



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Éléments pour éclairer le débat sur les gaz de schiste

**Avis
de l'Académie des sciences**

15 novembre 2013

Table des matières

Cadre général des travaux

Synthèse des recommandations

Introduction

1. Contexte

2. Analyse et recommandations

Annexe

Références

Composition du groupe de travail

Liste des experts auditionnés

Remerciements

Éléments pour éclairer le débat sur les gaz de schiste

Cadre général des travaux du Comité de prospective en énergie (CPE) et historique du présent rapport

L'énergie constitue un problème majeur pour l'avenir dans un contexte où la demande mondiale augmente à un rythme soutenu entraînant l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et la raréfaction des ressources. Bien que le sujet soit amplement débattu, les contraintes inévitables de production, de transport et d'exploitation sont souvent négligées, les défis scientifiques à relever et les ruptures technologiques majeures qu'il faudrait réaliser sont, la plupart du temps, sous-estimés ou esquivés. Il était naturel conformément à sa mission que l'Académie des sciences se saisisse de cette question complexe et demande à son comité de prospective en énergie (CPE) de conduire une réflexion sur ce thème en abordant les problèmes d'une façon systématique et raisonnée, résolument différenciée des visions simplistes. Dans son rapport sur « La recherche scientifique face aux défis de l'énergie » publié fin 2012, le Comité avait identifié les pistes de réflexion qui méritaient un approfondissement. En particulier dans le domaine des énergies fossiles, il était proposé de reprendre de ce point de vue le problème des gaz de schiste. Les questions posées par l'exploration et l'éventuelle exploitation de cette ressource sont ainsi abordées dans le présent avis en s'appuyant sur les éléments présentés dans le cadre d'une conférence débat organisée à l'Académie le 26 février 2013. L'analyse tire partie des réflexions menées par les collègues britanniques et américains qui participaient à ce débat (Robert Mair, président d'un groupe de travail conjoint entre la Royal society et la Royal academy of engineering du Royaume-Uni et Robert Siegfried, président du Research Partnership to Secure Energy for America, RPSEA). Elle s'appuie également sur les documents déjà élaborés par d'autres entités comme l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) ou par l'alliance ANCRE (Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie). La réflexion du Comité de prospective s'est concrétisée par une première version du présent avis, transmise à tous les membres de l'Académie en juillet 2013. Cette version a été révisée pour tenir compte des avis émis à ce stade puis présentée au Comité restreint du 1^{er} octobre. Le texte a ensuite été débattu en séance plénière de l'Académie le 29 octobre et adopté par un vote le 15 novembre 2013.

L'Académie des sciences est pleinement consciente de la nécessité de réduire la consommation d'énergie et notamment de combustibles fossiles et pour cela d'améliorer l'efficacité énergétique dans toutes les utilisations de l'énergie. Dans le contexte actuel de transition énergétique, la question des gaz de schiste mérite d'être examinée, notamment pour les raisons suivantes : (1) Assurer la sécurité d'approvisionnement en énergies fossiles qui constituent encore 80 % de l'énergie primaire, (2) Réduire la dépendance énergétique et la facture correspondante (plus de 60 milliards d'euros par an), (3) Stimuler la compétitivité de l'économie, (4) Permettre l'insertion des énergies renouvelables en réglant le problème de la compensation de leur intermittence au moyen d'une énergie mobilisable et qui évite

l'utilisation du charbon. Cet avis expose ces éléments de contexte puis élabore des recommandations qui devraient permettre de réduire les incertitudes actuelles. Ces recommandations sont présentées sous forme synthétique, ci-dessous.

Synthèse des recommandations

Les quatre premières recommandations visent la recherche et l'exploration. Les cinq recommandations suivantes visent l'éventuelle exploitation qui pourrait être engagée si des conditions favorables, notamment pour réduire les risques pour l'environnement, sont réunies.

