aquifères salins profonds. On pourra s'inspirer des travaux menés dans le cadre de l'impact des fuites de CO_2 en provenance des sites de stockage géologique profond sur les aquifères d'eau douce (Little et Jackson 2010 ; Apps et al., 2010 ; Rillard et al., 2010 ; Vong et al., 2010).

Les aquifères d'eau douce présentent l'avantage d'un accès plus facile à la ressource en eau, du fait de leur profondeur moindre, et donc d'une surveillance plus aisée avec du matériel plus conventionnel. L'inconvénient majeur réside, du fait de leur usage actuel ou potentiel, dans leur forte sensibilité à la contamination et donc à la nécessité de rechercher les contaminants à l'état de traces.

Enjeux et pistes de réflexions

Pour ces aquifères sensibles, une surveillance attentive devra être définie et mise en œuvre, les verrous techniques étant nettement moins nombreux que pour les aquifères profonds. Il s'agira notamment de :
- réaliser plusieurs piézomètres situés en amont et surtout en aval des sites d'exploitation (forage et zone affectée par la fracturation hydraulique ou son équivalent) ; ces piézomètres devront intéresser tous les aquifères sensibles présents au droit du site (par exemple, dans le cas du Bassin parisien, l'Albien, la craie et/ou le Tertiaire, les alluvions…) ;
- établir un « état zéro » des aquifères sensibles en amont et aval hydrogéologique des forages d'exploration ou d'exploitation et ce, suffisamment longtemps avant le début des travaux. La plupart de ces aquifères étant en relation avec la surface, ils nécessitent un suivi sur au moins un cycle

hydrologique ;
- définir les paramètres les mieux adaptés à une détection anticipée de l'arrivée de fluides au sein de l'aquifère, notamment en ce qui concerne les mesures physico-chimiques en continu ;
- développer et adapter des méthodes analytiques spécifiques (isotopes, molécules complexes,…) ;
- définir les modalités de prélèvement et d'analyse des caractéristiques de la nappe pour garantir une connaissance satisfaisante du fonctionnement de l'aquifère.

Ce type de surveillance devra intéresser l'amont et l'aval du forage mais également l'aplomb de la zone concernée par la fracturation hydraulique, que l'on veillera à étendre latéralement en fonction de la profondeur d'exploitation, de la nature des terrains et de la présence de structures géologiques particulières pouvant influencer le cheminement du gaz et/ou des produits injectés (ou encore des sous-produits issus de réactions).

En outre, l'accès plus aisé aux caractéristiques physico-chimiques de la nappe, mais également aux paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, devrait permettre de réaliser des modélisations afin de simuler une fuite de gaz et/ou de produits injectés et de suivre sa (leur) propagation dans la nappe.

5.3.4. Surveillance des migrations de gaz

Constat

Un point de l'étude pourra concerner le rôle de la zone non saturée dans la migration de contaminants vers la surface et notamment son rôle tampon éventuel (réservoir temporaire). En effet, outre l'analyse des aquifères, profonds ou superficiels, la détection d'indices de fuite peut également être envisagée par le suivi de migration de gaz au travers des terrains. Il s'agit de techniques dérivées de celles utilisées pour le suivi des émissions de gaz de mine (Pokryszka et Tauzième, 2000) ou de fuites potentielles de CO_2 en provenance des sites de stockage géologique profond (Pokryszka et Charmoille, 2008 ; Pokryszka et al., 2010). Ceci peut être envisagé :
- en profondeur, au sein du massif rocheux, au travers de piézomètres ou de « piézairs[13] » équipés de sondes de détection de gaz. Ces dispositifs ont fait leur preuve, dans d'autres environnements géologiques, jusqu'à quelques centaines de mètres de profondeur au sein de forages non ennoyés. Ils sont destinés à prélever et à analyser en continu les principaux composants gazeux présents dans les couches géologiques proches de la surface. L'objectif est de surveiller la composition gazeuse à une profondeur donnée et avec une sensibilité suffisantes pour alerter l'exploitant de la présence d'une fuite de gaz, suffisamment en amont de sa manifestation en surface. La « pré-alerte » ainsi

[13] Forages destinés à des prélèvements d'air.

générée peut offrir des opportunités d'adaptation et de mitigation du risque susceptibles de se manifester par des actions curatives ou protectrices adéquates ;

- en surface et en sub-surface pour alerter sur les risques encourus directement par les enjeux présents à l'aplomb de l'exploitation. Cette surveillance est classiquement réalisée en couplant le suivi de la composition et de l'origine des gaz du sol dans une frange de 1 à 2 m de profondeur ainsi que la mesure de flux de gaz à l'interface sol/atmosphère.

Comme dans le cas des aquifères sensibles, une telle surveillance est à envisager à l'aplomb de la zone concernée par la fracturation hydraulique, que l'on veillera à étendre latéralement en fonction de la profondeur d'exploitation, de la nature des terrains et de la présence de structures géologiques particulières pouvant influencer le cheminement du gaz.

Enjeux et pistes de réflexions

Il sera nécessaire d'adapter les techniques et outils de surveillance à des profondeurs sensiblement supérieures à celles utilisées jusqu'ici. Une réflexion sur l'automatisation des systèmes pour permettre une surveillance en continu du processus serait aussi à envisager. De plus, il convient de s'interroger sur les méthodes de surveillance et de contrôle spécifiques aux puits (cf. § 4.6) et en particulier sur leur adéquation dans le cadre de l'exploitation des gaz et huiles de roche-mère.

En cas de fuite, la localisation du point de fuite doit pouvoir être effectuée efficacement, notamment à l'aide du système de surveillance. De plus, une fois la zone de fuite identifiée, des mesures correctives (cf. § 5.4) appropriées doivent être mises en place afin que le système retrouve rapidement un fonctionnement normal.

Dans le cas de forages ennoyés, des développements seront nécessaires pour faciliter la récupération des gaz et permettre leur analyse dans des conditions optimales d'efficacité et de fiabilité.

On notera qu'un certain nombre de techniques de « surveillance globale de l'atmosphère » commence à émerger à l'échelle d'un secteur géographique bien délimité (laser et lidar par exemple). Ces technologies émergentes, encore coûteuses et complexes, mériteront d'être testées et améliorées avant d'être envisagées à des fins opérationnelles.

Dans tous les cas, un « état zéro » devra être précautionneusement établi de manière à caractériser l'intensité et la variabilité dans le temps des rejets de gaz d'origine naturelle (biogénique, thermogénique, mantellique, etc.) et ainsi être à même de définir la part potentielle due à l'exploitation des hydrocarbures.

5.4. MESURES CORRECTIVES ET DE REPARATION

Constat

Aux États-Unis, des mesures correctives et/ou des mesures de réparation ont déjà été mise en place afin de prévenir, limiter ou réparer des impacts environnementaux liés à l'exploitation des GHRM. Cette section présente un bref aperçu de mesures déjà utilisées couramment.

Les principales mesures correctives déjà mises en place sur sites au Etats-Unis concernent principalement les puits. Elles ne sont pas forcément spécifiques au domaine des GHRM. On peut citer à titre d'exemple :

-le changement du cuvelage s'il s'avère défectueux,
-la réalisation de nouvelles cimentations afin d'assurer une parfaite étanchéité entre niveaux (e.g. COGCC, 2004),
-la mise en place de mesures de maitrise des surpressions de l'annulaire du puits (e.g. Ohio Department of Natural Resources, 2008).

