



ANCRE

Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

***PROGRAMME DE RECHERCHE SUR L'EXPLOITATION
DES HYDROCARBURES DE ROCHES MERES***

Coordinateurs

François Kalaydjian (IFPEN)

Bruno Goffé (CNRS)

Groupe de travail

Ce rapport a été rédigé par des représentants du BRGM, du CNRS, d'IFPEN, de l'INERIS, de l'Université Joseph Fourier Grenoble I

Juillet 2012

SOMMAIRE

0	RESUME - CONCLUSIONS	5
1	INTRODUCTION	7
2	ÉTUDE DES PROPRIETES DES ROCHES MERES	9
2.1	OBJECTIF.....	9
2.2	DISTRIBUTION SPATIALE, VARIATIONS MINERALOGIQUES ET FACIOLOGIQUES DES DEPOTS RICHES EN MATIERES ORGANIQUES.....	9
2.3	DISTRIBUTION DES PROPRIETES PETROPHYSIQUES ET GEOCHIMIQUES.....	10
2.4	DISTRIBUTION ET CARACTERISATION DE LA MATIERE ORGANIQUE.....	11
2.4.1	<i>La matière organique vue comme source d'hydrocarbures</i>	11
2.4.2	<i>La matière organique vue comme espace de stockage d'hydrocarbures</i>	11
2.4.3	<i>La matière organique vue comme contrôle du comportement de la roche à la rupture</i>	11
2.5	FRACTURATION NATURELLE.....	12
2.6	CONCLUSIONS.....	12
2.6.1	<i>La simulation de bassin</i>	13
2.6.2	<i>Un besoin d'améliorer la compréhension des mécanismes de rétention et d'expulsion</i>	13
2.6.3	<i>Un besoin d'acquisitions de données de terrain et d'analyses</i>	14
3	EXPLOITATION PAR FRACTURATION HYDRAULIQUE	15
3.1	APPROCHE CLASSIQUE DE FRACTURATION HYDRAULIQUE.....	15
3.2	FRACTURATION HYDRAULIQUE DANS LES ROCHES MERES.....	16
3.3	PISTES DE RECHERCHE.....	18
3.3.1	<i>Compréhension et modélisation des mécanismes de fracturation</i>	18
3.3.2	<i>Optimisation des agents de fracturation</i>	19
3.3.3	<i>Mise au point, validation, évaluation des procédés améliorés de fracturation</i>	19
3.4	REFERENCES.....	19
4	MAITRISE DE L'IMPACT DE LA FRACTURATION HYDRAULIQUE	21
4.1	OBJECTIF.....	21
4.2	METHODES DE SUIVI.....	21
4.2.1	<i>Surveillance du processus de fracturation hydraulique</i>	21
4.2.2	<i>Surveillance de la qualité des aquifères</i>	22
4.2.3	<i>Surveillance de la migration des hydrocarbures de roches mères</i>	23
4.3	PISTES DE MAITRISE DU RISQUE ET DE REMEDIATION.....	23
4.3.1	<i>Objectifs</i>	23
4.3.2	<i>Piste de réflexion</i>	23
4.4	REFERENCES.....	24
5	ALTERNATIVES A LA FRACTURATION HYDRAULIQUE	25
5.1	CADRE PHYSIQUE ET VOIES ALTERNATIVES.....	25
5.2	AUGMENTER LA PERMEABILITE DE LA ROCHE SANS FRACTURATION PREALABLE PAR EFFET THERMIQUE.....	26
5.2.1	<i>Chauffer en profondeur est-ce possible ?</i>	26
5.2.2	<i>Effets du chauffage</i>	27
5.2.3	<i>Verrous scientifiques</i>	30
5.2.4	<i>Verrous économiques</i>	30
5.3	AUGMENTER LA PERMEABILITE DE LA ROCHE PAR DES METHODES DE FRACTURATION N'UTILISANT PAS L'EAU 31	
5.3.1	<i>Electro-fracturation</i>	31
5.3.2	<i>Par injection d'un fluide de fracturation et de mobilisation des hydrocarbures</i>	32
5.4	AUTRES TECHNIQUES PROSPECTIVES.....	33
5.5	REFERENCES.....	33

6	IMPACTS SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX.....	35
6.1	MODELISATION DU LESSIVAGE ET PROPAGATION DES CONSTITUANTS	35
6.1.1	<i>Contexte</i>	35
6.1.2	<i>Liste de verrous identifiés et pistes de recherche proposées</i>	35
6.2	IMPACT SUR LES AQUIFERES	36
6.2.1	<i>Impact qualitatif sur les ressources en eau</i>	36
6.2.2	<i>Impact quantitatif sur les ressources en eau</i>	37
6.3	IMPACTS SANITAIRES	38
6.3.1	<i>Liste des verrous identifiés et pistes de recherche proposées</i>	39
6.4	OBSERVATION ET SUIVI DES IMPACTS SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX.	39
7	ÉVALUATION BUDGETAIRE.....	41
8	ÉVALUATION DES RESSOURCES DISPONIBLES.....	43

0 Résumé - Conclusions

A la demande des Ministères tutelles de l'ANCRE (MESR et MEDDTL), le Président de l'ANCRE a demandé le 7 juillet 2011 au groupe programmatique *Énergies Fossiles et Géothermique, Métaux Critiques* de conduire une instruction sur le thème des huiles et gaz de roches mères devant traiter les cinq points suivants: (1) état des forces R&D existant en France sur ces thèmes, (2) évaluation des verrous scientifiques à lever pour mettre en œuvre des technologies efficaces, (3) Analyse des projets en Europe et aux États-Unis, (4) moyens permettant de maîtriser pleinement les fracturations hydrauliques et d'en limiter les impacts sur l'environnement, (5) alternatives éventuelles à la fracturation et à quelle échéance.

Le présent rapport apporte un éclairage sur ces différentes questions. Il s'est toutefois concentré sur les dimensions techniques et technologiques, sur les verrous scientifiques et les propositions de programmes scientifiques à mettre en place pour les lever. L'analyse des projets en Europe et aux États-Unis, couverte déjà par ailleurs, n'a donc pas été rappelée ici.

Le choix a été fait de focaliser la présente étude sur la partie concernant l'exploitation des huiles et gaz de roches mères. Ce choix a été motivé par la volonté d'articuler les **propositions de programmes de recherche avec la mise en œuvre d'un ou plusieurs sites expérimentaux d'exploitation d'huiles ou de gaz de roches mères**, à finalité scientifique, tel que le prévoit la loi du 13 juillet 2011 et de travailler en synergie avec la Commission nationale d'orientation, de suivi et d'évaluation des techniques d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures liquides et gazeux créée par cette même loi.

Ce programme de recherche n'a pas vocation à établir une référence réglementaire. Il est conçu pour (a) questionner les données acquises au cours des tests effectués sur le site, (b) vérifier que l'exploitation ne connaît pas d'irrégularités et inversement (c) proposer de nouvelles technologies à mettre en application, de nouvelles méthodes de suivi et de simulation afin d'accroître la fiabilité et les performances des techniques d'exploitation.

L'exigence de contrôle et de suivi pour un tel site expérimental doit être maximale. Pour cela les méthodologies préconisées devront être particulièrement élaborées et précises, sans pour autant prétendre à ce qu'elles constituent le standard qui puisse être exigé pour une exploitation industrielle.

Après un premier chapitre d'introduction, le rapport est organisé en cinq chapitres abordant les points suivants et conduisant aux recommandations suivantes :

- *L'étude des propriétés des roches mères:* y sont traitées les questions de variations spatiales des propriétés minéralogiques et du contenu en matière organique des roches mères et leur aptitude à pouvoir être l'objet d'une fracturation naturelle.
 - Les recommandations de recherche portent sur l'amélioration de la modélisation des mécanismes de rétention et d'expulsion des hydrocarbures de roches mères et l'adaptation de la simulation de bassin pour disposer d'une prévision de la quantité et de la qualité des hydrocarbures restant piégés dans une roche mère. Pour affiner la modélisation des roches mères et fournir des simulations réalistes il est nécessaire de pouvoir disposer de données variées (sismique, diagraphies, échantillonnages de roche et de fluides, analyses minéralogiques et géochimiques). La réalisation d'un site instrumenté est ici primordiale.
- *L'exploitation par fracturation hydraulique:* après avoir rappelé les principes de la fracturation hydraulique, ses spécificités quand elle est appliquée à des roches mères sont discutées.
 - Les pistes de recherche proposées visent à réduire l'impact environnemental de la fracturation hydraulique par (1) l'amélioration de la modélisation des mécanismes de fracturation des roches mères en prenant en compte à la fois leur composition hybride (minérale et organique) et les hétérogénéités, (2) l'optimisation des agents de fracturation par la recherche de produits alternatifs compatibles avec les normes environnementales et de matériaux 'intelligents'. Là encore, on souligne la nécessité de recourir à des expérimentations depuis l'échelle d'un échantillon jusqu'à celle d'un site afin de pouvoir disposer d'une modélisation validée en vraie grandeur.
- *Le suivi et contrôle de l'impact de la fracturation hydraulique:* les différentes techniques de surveillance sont présentées et des pistes de maîtrise des risques et de leur remédiation sont discutées.
 - Les voies de recherche proposées portent notamment sur l'amélioration de la technique d'écoute microsismique pour améliorer sa résolution en termes de suivi de la fracturation; la mise en place d'une procédure adaptée de suivi géochimique des aquifères tant profonds que superficiels

par l'analyse des éléments clés (organiques, minéraux, éléments traces, isotopes) dont l'évolution devrait permettre de fournir des diagnostics d'impact plus fiables et plus rapides; l'acquisition de données tant en conditions de fond qu'en surface doit être améliorée par la mise en œuvre de nouvelles méthodes de prélèvement et de techniques permettant une surveillance de la qualité de l'air; la mise en place de barrières de prévention et de protection touchant notamment à l'architecture d'exploitation et à l'optimisation de la conception des forages.

- *Les alternatives à la fracturation hydraulique:* de façon plus prospective, y est abordée la mise en place de technologies permettant l'amélioration la productivité des roches mères par la création de fracturations sans apport d'eau et par la transformation des hydrocarbures piégés en coupes plus légères.
 - Les voies de recherche proposées visent notamment à investiguer le potentiel d'injection de propane ou de CO₂ en lieu et place de l'eau ou par le développement de nouveaux procédés d'exploitation des roches mères qu'ils soient *thermiques* ou *électriques*. Dans ces deux derniers cas, il faut souligner le caractère en rupture, risqué et long terme de ces recherches.
- *Les impacts sanitaires et environnementaux:* y sont abordés la question du lessivage éventuel de constituants et la modélisation de leur propagation dans le sous-sol, l'étude de leur impact sur les aquifères et pour finir les impacts d'ordre sanitaire.
 - Les voies de recherche proposées visent à améliorer la modélisation des transports réactifs en milieu poreux pour rendre compte de façon plus précise des processus de dissolution-précipitation et de transport d'espèces chimiques indésirables, d'optimiser les fluides de fracturation pour en limiter l'impact environnemental et sanitaire, de définir les meilleures pratiques de gestion des effluents de production en surface, d'améliorer la connaissance des ressources en eau disponibles en profondeur et d'investiguer les possibilités de recourir à des ressources alternatives telles que les eaux salines profondes, les effluents de production tout en optimisant le traitement pour en permettre une utilisation propre.
 - Un système d'observation de l'ensemble du processus d'exploitation des hydrocarbures de roche mère depuis l'état des lieux initial jusqu'à la fermeture des sites après exploitation et durant toutes les phases intermédiaires de l'exploration, des tests et de l'exploitation demande à être mis en place. Cet observatoire en permettant d'identifier et qualifier les meilleures pratiques et en mettant à disposition du public, des élus et des acteurs publics et industriels des données qualifiées sera à même de garantir la transparence indispensable et de lever ainsi toutes les incompréhensions et ambiguïtés liées à cette exploitation.

Le chapitre 7 présente la construction budgétaire nécessaire à la réalisation un tel programme. Compte tenu de la diversité des questions à aborder et des compétences requises (géosciences, matériaux, chimie, ...), ce budget est estimé de l'ordre de **25M€ sur 5 ans** Un tel programme de recherche doit par ailleurs s'adosser à la réalisation d'un ou de plusieurs sites expérimentaux afin de pouvoir tester des configurations différentes quant à la nature des roches mères, les contraintes structurales existantes, les hétérogénéités rencontrées.

Chacun de ces sites nécessite un budget de l'ordre de **60M€**

On trouvera enfin dans le chapitre 8 un tableau résumant les moyens recensés dans les différentes infrastructures de recherche françaises.

Compte tenu de l'importance des questions sociétales soulevées par l'exploitation des hydrocarbures des roches mères, ce programme de recherche devrait être accompagné d'une réflexion de type *socio-économique*. La mise en œuvre d'une telle réflexion, non menée ici, devrait bénéficier d'une coopération avec l'alliance **ATHENA**.

1 Introduction

Les roches mères étaient vues jusqu'à présent comme les termes "sources" des systèmes pétroliers conventionnels. Il s'agit en effet d'unités sédimentaires à granulométrie fine contenant de la matière organique fossilisée, qui sous l'influence de la température (augmentant au cours de l'enfouissement dans les bassins) se transforme en partie en produits pétroliers (huile et gaz). Une partie de ces hydrocarbures est expulsée et collectée par des systèmes de drains qui amèneront ces fluides en direction de la surface du sol (poussée d'Archimède), avec la possibilité de se retrouver arrêtés ou retardés dans des pièges géologiques constituant les objectifs de l'exploration et de la production classique.

Il s'agit généralement d'un processus peu efficace et une grande partie de ces hydrocarbures n'atteindra pas ces pièges, soit parce qu'ils sont retenus dans la roche mère elle-même, soit parce qu'ils resteront dispersés le long des chemins de migration, soit parce qu'ils atteindront la surface où ils seront à terme détruits par oxydation chimique et dégradation microbienne.

Ce que l'on appelle "hydrocarbures de roches mères" et qui fait l'objet de ce document sont précisément ces hydrocarbures ne quittant pas les roches mères (ou pour être plus exact, les séquences sédimentaires abritant les niveaux riches en matière organique). De sources, par un changement de paradigme, les roches mères deviennent ainsi les "réservoirs" à hydrocarbures que l'on cherche à produire d'une manière "non conventionnelle". Identifier les meilleurs prospects et optimiser leur production demande de faire appel à des logiques et des techniques originales lorsqu'on les compare à celles mises en œuvre dans le cas d'accumulations traditionnelles d'hydrocarbures.

La rétention d'hydrocarbures au sein des roches mères s'explique par des raisons sédimentologiques. La très grande majorité des roches mères sont en effet des roches à grains très fins, entravant la circulation des fluides, donc l'expulsion. Des propriétés micro-pétrophysiques, encore mal connues, jouent probablement également un rôle déterminant. Enfin certaines situations géologiques telles que la difficulté d'accès à des drains régionaux peuvent se traduire par un confinement des hydrocarbures dans les "séquences roches mères", comme c'est le cas au sein de la formation dévonienne de Bakken, dans certaines parties du bassin Williston aux USA.

Des bassins sédimentaires riches en roches mères, y compris ceux ne comportant pas de pièges stratigraphiques ou structuraux propres à constituer des réservoirs conventionnels de pétrole ou de gaz importants, comme c'est le cas notamment du bassin parisien, peuvent ainsi renfermer des ressources propres à devenir des réserves économiques par l'utilisation de technologies appropriées.

L'exploitation des roches mères rebat les cartes de la géopolitique de la production d'hydrocarbures. Les États-Unis redeviennent ainsi progressivement autonomes en termes de consommation de gaz conduisant le Qatar à revoir sa stratégie d'exportation de gaz naturel liquéfié. En Europe, où la production d'huile et de gaz est déclinante, les roches mères pourraient permettre de réduire sa dépendance énergétique notamment vis-à-vis de la Russie.

Les roches mères constituent ainsi une opportunité de prolonger économiquement l'exploitation des énergies fossiles offrant la possibilité d'opérer une transition énergétique progressive vers des énergies décarbonées.

Pourtant l'exploitation des roches mères pose des problèmes d'acceptation sociétale notamment parce qu'elle utilise la fracturation hydraulique, technologie pourtant bien maîtrisée dans le monde pétrolier, mais appliquée ici de façon massive. Cette technologie est utilisée pour fissurer localement les roches et en augmenter la perméabilité afin de permettre une production économique.

Un programme de recherche est indispensable pour élaborer des technologies permettant de produire ces ressources de façon respectueuse vis-à-vis de l'environnement. Il est conçu pour tirer parti et s'adosser à un (ou plusieurs) pilote d'exploitation d'hydrocarbures de roche mère 'sur-instrumenté' devant être réalisé à des fins scientifiques (comme cela est prévu dans la loi de Juillet 2011) et placé sous la responsabilité de la Commission d'Orientation prévue également par la loi.

Ce programme n'a pas vocation à établir une référence réglementaire. Il est conçu pour (a) questionner les données acquises au cours des tests effectués sur le site, (b) vérifier que l'exploitation ne connaît pas d'irrégularités et inversement (3) proposer de nouvelles technologies à mettre en application, de nouvelles méthodes de suivi et de simulation qui permettront d'accroître la fiabilité des techniques d'exploitation. L'exigence de contrôle et de suivi pour un tel site expérimental doit être maximale. Pour cela les méthodologies préconisées devront être particulièrement élaborées et précises, sans pour autant prétendre à ce qu'elles constituent le standard qui peut être exigé pour une exploitation industrielle.