1. Lancer un effort de recherche, impliquant aussi bien les laboratoires universitaires que ceux des grands organismes, sur toutes les questions scientifiques posées par l'exploration et l'exploitation des gaz de schiste.
2. Préparer l'exploration en utilisant les connaissances géologiques, géophysiques et géochimiques déjà acquises ou archivées et solliciter les géologues pour travailler à une évaluation des réserves.
3. Réaliser des études et des expériences visant à évaluer et réduire l'impact environnemental d'une éventuelle exploitation.
4. Mettre en place une autorité scientifique, indépendante et pluridisciplinaire de suivi des actions engagées pour l'évaluation des ressources et des méthodes d'exploitation.
5. Traiter des problèmes de gestion des eaux, qui est un aspect majeur de l'exploitation des gaz de schiste.
6. Prévoir un suivi environnemental (monitoring) avant, pendant et après l'exploitation.
7. Travailler sur les méthodes qui pourraient remplacer la fracturation hydraulique mais aussi sur les procédés permettant d'améliorer celle-ci.
8. Traiter des problèmes d'étanchéité à long terme des forages d'exploitation en initiant un programme de recherche qui devrait conduire à l'élaboration d'une réglementation adaptée.
9. Procéder à des tests en vraie grandeur dans des conditions respectant la décision en vigueur, c'est-à-dire sans fracturation hydraulique, dans des zones déjà fracturées de vieux bassins charbonniers, pour mieux évaluer la ressource et maximiser le rendement de son exploitation.

Introduction

Les gaz de schiste (qu'il faudrait désigner plutôt sous le nom de gaz de roche-mère) sont depuis quelques années au cœur de vifs débats. Les points de vue exprimés vont du refus pur et simple de les voir exploités à l'idée qu'ils pourraient être pour le pays une façon inattendue et presque miraculeuse de relancer la croissance et l'emploi. Face à l'importance des questions soulevées par ce sujet, le Comité de prospective en énergie de l'Académie des sciences (CPE) souhaite apporter des éléments pour éclairer le débat et faire des propositions de recommandations notamment pour réduire les incertitudes actuelles.

Dans son précédent rapport [7] sur la « Recherche scientifique face aux défis de l'énergie », le CPE constatait que des décisions au sujet des gaz de schiste avaient

été prises hâtivement et sans que le dossier soit véritablement instruit, et concluait qu'il ne fallait pas négliger cette nouvelle ressource, l'avenir énergétique étant trop incertain pour ne pas faire, au minimum, une évaluation des potentialités. La réflexion du CPE s'est poursuivie à partir des éléments présentés au cours d'une conférence débat¹ organisée à l'Académie des sciences en février 2013 (Réf. [1] à [5]) et d'un ensemble de documents cités en référence ([6] et [8-16]) dont un rapport préparé conjointement par la Royal Society et la Royal Academy of Engineering du Royaume-Uni.

Après une analyse du contexte, le CPE fait neuf recommandations à caractère scientifique. Le message essentiel qu'elles contiennent est que la question d'une exploration, puis d'une éventuelle exploitation des gaz de schiste mérite d'être examinée, qu'il faut avancer sur ce sujet et développer la recherche, mais que rien ne saurait être entrepris sans de nombreuses vérifications et expérimentations préalables encadrées par une réglementation rigoureuse, afin de maîtriser les risques potentiels pour l'environnement et pour la santé. Dans cette logique, le présent rapport insiste sur les recherches qu'impliquent les nombreux points soulevés à propos de l'exploration et de l'exploitation des gaz de schiste, et qu'il conviendrait d'initier ou de développer.

1. Contexte

Le CPE tient à souligner qu'il reste dans son domaine de compétence qui est celui de l'évaluation scientifique. Certains éléments de contexte et notamment ceux qui portent sur les aspects économiques ou encore sur les aspects juridiques comme ceux du code minier sont mentionnés à titre indicatif. Ces éléments sont analysés par ailleurs, notamment par l'Académie des technologies et par divers groupes de réflexion. Le sujet de l'exploration et de l'exploitation des hydrocarbures non conventionnels est aussi traité au sein de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) dans le cadre d'une étude sur les techniques alternatives à la fracturation hydraulique [12].

1. On peut se demander s'il est encore utile de discuter du sujet des gaz de schiste, car au moment où des pays voisins s'engagent dans leur exploration ou leur exploitation, le débat semble fermé au niveau de la France. Pour l'Académie des sciences, la réponse est oui. En effet, il est dans sa mission de réfléchir aux problèmes scientifiques et de travailler dans un contexte international. Elle constate que des analyses et des débats sont engagés au sein des plus grandes Académies mondiales. C'est ainsi que la Royal Society et la Royal Academy of Engineering ont récemment publié un rapport conjoint sur le sujet [6]. Le débat se développe aussi dans le cadre des Académies américaines, par exemple au sein du Board on Environmental Change and Society [15]. Il nous est donc apparu légitime de poursuivre la réflexion sur ce sujet et de la conduire d'une façon équilibrée et raisonnée.