Des mesures de réparation sont mises en place lorsqu'il existe des impacts significatifs sur l'environnement. D'après un rapport de la Commission de Conservation Pétrole et Gaz de l'état du Colorado (COGCC, 2009), beaucoup de situations où des mesures de réparation sont nécessaires concernent des déversements de liquides polluants en surface. Quand les eaux souterraines sont impactées, les opérateurs ont les obligations suivantes :

- établir un plan de réparation,
- prévenir tout risque de contamination supplémentaire,
- faire des investigations sur l'étendue de la zone contaminée,
- éliminer les sources de polluants,
- réparer les dommages environnementaux (dépollution),
- faire un suivi de la zone préalablement contaminée.

Quand la réparation d'un dommage environnemental est nécessaire, les autorités compétentes interviennent en évaluant et approuvant le plan de réparation proposé par l'opérateur, en contrôlant le déroulement et la conformité des opérations de réparation, en établissant les standards de dépollution et les objectifs à atteindre (COGCC, 2009). Dans certaines situations, le type de mesures correctives ou de réparation à réaliser est directement imposé par les autorités compétentes. A noter que certains États, comme la Pennsylvanie, imposent de joindre un plan d'actions correctives aux demandes de permis (NYC DEP, 2009b).

A noter que l'état de New York (NYC DEC, 2011) a identifié dans un rapport provisoire un ensemble de mesures préventives, correctives et de réparation permettant de minimiser les impacts sur l'environnement de l'exploitation des GHRM.

Néanmoins, une réflexion rigoureuse sur les mesures correctives et/ou de réparation n'est pleinement possible que si les scénarios de risques liés à la fracturation hydraulique ont déjà été clairement identifiés (ce qui n'est pas encore le cas, cf. 5.1). De plus, dans de nombreux cas de pollutions suspectées, la cause exacte de la

défaillance et/ou le chemin suivi par le polluant n'ont pas été identifiés (NYC DEP, 2009a). En conséquence, la réflexion sur les mesures correctives et de réparation est actuellement assez limitée.

Enjeux et pistes de réflexions

Les points suivant ont été notés :

- Identifier des mesures correctives pour un ensemble de scénarios d'évolution dégradée. Ceci suppose d'identifier au préalable les causes des problèmes à corriger et les scénarios d'évolution.
- Identifier les mesures de réparation pour les impacts potentiels envisageables. Toutefois, là encore, cela suppose déjà de bien connaître les impacts potentiels.
- Faire un état de l'art des mesures correctives existantes et évaluer l'efficacité de ces mesures à corriger les dysfonctionnements et à réparer les impacts potentiels.

6. Programme de recherche

6.1. LISTE DE SUJETS DE RECHERCHE

Les sujets de recherche proposés dans la présente note sont présentés de façon synthétique dans le tableau de l'Illustration 11. Ce tableau présente les grands thèmes de la note avec leurs principaux enjeux. Pour chacun des enjeux, des verrous scientifiques et/ou technologiques ont été identifiés et des sujets de recherche permettant de lever ces verrous sont proposés. Cette liste n'est pas exhaustive et pourra être réajustée ou complétée par la suite.

Enfin, le tableau indique :

- le type de méthode de recherche envisagé (simulation, terrain, pilote, ...) ;
    - REX : Retour d'expérience,
    - SIE : Simulation/ Études,
    - ADN : Acquisition de données nouvelles,
    - LAB : Expériences en Labo,
    - TER : Expériences/acquisition de données de terrain,
    - PIL : Pilote démonstrateur
- une indication du début possible des travaux de recherche (Court, Moyen terme) ;
- une indication du délai de réalisation (Court, Moyen, Long terme).

Thème	Enjeux	Verrous	Sujets de recherche proposés	Méthode	Début	Délai
Analyse du retour d'expérience	**Analyse de quelques situations accidentelles bien documentées**	Difficulté d'accès à des données fiables : • Sur les sites où un impact est suspecté • Sur la façon dont la situation a été gérée par l'administration : application de la réglementation, fréquences des contrôles… Les causes exactes de problèmes ne sont souvent pas (encore) identifiées : • Origine de la pollution : exploitation GHRM? Naturelle? Anthropiques ? autres… • Si l'exploitation GHRM mise en jeu, quels mécanismes, quels chemins de migration?	• Analyse critique du REX en élargissant le cadre à des collaborations bilatérales (avec mission institutionnelle) o Canada o EUA o Pologne	REX, ADN	C	C
Compréhension du milieu géologique	**Comprendre les phénomènes qui régissent les roches mères** (échelles de macro à nano) : *Note: Les laboratoires d'essai pour les stockages souterrains ont déjà travaillé sur les transports dans les argiles mais peu dans les argiles riches en matière organique. Des synergies sont néanmoins à rechercher*	• Manque de moyens analytiques en France pour l'observation à l'échelle nano (outil FIB, « Focused ion beam ») • Hétérogénéité des dépôts de matière organique; évolution de cette matière organique du fait de l'activité bactérienne, de la minéralogie de la roche et de la température. • Porosité des argiles contenant la matière organique et évolution de cette porosité avec l'enfouissement et les réactions géochimiques (diagénèse, …) • Propriétés pétrophysiques, perméabilité et transport (rôle de la capillarité et du confinement) • Manque de connaissances sur la minéralogie des argiles et de la capacité de désorption des différents éléments absorbés • Hétérogénéité de la minéralogie et donc de la fracabilité des argiles	• Observation des phénomènes (micro-nano) o Caractérisation des phases minérales présentes dans les principales roches-mères françaises o Caractérisation des capacités d'échanges cationiques entre les argiles et les éléments traces métalliques o Caractérisation des capacités d'adsorption, absorption, désorption des gaz sur les argiles o Réactivités des systèmes multiphasiques GHRM ainsi que des processus de transfert de masse entre phases • Intégration de ces mesures et mécanismes dans une modélisation à l'échelle d'un gisement pour quantifier le risque cumulé de relâchement d'éléments non désirés.	ADN, LAB SIE	C M	C-M M

Thème	Enjeux	Verrous	Sujets de recherche proposés	Méthode	Début	Délai
Compréhension du milieu géologique	**Connaissances sur les séries encaissantes**	• Manque de connaissances sur les aquifères profonds / aquitards / karst • Interaction eaux météoriques / eaux connées • Connaissance partielle des réseaux de failles locales/régionales • Connaissance des paléocontraintes et des réseaux de fractures préexistants	• Construction de modèles 3D à différentes échelles afin d'intégrer toutes les données sur les bassins (géométrie des différentes séries, argiles, aquifères, karsts, failles etc.), • Développement des méthodes géologiques/géostatistiques pour la reconstruction 3D des réseaux des fractures préexistants	SIE SIE	C M	C-M C-M
	Compréhension de la déformation d'un milieu naturel, hétérogène et faillé	• Connaissance de l'état de contrainte actuel et de ses variations (en particulier en profondeur) • Capacité à modéliser en 3D et en fonction du temps la réorganisation de ces contraintes en tenant compte des hétérogénéités de comportement mécanique et des zones de faiblesse préexistantes. • Relation contrainte / propriété drainante ou non des failles	• Mesure de l'état de contraintes et de la déformation actuelle sur les principaux bassins sédimentaires français • Modélisation permettant d'intégrer ces mesures et quantification de l'incertitude sur la détermination des contraintes. • A petite échelle, développement de modèles théoriques et numériques capables à prendre en compte l'effet de la complexité géologique des zones de failles sur leur comportement hydromécanique.	ADN, TER SIE ADN, LAB, SIE	C M C	C-M C-M M
Fracturation hydraulique	**Compréhension de la géométrie et de la localisation de la zone fracturée**	• Connaissance précise de l'étendue de la zone affectée par la fracturation hydraulique	• Expériences de fracturation surmonitorées et quantification de l'incertitude finale afin de préciser par la suite le monitoring adéquat à demander aux opérateurs pour localiser précisément les fractures. • Modéliser le processus de fracturation hydraulique (initiation, propagation & soutien des fractures) en fonction des contextes géologiques : o Prise en compte des hétérogénéités o Interaction entre les fractures initiées et existantes o Evolution de la perméabilité des réseaux de fractures dans le temps : fluage, couplage chimio-mécanique…	REX,PIL ADN, SIE	M C	M-L M-L