Focalisé ainsi sur l'exploitation des roches mères, ce programme est organisé en cinq chapitres :

- **Étude des propriétés des roches mères.** Ce volet aborde (1) la question de l'hétérogénéité des roches mères tant du point de vue de leur sédimentologie que de leur contenu en matière organique, (2) celle des propriétés de transport et géomécaniques qui en résultent, (3) des considérations liées à l'existence de zones fracturées naturellement et de l'impact d'un forage ou d'une stimulation sur la possibilité de mise en connexion de la roche mère avec des aquifères potables sus-jacents.
- **Exploitation des roches mères par fracturation hydraulique.** Ce volet explore l'amélioration des simulations de l'exploitation des roches mères par le développement de techniques opératoires adaptées et de codes numériques couplant mécanique et transport utilisés pour optimiser les conditions de fracturation, prévoir la distribution et l'extension des fractures induites et en contrôler l'impact environnemental.
- **Suivi et contrôle de l'exploitation des roches mères par fracturation hydraulique.** Ce volet s'intéresse à l'optimisation des méthodes de suivi de l'exploitation des roches mères par fracturation hydraulique en combinant diverses méthodes (sismique de surface, sismique de puits), équipement des puits d'observation afin d'anticiper tout besoin éventuel de remédiation.
- **Techniques alternatives à la fracturation hydraulique.** Cette partie du programme explore des pistes de production des hydrocarbures de roches mères sans recourir à l'injection d'un fluide pour fracturer la roche. Il s'agit notamment ici de s'intéresser à l'exploitation des roches mères par effet thermique. L'enjeu est de comprendre et modéliser l'impact d'un apport de chaleur à la déstabilisation des argiles, à l'expulsion d'eau, à la création de porosité et de perméabilité qui pourrait en résulter et à l'amélioration de la production de gaz ou d'huile à laquelle il contribuerait. Une évaluation technico-économique de la faisabilité d'une telle approche devra également être considérée.
- **Minimisation de l'impact environnemental de l'exploitation des roches mères.** Dans cette partie du programme, il s'agit (1) de développer une phénoménologie permettant de rendre compte des phénomènes de dissolution-précipitation des minéraux de la roche mère et des échanges de masse entre les fluides et la roche; (2) de proposer des voies permettant de réduire le stress hydrique provoqué par la fracturation hydraulique; (3) de limiter les nuisances de la fracturation hydraulique sur l'environnement. S'agissant du lessivage de minéraux, il s'agit de comprendre l'impact des changements de conditions de pH et de Eh ainsi que des autres propriétés physiques du milieu. Un important travail de laboratoire doit également être conduit pour évaluer les paramètres thermocinétiques et biogéochimiques pouvant contrôler le lessivage d'éventuels polluants. S'agissant du bilan hydrique, il s'agit d'évaluer la possibilité de réutiliser l'eau de production en se conformant aux réglementations en vigueur. S'agissant de l'impact environnemental, les recherches porteront sur l'amélioration de la composition des fluides de fracturation hydraulique ainsi que la technique elle-même pour favoriser l'emploi de substances chimiques à faible impact.

Ce faisant, ce programme de travail, adossé à un ou plusieurs sites expérimentaux, permettra d'identifier et d'évaluer les risques éventuels liés à l'exploitation des hydrocarbures de roches mères, à proposer des éléments de recherche et d'innovation propres à renforcer la pertinence des méthodes de suivi et de contrôle, à proposer des techniques de remédiation et au final à contribuer à assurer une exploitation de ces ressources respectueuse de l'environnement et répondre ainsi aux attentes du public.

En marge de ce rapport et compte tenu de l'importance de l'aspect sociétal vis-à-vis de l'exploitation des hydrocarbures des roches mères, il nous est apparu nécessaire de recommander que ce programme de recherche soit accompagné d'une réflexion de type *socio-économique* sur le sujet.

Cette réflexion, non menée ici, devrait bénéficier d'une coopération avec l'alliance **ATHENA**. Elle permettrait, d'une part, de mieux quantifier les enjeux économiques de l'exploitation de ces nouvelles ressources en développant notamment une approche type *Analyse de Cycle de Vie* et, d'autre part, de mieux appréhender les attentes sociétales en identifiant les questions soulevées par le public, en analysant comment se matérialise ce questionnement, en impliquant d'une manière constructive les acteurs locaux à participer à la conception et la mise en œuvre des projets.

De même, cette réflexion devrait introduire et évaluer la nécessité d'accroître l'éducation au niveau de l'école, du lycée et la formation des maîtres dans le domaine des géosciences afin d'accroître la compréhension de ces questions et d'en privilégier une résolution rationnelle.

2 Étude des propriétés des roches mères

2.1 OBJECTIF

L'exploitation des hydrocarbures de roches mères, implique de la part des opérateurs une capacité prédictive afin d'optimiser la localisation des meilleurs prospects (potentiel en hydrocarbures et opérabilité), le plan d'implantation des puits et les techniques de production.

Dans un système pétrolier classique, on s'intéresse à la roche-mère pour ses capacités à générer ou à avoir généré des hydrocarbures qui ont alors migré vers un réservoir à partir duquel ils peuvent être extraits. Notons que cette vision se traduit souvent par une description globale, gommant les hétérogénéités (sédimentaires, géochimiques, géomécaniques) existantes aux échelles de l'objet "roche mère".

Dans le cas des roches mères on s'intéresse à la production des hydrocarbures qui n'ont pas été expulsés vers des drains régionaux :

- a) La quantité et la composition des hydrocarbures retenus dans les séquences roches mères, donc leur intérêt économique, vont dépendre de la teneur et de la nature de la matière organique, de son degré de maturité thermique, de son histoire d'enfouissement, de la matrice minérale initiale et de sa diagenèse.
- b) La variation de la composition minéralogique, de la diagenèse, de l'état de la matière organique des roches mères va fortement jouer sur la capacité à les produire en utilisant la fracturation naturelle ou artificielle ou toute méthode alternative de stimulation de cette roche-mère.
- c) La roche mère doit être appréhendée dans sa réalité et sa logique géologique, à savoir celle d'un intervalle sédimentaire (incluant les épontes) à l'échelle duquel peuvent se manifester une variabilité verticale et localement horizontale très significative sur le plan organique, minéralogique, pétrophysique et géomécanique.
- d) Il faut aussi définir les outils indispensables qu'il convient de développer ou améliorer pour parvenir à une interprétation pertinente de ces données et les traduire par la suite (voir chapitres suivants) en termes de productivité des puits mais aussi en termes de réduction de l'impact environnemental auquel une telle production pourrait conduire.

Les méthodologies à déployer devront être calibrées sur des données spécialement acquises lors de la mise en œuvre d'un site pilote d'expérimentation *in situ* réalisé dans un seul but scientifique.

2.2 DISTRIBUTION SPATIALE, VARIATIONS MINÉRALOGIQUES ET FACIOLOGIQUES DES DÉPÔTS RICHES EN MATIÈRES ORGANIQUES.

Si les parties grossières déposées sous une énergie de dépôt élevée sont généralement bien caractérisées car elles renferment les principaux réservoirs conventionnels, en revanche les dépôts plus fins mis en place sous une énergie de dépôt faible sont généralement traités avec une grande incertitude alors qu'ils sont le siège de la plupart des roches mères dans lesquelles les hétérogénéités sont particulièrement mal caractérisées.

Avec le développement de la production à partir des roches mères, la compréhension de la distribution spatiale de ces objets géologiques est devenue incontournable. La géologie sédimentaire des roches à grains fins est de ce fait en plein développement.

Les points principaux sont :

- la reconnaissance d'hétérogénéités sédimentaires à l'intérieur et au contact de ces dépôts tant en termes de contenu en matière organique et minéralogie qu'en termes de distributions des bancs compétents souvent présents à l'intérieur de ces intervalles et pouvant faire l'objet d'une utilisation préférentielle en tant que drains naturels ou induits lors de la mise en exploitation des roches mères,
- la construction de modèles réalistes de dépôts prédictifs de ces différents types de faciès, la géométrie des intervalles de roches mères,
- la compréhension de l'architecture sédimentaire de ces dépôts en particulier quant à leur contrôle sur la distribution des faciès sédimentaires cités ci-dessus et la distribution des niveaux riches en matière organique.

Deux cas très contrastés d'environnements de dépôts des roches mères sont prospectés, notamment en France:

- les roches mères marines (matière organique phyto-planctonique marine, distributions spatiales relativement continues, peu hétérogènes à l'échelle des formations). Ces roches mères sont actuellement exploitées dans le monde comme aux États-Unis par exemple.
 - En France le Lias, roche mère déposée en environnement marin épicontinental, constitue un exemple de choix en raison de sa vaste distribution géographique (Europe de l'Ouest) et de sa variabilité quant à sa maturité thermique: le bassin de Paris présente *a priori* un potentiel en "schistes bitumineux", en "huiles de roches mères", le bassin du Sud-Est thermiquement plus mature *a priori* un potentiel en "gaz de roches mères".
- les roches mères des systèmes continentaux (matières organiques mixtes, algues/plantes supérieures, distributions spatiales complexes, très hétérogènes à toutes les échelles). Les dépôts permien du bassin de Lodève pourraient servir d'exemples d'étude.

Ces deux cas doivent être étudiés et comparés, sous les angles croisés de la sédimentologie de faciès, de la géométrie des corps sédimentaires, de leur organisation séquentielle. Dans cette optique, une typologie des roches-mères (modèle de faciès, qui s'appuierait également sur la minéralogie) et un (des) modèle(s) séquentiels de dépôts pourraient être élaborés, rendant compte des hétérogénéités à des échelles kilométriques (échelle des corps sédimentaires et des données sismiques) à millimétrique (microfaciès en microscopie optique).

2.3 DISTRIBUTION DES PROPRIÉTÉS PETROPHYSIQUES ET GEOCHIMIQUES

Les propriétés pétrophysiques d'une roche mère dépendent d'une part de son faciès sédimentaire (voir §2.2) ainsi que de la diagénèse subie, cette dernière s'appliquant différemment à la composante minérale et organique du sédiment.

De même que pour les faciès et la géométrie des corps sédimentaires, la distribution et les hétérogénéités des propriétés géochimiques (potentiel pétrolier, nature des hydrocarbures) et physiques (porosité, perméabilité, capacité d'adsorption des hydrocarbures par le kérogène, propriétés mécaniques) devront être caractérisées, notamment aux échelles micro à nanométrique.

En effet, dans le cas du gaz, les mécanismes de transport au sein de la roche mère sont complexes :

- D'une part, la perméabilité au nanoDarcy (10^{-21}m^2) rend inopérantes les lois physiques (loi de Darcy) généralement utilisées pour décrire les écoulements en milieu poreux, la perméabilité du milieu poreux étant alors dépendante de la pression.
- D'autre part, il existe un système de porosité au sein de la matière organique (celle-ci peut être piégée) et une porosité au sein de la matrice argileuse. Ces porosités n'ont pas la même affinité avec le gaz (vis à vis de l'adsorption/désorption) et les modes de transport au sein de ces porosités peuvent être différents.

La variabilité spatiale des caractéristiques de la roche mère, ainsi que le changement du régime de pression en son sein, font alors coexister plusieurs régimes d'écoulement différents.

Pour améliorer la compréhension des mécanismes de migration du gaz il s'agira dans un premier temps d'identifier les techniques expérimentales qui permettent de caractériser finement la porosité et son rôle dans les processus de transfert ainsi que caractériser indépendamment chaque régime d'écoulement possible au sein de la roche mère. Dans un second temps, il s'agira de déterminer les paramètres de transfert pour différents types de roches mères et de déterminer l'impact des variabilités sédimentaires et diagénétiques sur ces paramètres. Cette étape est aussi pertinente pour l'étude des hydrocarbures liquides.

Afin d'adapter et développer des concepts propres à la caractérisation de ces roches-mères, il s'agit de traiter les points suivants :

- analyse de la nature, dimension et distribution des hétérogénéités pétrophysiques et géochimiques des roches-mères dans les bassins sédimentaires;
- propriétés de transport au sein des roches mères et impact sur les régimes de pression;
- relation entre les processus sédimentaire, diagénétique et la dynamique du bassin (permettant d'accéder à la comparaison entre le matériel déposé et celui préservé actuellement). Ce point fait le lien entre les paragraphes 2.2 et 2.3 de ce rapport.

Ces travaux couvrent donc un large spectre de méthodologies allant des aspects analytiques à la mise en place de concepts en passant par des tests et développements numériques.

2.4 DISTRIBUTION ET CARACTERISATION DE LA MATIERE ORGANIQUE

La nature, la distribution, l'état diagenétique (préservation, degré de maturité thermique) de la matière organique sont des paramètres clés dans l'évaluation de l'intérêt pétrolier d'un volume de sédiments car celle-ci constitue à la fois la source des hydrocarbures, mais aussi son site de piégeage.

2.4.1 La matière organique vue comme source d'hydrocarbures

La production d'hydrocarbures au cours de la maturation du kérogène¹ est un domaine qui a déjà été largement étudié dans le cadre des hydrocarbures conventionnels. La cinétique et la stoechiométrie de ces réactions chimiques est maintenant bien connue. Néanmoins, l'accent a porté sur les produits obtenus au cours de cette transformation, sans s'attacher à caractériser la transformation du kérogène lui-même.

L'hétérogénéité, au sein de la roche mère, de la distribution spatiale de la matière organique vue comme source d'hydrocarbures est un domaine déjà moins connu, bien que constituant un enjeu important pour l'exploitation des schistes à hydrocarbures. On peut citer des travaux initiés récemment sur ce thème, comme par exemple le développement de modèles conceptuels et de simulateurs du cycle de la matière organique, de sa production primaire (dans les couches superficielles de l'océan) jusqu'à sa préservation dans le sédiment.

L'intérêt d'un site pilote consiste à fournir des données pour évaluer et calibrer ces nouvelles approches.

2.4.2 La matière organique vue comme espace de stockage d'hydrocarbures

Dans le cadre de la production de gaz et huiles de roches mères le volume de la matière organique est aussi un facteur important pour l'estimation des ressources récupérables (distribution à l'échelle de la formation sédimentaire). Il faut donc connaître sa distribution en relation avec le réseau de drainage pour optimiser la récupération (exploiter les volumes les plus riches).

Il est apparu récemment que la contribution de la matière organique à la création d'un espace de stockage pour les hydrocarbures est primordiale. Au cours de la maturation, le kérogène initial subit des transformations chimiques qui se traduisent entre autre par une transformation de sa structure :

- à l'échelle micrométrique, le kérogène semble développer une porosité micrométrique et nanométrique probablement mal connectée au réseau poreux de la matrice minérale encaissante. Une partie importante des produits retenus dans les roches mères serait stockée sous forme libre dans cette porosité. Celle-ci est visible en microscopie électronique et classiquement imagée dans les publications récentes par des techniques haute résolution.
- à l'échelle nanométrique, le réarrangement structural des unités aromatiques de base (USB) favorise l'apparition de sites d'adsorption, de gaz notamment. Cette porosité nanométrique, parfois constituée de structure en oignons, contribuerait pour moitié environ au stockage de gaz dans les formations de roche mère.

Ces recherches sont à un stade très préliminaire, et doivent se poursuivre par l'acquisition de données et d'observations systématiques de l'évolution de ces différents systèmes de pores en fonction du degré de maturation, de la nature, et de l'enfouissement de la matière organique.

2.4.3 La matière organique vue comme contrôle du comportement de la roche à la rupture

Enfin, le kérogène joue un rôle dans le comportement mécanique des roches lors de la fracturation induite. En ce qui concerne cette dernière, se pose la question du rôle de la matière organique dans l'initiation et le développement des fractures. En effet, les kérogènes sont des structures moléculaires solides, qui selon leur nature et l'environnement physique (température, pression, saturation en hydrocarbures) vont avoir un comportement mécanique fragile à ductile, potentiellement en fort contraste avec les minéraux environnants. Ce sont également des structures "insolubles" dans les processus de déformation par dissolution-précipitation des phases silicatées ou carbonatées constituant alors des zones "étanches" à même quand elles sont organisées en structures planaires, de guider la circulation des fluides et la distribution des fractures (voir paragraphe suivant). La détermination du comportement physique en relation avec la distribution spatiale à

¹ Kérogène: matière organique sédimentaire

l'échelle microscopique deviennent des éléments clefs de compréhension du comportement à la fracturation induite des roches-mères.

2.5 FRACTURATION NATURELLE

Le terme hydrocarbures de roche-mères regroupe sous un même terme des séries à dominantes argileuses riches en matière organique qui ont subi un enfouissement et une histoire tectonique et structurale variés. Les roches mères se caractérisent donc par la nature composite de leur organisation (assemblage hybride de matière organique et matrice sédimentaire) et présentent de ce fait des propriétés géomécaniques particulières qu'il convient d'étudier dans le détail.

L'histoire géologique complexe que ces roches mères ont subie (sédimentation, compaction, fracturation plus ou moins cicatrisée et micro-fracturation en relation avec l'expulsion d'hydrocarbures) s'est traduite par un structure hétérogène (cf §2.1) mais aussi par une histoire de la fracturation différente suivant les parties du bassin considéré. S'agissant de l'expulsion d'hydrocarbures gazeux ou liquides (selon l'état thermodynamique auquel est parvenue la roche mère), dans le cas d'une roche imperméable comme peut l'être une roche mère, cette expulsion ne peut se produire que par le développement d'un réseau poreux-perméable induit par la genèse des hydrocarbures : la conversion du kérogène en gaz et liquides induit un changement de volume et une surpression qui induit la fracturation naturelle de la roche-mère. Si le seuil de saturation est atteint, un réseau perméable mouillé aux hydrocarbures se forme alors permettant l'expulsion.

La connaissance de cette aptitude à la fracturation naturelle est fondamentale à plusieurs titres :

- Pour la définition et la compréhension du système de failles et de fractures permettant de délimiter des zones naturellement fracturées et faillées. Cette description est indispensable aussi bien pour définir des zones de "sweet spot" dont la productivité importante permettra de réduire le nombre de drains horizontaux que pour la définition des zones de failles qu'il faudra aborder en terme de risques.
- Pour la reconstitution des différents états de contraintes et notamment de la contrainte actuelle afin d'optimiser l'orientation des drains horizontaux. Dans certaines zones, cette fracturation naturelle sera peut être suffisante à une production commerciale d'hydrocarbures sans avoir recours à une stimulation artificielle.