¹ Les conférences débat de l'Académie des sciences rassemblent des spécialistes autour d'une question scientifique actuelle. Elles ont pour objectifs de confronter les points de vue dans le but d'éclairer tous ceux que la question intéresse, grand public, médias et décideurs, en se fondant sur les meilleures informations scientifiques et techniques disponibles à ce jour présentées par des spécialistes du domaine.

2. La discussion engagée sur la politique de « transition énergétique » conduit elle aussi à poursuivre la réflexion. D'une part, le développement à grande échelle, en l'absence de moyens de stockage adaptés, de sources d'énergie intermittentes et diluées comme l'éolien et le photovoltaïque, nécessite de disposer de sources d'énergie concentrée de substitution, rapidement mobilisables, que seules des centrales à flamme peuvent actuellement fournir. L'intermittence ne peut être compensée par un lissage par « foisonnement », comme le montrent des études récentes (voir [7]), même si ses effets peuvent être atténués par l'« effacement » de certains utilisateurs ou par une gestion adaptée des équipements hydro-électriques. Ainsi, le développement des énergies renouvelables s'accompagne d'un besoin d'énergie fossile et, si tel est notre avenir, du moins à moyen terme, mieux vaudrait une combustion du gaz, dont les niveaux d'émission de CO₂, d'oxydes d'azote, de composés de soufre et de particules de suie sont plus faibles que ceux résultant du charbon ou du lignite et par conséquent avec un impact bien moindre sur la santé et l'environnement. D'autre part, s'il fallait également s'engager dans une réduction significative de la part du nucléaire dans la production d'électricité, ce qui supprimerait entre autres notre avantage comparatif en termes d'émission de CO₂, mieux vaudrait encore une fois une substitution de l'énergie nucléaire par de l'énergie fossile fondée sur le gaz plutôt que sur le charbon.

3. Avant d'envisager d'exploiter d'éventuels gisements, il faut pouvoir les explorer. Si l'exploration confirme les estimations avancées des réserves – ce qui reste à démontrer – l'exploitation pourrait permettre une réduction de la dépendance énergétique de la France, qui importe plus de 95 % de son énergie fossile et plus de 98 % de son gaz naturel. On peut rappeler que les importations d'énergie fossile pèsent lourd dans la balance commerciale de la France, avec une dépense de plus de 14 milliards d'euros en 2012 pour le seul gaz naturel². L'exploitation des gaz et des huiles de roche-mère permettrait de réduire le déficit commercial de la France et pourrait assurer des gains de compétitivité pour l'industrie. On pourrait aussi consommer ce qu'on produit sur place, ce qui est globalement favorable puisqu'on évite ainsi les problèmes associés au transport de gaz sur de grandes distances. Dans le domaine environnemental, il n'est pas sans intérêt de noter qu'un effet collatéral de l'exploitation des gaz de schiste aux États-Unis est l'exportation et la mise sur le marché européen de charbon à un prix bas, inférieur à celui du gaz, ce qui conduit à l'arrêt de centrales à gaz à haut rendement (CCGT : *Combined Cycle Gas Turbine*) remplacées par des centrales à charbon fortes génératrices de CO₂ (voir la dépréciation d'actifs de GDF-Suez il y a quelques mois). Ceci ajoute à l'importance de disposer d'une source de gaz à prix compétitif.

On ne peut rester indifférent à la renaissance industrielle des États-Unis dans les industries qui dépendent de l'énergie, telle l'industrie chimique : le prix du gaz, trois ou quatre fois inférieur à celui payé en Europe (essentiellement grâce à l'exploitation des gaz de schiste), donne aux États-Unis un avantage compétitif fort par rapport à l'Europe. Des gains économiques ont déjà été constatés outre-Atlantique, résultant d'une baisse sensible du coût de l'énergie et d'une plus grande disponibilité de matières premières pour la chimie. De plus en plus d'industries qui pourraient

² L'exploitation de l'énergie nucléaire épargne plus de 20 milliards d'euros d'énergies fossiles qu'il faudrait importer en supplément.

s'implanter en Europe et y créer des emplois choisissent les États-Unis à cause du coût désormais bas de l'énergie fournie par le gaz. Les conséquences positives pour l'économie qui pourraient résulter, pour la France, d'un développement des gaz et des huiles de roche-mère sont trop importantes dans la situation de crise actuelle pour qu'on puisse rejeter a priori, sans un examen attentif, cette ressource potentielle, dont l'éventuel développement devrait se faire, en tout état de cause, en maintenant l'objectif vertueux de la réduction générale de la consommation énergétique par habitant. Face à l'intérêt économique immédiat, l'intérêt d'une solution d'attente, misant sur le besoin à long terme d'un mix énergétique, l'amélioration attendue des techniques d'extraction et le renchérissement inévitable des hydrocarbures liquides ou liquéfiés mérite aussi d'être considéré.