Thème	Enjeux	Verrous	Sujets de recherche proposés	Méthode	Début	Délai
Fracturation hydraulique	**Compréhension de la géométrie et de la localisation de la zone fracturée**	• Compréhension de la modification locale des contraintes par la fracturation hydraulique.	• Étudier les effets des différents scenarii de fracturation hydraulique sur le développement de la sismicité induite et leurs éventuels impacts sur la sismicité naturelle.	ADN, LAB, SIE	C	M-L
	Additifs : **Optimiser les procédés pour en limiter les impacts.**	• Connaissance de la composition chimique des eaux de fracturation, des eaux du réservoir, de la toxicité des additifs (risques sanitaires et environnementaux). • Les besoins de traitement avant rejet sont à déterminer.	• Analyser la compatibilité ou non des produits chimiques utilisés vis-à-vis du contexte hydrogéochimique et minéralogique du réservoir • Etablir une liste d'additifs dont les impacts sanitaires et environnementaux ne peuvent pas être évalués • Envisager la mise en place d'une liste positive en fonction des tonnages utilisés. • Optimiser la chaine du traitement effluents + additifs de façon à minimiser les impacts	REX, ADN, LAB REX REX REX, LAB, SIE	C C C C	C-M C C M
	Compréhension des interactions entre le fluide de fracturation et les fluides présents dans l'encaissant	• Modification plus ou moins importante des conditions d'équilibre dans la couche fracturée et connaissance de l'influence sur : o Nature des effluents o Efficacité de la fracturation hydraulique	• Maîtriser le transport réactif et les réactions géochimiques induites par les perturbations THMC et les mélanges de fluides de propriétés physico-chimiques contrastées. En déduire les impacts possibles sur les puits et l'environnement souterrain depuis la phase du forage jusqu'après la fin de l'exploitation, et sur le long terme. • Analyser la compatibilité /incompatibilité des produits chimiques utilisés vis-à-vis du contexte hydrogéochimique et minéralogique du réservoir • Etudier l'endommagement potentiel des couches fracturées hydrauliquement à moyen et long terme en relation avec les scénarios de fracturation et la nature des fluides restant dans le sous-sol à l'issue de l'exploitation.	REX, ADN, SIE REX, ADN, SIE, LAB REX, ADN, SIE, LAB	C-M C M	C-M-L C-M M-L

Thème	Enjeux	Verrous	Sujets de recherche proposés	Méthode	Début	Délai
Fracturation hydraulique	**Améliorer les techniques existantes afin de réduire les risques et l'empreinte de la fracturation hydraulique sur le milieu géologique**	• Optimisation du fluide de fracturation	• Recherche d'agents de soutènement et de fluides « verts » (compatibles avec REACH et DCE) • Développer des méthodes alternatives de fracturation et de production (CO_2-N_2) • Examiner les possibilités d'utilisation d'eau salée, d'eaux des aquifères profonds (problèmes de compatibilité chimiques entre les eaux du réservoir et les eaux injectées)	EX, LAB, ADN, PIL	C-M	C-M
		• Conception et réalisation de forages prévenant la contamination des aquifères par les fluides de forage et de fracturation, puis par le gaz pendant la phase d'exploitation.	• Modélisation du chargement mécanique sur le puits dû à la fracturation hydraulique (évaluation et quantification des risques de l'endommagement des puits) • Rechercher de nouvelles formules pour satisfaire aux besoins spécifiques par rapport aux puits (tubages, complétion, rebouchage…)	REX, LAB, SIE REX, LAB, PIL	C C	C C-M-L
Ressources en eau	**Connaissance des aquifères (profonds) et de leur fonctionnement**	• Connaissance des propriétés hydrogéologiques des formations aquifères profondes situées à proximité des gisements de GHRM et connaissance des écoulements souterrains.	• Modélisation sur une zone donnée des fluides en 3D avec une approche multidisciplinaire hydrogéologie, géomécanique et bassin/réservoir pétrolier • Réaliser un référentiel hydrogéologique pour les aquifères profonds	SIE, ADN SIE, ADN	C C	C-M C-M
	Relargage d'éléments traces	• Connaissance de la minéralogie des argiles et de la capacité de désorption des différents éléments adsorbés (déjà cité dans le thème « Compréhension du milieu géologique »). • Connaissance des mécanismes pouvant entrainer un relargage d'éléments à risque	• Quantifier les cinétiques des réactions géochimiques et le temps d'évolution des systèmes stimulés • Identifier le devenir des éléments relargués et les impacts associés.	REX, SIE, LAB, TER REX, LAB, TER	C C	C-M C-M

Thème	Enjeux	Verrous	Sujets de recherche proposés	Méthode	Début	Délai
Ressources en eau	**Préservation de la qualité de la ressource en eau souterraine**	• Connaissance des mécanismes de contamination • Echelles de temps à envisager (court à long-terme) • Identification des substances potentiellement polluantes	• À partir du contexte géologique, structural (fractures, failles), hydrogéologique et sismique de la zone considérée, évaluer les risques de contamination des eaux souterraines par le fluide de fracturation et les gaz, à court, moyen termes ainsi que l'évolution du système à long terme.	REX, SIE, ADN	C-M	C-M
	Préservation de la qualité des eaux de surface	• Identification des substances potentiellement polluantes • Identification des mécanismes potentiels de contamination	• Établir un retour d'expérience détaillé sur la nature et la quantité des effluents recueillis. • Identifier les meilleures technologies/pratiques disponibles en ce qui concerne le transport, le stockage, l'utilisation, le traitement, le recyclage, le rejet des fluides de façon à éviter la contamination des eaux. Développer, au cas par cas des méthodes / procédés adaptés. • Définir les objectifs environnementaux de rejet dans les cours d'eau. • Identifier les paramètres environnementaux à contrôler.	REX, SIE, ADN, LAB	C-M	C-M
	Préservation de la quantité de la ressource en eaux	• Connaissance des impacts des prélèvements d'eau liés à l'exploitation des GHRM.	• Caractériser l'impact des prélèvements sur la disponibilité de la ressource, en fonction du type de ressource, en considérant la variabilité spatiale et temporelle à l'aide d'outils statistiques et de SIG. • Proposer une méthodologie permettant d'assujettir les prélèvements à la connaissance du milieu.	REX, ADN, SIE	C	M