De nombreuses questions scientifiques restent posées :

- Peut-on définir des critères reliant la teneur en matière organique, l'état de maturité et la composition minéralogique (en particulier la teneur en argile) qui gouverneraient l'occurrence de zones de fracturation naturelle ?
- Peut-on prédire le potentiel et la composition des fluides produits ?
- Peut-on prévoir avec suffisamment de précision la localisation de la fracturation naturelle, son orientation, son extension, ainsi que son efficacité en terme de circulation des fluides ? Cette question se pose non seulement pour rendre compte de l'état actuel mais interroge l'ensemble de l'évolution du bassin sédimentaire ?
- Peut-on modéliser les propriétés de transport des fissures/fractures de ces zones naturellement fracturées ? La connaissance fine de cette fracturation naturelle permettra elle de minimiser l'énergie à fournir pour créer une fracturation artificielle efficace permettant de diminuer d'autant l'empreinte environnementale et les risques liés à la perturbation d'un milieu hétérogène ?
- Peut-on dimensionner les contraintes appliquées sur une telle zone ? S'agissant de la fracturation induite se pose en particulier la question du rôle de la matière organique dans l'initiation et le développement des fractures ?
- Un travail sur l'imagerie à différentes échelles de cette fracturation semble également nécessaire, et pourrait être réalisé sur les exemples du Lias et du Permien cités plus haut. Les outils à calibrer semblent être les outils diagraphiques (au niveau des puits) et sismiques à une échelle plus régionale.

2.6 CONCLUSIONS

Une recherche ambitieuse est donc à mener pour répondre aux différentes questions listées dans les paragraphes §2.2, §2.3 et §2.4 ci-dessus. Il s'agira dans un premier temps d'identifier les limites des connaissances actuelles permettant de modéliser le comportement mécanique de tels objets hybrides (voir

Chapitre 3) et de répertorier les données existantes dans la littérature, puis, dans un second temps, de proposer un programme de travail visant à qualifier le comportement géomécanique de telles structures.

La compréhension des mécanismes impliqués et leur modélisation devront être intégrées dans des simulateurs appropriés pour lesquels deux voies de recherche peuvent être définies.

2.6.1 La simulation de bassin

Les simulateurs de bassin sont des outils de simulation numérique de l'histoire géologique. Ils reproduisent numériquement les phénomènes physiques de sédimentation, compaction, craquage de la matière organique, expulsion et migration des hydrocarbures. Ils se basent sur une représentation discrétisée des bassins sédimentaires, dans l'espace et dans le temps. Dans l'espace, le bassin est représenté par des mailles tridimensionnelles, de dimension caractéristique hectométrique à kilométrique. Le simulateur fournit à des intervalles de temps donnés (de l'ordre de centaines de milliers, voire de millions d'années), et surtout à l'Actuel, une prévision d'un certain nombre de grandeurs physiques dans chacune des mailles : température, pression de pore, porosité, teneur en hydrocarbure, composition des hydrocarbures. Le simulateur de bassin est donc l'outil privilégié qui accompagne toute prévision de la distribution spatiale des hydrocarbures en place dans un bassin sédimentaire.

Ces simulateurs de bassin ont été initialement développés pour assister l'exploration de réserves conventionnelles. Ils sont notamment très performants pour la simulation de la migration des hydrocarbures et leur piégeage, mais peu d'efforts ont été mis en œuvre jusqu'alors pour simuler les mécanismes détaillés de rétention des hydrocarbures dans la roche mère : en effet, dans un cadre conventionnel, la quantité et la qualité des hydrocarbures expulsés de la roche mère étaient plutôt traitées comme des variables d'ajustement. Pour être utilisés dans le cadre d'une prévision de la distribution des hydrocarbures retenus dans une roche mère, il est jugé nécessaire d'approfondir la simulation de ces mécanismes de rétention et d'expulsion hors de la roche mère.

Ce faisant, ils constitueront un outil privilégié pour la prévision des volumes et de la qualité des hydrocarbures piégés dans les roches mères.

2.6.2 Un besoin d'améliorer la compréhension des mécanismes de rétention et d'expulsion

Pour assurer la fiabilité des simulateurs, il nous faut bien connaître la physique des phénomènes que l'on simule et plusieurs objectifs sont donnés dans ce sens à la recherche phénoménologique.

Notamment il s'agit de :

- Mieux comprendre la part relative de la rétention dans la porosité minérale (espaces entre les particules minérales) et dans la porosité organique (nature et architecture du réseau poreux à l'intérieur des particules organiques).
- Mieux comprendre l'évolution de ces deux porosités au cours de l'enfouissement, et en réponse aux transformations physico-chimiques des minéraux et de la matière organique qui en résultent. Ceci implique de mieux comprendre la modification de la structure multi-échelle du réseau de pores au cours de l'histoire du bassin, afin de mieux prévoir :
 - le volume de composés stockés sous forme libre dans les pores du kérogène et dans les pores de la matrice minérale,
 - la quantité de composés organiques piégés dans la nanoporosité du kérogène.
- Mieux identifier quels composés sont immobiles et quels sont ceux qui migrent dans la roche mère jusqu'à en être expulsés. Ceci impose notamment une meilleure connaissance de la connectivité du réseau poreux et de son évolution dans le temps: y a-t-il une déconnection de la porosité organique et de la porosité minérale au cours de l'histoire du bassin ?
- Mieux prévoir des épisodes de développement de la fracturation naturelle de la roche mère dans le passé, sous l'effet de surpressions. Ces épisodes engendrent en effet une expulsion des fluides qui peut affecter l'estimation des volumes en place à l'Actuel.

La mise en œuvre de simulations sur des cas de référence bien documentés est donc indispensable pour calibrer les simulateurs numériques et pour valider les hypothèses et les lois d'homogénéisation sur lesquels ils reposent. Cette étape de calibration et de validation est donc indispensable pour assurer la fiabilité des prévisions qui seront réalisées dans le futur à l'aide de ces outils numériques.

2.6.3 Un besoin d'acquisitions de données de terrain et d'analyses

Si l'état des lieux sur la connaissance de ces objets géologiques, leurs propriétés et hétérogénéités, constitue une étape nécessaire, en revanche, aller plus loin et notamment exploiter les possibilités du simulateur de bassin nécessitent une acquisition de nouvelles données sur ces roches mères. Ces données concernent la sismique pétrolière (acquisition ou retraitement), la sismique « très haute résolution » sur analogue terrain, les diagraphies (imagerie de paroi, caractérisation pétrophysique), réalisation de puits carottés, analyses diverses sur analogues terrain (minéralogie, géochimie...).

S'appuyant sur ces nouvelles données, une modélisation et une simulation plus réalistes de la géologie et des potentiels des roches mères pourront être rendues à la communauté scientifique et au public.

Cette connaissance est indispensable pour optimiser une éventuelle production et réduire les risques engendrés par cette dernière.

3 Exploitation par fracturation hydraulique

3.1 APPROCHE CLASSIQUE DE FRACTURATION HYDRAULIQUE

L'objectif d'une opération de fracturation hydraulique est de créer par rupture de la roche un drain perméable s'étendant de part et d'autre du puits. On isole une zone du puits par des packers. La fracturation hydraulique consiste à injecter (voir Fig. 3.1), à un débit approprié, un fluide plus ou moins visqueux au droit de la formation productrice jusqu'à ce qu'une fracture s'amorce à la paroi.

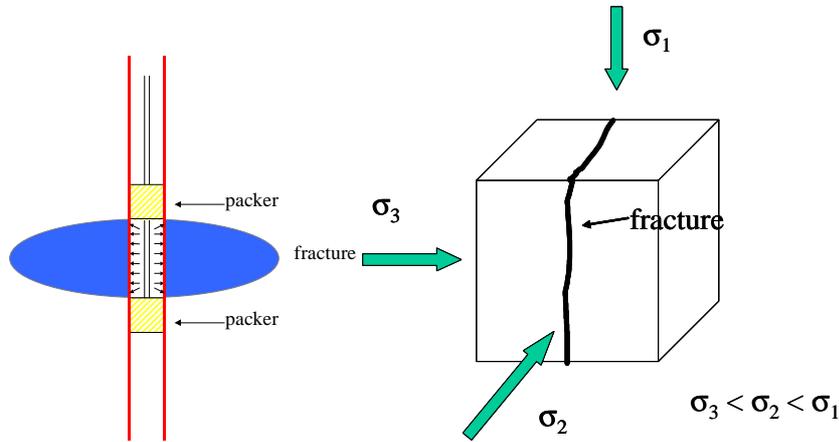


Figure 3.1: Schéma de principe

Une fracture ne s'ouvre que si la pression de fluide appliquée dépasse un certain seuil. Cette pression d'initiation dépend :

- des contraintes in situ,
- du mode de déformation du toit et du mur de la zone concernée,
- du comportement rhéologique de la roche,
- du mode d'injection du fluide,
- de la filtration ou de la non filtration du fluide.

Les fractures se développent et se propagent dans des directions d'énergie minimale, perpendiculaires à la contrainte principale mineure. La fracturation hydraulique est classiquement utilisée pour vaincre des barrières naturelles s'opposant au bon écoulement des fluides (endommagement des puits) par exemple.

Comme la contrainte principale mineure (σ_3) est souvent horizontale, les fractures seront essentiellement verticales. Si le champ de contrainte horizontal est isotrope, la direction des fractures sera indéterminée. Théoriquement dans un champ de contrainte homogène et dans un matériau homogène et isotrope, une fracture à partir d'un point va croître uniformément dans toutes les directions de façon circulaire. Initiée dans un puits perforé, on aura tendance à avoir deux lobes tendant à se développer vers la partie supérieure (les contraintes augmentant avec la profondeur). Quand les fracturations hydrauliques sont effectuées à partir de puits déviés les fractures ne sont plus complètement dans un plan, on peut avoir des fractures réorientées et multiples.

Au cours d'une opération de fracturation hydraulique, on distingue successivement :

- l'ouverture de la fracture par mise en pression du milieu par un fluide sans particules solides. Le fluide est injecté à travers les perforations avec un débit suffisant pour maintenir la pression de propagation de la fracture.
- l'injection d'un fluide avec un matériau granulaire appelé agent de soutènement, en suspension dans le fluide, destiné à maintenir la fracture ouverte à l'issue de l'injection,
- le rejet du fluide de fracturation et la remise en production du puits.

- L'extension des fractures dépend, pour une contrainte mécanique appliquée, des propriétés pétrophysiques et mécaniques de la roche traitée. Les volumes injectés vont de quelques mètres cubes à plusieurs milliers.

La pratique courante depuis 1947 utilise de l'eau, des agents de soutènement et des additifs (réducteur de frottement, bactéricides, anticorrosion, acides). La Figure 3.2 ci-dessous illustre la composition du fluide de fracturation.

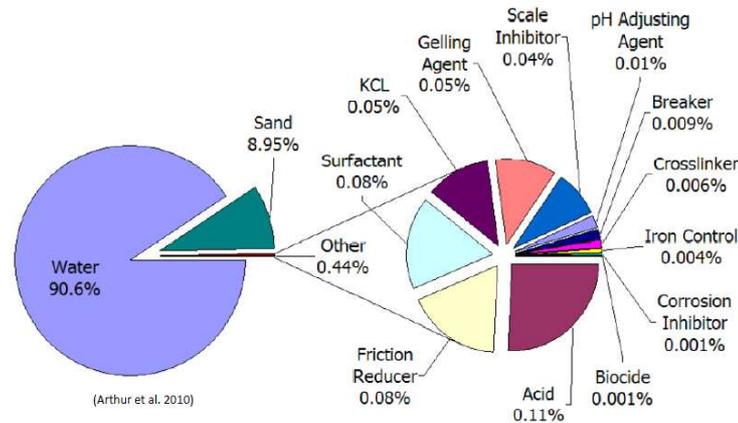


Figure 3.2: Composition du fluide de fracturation hydraulique (modifié de Arthur et al., 2008)

Le fluide de fracturation est d'abord injecté sans agent de soutènement. Son rôle est de conférer à la fracture une épaisseur suffisante pour que les agents de soutènement pénètrent dans cette fracture. Dans la phase suivante, l'agent de soutènement (sable, bauxite, ...) est mélangé au fluide de fracturation. Celui-ci doit alors transporter les solides de la tête de puits jusqu'à l'extrémité de la fracture. Le fluide doit être suffisamment visqueux pour assurer le transport des particules et pas trop cependant pour en faciliter le dégorgement. Il s'agit en général d'un gel à base d'eau ou d'huile comportant des additifs dont les usages sont décrits dans le tableau suivant :

Eau	Propage la fracture et porte l'agent de soutènement
Agent de soutènement (sable,) (proppant)	Assure que les fractures restent ouvertes. Certaines particules sont entourées de résine pour faciliter l'agglomération dans les fractures
Agent gélifiant	Rend l'eau plus visqueuse et apte au transport des agents de soutènement et les maintenant en suspension
Réducteur de frottement	Réduit le frottement du fluide (slickwater)
Réticulant	Maintient la viscosité du fluide
Breaker	Produit permettant de réduire la viscosité des gels après création des fractures
Bactéricides	Inhibent la croissance de microorganismes qui pourrait contaminer le gaz
Stabilisateurs d'argile	Empêche le gonflement des argiles
Inhibiteur de corrosion	Réduit la corrosion des équipements

3.2 FRACTURATION HYDRAULIQUE DANS LES ROCHES MÈRES

L'objectif de la fracturation hydraulique est de créer un réseau de fracture le plus dense possible.

Hormis les cas de faible profondeur ou de tectonique particulière, les puits sont idéalement forés horizontalement dans une direction parallèle à la contrainte minimale pour optimiser l'extension des fractures. Le puits est placé à la base du réservoir car les fractures ont tendance à monter. En pratique on procède à plusieurs traitements régulièrement espacés le long du puits (Fig. 3.3). Le nombre de sections traitées le long d'un puits est très variable (3 à 40). La longueur des clusters de perforation doit être inférieure à 4 diamètres de puits pour éviter la création de fractures multiples (Ketter et al, 2006).

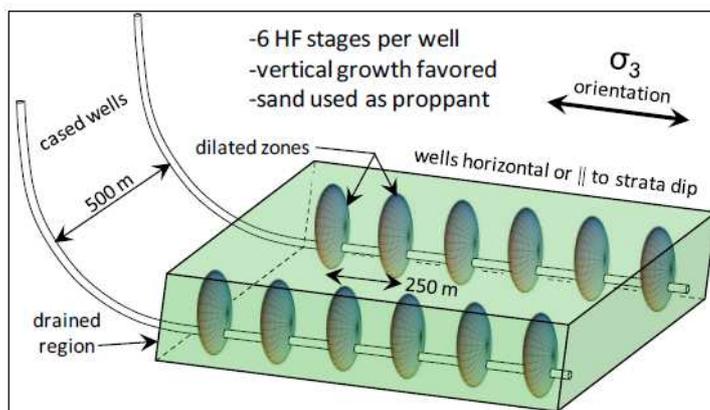


Figure 3.3: Fracturation "multi-stage" couramment réalisée (Dusseault et McLennan, 2010)

Les méthodes évoluent constamment et deviennent de plus en plus sophistiquées. Elles dépendent de l'objectif (épaisseur, caractéristiques de couches, ...) et aussi de l'expérience acquise par les opérateurs.

Le traitement est opéré en plusieurs séquences :

- traitement acide pour nettoyer le proche puits et enlever la boue de forage,
- injection d'eau pour réduire le frottement et faciliter la mise en place des agents de soutènement et ouvrir un réseau de fractures,
- injection d'eau avec agents de soutènement en plusieurs étapes en augmentant la taille des agents de soutènements (par exemple on injectera 500 m³ de fluide avec du sable de 150 µm, puis 1500 m³ avec du sable de 200 à 400 µm et enfin 500 m³ avec du sable de 600 à 800 µm),
- lavage à l'eau pour extraire l'excès d'agent de soutènement.

Contrairement à ce qui se passe pour une opération classique avec création de deux lobes, le réseau "endommagé et fracturé" est plus complexe pour plusieurs raisons (King, 2010, Alexander et al, 2011) :

- les roches mères sont souvent litées, en couches minces et ont un comportement fragile (mécaniquement),
- les couches présentent des fractures naturelles partiellement ouvertes ou non qui constituent des éléments de faiblesse,
- l'anisotropie des contraintes horizontales est parfois faible.