4. Cependant, l'exploitation des gaz de roche-mère ne saurait être engagée sans que soient étudiés soigneusement les risques potentiels pour l'environnement associés à ce type de production. Beaucoup de ces risques ne sont d'ailleurs pas nouveaux et sont déjà traités dans l'exploitation d'autres types de ressources (forages liés à l'exploitation conventionnelle du pétrole, du gaz, de la géothermie...). La fracturation hydraulique elle-même a déjà été largement utilisée dans le passé. Elle est mise en œuvre chaque année dans le monde entier dans plusieurs milliers de forages pétroliers ou gaziers conventionnels et bien qu'il s'agisse d'autres types de roches que les schistes il existe un important retour d'expérience. Il est nécessaire de considérer chaque risque en toute transparence, et de déterminer si des technologies nouvelles, des modes opératoires et des réglementations adaptées seraient compatibles avec le souci de la protection de l'environnement et des modes de vie. On peut rappeler, à ce stade, que l'exploitation du gaz de Lacq (gisement découvert dans le sud-ouest en 1951, dont l'exploitation a débuté dans les années 1960 et s'est arrêtée le 14 octobre 2013) qui n'est pas un gaz de schiste, posait cependant des problèmes technologiques sérieux. Elle s'est faite dans des conditions respectueuses pour l'environnement et la qualité des eaux locales, malgré la proportion élevée de gaz acides (hydrogène sulfuré) dans ce gisement.

5. Comme pour beaucoup de sujets complexes, il est nécessaire de présenter de façon non partisane, en s'appuyant sur des données scientifiques, les avantages attendus et les risques, en déterminant si ces risques peuvent éventuellement être maîtrisés. Il faudrait définir les conditions acceptables pour l'environnement et les collectivités qui pourraient permettre une exploration, et, si elle s'avère positive, une exploitation. Dans cet objectif, il convient donc de développer les recherches et d'élaborer un ensemble de règlements et de bonnes pratiques destinés à réduire l'impact de l'exploitation sur les écosystèmes.

6. Même si à long terme, les besoins d'énergie électrique peuvent être couverts par le nucléaire et par certaines énergies renouvelables (hydraulique, éolien, hydrolien, solaire, géothermie haute enthalpie...), il subsistera de toute façon un besoin impérieux de combustibles liquides ou gazeux (pétrole, gaz naturel, et aussi de combustibles synthétiques fabriqués à partir de la biomasse, de déchets végétaux, d'algues et d'hydrogène, lui-même résultant de l'électrolyse de l'eau...). Ces carburants liquides ou gazeux conserveront leur importance sur une longue période et ils sont indispensables pour de nombreuses utilisations. Dans le choix des sources d'énergie fossile actuellement disponibles, il importe de se rappeler que la combustion du gaz naturel, tout en dégageant des gaz à effet de serre, est deux à

quatre fois plus propre, en terme d'émission de ces gaz, que celle du charbon. Il est en effet possible d'augmenter le rendement de Carnot au moyen d'un cycle combiné et ainsi de diviser par deux les émissions de CO₂ par unité d'énergie. Le gaz naturel est aussi une matière première d'intérêt majeur pour la chimie.

7. Il y a une grande différence, dans les règles d'exploitation du sous-sol, entre les États-Unis et l'Europe, où l'appartenance des ressources souterraines à la nation permet une meilleure maîtrise de leur mode d'exploitation. L'actuelle révision en cours du Code minier pourrait peut-être permettre de renforcer les règles de protection de l'environnement pour toute forme d'exploitation des ressources du sous-sol tout en permettant aux collectivités locales et aux propriétaires des terrains de mieux tirer profit de l'exploitation qui pourrait être faite du sous sol.