Thème	Enjeux	Verrous	Sujets de recherche proposés	Méthode	Début	Délai
Identification des risques et des nuisances en surface	**Identifier les conséquences de la filière sur la sécurité des personnes, biens et activités de surface**	• Connaissance des risques spécifiques à l'exploitation de GHRM pour ce qui concerne les installations de surface	• Étude des impacts géomécaniques en surface (principalement liés à la sismicité induite) • Elaborer des modèles représentatifs pour étudier l'influence des conditions d'exploitation sur l'étanchéité des puits • Analyse des scénarios de migration non maîtrisée de gaz au travers des terrains de recouvrement • Valoriser les résultats dans le cadre de l'élaboration du référentiel d'analyse des risques	REX, SIE, LAB REX, SIE REX, SIE SIE	C C C M	M-L C-M C-M C
Bilan environnement global	**Evaluation globale des impacts sur l'environnement**	• Connaissance des impacts environnementaux liés à l'exploitation des GHRM. • Possibilité de conflits d'usage en termes de partage des ressources du sous-sol	• Bilan environnemental o Gaz à effets de serre o Eau, effluents, (ACV du cycle de l'eau) => méthodologie à adapter, indicateurs standardisés à tester, après une synthèse bibliographique o Ensemble de la filière industrielle (sur toute la durée du projet) incluant l'analyse couts-bénéfices • Évaluation de l'impact sur d'autres ressources du sous-sol de ce type d'exploitation (dont les conflits d'usage)	REX, SIE, ADN REX, SIE	C C	C-M C
Maitrise des risques : **méthodologie**	**Fixer un cadre commun en termes de risques à l'ensemble des parties pour ce qui concerne les conditions optimales d'exploitation**	• Connaissance des cibles et des potentiels de dangers. • Définition et quantification des scénarios de risque, en situations « normales » ou « altérées » • Identification des outils de modélisation adaptés aux objectifs et prendre en compte les incertitudes dans les calculs • Connaissance de la nature, l'efficacité et les limites des techniques de maîtrise du risque	• Préparation d'un guide technique participant à l'élaboration d'un référentiel commun d'analyse et de maîtrise des risques. Ce document, résolument transversal, s'appuiera sur les résultats des différents thèmes de recherche	REX, SIE	C	C-M

Thème	Enjeux	Verrous	Sujets de recherche proposés	Méthode	Début	Délai
Maitrise des risques : **Surveillance**	**Développer et tester des techniques capables de détecter des signaux précurseurs capables d'alerter sur un éventuel fonctionnement anormal du procédé**	• Surveillance de la fracturation par écoute sismique passive : identification de l'échelle d'observation, de la gamme de précision attendue, en fonction des contextes géologiques et de la géométrie d'exploitation	• Optimiser les performances du suivi microsismique (à partir d'une analyse de l'état de l'art) et quantification des incertitudes	REX, SIE	C	C
		• Connaissance des « états zéro » avant exploitation	• Etablir des méthodologies de réalisation de l'état zéro et des référentiels géochimiques et les tester sur un plusieurs sites pilotes • Connaissance des échappements de gaz naturels en surface (lignes de base) : monitoring pour connaitre la production dans le temps et en déterminer l'origine, mesure du bruit de fond au-dessus des zones à GHRM potentielles	REX, TER ADN, TER, PIL	C C	C C-M
		• Conception et dimensionnement des dispositifs de surveillance permettant de détecter précocement d'éventuelles contaminations des eaux. Evaluer s'il est besoin d'améliorer l'existant	• Développement /amélioration/ validation de méthodes analytiques spécifiques (isotopes, molécules complexes, ….)	ADN, LAB, TER	C-M	C-M
		• Migrations de gaz : adaptation des techniques et outils de surveillance à des profondeurs sensiblement supérieures à celles utilisées jusqu'ici	• Améliorer les techniques de mesures de paramètres physico-chimiques et de prélèvement d'eau dans le cas d'aquifères profonds (prof > 1000 m).	LAB, TER, PIL	M	M
Maitrise des risques : **remédiation-mitigation**	**Recenser et évaluer les méthodes existences et déjà mises en œuvre de remédiation-mitigation**	• Identification des mesures correctives pour un ensemble de scénarios d'évolution dégradée. Ceci suppose d'identifier au préalable les causes des problèmes à corriger et les scénarios d'évolution. • Identification des mesures de réparation pour les impacts potentiels envisageables. • Connaissance de l'efficacité des mesures à corriger les dysfonctionnements et à réparer les impacts potentiels	• État de l'art, Mesures de prévention/correctives/ de dépollution	REX, SIE, PIL	C-M	M-L

Illustration 11- Synthèse des sujets de recherche proposés dans la présente note.

6.2. SELECTION DE SUJETS DE RECHERCHE « PRIORITAIRES »

Parmi la liste proposée précédemment, dix sujets ont été sélectionnés et sont davantage détaillés dans cette partie. Ils correspondent à la fois à des thèmes prioritaires (analyse de la filière, étude de risques, spécificités du contexte français) et à des sujets pour lesquels des recherches pourraient être débutées dans les prochains mois. De plus, pour ces sujets de recherche, les résultats/livrables sont envisageables dans le court terme (2 ans environ).

Pour chaque sujet, les objectifs sont décrits brièvement, un ordre de grandeur des ressources nécessaires et la durée du projet sont proposés.

6.2.1. Analyse globale de la filière

Analyse détaillée de retours d'expérience

Objectifs

L'ensemble des rédacteurs du présent rapport s'accordent à dire que l'accès à des informations précises et circonstanciées est primordial pour compléter l'état de l'art bibliographique présenté dans les premiers chapitres du document. Si le retour d'expérience envisagé devrait être principalement consacré à l'analyse de quelques situations accidentelles convenablement documentées, il serait également l'occasion d'échanger sur les bonnes pratiques disponibles (notamment les 9 points faisant l'objet des propositions suivantes) ayant mis en évidence leur efficacité en termes d'innocuité, tant en matière de conception/opération qu'en termes d'efficacité de barrières de sécurité.

C'est assez naturellement vers les états nord-américains (Etats-Unis et Canada) que le travail de recueil et d'analyse serait orienté. Au regard de la sensibilité du sujet et dans le but d'optimiser les conditions de succès de la démarche, il nous semble souhaitable que la délégation envisagée (commune aux trois organismes et au Ministère) puisse se présenter comme officiellement porteuse d'une mission d'étude pour le Ministère français de l'Environnement. Différentes prises de contact informelles et engagées de manière non coordonnée présenteraient en effet, à nos yeux, une faible probabilité d'aboutir à des échanges d'informations quantitatives précises qui s'avèrent souvent confidentielles.

En France, l'analyse du retour d'expérience pourrait aussi s'étendre à d'autres activités pour lesquelles une stimulation hydraulique est utilisée dans le but d'augmenter la perméabilité du milieu (production d'eau potable, géothermie…), tout en gardant à l'esprit que les analogies possibles avec la fracturation hydraulique dans le cadre des GHRM restent limitées (cf. note de bas de page n°2 page 14).

Livrable

Outre la **préparation** et la **réalisation de la mission** à proprement parler, le travail

envisagé comporte le dépouillement et l'interprétation des informations collectées ainsi que la **rédaction d'une note de synthèse** dont la confidentialité méritera d'être précisée avec les différents intervenants et partenaires. Un réseau de contacts potentiellement mobilisables existe déjà au sein des trois organismes.

Ressources nécessaires : 1 personne-an.

Délai : 6 à 8 mois.

Référentiel commun d'analyse des risques

Objectifs

L'objectif d'un référentiel commun d'analyse des risques dédié à la filière « gaz et hydrocarbures de roche mère » est de fixer un cadre commun à l'ensemble des parties (exploitants, experts publics, administration, société civile) pour ce qui concerne les conditions optimales de recherche tenant compte de l'état de l'art et permettant de limiter les risques sanitaires et environnementaux. Ce type de démarche s'appuie sur une identification préalable des cibles et potentiels de danger qui débouche sur la définition des scénarios et à partir desquels sont quantifiés les risques, à la fois en situation « normale » (conforme aux prévisions) mais également « altérée » (survenue d'un accident non forcément planifié). Il peut également préconiser des dispositions de conception ou des mesures de sécurité. Ce référentiel aura comme vocation d'encadrer les actions de recherche scientifique.