Il n'y a pas de méthodes pour prédire le développement du réseau de fractures (Warpinski et al, 2008) Pour un réservoir donné, seule la micro-sismicité permet de bien suivre le volume du réseau complexe de fracture (Fig. 3.4)

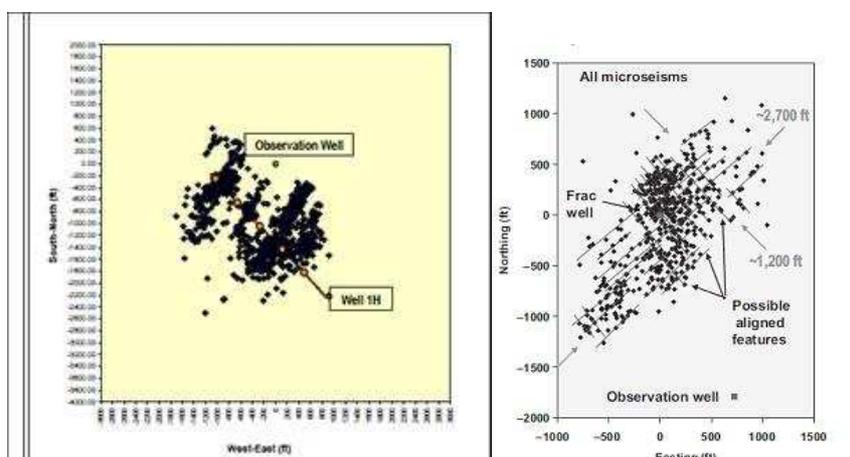


Figure 3.4: Enregistrements de micro-sismicité et leur interprétation (Ketter et al, Warpinski et al,)

La géométrie du réseau de fractures dépend des caractéristiques mécaniques de la roche environnante, de l'état de contrainte dans laquelle elle se trouve et du fluide utilisé. Compte tenu du fait que la pression d'injection est souvent proche de la valeur de la contrainte verticale, on peut créer des mini fractures horizontales dans des zones de faiblesse au niveau litage. Le volume injecté est très important et on peut considérer qu'on crée globalement une sorte de chambre dilatée (analogue à la chambre de vapeur développée pour la production thermique des huiles lourdes). Aux limites de cette zone en dilatation, on peut créer du cisaillement, ce qui va augmenter la dilatance sans fracturation hydraulique. On ne comprend pas encore comment les différents mécanismes jouent, mais une telle approche est envisagée par Dusseault et McLennan (Fig. 3.5). Le volume d'eau dégorgé représente entre 20 et 80% du volume injecté, il est certain que cela donne une idée du volume "dilaté" au fond.

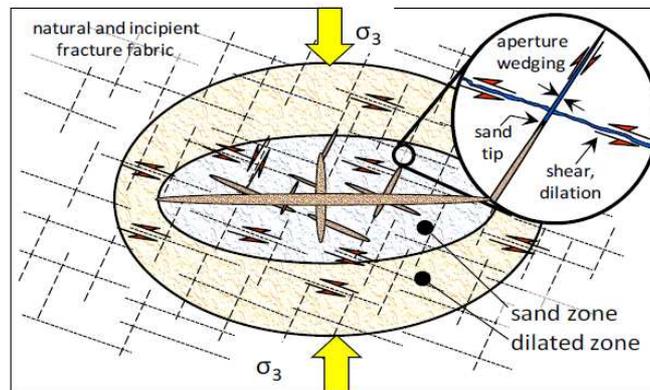


Figure 3.5: Mécanismes possibles lors d'une fracturation hydraulique dans les roches mères (Dusseault et McLennan, 2011)

3.3 PISTES DE RECHERCHE

La production des hydrocarbures de roches mères passe par un accroissement de la capacité des puits à drainer en sécurité² les formations compactes qui les renferment. A ce jour, la fracturation hydraulique apparaît comme la seule technique opérationnelle pour faire des roches mères une ressource économiquement exploitable. Cependant, la mise en œuvre de cette technique demeure mal maîtrisée en raison de l'hétérogénéité de ces formations souvent peu ou mal caractérisées. Il en résulte un succès très variable des opérations de fracturation, avec une double conséquence : un nombre d'opérations élevé d'une part, et un durcissement des conditions appliquées à la formation en termes de pression et propriétés de l'agent de fracturation, d'autre part. En résumé, par la réduction du nombre d'opérations et des volumes injectés, une meilleure maîtrise de la technique de fracturation hydraulique permettrait à la fois de minimiser l'empreinte environnementale des opérations et d'accroître la rentabilité économique des ressources de gaz de l'exploitation des roches. Par ailleurs, la recherche d'agents de fracturation alternatifs constitue une autre voie de progrès à explorer.

Le gain de fiabilité et sûreté des techniques de fracturation hydraulique des roches mères pourrait ainsi s'appuyer sur la stratégie de R&D suivante :

3.3.1 Compréhension et modélisation des mécanismes de fracturation

L'usage d'un modèle couplant mécanique et transport mis au point pour le cas spécifique de l'exploitation des roches mères doit être envisagé pour optimiser les conditions de fracturation et les propriétés du fluide de fracturation et de l'agent de soutènement. De nombreuses interrogations se posent en effet à ce jour, portant :

- sur les conditions opératoires :
 - le débit optimum d'injection : lent, rapide, pulsé? (KIWAY (Schlumberger), D'Huteau et al, 2011),
 - la nécessité ou non d'injecter du sable,
 - l'intérêt d'une eau avec réducteur de frottement,

² L'intégrité des puits représente un enjeu important de sécurité de l'exploitation des roches mères notamment pour ce qui concerne une cimentation et une complétion adaptées. Ce point est traité au paragraphe 4.3 du présent rapport.

- le transport et la distribution des agents de soutènement dans le réseau de fractures;
- l'évaluation quantitative de l'opération :
 - la caractérisation des zones traitées (dilatées), du cisaillement à la périphérie de la zone traitée,
 - la prédiction des fractures secondaires,
 - la prise en compte des hétérogénéités.

3.3.2 Optimisation des agents de fracturation

Sont inclus dans les agents de fracturation : le fluide porteur et ses additifs ainsi que l'agent de soutènement.

- amélioration des formulations existantes, i.e. des additifs du fluide de fracturation et de l'agent de soutènement. Par exemple : recherche de particules ultralégères et ultra-dures pour limiter l'usage des agents gélifiants.
- recherche et mise au point d'agents alternatifs, comme par exemple l'usage d'un fluide porteur moussant au lieu d'un fluide gélifié.
- recherche de matériaux intelligents présentant des capacités de prise in situ et issus d'une synthèse de matériaux éco-durables offrant des propriétés de perméabilité compatible avec les transferts de gaz (ex nano-tube de silicate) et permettant la maîtrise du transfert des autres phases non désirées (ex métaux).

3.3.3 Mise au point, validation, évaluation des procédés améliorés de fracturation

La validation, l'évaluation et la démonstration des procédés de fracturation réalisés suivant les conditions et au moyen des produits spécifiés plus haut nécessiteront des expérimentations à des échelles adaptées, échelle du bloc de roche, voire échelle d'un pilote de terrain afin de se rapprocher des conditions d'une opération en vraie grandeur.

3.4 REFERENCES

- [1] Alexander, T., Baihly, J., Boyer, C., Clark, B., Waters, G., Jochen, V., Le Calvez, J., Lewis, R., Miller, C., Thaeler, J. and Toelle, B., 2011, Shale gas revolution, Oilfield Review, 23, n°3
- [2] Arthur, J. et al, Hydraulic Fracturing Considerations for Natural Gas Wells of the Marcellus Shale, Presented at Ground Water Protection Council 2008 Annual Forum Cincinnati, Ohio, September 21-24, 2008
- [3] D'Huteau, E., Gillard, M., Miller, M., Pena, A., Johnson, J., Turner, M., Medvedev, O., Rhein, T. and Wilberg, D., 2011, Open channel fracturing, a fast track to production, Oilfield review, 23, n°3
- [4] Dusseault, M. and McLennan, 2010, Massive Multi-Stage Hydraulic Fracturing: Where are We? ARMA (American Rock Mechanics Association) e-Newsletter, Winter 2011.
- [5] Ketter, A, Daniels, JL, Heize, JR, Water, G., 2006, Afield study optimizing completion strategies for fracture initiation in Barnett Shale horizontal wells, SPE 103232
- [6] King, G., 2010, Thirty years of gas shale fracturing : what have we learned ?, SPE 133456
- [7] Warpinski, NR, Mayerhofer, MJ, Vincent, Cipolla, CL, Lolon, EP, 2008, Stimulating unconventional reservoirs maximizing network growth while optimizing fracture conductivity, SPE 114173
- [8] Mayerhofer, M.J., Lolon, E.P., Warpinski, N.R., Cipolla, C.L., Walser, D. and Rightmire, CM, 2010, What is stimulated reservoir volume ?, SPE119980.

4 Maîtrise de l'impact de la fracturation hydraulique

4.1 OBJECTIF

La mise en œuvre d'un système de surveillance pour assurer le suivi et le contrôle du procédé de fracturation hydraulique présente un double objectif :

1. suivre en temps réel la propagation des fractures créées dans la roche mère pour en optimiser l'exploitation tout en contrôlant l'extension;
2. dans une logique de maîtrise des risques, assurer le suivi du processus de manière à détecter, aussi tôt que possible, tout signal précurseur qui pourrait traduire une dérive ou un dysfonctionnement du système. Le dépouillement et l'interprétation des données recueillies permettent alors d'engager des actions correctives pour limiter les conséquences sur les personnes, les biens et l'environnement.

Dans le contexte des hydrocarbures de roche mère, le processus de surveillance doit être étendu à plusieurs domaines et milieux (fracturation du massif, migration de fluides, etc.). Il a vocation à intégrer une phase de caractérisation d'un « état zéro » visant à préciser l'état initial du milieu avant tous travaux de reconnaissance ou d'exploitation ; l'objectif est d'identifier de manière fiable la « part liée » aux actions anthropiques dans les caractéristiques du milieu qu'il convient de différencier du « bruit de fond » qui caractérise tout site.

4.2 METHODES DE SUIVI

On décomposera les méthodes de suivi en trois catégories principales :

- la surveillance du processus de fracturation hydraulique du massif notamment par microsismique,
- la surveillance de la qualité des aquifères,
- la surveillance de migration d'hydrocarbures en profondeur, sub-surface et surface.

4.2.1 Surveillance du processus de fracturation hydraulique

4.2.1.1 Attendus de la technique

L'objectif principal de cette surveillance est de fournir des informations précises sur le développement spatial et temporel des fractures induites par le procédé de fracturation hydraulique au sein du massif rocheux. Comme déjà mentionné au chapitre 3, la technique la plus utilisée actuellement est l'écoute microsismique en forage profond.

Cette technique, communément utilisée dans divers autres contextes d'exploitation (géothermie, mines, stockages) ou de surveillance passive (mines abandonnées, volcanologie), consiste à placer, à une certaine distance des foyers sismiques, divers capteurs géophysiques (géophones, accéléromètres) visant à détecter des vibrations, notamment de très faible amplitude. Lorsque le réseau d'écoute est convenablement dimensionné, l'analyse des signaux enregistrés (amplitude, fréquence, polarité des premières arrivées, temps d'arrivée et forme des ondes...) permet de localiser les foyers où a lieu la fracturation des roches (ouverture ou propagation des fissures).

4.2.1.2 Pistes de réflexion

Si la technique en tant que telle est bien maîtrisée, son application au contexte des hydrocarbures de roches mères mérite d'être affinée. Cela concerne notamment la notion de précision attendue en terme de localisation des événements. Cette précision va en effet influencer grandement sur le dimensionnement du réseau requis et donc, de manière directe, sur les coûts associés.

La précision de localisation des événements dépend étroitement de la géométrie du réseau (nombre de sondes et répartition dans l'espace) et de la connaissance des conditions de propagation des ondes dans le milieu (variations géologiques, modifications progressives du milieu liées notamment au processus de fracturation du massif, etc.).

En fonction de la précision attendue et des contextes géologiques et d'exploitation, il sera donc fondamental de préciser, en s'appuyant sur des simulations numériques, les principes de dimensionnement des réseaux (nombre, positionnement et caractéristiques des sondes) pour garantir l'atteinte des objectifs fixés (confiner les fractures induites au sein de la roche mère et suffisamment éloignées de discontinuités pré-identifiées).

Les résultats de simulation serviront à une réflexion sur l'analyse « signal/bruit » permettant également d'évaluer le risque qu'une partie non négligeable du processus de fracturation des roches (notamment la propagation des fissures en champ éloigné) ne soit pas détectable à l'aide de la technique de surveillance micro-sismique.

Divers développements technologiques sont également à envisager (chaînes d'écoute amovibles permettant une progression avec l'avancement des travaux, conditionnement du matériel à un environnement profond et potentiellement agressif).

Une autre voie possible de recherche pour améliorer la résolution de l'imagerie du sous-sol à partir de la sismique de surface et contribuer ainsi à détecter de façon précoce la présence de fractures et anticiper ainsi l'occurrence de fuites est de combiner des méthodes sismiques de surface avec d'autres acquisitions sismiques comme la sismique de puits par exemple. Ce sont là des voies de recherche encore à un stade amont qu'il convient de développer pour en améliorer les performances. On peut imaginer de même que la combinaison d'une imagerie de surface avec des acquisitions micro-sismiques de même pourrait améliorer la qualité de l'imagerie du sous-sol.

Nota : on gardera en mémoire que si les microséismes générés, à l'échelle locale, par la propagation de fissures résultant du procédé d'injection sont sans effet sur les terrains de surface (magnitudes généralement négligeables), le cumul de petites perturbations du massif induites par le procédé peut induire une redistribution des contraintes susceptibles de générer une activité de « sismicité induite ». Plusieurs cas sont notamment recensés au Texas, en Arkansas et récemment (mai 2011) dans la région de Blackpool (Grande-Bretagne). La magnitude de ce type de secousses est très variable et, si une large majorité s'avère inférieure à 2, quelques cas font état de valeurs supérieures (2,3 à Blackpool et jusqu'à 4,0 en Arkansas).

L'évaluation de l'aléa sismique, à savoir la probabilité d'occurrence de sismicité induite et, à plus forte raison, des caractéristiques associées (lieu et période de survenue, magnitude, fréquence et vitesse ondulatoires, possibles effets de site) est une opération difficile du fait des nombreuses incertitudes pesant sur les caractéristiques des massifs rocheux et leur comportements sous l'effet de la fracturation hydraulique. Elle exige notamment une bonne connaissance en 3D des conditions géologiques et tectoniques du secteur d'exploitation. L'exploitation d'un réseau de surveillance spécifiquement dédié à la détection et à la caractérisation de tels phénomènes et le développement d'outils numériques capables de prendre en compte le caractère dynamique des événements constituent des pistes prometteuses de recherche et développement.

4.2.2 Surveillance de la qualité des aquifères

4.2.2.1 Attendus de la technique

Les différents aquifères présents au sein du recouvrement constituent généralement la cible la plus sensible en termes d'enjeu environnemental (en lien avec le Chapitre 6). A ce titre, on veillera à différencier les aquifères profonds des aquifères superficiels. Leurs caractéristiques et leur potentiel de valorisation diffèrent en effet considérablement.

Les aquifères profonds sont les premiers exposés en cas de migration non maîtrisés de fluides au travers des terrains (discontinuités, fracturation). Ils peuvent donc constituer une piste intéressante en tant que déclencheur d'alarme anticipée. Ils représentent par ailleurs un enjeu moindre en terme de valorisation potentielle de la ressource (eau souvent salée et impropre à la consommation).

Les aquifères superficiels, à l'inverse, sont le siège de la très grande majorité des captages destinés aux activités humaines (alimentation en eau potable, irrigation, industrie, etc.). Ils sont toutefois souvent très éloignés des roches mères. En revanche, ils sont traversés par les forages d'exploitation comme pour les aquifères profonds.

L'objectif de la surveillance des aquifères consiste à détecter tout indice de fuites ou de migration de fluides susceptibles de porter atteinte à la qualité des aquifères présents au sein du recouvrement.

4.2.2.2 Pistes de réflexion

En fonction de la nature des aquifères (profonds/superficiels), une procédure « standardisée » devra être élaborée pour assurer le suivi des caractéristiques environnementales.

Ceci implique notamment le développement d'un protocole d'expérimentation et d'analyse ainsi que l'identification des éléments clés (organiques, minéraux, éléments traces, isotopes...) dont l'évolution est susceptible de renseigner rapidement et de manière fiable un impact sur le comportement hydrochimique d'un aquifère. Ces éléments doivent permettre à la fois le suivi de l'intrusion possible des additifs chimiques

mais également des substances potentiellement mises en solution du fait du processus de fracturation du massif.

Pour ce faire, des développements technologiques sont à envisager pour permettre l'analyse d'éléments physico-chimiques prélevés à grande profondeur.

Enfin, un protocole de suivi (nombre et répartition géographique des piézomètres, fréquence des mesures) devra être défini, pour ce qui concerne l'établissement d'un « état zéro » mais également pour les phases d'exploitation et de post-exploitation.

4.2.3 Surveillance de la migration des hydrocarbures de roches mères

4.2.3.1 Attendus de la technique

L'objectif consiste à détecter la possible migration des hydrocarbures au travers des terrains de recouvrement, dans une logique sensiblement similaire à ce qui est mis en œuvre à l'aplomb d'exploitations minières, de décharges ou de stockages souterrains. Cette surveillance peut être opérée soit depuis la surface du sol afin d'alerter les enjeux situés à proximité immédiate d'un possible danger, soit conduite à l'aide de forages profonds qui permettent de détecter le phénomène redouté bien avant qu'il ne se manifeste en surface, permettant ainsi la mise en œuvre de mesures correctives.

L'identification des zones à surveiller doit naturellement tenir compte de l'implantation des zones d'exploitation mais également des caractéristiques géologiques des terrains de recouvrement (failles, pendages, couches perméables, etc.).

4.2.3.2 Pistes de réflexion

L'identification des zones à surveiller doit naturellement tenir compte de l'implantation des zones d'exploitation mais également des caractéristiques géologiques et pétrophysiques des terrains de recouvrement (failles, pendages, couches perméables, etc.). La technologie doit être adaptée aux contraintes inhérentes aux profondeurs de prélèvement (pompage, forages noyés).

Pour ce qui concerne les mesures réalisées en surface, le recours à des technologies désormais développées pour la surveillance de la qualité de l'air, notamment des techniques optiques, in situ intégrant une dimension spatiale (radar, lidar, caméra infra-rouge...) devra être étudié ; ces dernières seront à tester et éventuellement à améliorer/adapter à des fins opérationnelles.