2. Analyse et Recommandations

1. *Le Comité de prospective en énergie* constate qu'il n'y a pas actuellement de programme de recherche publique en France sur le sujet des gaz de roche-mère tout en notant que des propositions sont rassemblées dans le rapport de l'Alliance pour l'Énergie ANCRE « Programme de recherche sur l'exploitation des hydrocarbures de roches-mères » [8] et que l'appel d'offre 2013 du programme Énergie du CNRS porte sur le thème « ressources, société, environnement ». *Le Comité* souligne l'intérêt de ces initiatives et **recommande le lancement d'un effort de recherche soutenu dans le domaine** (impliquant aussi bien les laboratoires universitaires que les organismes de recherche plus technologiques) avec comme objectifs : (1) Connaître la ressource et réaliser une évaluation des réserves accessibles, (2) Mieux évaluer l'impact environnemental d'une éventuelle exploitation, (3) Améliorer et contrôler les techniques existantes et les procédés d'exploitation pour minimiser cet impact, (4) Développer des technologies d'exploitation alternatives à la fracturation hydraulique, (5) Démontrer si les impacts sur l'environnement sont maîtrisables, et, (6) Réaliser une expérimentation à diverses échelles dans des situations bien contrôlées et mettre en place un site pilote de recherche pour permettre une analyse indépendante des procédés mis en œuvre. *Le Comité* considère que l'exploration, si elle est menée selon des règles précises et contrôlées, n'a pas d'impact environnemental significatif.

2. Les conditions de formation et de migration des hydrocarbures dans les bassins sédimentaires sont connues et on sait évaluer, à partir de la nature et de la teneur en matière organique des sédiments, de l'histoire (sédimentologique et tectonique) de l'enfouissement de cette matière et de l'évolution thermique qui en résulte, les quantités d'hydrocarbures liquides et gazeux générés et celles qui sont encore emprisonnées dans les roches, la majeure partie en ayant en général été perdue. Pour préparer l'exploration, *le Comité considère comme prioritaire d'utiliser les connaissances géologiques, géophysiques et géochimiques* déjà acquises au moyen de forages et de fracturations (ou qui dorment dans les archives) puis d'acquérir et d'associer observations de terrain complémentaires, expériences de laboratoire et modèles de simulation numérique pour évaluer, sur des bases scientifiques, les ressources potentielles de notre pays en gaz et huile de roches-mères. Il est urgent de solliciter tous les géoscientifiques (géologues, géophysiciens, géochimistes, hydrogéologues...), du monde universitaire et des organismes publics

(CNRS, BRGM, IFPEN) ou privés, pour travailler conjointement à cette évaluation des réserves.

3. Tout en notant que la fracturation hydraulique existe depuis longtemps et a déjà été largement utilisée³, le *Comité souligne l'importance d'études visant à évaluer et à réduire l'impact environnemental de cette technique*. Il est souhaitable d'améliorer 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, d'optimiser les agents de fracturation et de rechercher des produits alternatifs compatibles avec les normes environnementales les plus exigeantes. Il semble possible de proposer pour cela des matériaux « intelligents » (présentant par exemple des capacités de prise *in situ*, offrant des propriétés de transfert de gaz améliorées). Le *Comité* 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. Il considère aussi que ces études et expériences devraient associer étroitement le public à la formulation des questions à examiner, à l'examen en toute transparence des réponses obtenues, et au suivi des suites de cet examen. Les travaux devraient aussi permettre la définition de règlements et de cahiers des charges adaptés à une exploitation respectueuse de l'environnement.

4. S'agissant d'un sujet de dimension nationale controversé, le *Comité* suggère la mise en place d'une autorité scientifique, indépendante et pluridisciplinaire, pour le suivi des actions qui seraient engagées pour l'évaluation objective des ressources en gaz de schiste et des méthodes d'exploitation.

Si les actions décrites précédemment confirmaient l'intérêt d'une exploitation, les recommandations suivantes pourraient être mises en œuvre.