Un tel outil permet de fournir aux opérateurs un cadre précis sur la nature des informations requises lors de travaux exploratoires réalisés dans un objectif de recherche scientifique. Il fournit également un référentiel objectif et transparent vis-à-vis des populations sur les avis publics rendus en termes de sécurité. Le travail, transversal aux différentes thématiques inhérentes à la question de l'exploitation des GHRM, se doit d'aborder différents aspects : caractéristiques du milieu géologique, dispositions techniques pour la mise en œuvre de la fracturation hydraulique, types d'outils de modélisation utilisables pour simuler les effets de l'exploitation projetée, prise en compte des incertitudes et des éventuelles situations altérées dans les travaux de modélisation, nature et efficacité des techniques de maîtrise du risque, etc.

Livrable

La présente action se traduira par **l'élaboration d'un « guide technique »** établi dans le **cadre d'un groupe de travail** commun aux trois organismes et aux différents services de l'Etat impliqués sur le sujet et potentiellement ouvert, en tant que de besoin, à divers industriels consultés sur un sujet spécifique. Ce document a vocation à contribuer à la définition d'un référentiel commun plus large englobant également les aspects réglementaires non intégrés dans la définition et le chiffrage de cette action.

Ressources nécessaires : 3 personnes-an.

Délai : 2 ans.

Bilan environnemental global avec une attention particulière sur l'eau et les gaz à effet de serre. Comparaison avec les autres sources d'énergie.

Enjeu

Pour juger de l'opportunité de la mise en exploitation des GHRM, il convient de pouvoir analyser sur l'ensemble de la filière quels sont les avantages et les inconvénients de tous les points de vue : humain, environnementaux et économique, sur le court comme sur le moyen long terme.

Objectifs

- Mesurer l'impact environnemental de l'exploitation des GHRM par une méthode standardisée. Une ACV pourra être réalisée sur le procédé d'exploitation ou sur le produit obtenu (gaz ou huile).
- Quantifier les émissions de gaz à effets de serre liées à l'exploitation des GHRM par fracturation hydraulique (par unité d'énergie extraite).
- Quantifier l'impact qualitatif et quantitatif sur les ressources en eaux (habituellement peu d'ACV concernent les ressources en eau).
- Comparer les impacts environnementaux des GHRM avec ceux des autres sources d'énergie en utilisant une unité commune (par exemple par térajoule d'énergie produite).

Livrable

- Rapport sur l'ACV de l'exploitation des GHRM avec un accent particulier sur les ressources en eaux et les gaz à effets de serre. Mise en perspective par rapport aux autres énergies.

Ressources nécessaires : 1.5 personnes-an.

Délai : 1 an.

6.2.2. Analyse technique de certains risques

Toxicité et éco-toxicité des additifs

Objectifs

Pour limiter les possibles impacts environnementaux de la technique de fracturation hydraulique, l'une des actions prioritaires consiste à optimiser l'emploi des additifs chimiques au fluide de fracturation. Il s'agit principalement d'interdire le recours aux substances les plus dangereuses pour l'homme et les écosystèmes (notamment les substances cancérigènes, mutagènes et repro-toxiques). Une analyse fine des produits potentiellement utilisables par les exploitants (se basant principalement sur la liste de ceux déjà utilisés) peut donc être envisagée, aussi bien en termes de volume, de nocivité/toxicité et de réactivité (produits entre eux, sur les terrains et sur les éléments du forage). Elle se basera sur la démarche préconisée par le règlement REACH**.** Les efforts de recherche se focaliseront sur les principaux additifs utilisés ou sur ceux jugés comme étant les plus préoccupants. En fonction de l'avancement des travaux, des opportunités de substitution pourront aussi être formulées.

Un travail préliminaire important mais délicat consistera à lister précisément les produits chimiques potentiellement concernés. La difficulté de la recherche résulte notamment de diverses clauses de confidentialité édictées aux Etats-Unis qui ont, dans de nombreux cas, conduit à une non communication par les exploitants de la nature des produits aux autorités publiques. Diverses sources d'informations fiables et bien documentées fournissent tout de même des informations assez précises (à défaut d'être exhaustives) sur le sujet.

Livrable

Le livrable de cette action prendra la forme d'un **rapport de synthèse** qui présentera la **liste des produits identifiés**, classés par catégories de fonctions (acides, gélifiants…). Les résultats des **analyses toxicologiques et écotoxicologiques** menées sur les produits les plus critiques (toxicité et tonnage) seront également présentés. Ils ouvriront sur des **préconisations d'interdiction ou de limitation** de certains produits. Même si elle peut être évoquée pour les additifs les plus essentiels au procédé de fracturation, l'analyse à mener sur les opportunités de substitution (s'appuyant sur les perspectives de la chimie verte) est trop incertaine en l'état pour être décrite et chiffrée au sein de la présente action.

Ressources nécessaires : 1 personne-an.

Délai : 18 mois.

Cartographie de la zone affectée par la fracturation hydraulique

Objectifs

Durant l'étape de fracturation hydraulique, un réseau de fracture est créé. Pour éviter les fuites, de l'eau injectée comme des hydrocarbures, ce réseau doit être strictement cantonné dans la zone d'intérêt. La connaissance de la géométrie de ce réseau est fondamentale tant pour les conditions de sécurité que pour optimiser la production. Cette étude vise à définir les bonnes pratiques et à lister les données nécessaires à une connaissance optimale de ce réseau tout au cours de l'exploitation de la zone. Pour ce faire il faut connaître le milieu géologique, la géométrie des couches et leur vitesse sismique, les contraintes initiales et enregistrer les microséismes durant et après la frac. Des logiciels permettent de les localiser dans le sous-sol en 3D avec une précision dépendante de la quantité et de la qualité des données. Des études théoriques (simulations numériques) permettant de calculer l'incertitude sur la géométrie calculée en fonction des données et du contexte seront réalisées. De nombreux paramètres influent sur le besoin de précision (pour minimiser les risques), on peut citer: la proximité d'aquifères, de karst, de failles, de zones habitées, l'épaisseur de la roche mère et ses anisotropies en cas de réseau de fractures préexistantes, l'anisotropie de l'état de contraintes. Ils seront systématiquement analysés. Les travaux envisagés dans ce sujet de recherche se baseront sur des études en laboratoire ainsi que sur des simulations numériques et ne nécessiteront donc pas d'investigation de terrain.

Livrable

- La définition d'un protocole minimum d'acquisition (en surface et en puits) de données pour une localisation adéquate.
- Des préconisations sur le monitoring pendant la production pour s'assurer que le réseau reste dans la zone non risquée.

Ressources nécessaires : 1.5 personnes-an.

Délai : 18 mois.