4.3 PISTES DE MAITRISE DU RISQUE ET DE REMEDIATION

4.3.1 Objectifs

L'objet de tout processus d'analyse de risque consiste à identifier des scénarios de risque puis à les caractériser (probabilité d'occurrence/conséquences) afin de proposer des mesures de maîtrise des risques (MMR) destinées à empêcher les dits scénarios de se dérouler ou, pour le moins, à réduire leur probabilité d'occurrence et/ou leurs potentielles conséquences.

Dans le domaine de l'exploitation des hydrocarbures de roches-mères, si les références sont relativement nombreuses sur l'identification des scénarios (nettement plus rarement leur caractérisation), très peu de travaux ont porté sur les mesures de maîtrise du risque. A ce titre, un référentiel standardisé d'analyse et de maîtrise du risque doit être élaboré, en intégrant les différentes parties prenantes impliquées dans le sujet.

Pour ce qui concerne plus spécifiquement les mesures de maîtrise du risque, on différencie classiquement :

- les barrières de prévention qui ont pour vocation d'empêcher la survenue de l'évènement redouté (mesures préventives) ;
- les barrières de protection qui s'attachent à limiter les conséquences de la survenue de cet évènement redouté sur les différents enjeux pré-identifiés (homme, environnement, biens matériels) (mesures correctives).

4.3.2 Piste de réflexion

4.3.2.1 Barrières de prévention

S'agissant des mesures préventives, une réflexion de fond mérite d'être menée afin d'identifier les critères de choix (ou, à l'inverse, d'exclusion) d'un site. Cette démarche devra notamment s'appuyer sur un retour d'expérience détaillé des situations de dysfonctionnement mises en évidence en Amérique du Nord. Parmi les pistes à privilégier, la présence d'enjeux sensibles en surface, de configurations géologiques ou

hydrogéologiques complexes (karsts, failles, etc.) ou l'interaction avec d'autres usages voisins du sous-sol constituent des éléments défavorables en termes de contexte.

Une autre réflexion de fond mérite également d'être entreprise sur la notion d'optimisation de la conception de l'exploitation en fonction du contexte. Ceci touche notamment :

- à la conception des forages (cimentation, complétion) assurant leur intégrité sur le court et le long terme en prenant en compte l'environnement hydrogéologique,
- à l'orientation et la profondeur des forages afin d'intégrer la direction des contraintes naturelles principales,
- à l'implantation des carreaux d'exploitation pour limiter l'impact sur l'usage des terrains de surface,
- au positionnement des points de captage pour limiter les impacts sur les nappes.

4.3.2.2 Barrières de protection

Les rares mesures correctives décrites dans la littérature concernent le traitement des forages en cas de fuites avérées. Une re-cimentation de l'ouvrage, voire un changement de cuvelage peuvent être envisagés en fonction des contextes géologiques et d'exploitation.

On peut également citer l'optimisation des paramètres d'exploitation (dimension, profondeur et orientation des forages, pression d'injection, nombre de cycles de fracturation) pour contraindre au mieux le processus et stopper les dérives détectées par la surveillance.

Des recherches sur les mesures les plus radicales (pompages, dépollution, traitement de sols pollués...) devront également être considérées pour disposer d'une panoplie de bonnes pratiques disponibles en cas de défaillance du processus d'extraction.

4.4 REFERENCES

- [9] Contrucci I, Klein E, Bigarre P, Lizeur A., Lomax A., Bennani, 2010. Management of Post-mining Large-scale Ground Failures: Blast Swarms Field Experiment for Calibration of Permanent Microseismic Early-warning Systems, *Pure Appl. Geophys.*, 167(1-2), 43-62.
- [10] Contrucci I, Pacchiani F., Klein E., 2009. Absolute versus relative event location calibrated by induced blasts for real-time microseismic monitoring of post-mining ground failures. AGU, 14-18 décembre 2009, San Francisco, USA. *Eos Transactions AGU*, vol. 90, n° 52, Fall Meeting Supplement, abstract S32B-06.
- [11] Contrucci, I., Lomax, A., Lizeur, A. et Klein, E., 2007. «Le monitoring microsismique pour évaluer l'intégrité d'un stockage de CO₂», Séminaire Captage et Stockage du CO₂, ANR CO₂, PAU, 12 et 13 Décembre 2007.
- [12] COGCC, 2004. Colorado Oil and Gas Conservation Commission. Order no. IV-276
- [13] 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.
- [14] Hayes, T., 2009. Sampling and analysis water of water streams associated with the development of Marcellus Shale gas, final report.
- [15] Ketter, A, Daniels, JL, Heize, JR, Water, G., 2006. A field study optimizing completion strategies for fracture initiation in Barnett Shale horizontal wells, SPE 103232.
- [16] 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.
- [17] Pokryszka Z., Charmoille A. et 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
- [18] Pokryszka, Z., Tauziède, 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.
- [19] Veil, J.A., 2010. Water management technologies used by Marcellus Shale gas producers.

5 Alternatives à la fracturation hydraulique

L'amélioration des technologies de production existantes de même que la recherche de techniques alternatives suscitent aujourd'hui un fort intérêt de la communauté scientifique comme en témoigne le nombre d'articles scientifiques en forte croissance depuis 2007 (Figure 5.1) provenant du secteur académique sur cette thématique.

La fracturation hydraulique est aujourd'hui la seule technique utilisée pour produire les hydrocarbures de roches mères par la stimulation de la production qui en résulte. L'injection d'un fluide incompressible représente en effet un optimum pour apporter à (longue) distance l'énergie nécessaire pour fracturer la roche mère et produire des hydrocarbures.

Cependant, compte tenu des difficultés d'acceptation de cette technologie (bilan en eau, maîtrise des risques), il convient d'identifier quelles pourraient être les alternatives et d'en déterminer la faisabilité technico-économique.

De nature exploratoire, ce chapitre vise dans un objectif long terme à tracer les grandes lignes d'un programme de recherche amont et à en évaluer la faisabilité.

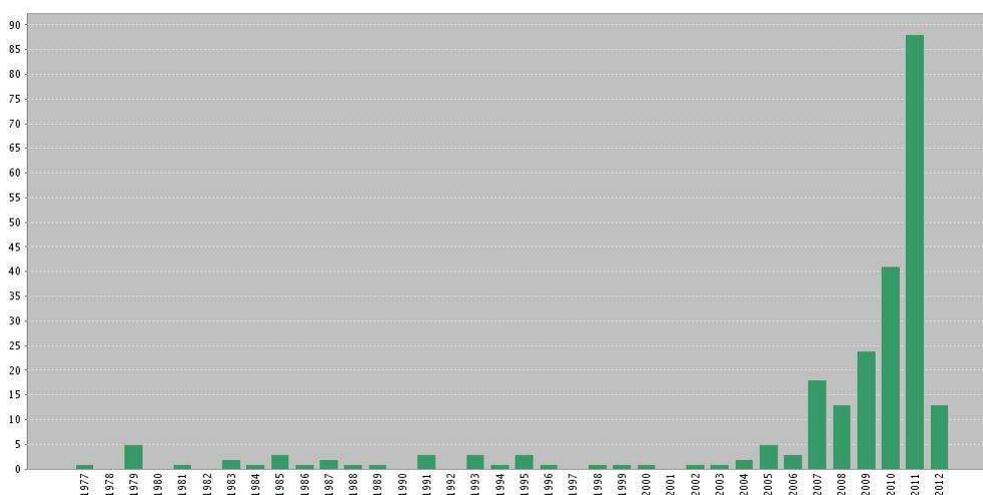


Figure 5.1 : Nombre annuel de publications scientifiques ayant pour sujet « shale gas » ou « gas shale » dans le catalogue « Web of Science » entre 1979 et 2011. Leur nombre augmente fortement depuis 2007 (données au 20 Mars 2012).

5.1 CADRE PHYSIQUE ET VOIES ALTERNATIVES

L'exploitation des roches mères nécessite des technologies qui permettent l'augmentation de la vitesse de circulation et du débit d'un fluide dans une roche peu perméable. En première approche, la circulation d'un fluide monophasique dans un milieu poreux est décrite par la loi de Darcy, qui indique que le débit du fluide est proportionnel à un gradient de pression ΔP et à un indice de productivité IP qui dépend de la nature de la roche et du fluide. Par définition, $IP = k / \mu$ où k (m^2) est la perméabilité intrinsèque de la roche et μ (Pa.s) est la viscosité du fluide.

La technologie actuelle de fracturation hydraulique vise à augmenter le paramètre IP de plusieurs ordres de grandeur en créant, par injection d'eau, des fissures, chemins préférentiels de circulation dans la roche par des injections de fluides, généralement de l'eau, sous pression.

Des techniques alternatives, actuellement à l'étude, visent à augmenter la valeur de l' IP par l'augmentation de k sans recourir à l'injection de quantités importantes de fluide. Cela peut être réalisé en créant de la porosité dans le milieu, soit sous forme d'une microfissuration (effet de chauffage), soit par expulsion de l'eau qu'il contient, par déshydratation des argiles ou en développant des techniques nouvelles de fissuration in-situ par exemple en utilisant des courants électriques.

Par ailleurs, on peut envisager également de favoriser la transformation de la matière organique présente par un apport de chaleur facilitant ainsi la production de gaz.

5.2 AUGMENTER LA PERMEABILITE DE LA ROCHE SANS FRACTURATION PREALABLE PAR EFFET THERMIQUE

5.2.1 Chauffer en profondeur est-ce possible ?

Les procédés de chauffage de l'espace souterrain existent et ont déjà été utilisés par l'industrie pétrolière pour diverses applications en particulier pour augmenter les taux de récupération des huiles et pour augmenter la maturation de la matière organique. Il s'agit de procédés utilisant soit la vapeur (sans fracturation) dans les milieux poreux ou utilisant des chauffages électriques dans les cas moins favorables rencontrés dans les roches mères.

Ces procédés (voir Figures 5.2 et 5.3) pourraient être adaptés aux cas des gaz non conventionnels. Ils pourraient en outre être associés à des barrières temporaires d'isolation par réfrigération qui offre des solutions techniques possibles pour une exploitation contrôlée des gaz non conventionnels sans fracturation hydraulique.

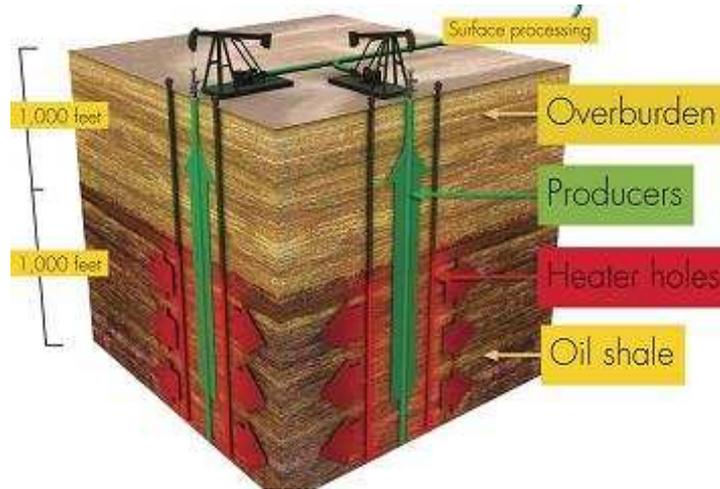


Figure 5.2: schéma de la structure de chauffage dans le cadre du projet Shell Mahogany Research Project

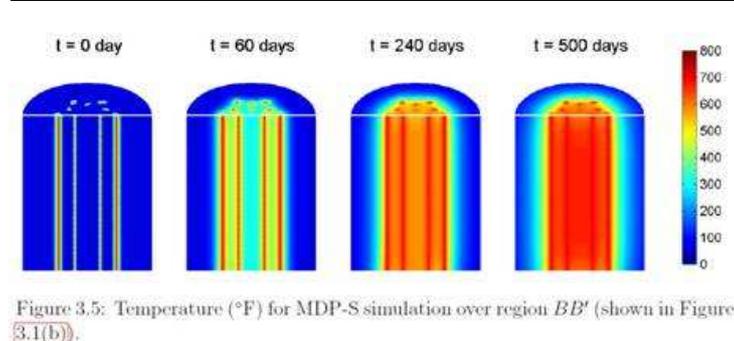
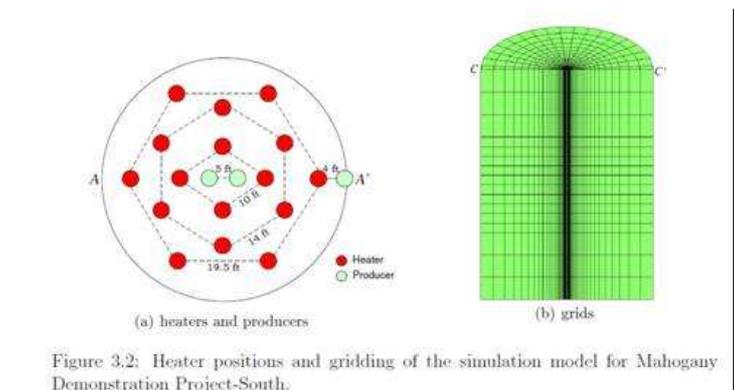


Figure 5.3: extrait de deux figures de modélisation de la structure chauffée dans le cadre du projet Shell 'Mahogany Research Project' donnant les dimensions et l'évolution des températures au cours du temps (d'après la thèse "Chemical reaction modelling in a subsurface flow simulator with application to in situ upgrading and CO2 mineralization", Yaqing Fa, May 2010, Phd, Stanford University)

La compagnie American Shale Oil (AMSO) a développé, quant à elle, une technologie d'injection de vapeur afin de diminuer la viscosité d'huiles lourdes (Figure 5.4), technologie qui pourrait être aussi utilisée pour chauffer l'espace souterrain.

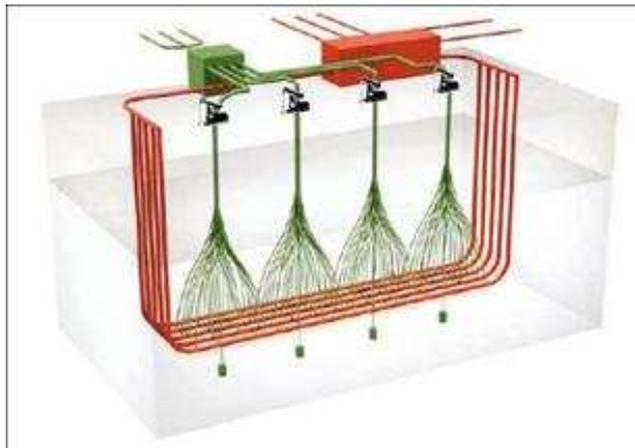


Figure 5.4: Schéma d'injection de vapeur proposé par la compagnie American Shale Oil

5.2.2 Effets du chauffage

5.2.2.1 Modification minéralogique

Le premier effet escompté est la **modification minéralogique induite**. La déshydratation des argiles peut en effet produire jusqu'à 150 litres d'eau par m³ d'argile en place (Vidal et Dubacq, 2009) avec deux effets possibles (voir Figures 5.5 et 5.6):

- l'espace libéré par l'eau augmente la porosité et donc la perméabilité (la phase solide se contracte jusque 25%, tandis que le volume du fluide augmente de 15%),
- l'expulsion de l'eau aide le transport de gaz (effet lubrifiant), qui dépend de la capacité de chacun des fluides à mouiller les minéraux. Ce concept séduisant de couplage déshydratation des argiles – expulsion d'hydrocarbure relève à ce jour du domaine de la recherche académique. Mais force est de constater que c'est un processus majoritairement à l'œuvre dans la nature dans les roches argileuses et carbonées soumises à augmentation de température lors de la diagenèse ou du métamorphisme alors que la pression de confinement augmente,
- la dilatation thermique de la roche et la modification de la perméabilité qui en résulte.