5. Le *Comité* considère que **la gestion de l'eau constitue un aspect majeur de l'exploitation** des gaz de schiste et qu'elle doit prendre en compte la disponibilité, le recyclage et la prévention des contaminations des aquifères et des eaux de surface par les eaux utilisées pour le forage, la fracturation et le dégorgeement des eaux des puits fracturés (ou les eaux de retour après fracturation). Les premiers forages mis en œuvre aux États-Unis qui n'ont pas toujours respecté des normes indispensables à une protection correcte de l'environnement, ont provoqué des pollutions significatives qui doivent être absolument évitées dans un pays aussi densément peuplé que la France. Les techniques actuelles et l'expérience pétrolière permettent – semble-t-il, mais cela doit être évalué – de définir des modalités de forage et d'exploitation respectueuses de l'environnement et sûres pour le long terme. Les aquifères traversés doivent être protégés par tubage multiple et par un scellement complet du puits. Les eaux qui ressortent du puits peuvent avoir lessivé des métaux lourds ou des éléments radioactifs présents naturellement dans les roches et il faut donc assurer leur traitement avant leur retour à l'environnement [1, 2]. Ceci n'est d'ailleurs ni nouveau ni spécifique aux gaz de schiste mais la mise en œuvre de l'eau est effectuée dans ce dernier cas à plus grande échelle.

³ Depuis l'introduction industrielle en 1947 de la fracturation hydraulique profonde, 2,5 millions d'opérations ont été réalisées dans le monde.

6. La présence de méthane et d'autres contaminants dans les eaux souterraines doit être surveillée, tout comme les fuites potentielles de méthane et d'autres gaz dans l'atmosphère. Le *Comité* souligne **l'importance d'un suivi (monitoring) qui devrait être effectué avant, pendant et après les opérations d'exploration/exploitation**. La surveillance des fuites potentielles de méthane peut permettre de mieux évaluer l'empreinte en termes d'effet de serre de l'extraction de gaz de schiste [3, 4, 14]. Avant toute exploration un état des lieux environnemental doit permettre de caractériser la situation locale (qualité de l'eau douce et quantité de méthane présente dès l'origine dans les aquifères de surface). On pourra ainsi mieux surveiller l'impact de l'exploitation et remettre le terrain en l'état après la fin des activités d'exploration et d'exploitation. Cela pourrait avoir pour effet d'éviter de mettre en cause l'extraction des gaz de schiste lorsqu'une pollution existe déjà à l'état initial [1, 2].

7. Sur la question des alternatives à la fracturation hydraulique, *le Comité* constate que des méthodes utilisant l'électro-fissuration, la fracturation thermique ou l'injection de propane ou de CO₂ supercritique ont été proposées et sont déjà mises en œuvre à petite échelle. Le *Comité* observe cependant qu'à l'heure actuelle **ces méthodes ne constituent pas une alternative à la fracturation hydraulique utilisable en pratique**. Il note que, sans négliger la recherche sur ces méthodes ou sur de nouvelles méthodes, il faudrait aussi travailler sur l'amélioration des procédés de fracturation hydraulique (réduction des quantités d'eau nécessaires, monitoring, définition des additifs les plus compatibles avec l'environnement...).

8. Le *Comité* considère que **la question de l'étanchéité à long terme des forages** d'exploitation des gaz de schistes, même obstrués, mérite un examen attentif. Le vieillissement des cimentations et la corrosion des tubages, sur le long terme, sont inévitables, mais leurs effets sont mal connus et il pourrait en résulter, après montée en pression, une perte d'étanchéité des puits scellés. Une opération d'étanchéification pérenne des forages est possible, par alésage et extraction sur une hauteur suffisante des tubages et cimentation, puis mise en place d'un bouchon étanche en matériaux naturels (argile compactée). Mais il existe peut-être une alternative à ces travaux coûteux. À l'évidence ce sujet doit être traité, au besoin par une réglementation adaptée (voir [13]).

9. Les gaz de roche-mère d'hydrocarbures ou de charbon sont là depuis des millions d'années et ne sont pas une nouvelle manne tombée du ciel au XXI^e siècle. Ils sont connus par les géologues depuis au moins 40 ans, et par les mineurs de charbon depuis bien longtemps ; mais ce qui manquait jusqu'ici est une méthode correcte d'exploitation. La loi interdit la fracturation hydraulique mais n'interdit ni les forages verticaux, ni les forages horizontaux à partir de ces derniers. On peut supposer que les réserves de méthane sont abondantes dans les vieux bassins houillers, l'abondance de matière organique fossile et les accidents historiques en témoignent. D'où l'intérêt de procéder à un ou des essais dans cette situation géologique. *Le Comité* propose, comme première voie d'action vers l'exploitation éventuelle des gaz de roches-mères, de **procéder à des tests en vraie grandeur dans des conditions respectant la réglementation en vigueur** : tests par puits verticaux sans fracturation hydraulique dans des zones déjà fracturées dans de vieux bassins charbonniers où la matière organique est abondante et propre à générer d'importantes quantités de gaz. Ces forages verticaux seraient suivis ou non de

forages horizontaux de différents types pour maximiser le débit de méthane, pour mesurer son évolution au fil du temps et pour étudier la densité de forages nécessaire pour récupérer des quantités significatives de méthane à l'échelle industrielle. *Le Comité* note que la distinction entre gaz de charbon et gaz de schiste n'a qu'une portée limitée car il s'agit des mêmes processus géologiques, et la nature et la tenue mécanique des couches encaissantes sont variables dans tous les cas.