Capacité de détection des additifs et mise en œuvre pratique sur le terrain

Objectif

Durant l'exploitation des GHRM, les diverses phases opérationnelles font appel à des fluides complexes (forage, fracturation) constitués de composés organiques et de charges minérales. Ces opérations génèrent de grandes quantités de rejets solides et liquides (cuttings, boues, eaux) dans lesquels se retrouvent tout ou partie de ces intrants auxquels il faut ajouter les composés issus des couches géologiques avec lesquelles ils étaient en contact (minéraux, radionucléides). La composition complexe

de ces additifs, mise au point par les opérateurs pour répondre à des besoins opérationnels précis (viscosifiant, inhibiteur de corrosion, proppants, surfactants, etc..) est précieusement gardée. La connaissance des molécules les composant ainsi que leurs concentrations dans les différents compartiments de l'environnement (eau, air, sol), permet au travers de leur comportement physico-chimique (volatilité, solubilité, adsorption) de prédire leur devenir (voies de transfert) et leurs impacts potentiels. Ce travail débutera par un examen détaillé des retours d'expériences et des bases de données existantes concernant ces molécules (TEDX, MSDS, etc..) ainsi que des directives et règlements européens (REACH, DCE) en matière d'enregistrement, d'évaluation et d'analyse (méthodes normatives).

Dans un second temps, cette étude visera à définir, en fonction des technologies mises en oeuvre (OBM, SBM, WBM), les molécules les plus impactantes (toxicité, faible biodégradabilité, persistance) et leurs traceurs associés. Si elles n'existent pas déjà, les techniques analytiques pour les identifier et les quantifier dans les gaz et dans les eaux seront développées au laboratoire et validées sur site avec des fluides complexes. Les bilans réalisés grâce à ces méthodes, avant (phase pré-opérationnelle) et durant les différentes opérations, permettront de juger de l'efficacité des procédés de remédiation.

Livrable

Rédaction d'un guide méthodologique regroupant:

- les molécules à analyser pour chacune des phases opérationnelles ;
- les données bibliographiques (méthodes d'analyse normalisées, toxicité) ;
- les appareils d'analyse et les méthodes de prélèvement appropriés ainsi que leur métrologie (sensibilité, spécificité, seuil de quantification, etc…).

Ressources nécessaires : 2 personnes-an + études de laboratoire et de terrain.

Délai : 18 mois.

6.2.3. Analyses spécifiques pour la France

Etude des éléments à risque que les roches-mères françaises pourraient relarguer suite à l'opération de fracturation hydraulique.

Enjeu

Il est prévisible que les interactions entre le fluide injecté et les roches en place vont

donner lieu à des réactions chimiques complexes qui se traduiront, entre autres, par la mise en mouvement dans le fluide produit ultérieurement de métaux lourds, voire de substances radioactives. Afin d'appréhender ces phénomènes, il est primordial de disposer d'une caractérisation aussi précise que possible de la minéralogie des argiles et de la capacité de désorption des différents éléments adsorbés.

Objectifs

- Connaître de façon aussi précise que possible les caractéristiques minéralogiques et géochimiques des diverses roches-mères françaises, ainsi que leur contenu en éléments à risques (métalliques, radioactifs, organiques). L'approche se basera sur la réalisation d'analyses (minéralogiques, chimiques, analyses de la matière organique, tests de désorption) de matériaux disponibles (affleurements et carottes).
- Caractériser les mécanismes pouvant entraîner un relargage d'éléments à risque suite à la perturbation du milieu par la fracturation hydraulique (désorption, interactions avec les fluides injectés…).
- Identifier le devenir des éléments relargués et les impacts associés.

Livrables

- Rapport présentant une méthodologie pour évaluer les possibilités de relargage des éléments à risques.
- Cartographie simplifiée des argiles incluant leurs caractéristiques minéralogiques et géochimiques ainsi que leur susceptibilité en termes de relargage d'éléments à risque.

Ressources nécessaires : 6 personnes-an, incluant des techniciens pour le laboratoire.

Délai : 3 ans.

Inventaire rapide des aquifères profonds qui pourraient être utilisés comme ressources en eau et/ou qui pourraient être affectés par une exploitation de GHRM située à proximité.

Enjeu

La question de l'eau est au cœur de la problématique de l'exploitation des GHRM. Qu'il s'agisse de celle utilisée pour la fracturation, des effluents ou de la protection des masses d'eau souterraines, superficielles ou profondes, il est nécessaire d'avoir plus d'éléments afin d'être en mesure de statuer vis à vis des parties prenantes.

Objectifs

- Identifier, dans la mesure du possible, les aquifères profonds utilisables en France métropolitaine comme ressources en eau ou potentiellement vulnérables. Pour ce faire, il est nécessaire de renforcer les connaissances sur les propriétés hydrogéologiques et géochimiques ainsi que les potentialités hydrauliques des aquifères profonds. Ces travaux de recherche se baseront sur l'exploitation et la valorisation de données existantes.

Livrables

- Rapport présentant une méthodologie pour inventorier les aquifères profonds et leurs implications dans l'exploitation des GHRM.

- Cartographie simplifiée des aquifères utilisables comme ressource ou vulnérables situés à proximité de formations exploitables.

Ressources nécessaires : 1.5 personnes-an.

Délai : 18 mois.

Utilisation partagée du sous-sol

Objectif

Dans le sous-sol, différents fluides sont présents et se partagent l'espace poreux : les eaux de formation, piégées au moment des dépôts, les hydrocarbures qui peuvent être générés, les autres gaz, issus en particulier du manteau, et les eaux d'infiltration. Les modélisations habituellement faites se restreignent à calculer les mouvements de l'un ou l'autre de ces fluides et négligent les interactions entre eux. Néanmoins, l'accroissement des activités dans le sous-sol (exploitation des nappes souterraines et des hydrocarbures, stockage de CO_2 ou du gaz, géothermie etc.) nécessite d'intégrer les différents fluides et les différentes échelles. La variation de pression, positive en cas d'injection aussi bien que négative en cas de production, peut entrainer des flux compensatoires qu'il est indispensable d'anticiper pour prévenir les risques. Ce type d'études intégrées ne peut être fait que sur une zone restreinte choisie parmi les plus documentées en mutualisant données et compétences.

Livrable

- Préconisation sur les distances minimales entre les zones affectées à une activité donnée, ou entre ces zones et les aquifères, pour que les interférences soient négligeables à court et à long terme.

- Définition d'un workflow minimal, tant en terme d'acquisition de données que de modélisation à mettre en œuvre par les opérateurs ou les autorités de tutelles pour s'assurer de qu'il n'y a pas de risque du fait d'un conflit d'usage.

Ressources nécessaires : 2 personnes-an.

Délai : 18 mois.

Acquisition de lignes de base

Objectif

De nombreuses études sur les incidents autour de l'exploitation des GHRM restent non conclusives car l'état initial des milieux n'était pas connu. Dans certains sites, il a été reporté par exemple la présence d'hydrocarbures volatiles dans l'air mais dans de nombreux configurations géologiques du méthane s'échappe naturellement de certaines roches. Le plan de surveillance "pré-opérationnel" sera partie intégrante de la caractérisation initiale du site. Il permettra de déterminer l'origine (biogéniques, etc.) des différents composés détectés ainsi que leur variabilité spatiale et temporelle (saisonnalité). Ce plan de monitoring initial comportera des mesures de gaz et d'eau prélevés en surface et en profondeur. Cette étude vise à lister tous les phénomènes qui pourraient être perturbés par l'activité de production de GHRM et à s'assurer que l'on sait les détecter. Dans le cas du méthane par exemple, des traceurs isotopiques et des éléments traces d'autres gaz permettent d'en pister l'origine. On s'appuiera sur l'expérience américaine et les pollutions qui y ont été détectées. Dans l'analyse des retours d'expérience, seront recherchés les outils de monitoring les mieux adaptés, la localisation des points de contrôle (taille du maillage), et les fréquences de mesures qui doivent être acquises pour être pertinentes.