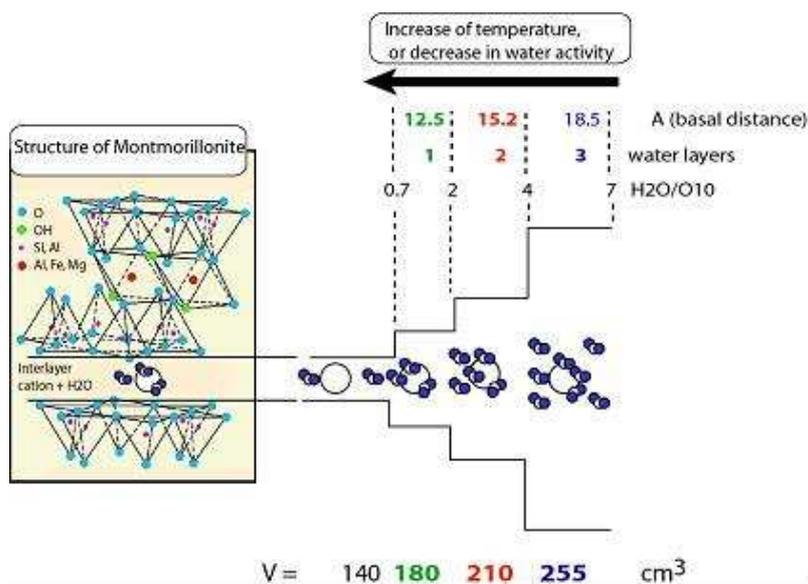


Figure 5.4 : Volume des argiles en fonction de leur état d'hydratation.
(La déshydratation se traduit par une forte diminution de volume de

(l'ordre de 25% et une expulsion d'eau de l'ordre de 15% du volume initial)

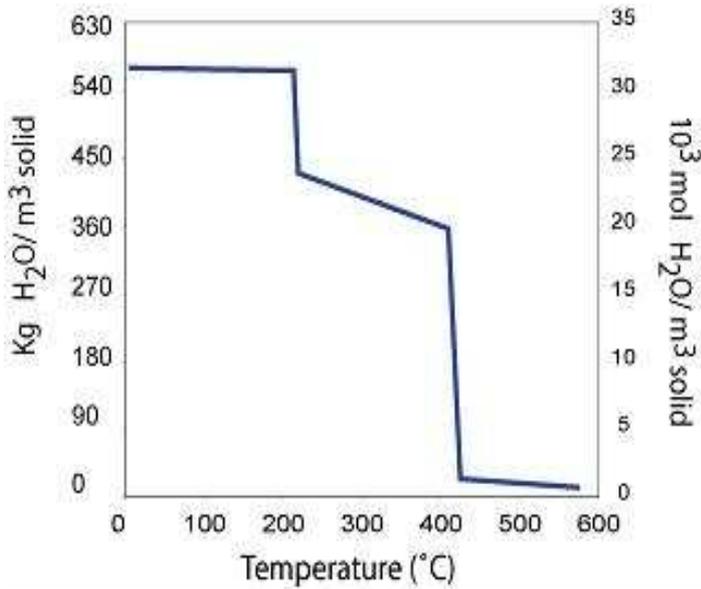


Figure 5.5 : Modélisation des étapes de déshydratation pour une argile de type beidellite en fonction de la Température pour des pressions variant de 1 à 1300 bars (géotherme moyen) (Vidal, 2009)

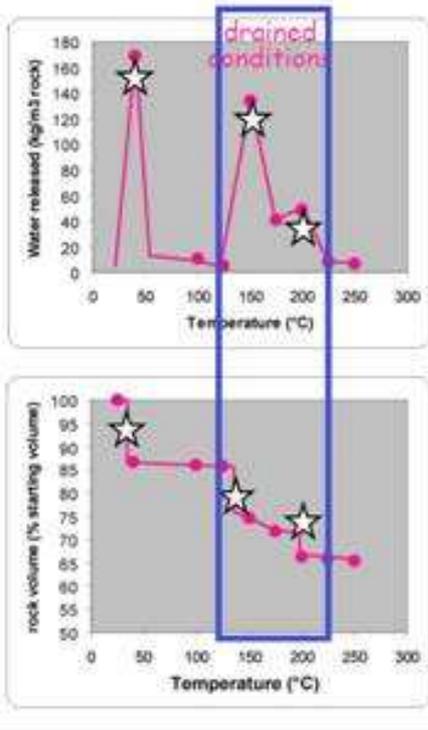


Figure 5.6 : Modélisation des conditions de variation de volume et de production de fluide dans un système drainé pour une argile de type beidellite en fonction de la Température (Vidal, 2009)

5.2.2.2 Décomposition du kérogène

Le deuxième effet escompté est la **décomposition chimique du kérogène ou d'hydrocarbures lourds en hydrocarbures légers**. L'augmentation de température permet en effet de dégrader certaines molécules de kérogène, dans le cas de maturation incomplète, et favoriser la transformation d'hydrocarbures liquides et visqueux en composés gazeux ou légers. Ces techniques sont surtout applicables dans le cas des huiles de schiste ou des roches peu matures où des kérogènes sont encore présents. Les fluides et gaz produits augmentent les surpressions locales et permettent d'utiliser la microfissuration existante ou d'en créer une nouvelle (Jin *et al.*, 2010 ; Kobchenko *et al.*, 2011). L'augmentation de perméabilité s'effectue par microfissuration induite de la roche. Ici l'enjeu est de mieux comprendre comment un endommagement diffus peut devenir connecté pour créer des chemins préférentiels d'écoulement. Ceci peut être réalisé par de l'imagerie in-situ de carottes de shales durant la production de gaz (Figure 5.7).

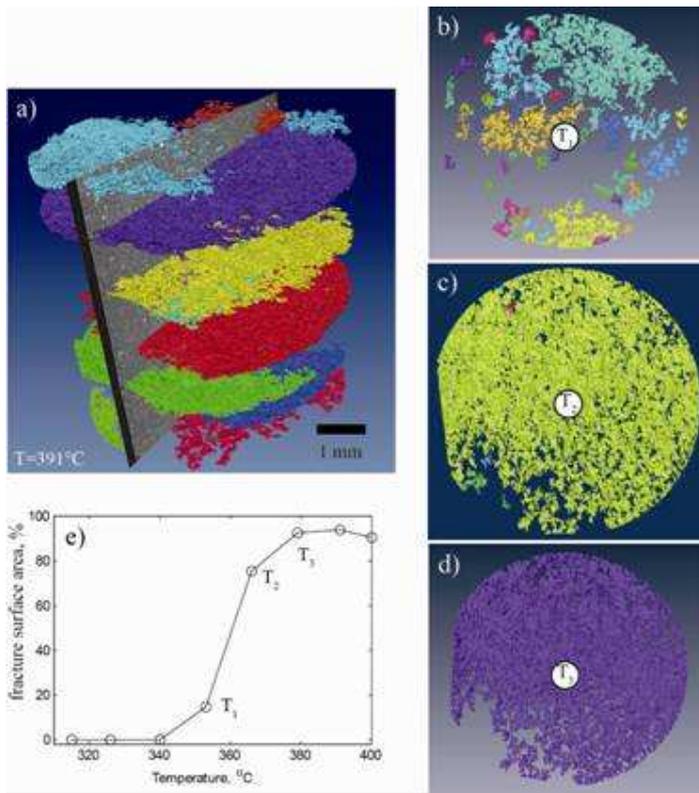


Figure 5.7: Images par tomographie synchrotron d'une shale durant un traitement thermique produisant une microfissuration. a) Formation de plusieurs plans de fracturation horizontaux. b-d) Suivi temporel de la formation d'un chemin percolant. e) Surface d'une fracture au cours du chauffage (Kobchenko et al. 2011).

Le troisième effet escompté est **l'évolution de la structure carbonée du kérogène**. L'augmentation de température peut, en effet, avoir comme effet d'ouvrir la porosité des micro- et nano-structures de carbone constituant le kérogène (Beysac et al 2002, 2003) passant ainsi de textures en oignon fermées à des textures planaires ouvertes pouvant libérer les gaz inclus (Figure 5.8).

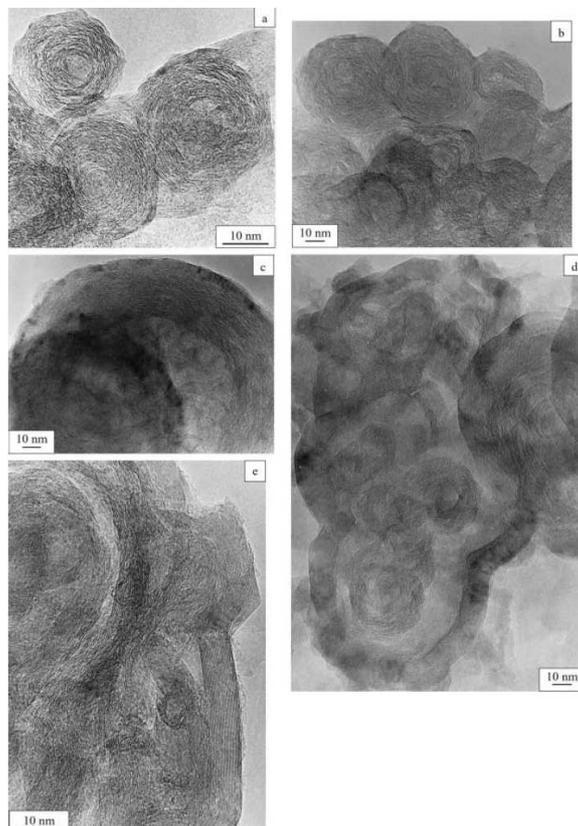


Figure 5.8 : Images en microscopie électronique à très haute résolution montrant la déstructuration progressive des structures en oignon(a) du kérogène avec l'augmentation progressive de la température (~300-500°C) (de b à e) dans un milieu confiné sous pression (Beysac et al. 2002)

5.2.3 Verrous scientifiques

Les verrous scientifiques et techniques à lever sont considérables. Ils dépendent certainement encore plus que dans les autres technologies de la caractérisation des propriétés du milieu dont la variété a été décrite au chapitre 2. Ils nécessitent un effort de recherche conséquent portant notamment sur :

- La compréhension des processus à petite échelle (maturation, déshydratation, mécanique) qui nécessite une caractérisation fine des matériaux et de leur évolution. Des techniques d'imagerie in-situ pendant la microfissuration devront être développées, par exemple sur des lignes de lumières de synchrotrons ou dans des microscopes électroniques. A cela s'ajoutera des besoins de modélisations couplées triphasiques (eau, gaz, roche) à petite échelle. Ces expériences de laboratoire sous confinement devront aussi suivre les comportements mécaniques et analyser en continu les fluides produits.
- La modélisation des processus et analyse des paramètres de contrôle (ex. Figure 5.9) : circulation dans des milieux à double porosité (fissures et microporosité des shales), couplage entre circulation des fluides, processus chimiques et fissuration. Cela peut inclure l'effet d'ajouts d'additifs chimiques (surfactants, vapeur ou bactéries) pour modifier localement la mobilité du fluide.

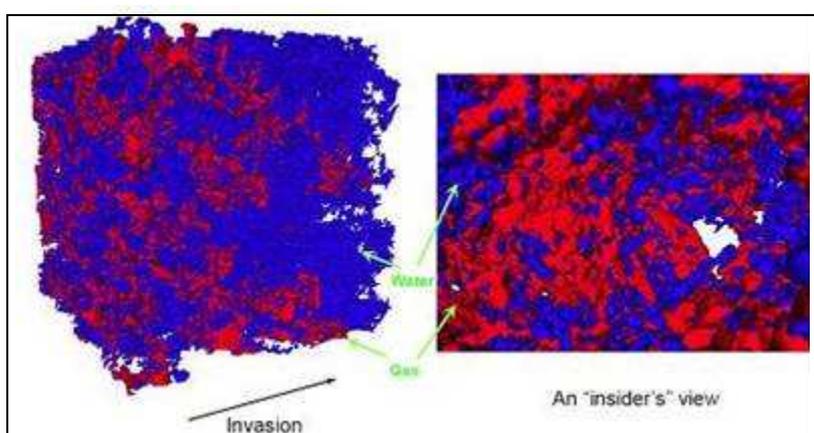


Figure 5.9: Modélisation triphasique de l'équilibre capillaire dans un black shale (Silin, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010)

- La compréhension des comportements mécaniques et physiques à petite, moyenne et grande échelle. Il s'agit ici de développer des modèles conceptuels de nucléation et croissance de réseaux de fissures jusqu'à ce qu'un chemin connecté se développe. Sont ici couplées des processus de transport (température, fluides), de déformation (ouverture/fermeture de fissures au cours du temps). La dynamique temporelle s'avèrera cruciale car une même fissure peut s'ouvrir et se refermer plusieurs fois au cours du temps,
- L'expérimentation sur un site pilote, avec monitoring amont pour avoir l'état zéro avant toute action humaine, puis suivi au cours du temps,
- La modélisation des conditions industrielles, du bilan carbone total et du modèle économique à l'échelle du réservoir, en prenant en compte les enjeux environnementaux,
- Les enjeux environnementaux qui, à l'instar des autres techniques d'exploitation d'hydrocarbures, concernent le traitement des effluents utilisés pour la construction des puits et la réduction des fuites de gaz dans les zones de productions soit vers l'air soit vers les aquifères souterrains. Ce dernier enjeu relève d'une priorité (Kelvin et al. 2011) maintenant que des mesures montrent des contaminations d'aquifères (Osborn, 2011, avec une réponse de Schon, 2011) et que le débat est lancé concernant le volume des fuites de méthane dans l'atmosphère (Tollefson, 2012).

5.2.4 Verrous économiques

Un des enjeux sur des technologies utilisant un chauffage basé sur l'électricité est la rentabilité économique fortement dépendante du coût de l'électricité consommée et de l'efficacité de la production de gaz. Fa (2010)

a effectué une analyse comparée du bilan énergétique en considérant un taux de récupération des huiles de 90% (voir Fig. 5.2, 5.3 et 5.10) :

Table 3.9: Energy ratios for the sensitivity study cases (at 90% recovery efficiency)

Pattern	Heater Temperature	Heater Spacing	Thermal Energy Input (Btu)	Chemical Energy Output (Btu)	E_{out}/E_{in}
Hexagon	700 °F	8 ft	3.346E+08	2.296E+09	6.9
Hexagon	650 °F	8 ft	3.345E+08	2.296E+09	6.9
Hexagon	600 °F	8 ft	3.367E+08	2.296E+09	6.8
Square	700 °F	13 ft	3.396E+08	2.283E+09	6.7
Triangle	700 °F	20 ft	3.646E+08	2.261E+09	6.2
Hexagon	700 °F	10 ft	5.175E+08	3.480E+09	6.7
Hexagon	700 °F	12 ft	7.560E+08	4.914E+09	6.5

Figure 5.10: modélisation du bilan énergétique du projet Shell Mahogany Research (Figure 5.2, 5.3)

Cette analyse qui n'est pas directement applicable aux cas des gaz non conventionnels, démontre néanmoins le caractère crucial de l'évaluation des bilans en énergie et des coûts associés. Un taux de récupération de 90% est en effet excessivement optimiste. Dans la réalité, il est plus probable que les taux, en cas de succès, soient plus proches de 30% diminuant d'autant la viabilité économique du projet. C'est un point déterminant à évaluer pour lequel nous pouvons suggérer l'idée d'utiliser les énergies non utilisées des ENR (énergies renouvelables) ou du nucléaire aux coûts très bas puisque perdus, en permettant ainsi leur valorisation par récupération des gaz non conventionnel et le stockage de la chaleur.

5.3 AUGMENTER LA PERMEABILITE DE LA ROCHE PAR DES METHODES DE FRACTURATION N'UTILISANT PAS L'EAU

5.3.1 Electro-fracturation

L'électro-fracturation est un terme qui englobe différentes techniques d'utilisation de l'électricité pour l'exploitation pétrolière:

- Utilisation de flux électriques pour compléter la maturation du kérogène,
- Utilisation de flux électriques pour diminuer la viscosité des pétroles lourds,
- Utilisation de chocs électriques pour aboutir à des fracturations.

Par ces techniques, l'amélioration de la perméabilité de la roche est obtenue par une série de trains d'ondes acoustiques. Ces trains d'ondes, transmis à la roche par un fluide (typiquement de l'eau), sont générés à partir de décharges électriques délivrées par un dispositif à arc (Chen, 2010, Figures 5.11 et 5.12). Cette technique a en particulier fait l'objet de deux brevets déposés par Total en mars 2011.

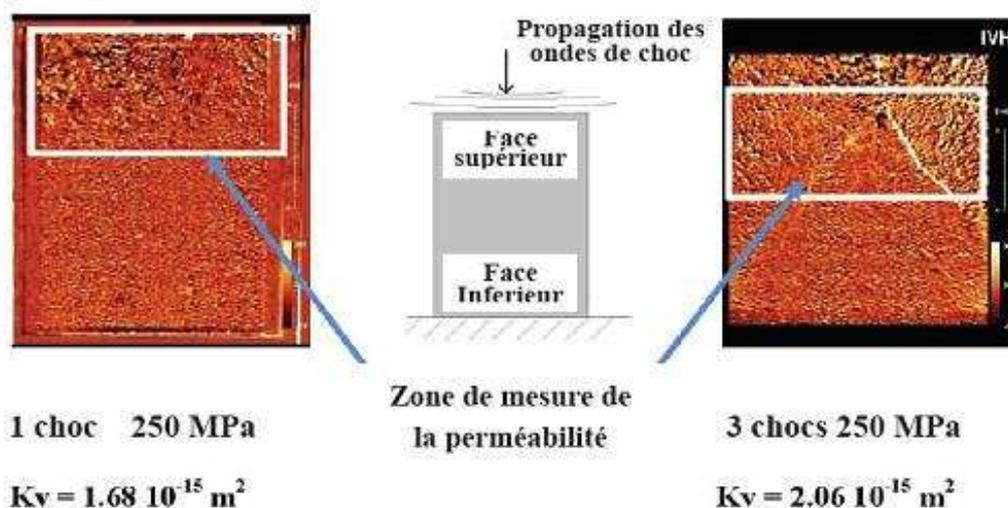


Figure 5.11: Expérience de fissuration d'une roche sous l'effet d'un courant électrique (Chen, 2010)

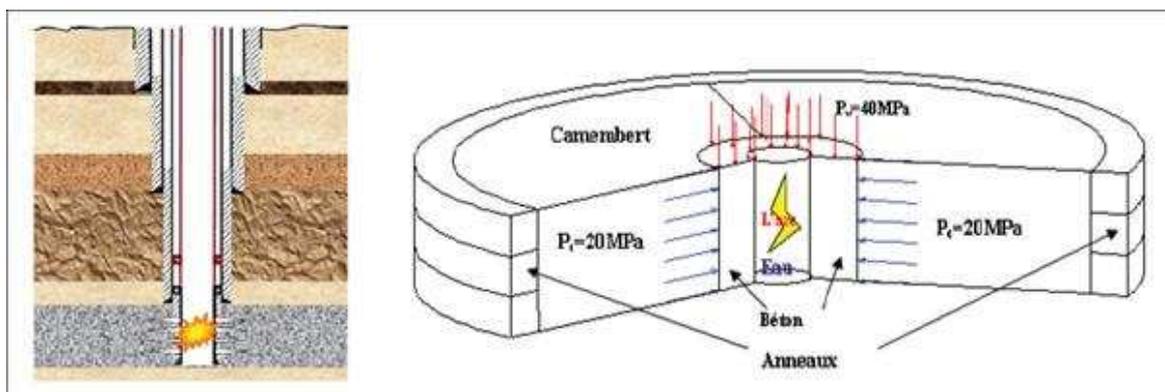


Figure 5.12: Application des chocs électriques à un puits pétrolier et expérience réalisée par Chen (2010).