Livrable

- Plan de surveillance comprenant:
    - La liste des composés à enregistrer (hydrocarbures, gaz permanents, radionucléides)
    - Le type de mesure et la fréquence des acquisitions, mesures à faire (concentration, isotopies, précision des appareils, durée d'enregistrement ...)
- Mise en œuvre sur une zone restreinte pour vérification de la faisabilité – approche géostatistique visant à établir des cartographies.

Ressources nécessaires : 4 personnes-an, mesures en laboratoire, terrain.

Délai : 18 mois.

7. Glossaire

Casing : tube en acier positionné dans un puits.

Cuttings: déblais de forage.

Eaux connées : eau emprisonnée dans les pores d'une roche au moment de sa formation.

Flowback : ensemble des fluides retournant à la surface suite à l'opération de fracturation hydraulique.

Fracabilité : aptitude d'une roche à être fracturée de manière artificielle.

Frac : abréviation usuellement utilisée pour l'opération de fracturation hydraulique.

GHRM : gaz et huiles de roche-mère.

Packer : garniture d'étanchéité utilisée pour isoler une partie du forage ou du casing.

8. Références

American Petroleum Institute (2009) - Hydraulic fracturing operations – well construction and integrity guidelines. API Guidance Document HF1.

American Petroleum Institute (2010) - Site internet consulté le 30/08/2011 http://www.api.org/policy/exploration/hydraulicfracturing/shale_gas.cfm

Apps J. A., Zheng L., Zhang Y., Xu T., Birkholzer J. T. (2010) - Evaluation of potential changes in groundwater quality in response to CO2 leakage from deep geologic storage. Transport in Porous Media 82, 215-246.

ATSDR (2010) - Health Consultation. Evaluation of Contaminants in Private Residential Well Water. Pavillion, Wyoming Fremont County.

Bayer P., Pfister S., Hellweg S. (2008) - On the potential of life cycle assessment in water resources management: focus on groundwater. IAHS-publ. no. 327, Capri; 2008.

Barthélémy Y., Seguin J.J. (2011) - Pôle national de modélisation en hydrogéologie, Etude de faisabilité, Rapport final, BRGM RP-5865-FR, 112pp.

Bexte D.C., et al. (2008) - « Improved cementing practice prevent gas migration », World Oil, vol. 229, no 6, p. 1 à 8.

BSSA (2011) - Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA). BSSA tip Sheet for February 2011.

CGIET/CGEDD (2011) - Les hydrocarbures de roche-mère. Rapport provisoire.

COGCC (2004) - Colorado Oil and Gas Conservation Commission. Order no. IV-276.

COGCC (2009) - FY 2008-2009. Report to the water quality control commission and water quality control division of the Colorado department of public health and environment.

Daniel Arthur J. (2009) - R&D of Tools for Managing and Analyzing Produced Water Associated with Marcellus Gas Shales. Presentation at the Independent Oil & Gas Association of New York, 29th Annual Meeting, November 5th, 2009.

EIA (US Energy Information Administration) (2011) - World Shale gas Resources: An initial Assessment of 14 Regions outside the United State.

Ewing J., Devon Energy. (2008) - "Taking a Proactive Approach to Water Recycling in the Barnett Shale." Fort Worth Business Press Barnett Shale Symposium. p.9. http://www.barnettshalenews.com/documents/EwingPres.pdf

EPA (2007) - Reducing methane emissions during completion operations. Natural Gas STAR Producer's Technology Transfer Workshop, 11 September 2007. http://epa.gov/gasstar/documents/workshops/glenwood-2007/04_recs.pdf

EPA (2010a) - Expanded Site Investigation – Field Sampling Plan Pavillion area ground water investigation. Pavillion, Fremont County, Wyoming. TDD No. 0901-01.

EPA (2010b) - Environmental Protection Agency, "Greenhouse Gas Emissions Reporting from the Petroleum and Natural Gas Industry, Background Technical Support Document".

EPA (2010c) - Advisory on EPA's research scoping document related to hydraulic fracturing.

EPA (2011) - Draft Plan to Study the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources. 126 p. February 7, 2011. EPA/600/D-11/001.

Hayes T. (2009) - Sampling and analysis water of water streams associated with the development of Marcellus Shale gas, final report.

Howarth R.W., Santoro R., Ingraffea A. (2011) - Methane and the greenhouse gas footprint of natural gas from shale formations. Climatic Change Letters, DOI: 10.1007/s10584-011-0061-5.

IEA (International Energy Agency) (2010) - World Energy Outlook 2010.

Jenkins C.D., Boyer C.M. (2008) - Coalbed and shale-gas reservoirs. Journal of Petroleum Technology.

Kargbo D.M., Wilhelm R. G., Campbell D.J. (2010) - Natural Gas Plays in the Marcellus Shale: Challenges and Potential Opportunities. Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 5679–5684.

Little M. G., Jackson R. B. (2010) - Potential Impacts of Leakage from Deep CO2 Geosequestration on Overlying Freshwater Aquifers. Environ Sci Technol 44, 9225-32.

Loucks R., Reed R., Ruppel S., Jarvie D. (2009) - Morphology, Genesis and Distribution of Nanometer-Sacale Pores in Siliceous Mudstone of Mississipian Barnett Shale. Journal of sedimentary research, v 79, 848-861.

McMahon P.B., Thomas J.C., Hunt A.G. (2011) - Use of diverse geochemical data sets to determine sources and sinks of nitrate and methane in groundwater, Garfield County, Colorado. USGS Scientific Investigations Report 2010-5215.

NY DEC (2011) - Preliminary revised draft. Supplemental Generic Environmental Statement. Well Permit Issuance for Horizontal Drilling and High-Volume Hydraulic Fracturing to Develop the Marcellus Shale and Other Low-Permeability Gas Reservoirs.

NYC DEP (2009a) - Impact assessment of Natural Gas Production in the New York City Water Supply Watershed. Final Impact Assessment Report.

NYC DEP (2009b) - Rapid Impact Assessment Report. Impact Assessment of Natural Gas production in the New York City Water Supply Watershed.

Ohio Department of Natural Resources (2008) - Report on the Investigation of the Natural Gas Invasion of Aquifers in Bainbridge Township of Geauga County, Ohio. Division of Mineral Resources Managemen.

PA DEP (2009) - DEP Reaches Agreement with Cabot to Prevent Gas Migration, Restore Water Supplies in Dimock Township (Nov. 4, 2009), available at: http://www.portal.state.pa.us/portal/server.pt/community/newsroom/14287?id=2418&typeid=1.

Pennsylvania Department of Environmental Protection (2010) - Consent order and settlement agreement (Commonwealth of Pennsylvania department of Environmental Protection and Cabot Oil & Gas Corporation).

Pfister S., Koehler A., Hellweg S. (2009) - Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. Environ. Sci. Technol. 43, 4098–4104.

Pickett A. (2009) - New solutions emerging to treat and recycle water used in hydraulic fracs. American Oil & Gas reporter.

Pokryszka Z., Charmoille A. (2008) - Monitoring géochimique en phase gazeuse à la surface et dans la couverture intermédiaire des sites de stockage. Synthèse des travaux de l'INERIS 2006-2008. Raport INERIS DRS-08-71082-09108B, en ligne www.ineris.fr

Pokryszka Z., Charmoille A., Bentivegna G. (2010) - Development of Methods for Gaseous Phase Geochemical Monitoring on the Surface and in the Intermediate Overburden Strata of Geological CO2 Storage Sites, OGST, Vol. 65, No. 4, 653-666.