Cependant, la gestion de la sécurité en surface (fortes tensions électriques avoisinant des gaz inflammables) nécessiterait des dispositions particulières pour ces techniques dont il apparaît en tout état de cause qu'elles ne pourraient aboutir à des résultats opérationnellement utilisables avant une dizaine d'années.

5.3.2 Par injection d'un fluide de fracturation et de mobilisation des hydrocarbures

Il s'agit des techniques ayant recours à l'injection de solvants (GPL, propane, CO_2). Par exemple, l'injection du CO_2 qui a la propriété de s'adsorber plus facilement sur les surfaces minérales, permet un 'relargage' des hydrocarbures. Ainsi Chevron a utilisé le procédé CRUSH, couplé avec de la fracturation hydraulique, en injectant du CO_2 supercritique, chauffé, qui permettait une augmentation de la solubilisation d'hydrocarbures lourds. Un autre exemple est l'utilisation du propane. Ainsi la compagnie GASFRAC au Canada a développé une technique de fracturation au propane, utilisable à l'échelle d'un pilote.

Dans le cas de la fracturation au propane, à l'instar de la fracturation par injection d'eau, il s'agit de générer des fissures au sein de la roche-mère et de les maintenir ouvertes à l'aide de sable et/ou de billes céramiques (Figure 5.13 ci-dessous).

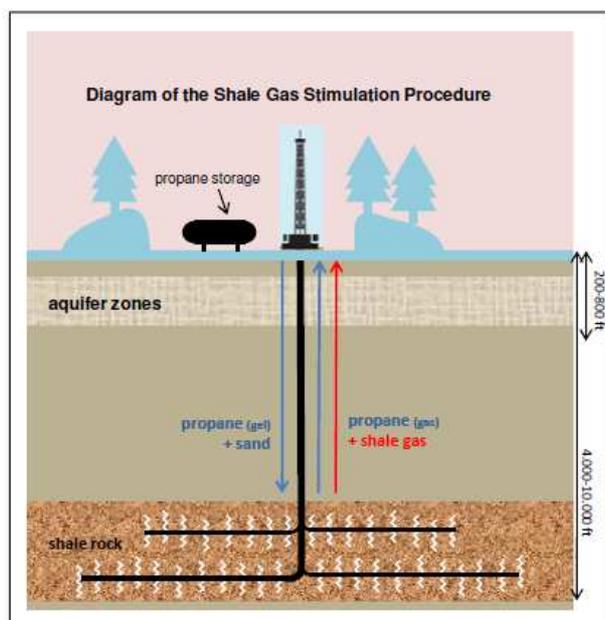


Figure 5.13 : un exemple schématique d'une exploitation utilisant le propane comme fluide de fracturation.

Le point-clé de la technologie a été de déterminer l'agent chimique capable de gélifier le propane. On utilise un ester de phosphate, en association avec un autre additif destiné à casser ultérieurement les chaînes moléculaires à l'origine de la phase gélifiée. Par ailleurs, aucun biocide n'est nécessaire contrairement à ce qui se passe dans le cas d'une fracturation à l'eau.

Parmi les autres différences avec la fracturation à l'eau, on retiendra principalement les **avantages** suivants:

- pas d'utilisation d'eau,

- une tension de surface, ainsi qu'une viscosité réduite, ce qui confère des taux élevés de récupération du gaz en place (meilleure pénétration du fluide et évacuation facilitée par le passage en phase gazeuse du propane),
- des volumes de propane réduits (typiquement 800 m³), notamment si l'on considère que la récupération du propane injecté est quasi complète,
- des temps de « clean-up » réduits (~2 jours, au lieu de 5 dans le cas d'une fracturation à l'eau), ce qui réduit la perte de gaz (« venting » et/ou « flaring »).

Mais aussi les **inconvéniens** suivants :

- il s'agit, malgré l'absence d'eau, d'une fracturation hydraulique au sens d'injection d'un fluide sous pression,
- l'inflammabilité du propane, allié au fait que ce dernier est plus lourd que l'air, ce qui retarde sa dispersion en cas de fuites en surface.

En résumé, du point de vue de l'efficacité de récupération des gaz en place, la méthode présente nombre d'avantages au regard des possibilités de la fracturation hydraulique à l'eau. Cependant, les problèmes liés à la **sûreté** des installations pourrait limiter l'utilisation massive de cette technique. A ce jour, plus de mille opérations de fracturation ont été menées au Canada, et deux accidents liés à l'inflammabilité du propane ont été recensés.

5.4 AUTRES TECHNIQUES PROSPECTIVES

Il est fort probable que les enjeux liés à la sécurisation des sources d'énergie à bas coûts vont stimuler la recherche pour l'extraction propre et sécurisée des ressources de notre sous-sol (Figure 5.1).

Cela passera par une amélioration considérable de la connaissance (cf. chapitre 2, Étude des propriétés des roches mères) des propriétés des roches, de leurs comportements intrinsèques et de leurs relations dans un espace souterrain dont l'utilisation pour diverses utilisations sera croissante (réserve en eau, en ressources, en espace de stockage...).

Les solutions techniques feront certainement appels à une combinaison des techniques décrites ci-dessus, certaines anciennes à améliorer, d'autres encore à inventer. Parmi ces dernières, la simplification des procédures multiples et successives utilisées actuellement, toutes ayant un risque et un coût, est certainement une voie à suivre avec l'utilisation de matériaux intelligents (cf. §3.3.2, Optimisation des agents de fracturation) assurant en une seule opération l'ensemble des procédures nécessaires à l'augmentation de la perméabilité de la roche et la récupération des gaz : la fracturation, le soutènement, la production et migration sélective des gaz et huile, tout en limitant l'usage de l'eau, en augmentant la compatibilité environnementale et la sécurité et en optimisant notre gestion globale d'énergie (cf. §5.2.4 Verrous économiques)

5.5 REFERENCES

- [20] Beyssac O., Rouzaud J.N., Goffé B., Brunet F., Chopin C. (2002) Graphitization in a high-pressure, low-temperature metamorphic gradient: a Raman microspectroscopy and HRTEM study. *Contrib. to Mineralogy and Petrology*, 143, 19-31
- [21] Beyssac O., Brunet F., Petitot J.P., Goffé B. et Rouzaud J.N. (2003) Experimental study of the microtextural and structural transformations of carbonaceous materials under pressure and temperature. *European Journal of Mineralogy*, 15, 6, 937 – 951
- [22] Chen, W. (2010) Fracturation électrique des géomatériaux: Etude de l'endommagement et de la perméabilité, thèse de l'Université de Pau.
- [23] Crawford, P.M., Biglarbibli, K., and Dammer, A.R. (2008), *Advances in World Oil Shale Production Technologies*, SPE116570, 2008 SPE Annual Technical Conference, Denver, 21-24 Sept.
- [24] Fa, Y. (2010), *Chemical reaction modeling in a subsurface flow simulator with application to in-situ upgrading and CO2 mineralization*, Phd, Stanford University.
- [25] Kelvin B. G., Radisav D. V., and Dzombak, D. A. (2011) Water management challenges associated with the production of shale gas by hydraulic fracturing, *Elements*, 7, 181-186.

- [26] Jin, Z.-H., S. E. Johnson, and Z. Q. Fan (2010), Subcritical propagation and coalescence of oil-filled cracks: Getting the oil out of low-permeability source rocks, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L01305.
- [27] Kobchenko, M., Panahi, H., Renard, F., Dysthe, D. K., Malthe-Sorrensen, A., Mazzini, A., Scheibert, J. Jamtveit, B., and Meakin P. (2011) Fracturing controlled primary migration of hydrocarbon fluids during heating of organic-rich shales, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2011JB008565.
- [28] Osborn, S. G., Vengosh A., Warner, N. R., and Jackson, R. B. (2011) Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing, *PNAS*, doi 10.1073/pnas.1100682108.
- [29] Schon, S. C. (2011) Hydraulic fracturing not responsible for methane migration, *PNAS*, 108, 37.
- [30] Tollefson, J. (2012) Air sampling reveals high emissions from gas field, *Nature*, 482, 139-140.
- [31] Tutuncu, A.N (2011), Environmental Challenges of Gas and Oil Shale Stimulation, Unconventional Natural Gas Institute, Colorado School of Mines, paper SGA2011-3707, SEG Annual Meeting, San Antonio.
- [32] Vidal, O. and Dubacq, B. (2009) Thermodynamic modelling of clay dehydration, stability and compositional evolution with temperature, pressure and water activity. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73-21, 6544–6564.

6 Impacts sanitaires et environnementaux

Ce chapitre se focalise sur les impacts environnementaux et plus particulièrement **les ressources en eau** étant donné qu'elles sont au cœur des préoccupations environnementales qui ont émergé aux États-Unis en lien avec l'exploitation des gaz et huiles de roches mères (EPA, 2011). Outre cet enjeu majeur, les phénomènes de migration de gaz au travers des terrains jusqu'à certains aquifères, voire jusqu'en surface, sont des sources de contaminations potentielles des milieux d'expositions et sont donc susceptibles d'induire des impacts sanitaires des populations humaines, ainsi que sur les écosystèmes.

Ces phénomènes doivent également faire l'objet de travaux de recherche, d'une part en termes de modélisation des phénomènes en jeu et d'autre part en matière de surveillance (cf. 4.2.3).

Ainsi, ce chapitre propose également des actions de recherche afin de mieux appréhender le devenir des constituants (injectés ou naturels) présents dans le sous-sol ainsi que leurs impacts qualitatifs et quantitatifs.

Ce chapitre, en revanche, ne traite pas des risques accidentels ou sanitaires chroniques liés aux installations de surface, repris par ailleurs.

6.1 MODELISATION DU LESSIVAGE ET PROPAGATION DES CONSTITUANTS

6.1.1 Contexte

La qualité environnementale du sol et des hydro-systèmes est essentiellement liée aux conditions d'équilibre entre phases (solides – fluides - gaz) avec une forte inertie créée par les caractéristiques et la nature des différentes phases. Ces équilibres spécifiques conditionnent les caractéristiques et le fond géochimique d'un système. Suite aux différentes perturbations induites par des changements de conditions de température, de pression et d'ajout/soustraction de masse ou de chaleur le système évolue de façon à retrouver un nouvel équilibre physique et chimique.

Les différentes perturbations depuis l'exploration jusqu'aux opérations de production des réservoirs d'hydrocarbures de roches mères auraient tendance à libérer des substances organiques et inorganiques pouvant être néfastes pour la biosphère (ressources en eau, milieux d'expositions des populations humaines, faune et flore). Ces aspects couplant plusieurs processus et mécanismes (physico-chimiques, thermocinétiques, microbiologiques, thermiques et hydrauliques) agissent souvent de façon concomitante (couplage entre processus). Les processus géomécaniques peuvent également être impactés par les processus hydrauliques et physico-chimiques ou vice-versa. Plusieurs outils de simulation numérique des processus de lessivage et de transfert de masse et de chaleur dans les géosystèmes intégrant le continuum zone 'non saturée – zone saturée en eau' (systèmes multiphasiques) ont été développés et appliqués afin de configurer les réservoirs de stockage (CO₂, déchets radioactifs, gaz, eau, etc.) ou de production d'autres ressources (eau, huiles, substances minérales, géothermie, etc.). Selon les approches intégrées et les domaines d'application d'autres outils encore ont été développés pour la gestion de la ressource en eau (recharge des nappes, protection de la ressource, gestion active, etc.).

6.1.2 Liste de verrous identifiés et pistes de recherche proposées

La communauté scientifique des géosciences et les exploitants industriels des différentes ressources disposent déjà de plusieurs outils numériques. Ceux-ci peuvent être utilisés en l'état pour accompagner les études de l'impact environnemental de l'exploitation des roches mères ou adaptés notamment en y intégrant les mécanismes spécifiques de ces systèmes (nouvelles substances chimiques, nouveaux assemblages de minéraux, etc.). Des expériences de laboratoire, des études 'pilote' ainsi que le retour d'expériences sur l'exploitation de ces ressources non conventionnelles devraient permettre d'adapter ces outils et de « finaliser » les concepts de fonctionnement et des scénarios d'exploitation de façon à maîtriser les différents impacts et risques.

La modélisation du transport réactif induit par les stimulations chimiques, hydrauliques et/ou thermiques devrait pouvoir intégrer les processus suivants :

- Processus de dissolution – précipitation des minéraux de la roche mère et d'échange de masse entre phases (roche – huile – eau – gaz). Ces échanges peuvent générer la mobilisation des substances organiques et inorganiques pouvant être polluante et néfastes pour l'environnement (aquifères, faune, flore) et les populations humaines.
- Changements de conditions de pH (acidification ou basification), de Eh (réduction ou oxydation) et des propriétés physiques (T, P, pCO₂, pO₂, pH₂S, etc.). Ces changements peuvent provoquer le

lessivage d'éléments chimiques aussi bien depuis la surface des minéraux (réaction de complexation de surface) que d'échange ionique (touchant les espaces interfoliaires des argiles notamment).

- Intégration des espèces chimiques spécifiques injectées lors des stimulations hydrauliques/chimiques dans les bases de données des outils de modélisations avec les caractérisations thermocinétiques préalables.
- Modélisation des phénomènes de migrations (transport/transformations chimiques) des contaminants en phase gazeuse.
- Réalisation des expériences de laboratoire (batch et colonnes réactives) afin d'évaluer les paramètres thermocinétiques et biogéochimiques pouvant contrôler le lessivage ou les transferts gazeux des polluants (métalliques et/ou organiques).
- Réalisation des applications d'analyse de scénarios et d'intégration des résultats en se basant sur les données et les concepts d'un site pilote avec les contraintes industrielles et d'exploitation.

Globalement, il faut étendre les bases de données thermochimiques, thermocinétiques et biogéochimiques des outils de modélisation du transport réactif multiphasique avec sans doute des adaptations des approches théoriques mais aussi des couplages entre processus.

6.2 IMPACT SUR LES AQUIFERES

Les ressources en eaux souterraines ou de surface situées à proximité de gisements potentiels d'hydrocarbures de roches mères sont susceptibles d'être impactées (EPA, 2011) :

- du point de vue de leur *qualité* car elle peut être dégradée en cas de pollution et de migration des éléments chimiques et/ou de modification des propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques;
- du point de vue de leur *quantité* car elles peuvent être utilisées pour fournir l'eau nécessaire au processus de fracturation ce qui peut impacter la disponibilité de la ressource et générer des conflits d'usage.

6.2.1 Impact qualitatif sur les ressources en eau

6.2.1.1 Contexte

Les principaux mécanismes de contamination des aquifères évoqués dans la littérature scientifique sont les suivants (EPA, 2011) :

- déversements de fluides en surface,
- fuites par les puits d'exploitation vers des aquifères,
- fuites par des puits voisins orphelins ou abandonnés, répertoriés ou non répertoriés,
- mise en connexion de la formation exploitée avec les aquifères superficiels par le biais de voies de migration préférentielles (zones faillées, fissures) naturelles ou créées par l'exploitation.

Les cas reconnus officiellement de contamination d'aquifères par des migrations en sub-surface sont, en revanche, beaucoup moins nombreux. Néanmoins, les transferts dans le milieu géologique par des chemins créés par l'homme (puits, fracturation provoquée) ou par des chemins naturels (zone faillée, zone perméable) restent difficiles à appréhender. De plus, dans certains cas de pollution suspectée, l'origine des polluants n'a pu être déterminée avec certitude.

6.2.1.2 Liste de verrous identifiés et pistes de recherche proposées

6.2.1.2.1 Les connaissances sur les transferts potentiels de fluides dans le milieu géologique.

Le verrou le plus important concerne les échanges verticaux qui sont susceptibles de modifier la qualité des eaux dans les différents aquifères sus-jacents. Ce point est particulièrement complexe dans le sens où il fait intervenir le milieu naturel en grande partie inconnu. De plus, les impacts potentiels dépendront grandement de la composition des fluides ayant migré dans le milieu géologique. L'étude des transferts est donc à coupler avec celle des évolutions physico-chimiques et thermiques ayant lieu dans le milieu (thème étudié spécifiquement dans la partie 6.1). S'agissant des transferts à proprement parler, les actions de recherche suivantes peuvent être envisagées :

- Caractérisation du milieu géologique et de la fracturation (naturelle ou provoquée). Il s'agit ici, en lien avec les actions de recherche des chapitres 2 et 3 du présent rapport, de caractériser le milieu

géologique en focalisant l'approche sur les risques de migrations des substances chimiques constituant les fluides mis en œuvre. La connaissance des caractéristiques pétrophysiques des roches-mères et des formations environnantes (propriétés hydromécaniques, perméabilités, discontinuités...) ainsi que l'appréciation des hétérogénéités sont des éléments nécessaires pour analyser les transferts potentiels. En ce qui concerne la caractérisation de la fracturation, la démarche pourrait se baser sur des données de puits et d'affleurements, et sur la caractérisation spatiale et temporelle de la sismicité induite, pour apprécier les caractéristiques statistiques générales de la fracturation et évaluer a priori la distance du milieu au seuil de percolation (Bour et Davy, 1998; de Dreuzy et al., 2000).

- Identification et évaluation des phénomènes de migration. L'identification des chemins de migration et la compréhension du transport dans le milieu souterrain constituent un sujet de recherche : à ce titre l'EPA (2011) propose dans son programme de recherche de faire des investigations sur des zones où une pollution est reportée de sorte à déterminer si la fracturation hydraulique est responsable de la dégradation de la qualité de l'eau. De la même manière, l'approche pourrait se baser sur des études de cas où une pollution est suspectée, sur la modélisation des processus de transport, sur l'évaluation de scénarios et sur des expérimentations de terrain sur des sites pilotes.
- Compréhension des mécanismes réactionnels physico-chimiques dans les milieux géologiques susceptibles d'être à l'origine de formation de substances toxiques ou écotoxiques en phase gazeuse.