Pokryszka Z., Tauzède C. (2000) - Evaluation of gas emission from closed mines surface to atmosphere. Environmental Issues and Management Waste in Energy and Mineral Production, Balkema eds., Rotterdam, ISBN 9789058090850, 327-329.

Rillard J., Zuddas P., Gombert P., Toulhoat P., Farret R. (2010) - Enseignements tirés de l'étude des éléments traces dans les sources carbogazeuses pour le stockage géologique du CO2. Résumés de la 23e RST, 25-29 octobre 2010, Bordeaux : 247-248.

Seguin J.J. avec la collaboration de Mardhel V. (2009) - Référentiel Hydrogéologique Français V2- BDLISA, Principes de construction et mise en œuvre, Rapport provisoire BRGM, Avril 2009, 132pp.

State of Colorado Oil and Gas Conservation Commission (2009a) - Bradenhead test report. OGCC Operator number 26420, API Number 123-11848.

State of Colorado Oil and Gas Conservation Commission (2009b) - Sundry notice. OGCC Operator number 26420, API Number 05-123-11848.

Satterfield J. et al. (2008) - Managing Water Resource's Challenges in Select Natural Gas Shale Plays, Chesapeake Energy Corp.

Stepan D.J., Shockey R.E., Kurz B.A., Kalenze N.S., Cowan R.M., Ziman J.J., Harju J.A. (2010) - Bakken water opportunities assessment – Phase 1. Publication n° 2010-EERC-04-03. Grand Forks, ND: Energy and Environmental Research Center.

Tyndall Center (2011) - DRAFT. Shale gas : a provisional assessment of climate change and environmental impacts. A research report by the Tyndall Center University of Manchester.

URS Corporation (2009) - Water-related issues associated with gas production in the Marcellus Shale : Additive use, flowback quality and quantities, regulations, on-site treatment, green technologies, alternative water sources, water well-testing.

GWPC et ALL Consulting (2009) - Modern Shale Gas Development in the United States : A Primer. Prepared by Ground Water Protection Council Oklahoma City, OK 73142 And ALL Consulting Tulsa, OK 74119.

Veil J.A., Puder M.G., Elcock D., Redweik R.J. (2004) - A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas and coal bed methane.

Veil J.A. (2010) - Water management technologies used by Marcellus Shale gas producers.

Vidic R.D. (2010) - Sustainable water management for Marcellus Shale development. Marcellus Shale Summit, Temple University, Philedelphia, PA.

West Virginia Water Research Institute (2010) - Zero discharge water management for horizontal shale gas well development. Technology status assessment.

Vong Q., Jaquemet N., Lions J., et al. (2010) - Impacts de l'intrusion de CO2 dans un aquifère d'eau potable et faisabilité de l'atténuation naturelle comme mesure de gestion de risques - modélisation en transport réactif. Rapport d'avancement. BRGM/RP-58284-FR.

Yang T.H., Tham L.G., Tang C.A., Liang Z.Z., Tsui Y. (2004) - Influence of heterogeneity of mechanical properties on hydraulic fracturing in permeable rocks. Rock Mechanics and Rock engineering, 37(4), 251-275.

Zoback M., Kitasei S., Copithorne B. (2010) - Addressing the Environmental Risks from Shale Gas Development. Briefing Paper 1. Worldwatch Institute.

Zuddas P. (2009) - Evaluation des conséquences pour l'environnement du stockage géologique du CO2 : état de l'art. Rapport UCBL pour l'INERIS, Lyon, septembre 2009, 25 p.

Annexe 1

Propos sur la pertinence d'une analyse intégrée des risques

L'exploitation dite d'hydrocarbures non conventionnels à l'aide de la technique de fracturation hydraulique peut, par certains aspects, conduire à un « risque émergent ». En effet, bien que la technique soit mise en œuvre depuis plusieurs années aux Etats-Unis, du fait des impacts environnementaux très controversés de certains sites d'extraction, on peut considérer aujourd'hui que :

- il existe des déficits de connaissances sur le type et le niveau de risques sur l'homme et l'environnement que ce type d'exploitation serait susceptible d'induire en fonction du contexte et des moyens mobilisés ;
- la technique mise ne œuvre est souvent mal connue, comprise et acceptée par la société en général et les populations riveraines en particulier ;
- le débat déborde largement de la simple problématique technique, la notion même de pertinence de la filière (énergie fossile) est largement mise en cause par diverses parties prenantes en termes de bilan carbone, environnemental et sanitaire.

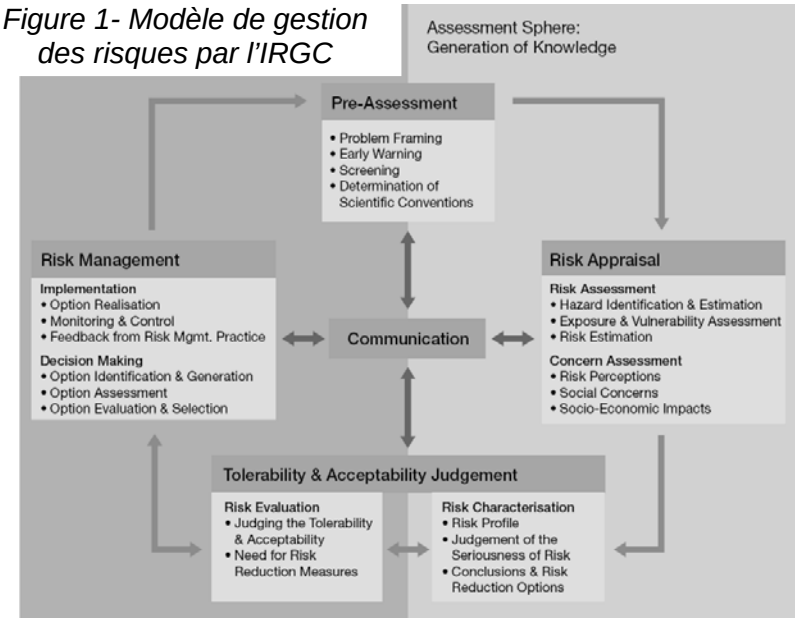
Au regard de la complexité et de la sensibilité des différentes problématiques (risques et impacts environnementaux, accidentels, sanitaires) fortement interconnectées, une démarche intégrée du risque doit être privilégiée. Elaborée sous la coordination de l'INERIS dans le cadre d'un partenariat Européen sur le projet iNTeg-Risk (www.integrisk.eu-vri.eu), une approche innovante de cette démarche « systémique » proposée par l'International Risk Governance Council pourrait être appliquée au contexte d'hydrocarbures non conventionnels (figure 1[14]). Cette démarche s'appuie notamment sur les principes suivants :

- évaluation détaillée et séquentielle de la technologie permettant, à chaque étape, de s'assurer du caractère réversible/compensable des risques ;
- développement des capacités d'anticipation et de prévision des réactions et positionnement des porteurs d'enjeu en vue d'anticiper, d'éviter ou de minimiser les éventuels conflits ;

[14] Renn O. Risk Governance - Coping with Uncertainty in a Complex World. London, Washington DC: earthscan, 2008

- mise en place d'une démarche organisée permettant d'articuler l'approche technique d'estimation des risques avec l'ensemble des autres dimensions du projet ;
- prise en compte de l'ensemble du cycle de vie de la technologie.

Figure 1- Modèle de gestion des risques par l'IRGC



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