6.2.1.2.2 *Le développement de fluides de fracturation à la fois efficaces et à faible impact sur l'environnement*

Afin de limiter les nuisances possibles sur l'environnement une des actions prioritaires consisterait à agir au niveau de la formulation de la composition chimique et des propriétés physico-chimiques des fluides de fracturation. L'objectif serait d'optimiser la composition des fluides et la technique de fracturation de sorte à limiter l'emploi des additifs les plus dangereux pour la santé humaine ou l'environnement et à favoriser l'emploi de substances à faible impact. Ces actions se baseraient sur l'analyse de la toxicité et de l'écotoxicité des additifs chimiques déjà utilisés ainsi que sur l'analyse de leur devenir dans l'environnement. Une des difficultés de cet exercice réside dans la connaissance de la composition des fluides de fracturation utilisés par les opérateurs. Les possibilités de substitutions par des substances à faibles impacts ou par des substances « vertes » constitueraient des pistes de recherche intéressantes (URS Corporation, 2009).

6.2.1.2.3 *L'optimisation du traitement des effluents (eaux remontant après la fracturation, eaux de production) et de la réutilisation des eaux de fracturation.*

S'agissant des effluents, il est nécessaire de connaître la nature et la teneur des substances qu'ils sont susceptibles de contenir ainsi que les volumes devant être traités. Les caractéristiques de ces effluents dépendront étroitement des caractéristiques des fluides de fracturation utilisés et des propriétés géologiques du milieu exploité, et donc, des conditions locales. Une fois la nature des effluents précisée, les meilleures technologies disponibles de traitement (ou de prétraitement) devront être identifiées et/ou adaptées en fonction de la réactivité et du devenir des effluents ou de leur mode de valorisation (réutilisation, remise dans le milieu ou réinjection).

6.2.1.2.4 *L'optimisation de la gestion des fluides pour minimiser les risques de déversements accidentels en surface*

En ce qui concerne les déversements possibles par les activités de surface, il est nécessaire de mettre en place des mesures pour réduire à un niveau aussi bas que raisonnablement possible la probabilité de déversements dans l'environnement. Ce point concernerait toutes les étapes d'utilisation des fluides: transport, stockage, utilisation, préparation, traitement, rejet. Cet axe pourrait se concrétiser par une réflexion sur les bonnes pratiques et/ou sur des dispositions réglementaires adéquates concernant la gestion des fluides.

6.2.2 Impact quantitatif sur les ressources en eau

6.2.2.1 Contexte

La fracturation hydraulique nécessite ponctuellement une grande quantité d'eau ce qui a pu renforcer les tensions sur la ressource et générer des conflits d'usage en particulier dans les régions les plus sèches où la recharge naturelle est limitée (EPA, 2011). Les chiffres couramment reportés dans la littérature sur les besoins en eau sont de l'ordre de la dizaine de milliers de mètres cubes par puits. Ces volumes d'eau nécessaires varient néanmoins notablement en fonction du type de formation visé, des caractéristiques du puits et des modalités de fracturation. Les pistes de recherche proposées concernent la préservation des ressources existantes et l'utilisation de ressources d'eau alternatives.

6.2.2.2 Liste de verrous identifiés et pistes de recherche proposées :

6.2.2.2.1 Connaissance des ressources en eaux et impacts sur la disponibilité

Il est nécessaire de connaître et de caractériser précisément les masses d'eau situées à proximité de gisements de GHRM (caractéristiques, quantités) afin de pouvoir par la suite évaluer les incidences de l'exploitation et définir l'état 0" avec une caractérisation fine de l'état initial de l'aquifère indispensable à la surveillance (cf. Chapitre 4) et pour une meilleure gestion.

Des bases de données (BDRHF³, ADES⁴) existent et permettent une identification, une description et une localisation des entités hydrogéologiques. Néanmoins, à mesure que la profondeur augmente les données sont plus lacunaires voire inexistantes. En ce qui concerne l'impact quantitatif, les actions de recherche pourraient permettre d'évaluer la capacité des ressources en eau à satisfaire aux besoins de l'exploitation ainsi que l'impact des prélèvements sur le cycle hydrologique. Les approches adoptées devront tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle des ressources en eaux ainsi que des relations hydrauliques entre les différentes ressources en eau en surface et en profondeur. Les besoins spécifiques en eaux de la fracturation hydraulique et les impacts subséquents pourront être évalués en fonction des modes d'exploitation envisagés et de l'origine des eaux utilisées.

6.2.2.2.2 Utilisation de ressources d'eau alternatives

Étant donné que la technique de fracturation hydraulique consomme de grandes quantités d'eau, l'utilisation de ressources d'eau alternatives est une piste de recherche intéressante. Les ressources alternatives peuvent être par exemple : des eaux de production, des eaux salines d'origine profondes, des effluents de station de traitement, des eaux d'exhaure issues de mines, etc. La possibilité d'utiliser ces eaux dépend de nombreux facteurs qui nécessiteraient d'être évalués notamment : la disponibilité de la ressource, la distance au point d'utilisation, la qualité de l'eau, le coût, la réglementation (URS Corporation, 2009). L'évaluation de ces différents facteurs, en tenant compte des conditions locales de sites d'exploitation potentiels, permettrait de déterminer l'opportunité d'utiliser ces ressources alternatives.

6.2.2.2.3 Recyclage de l'eau

Le recyclage de l'eau de fracturation offre également une voie de réduction de la consommation d'eau. C'est actuellement une pratique courante qui se heurte cependant au traitement des résidus ultimes pouvant concentrer des métaux lourds ainsi que certains produits ajoutés. La récupération de ces métaux, leur valorisation éventuelle et le développement de traitements de dépollution efficaces nécessitent des recherches pour mettre à disposition des procédés performants.

6.3 IMPACTS SANITAIRES

Il est à souligner que cette section n'aborde que les aspects sanitaires liés à une exposition chronique des populations générales, et non aux risques accidentels liés aux installations de surface ou pour les travailleurs. Les impacts sanitaires pour les populations sont en lien principalement avec la migration des fluides et des gaz vers la surface, et donc avec la qualité des aquifères de surface et de l'air au regard des différents usages des ressources en eau et des sols.

Ainsi, l'étude des impacts sur les milieux d'expositions humaines liés à l'exploitation des hydrocarbures de roches mères intègre un grand nombre de questions scientifiques traitées par ailleurs dans le présent document, comme notamment :

- La connaissance des phénomènes de transport réactif, de migrations en milieu géologique des fluides et des gaz considérés ;
- Le développement de fluides de fracturation moins nocifs pour l'homme et pour l'environnement ;
- La surveillance des processus d'exploitation et des impacts sur l'environnement, notamment la surveillance du processus de fracturation hydraulique, de la qualité des aquifères et de la migration de gaz.

³ BDRHF : Base de Données sur le Référentiel Hydrogéologique Français. Ce référentiel est en train d'évoluer vers la base de données LISA (Seguin, 2009).

⁴ ADES : Banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines qui rassemble des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines.

6.3.1 Liste des verrous identifiés et pistes de recherche proposées

Les enjeux de recherche spécifiques à l'étude des impacts sur l'homme (certains ayant déjà été abordés dans les sections précédentes) concernent plus particulièrement :

- Le dimensionnement des systèmes de surveillance dans des logiques d'alerte vis-à-vis des milieux d'exposition (aquifères superficiels ou air du sol et en surface) nécessite d'appréhender le plus finement possible la géolocalisation de la zone de surface potentiellement affectée par la fracturation hydraulique. Le développement des approches par traçages chimiques (recherche de substances spécifiques non réactives présentes dans les fluides de fracturation ou injection d'un traceur ad hoc) identifiables à de très faibles concentrations est nécessaire afin de détecter l'arrivée de composés potentiellement toxiques dans les nappes superficielles ou les sols de surface. Comme indiqué en 4.2.3 le développement des nouvelles technologies de surveillance basées sur l'intégration spatiale des informations et sur l'amélioration de la sensibilité des systèmes in situ doit être étudié
- L'étude des mécanismes de réactions et de migration des substances générées et/ou injectées dans le sous-sol permettra d'identifier l'éventualité de formation et de relargages de produits toxiques ou écotoxiques, ainsi que d'étudier leur devenir dans le milieu fissuré à moyen et à long terme.
- L'évaluation des dangers des substances : Parmi les nombreux additifs chimiques constituant les fluides de fracturation, certains peuvent présenter des propriétés toxiques. Si les différents types de formulations sont actuellement globalement connus et renseignés sous l'aspect de l'efficacité des procédés, les substances et leurs proportions dans les formulations varient en fonction des conditions d'exploitation des gisements et restent le plus souvent non communiquées. Ainsi, les questions de composition chimique fine, de toxicité et de dégradabilité (temps de vie et formation de produits intermédiaires) méritent d'être traitées spécifiquement sous l'angle de l'impact sanitaire, en cas de migration vers les eaux et les sols de surface. Ces études doivent intégrer les connaissances actuelles et le développement de connaissances nouvelles sur les effets synergiques des mélanges de substances. La possible utilisation dans les procédés de fracturation hydraulique d'additifs enrichis de nanomatériaux (amélioration de certaines propriétés) doit également constituer un sujet d'intérêt.

6.4 OBSERVATION ET SUIVI DES IMPACTS SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX.

Un système d'observation de l'ensemble du processus d'exploitation des hydrocarbures de roche mère depuis l'état des lieux initial jusqu'à la fermeture des sites après exploitation et durant toutes les phases intermédiaires de l'exploration, des tests et de l'exploitation demande à être mis en place.

Cet observatoire, conçu sur le modèle de l'observatoire de la mine en construction au Québec dans le cadre du développement de l'industrie minière dans le domaine arctique, aborderait trois volets principaux de recherche et d'observation:

- l'établissement de l'état initial et des conditions existant sur les sites d'exploration, d'exploitation et de réhabilitation,
- le suivi des modifications du milieu physique et vivant entraîné par l'exploitation industrielle en début, en cours et en fin de vie,
- le suivi des impacts socio-économiques sur les populations locales.

Porté par un établissement public national, il devrait

- être un outil pour la mise à disposition du public, des élus, des scientifiques, des industriels et des décideurs administratifs ou politiques de données d'observation fiables, labellisées et compréhensibles,
- constituer une référence internationale dans le domaine de l'observation de l'exploitation des hydrocarbures non conventionnels et contribuer à l'établissement des bonnes pratiques, seules garantes d'une acceptabilité sociétale pour l'accès au sous-sol et gage de l'établissement d'une concurrence loyale entre les acteurs économiques.

7 Évaluation budgétaire

Le programme proposé est envisagé sur une période de 3 à 5 ans. **Son budget**, en première estimation pourrait être de l'ordre de **25M€**. Sa répartition selon les cinq volets décrits dans les chapitres précédents est rappelée dans le tableau donné à la Figure 7.1 ci-dessous.

L'étude des propriétés des roches mères requiert un budget de 3,3M€. Les études proposées, visent à répondre aux 4 enjeux suivants:

1. améliorer la modélisation des mécanismes de rétention et d'expulsion des hydrocarbures de roches mères;
2. améliorer la modélisation du transport du gaz au sein de la roche mère et lors de sa migration;
3. rendre la simulation de bassin plus quantitative,
4. réaliser des études d'analogues, des analyses d'échantillons de fluides et de roche et à produire des modèles sédimentologiques plus pertinents

L'exploitation des roches mères par fracturation hydraulique demande un budget de l'ordre de 3M€ consacré essentiellement à l'amélioration de la modélisation géomécanique des matériaux hybrides (roche + matière organique) que sont les roches mères.

Le suivi et le contrôle de l'impact de la fracturation hydraulique est le volet qui requiert le budget le plus important. De 9M€, ce budget représente à lui seul plus du tiers du budget global. Dans ce volet, on se propose de résoudre les points suivants:

1. amélioration de l'écoute microsismique et de son interprétation
2. le suivi géochimique des aquifères profonds et superficiels
3. l'amélioration des méthodes de prélèvement en conditions de fond
4. le suivi de la qualité de l'air
5. la mise en place de barrières de prévention et de protection pour minimiser les risques environnementaux

Les alternatives à la fracturation hydraulique se décomposent en quatre voies qu'on se propose de d'aborder, pour un budget de 4M€:

1. l'injection de propane dont il est nécessaire d'améliorer la modélisation thermodynamique pour mieux la maîtriser et améliorer les performances
2. la modélisation de l'injection de CO₂
3. la mise en œuvre de procédés thermiques dont il est nécessaire de mieux comprendre l'impact induit sur les argiles (déshydratation, structure), la production d'eau in situ, la modification des perméabilités qui en résulte, la modification des propriétés du kérogène
4. la compréhension des phénomènes mis en jeu lors de l'utilisation de procédés électriques.

L'étude des impacts sanitaires et environnementaux nécessite un budget de 5,4M€ portant sur:

1. la caractérisation hydrogéologique et modélisation hydrodynamique des aquifères sus-jacents et latéraux
2. la modélisation des transports réactifs en milieu poreux (dissolution/re-précipitation) biosphère profonde, processus biogéochimiques et impacts environnementaux
3. l'optimisation des fluides de fracturation
4. l'amélioration du traitement des effluents en surface
5. la valorisation des effluents en surface

Le dernier volet, dont le budget n'est pas établi, porte sur la **perception par le public des questions d'exploitation des roches mères**. Il devrait renvoyer notamment à quatre objectifs:

1. l'identification des ressorts des controverses
2. la réalisation enquêtes d'opinion publique
3. l'organisation de débats, de séminaires
4. l'amélioration de la communication auprès du grand public (site web, livre blanc, etc).

Ces différents volets sont résumés dans le tableau donné à la figure 7.1 ci-après.

Figure 7.1: Répartition budgétaire par volets du programme de recherche sur l'exploitation des roches mères

BUDGET PROGRAMME D'EXPLOITATION DES ROCHES MERES - 24,7 M€										
Etudes des propriétés des roches mères	M€	Exploitation par fracturation hydraulique	M€	Suivi et contrôle de l'impact de la fracturation hydraulique	M€	Alternatives à la fracturation hydraulique	M€	Impacts sanitaires et environnementaux	M€	SHS
amélioration de la modélisation des mécanismes de rétention et d'expulsion des hydrocarbures de roches mères	1,4			amélioration de l'écoute microsismique et de son interprétation	2	modélisation de l'injection de propane: modélisation thermodynamique, évaluation des performances	0,5	caractérisation hydrogéologique et modélisation hydrodynamique des aquifères sus-jacents et latéraux	1	identification des ressorts des controverses
modélisation géochimique du transport de gaz au sein de la roche mère et de la migration vers des aquifères sus-jacents	0,3									
adaptation de la simulation de bassin pour prédire la quantité et la qualité des hydrocarbures en place	0,6	modélisation des mécanismes de fracturation des roches mères	3	suivi géochimique des aquifères profonds et superficiels	2	modélisation de l'injection de CO2	1	modélisation des transports réactifs en milieu poreux (dissolution, précipitation)	2,5	enquêtes d'opinion
				méthodes de prélèvement en conditions de fond	2	procédé thermique: impact sur les argiles (déshydratation, structure), production d'eau in situ, modification des perméabilités, modification des propriétés du kérogène	2	optimisation des fluides de fracturation	0,5	organisation de débats, de séminaires
études analogues terrain, analyses sur échantillons/carotte, modèle géométrique et sédimentologique	1			suivi de la qualité de l'air	1			amélioration du traitement des effluents en surface	1	
				amélioration des barrières de prévention et de protection nouveaux ciments, procédés de remédiation, ...	2	procédé électrique	0,5	valorisation des effluents en surface	0,4	Communication auprès du grand public (site web, livre blanc, etc.
TOTAL	3,3	TOTAL	3	TOTAL	9	TOTAL	4	TOTAL	5,4	

8 Évaluation des ressources disponibles

numero	Verrous	intitulé	EPIC			EPA	EPST et principales universités		moyens communs de la recherche (TGE, TGIR, plateforme, Programme)	
			nom	ETP	nom		nom	personnel en ETP chercheurs permanents	nom	porteur
1		Propriétés minéralogiques, pétrophysiques et contenu organique des roches mères	IFPEN	8		CNRS-Univ. : Orléans (ISTO), Paris (IMPC, LDG-ENS, IPGP), Nancy (G2RI), Grenoble (ISTERRE), Poitiers (?), AMU (Cerage)	5	programme CESSUR	INSU-CNRS	
			BRGM	1						
2		Exploitation des roches mères par fracturation hydraulique	IFPEN	8		CNRS-Univ. : Paris (LDG-ENS, IPGP), Grenoble (ISTERRE), Strasbourg (IPGS),	3	plateforme de simulation d'outils en conditions de forage	INSU-CNRS, Strasbourg	
			BRGM							
			INERIS	4						
3		Méthodes de suivi et de surveillance	IFPEN	2		CNRS-univ. Nancy (G2P ...), Paris (IPGP), Grenoble (ISTERRE), Strasbourg (IPGP), Montpellier (Géosciences), Rennes (Géosciences)	3	station forage Ecole des Mines Pau	CNRS-INSU	
			BRGM							
			Itremer							
			INERIS	8						
4		Etude des alternatives à la fracturation hydraulique	IFPEN	2		CNRS-Univ. : Orléans (ISTO), Paris (LDG-ENS), Nancy (G2RI), Grenoble (ISTERRE), Poitiers (?), AMU (Cerage)	4	RESIF : réseau sismologique et géodésique français	CNRS-INSU	
			BRGM							
			INERIS							
5		Impact environnemental	IFPEN	4		CNRS-Univ. : Orléans (ISTO), Paris (IPGP), Nancy (G2RI), Rennes (Géosciences), Montpellier (hydro?), AMU (Cerage), Toulouse (GET)	5	RESIF : réseau sismologique et géodésique français	CNRS-INSU	
			BRGM							
			INERIS	8						
Total				45		20				