ANNEXE

Cette annexe traite de quatre aspects. Elle propose à la section 1, une synthèse des connaissances sur les gaz de schiste (on trouvera un exposé plus détaillé dans la référence [9] qui traite plus généralement des hydrocarbures de roches-mères. La revue [17] propose un dossier accessible à un large public). La section 2 de cette annexe rassemble l'essentiel des recommandations présentées dans un rapport conjoint de la Royal Society et de la Royal Academy of Engineering [6]. La section 3 traite des risques environnementaux associés à l'extraction des gaz de roche-mère et passe en revue les méthodes qui pourraient être utilisées pour maîtriser ces risques. Enfin, la section 4 traite de la question du bilan global de l'extraction et de l'utilisation des gaz de roche-mère en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

1. Les gaz et huiles de schiste en quelques mots

Le gaz de schiste, qu'on devrait plutôt désigner sous le nom de gaz de roche-mère, est un **gaz naturel**, formé par du méthane et quelques autres hydrocarbures, le plus souvent enfoui à grande profondeur (1 500 à 3 000 m), dans des roches compactes et imperméables [1]. L'existence des gaz de roche-mère ne constitue pas une découverte nouvelle, comme certains pourraient le penser. Les connaissances scientifiques acquises depuis plus de 30 ans sur la genèse des hydrocarbures, liquides et gazeux, peuvent être utilisées pour évaluer ces ressources. Les réserves sont considérables et bien réparties dans le monde : on estime qu'elles pourraient fournir 120 à 150 ans de la consommation actuelle de gaz naturel.



Figure – Régions européennes qui pourraient comporter des réserves de gaz de schiste et gaz de houille exploitables (Source : Agence internationale de l'énergie 2012 [16], présenté par B. Courme [2]).

En Europe, les réserves de gaz de schiste sont estimées entre 3 000 et 12 000 milliards de m³ (entre 75 et 300 ans de consommation annuelle pour la France). Les ressources seraient en France de 5 100 milliards de m³. On donne à la figure 1 une carte des régions européennes qui pourraient contenir des réserves exploitables de gaz et huiles de schiste.

L'évaluation de ces réserves fait actuellement débat. Cependant, les conditions de formation et de migration des hydrocarbures dans les bassins sédimentaires sont connues et on sait évaluer, à partir de la nature et de la teneur en matière organique des sédiments, de l'histoire de l'enfouissement, et de l'évolution thermique qui en résulte, les quantités d'hydrocarbures liquides et gazeux générés et celles qui sont encore restées en place. Les connaissances géologiques, géophysiques et géochimiques disponibles peuvent permettre d'évaluer, sur des bases scientifiques, les ressources potentielles de notre pays en gaz et huile de roches-mères. Cela permettrait de préciser les estimations proposées actuellement. En l'absence de ce type d'information, les incertitudes sont grandes. Ainsi, par exemple, en Pologne on donne des chiffres qui correspondent à des durées de 30 à 440 ans de consommation du pays, et qui pourraient permettre à ce pays de retrouver une certaine indépendance par rapport aux importations de gaz russe, sans que ces chiffres aient pu être précisés. L'exploration entamée par Exxon a en effet été arrêtée en fonction du manque de visibilité réglementaire sur l'exploitation des gaz de schiste et des incertitudes sur les possibilités d'extraction commerciale à partir de roches relativement imperméables.

L'exploitation des gaz de schiste repose sur l'association de deux technologies : la fracturation hydraulique (inventée en 1949 et utilisée dans plus d'un million de puits pour de nombreuses applications pétrolières) et le forage horizontal introduit plus récemment. Cette combinaison a permis un développement à grande échelle aux États-Unis.

Le développement du gaz de schiste a radicalement changé la situation de l'offre d'énergie aux États-Unis. Cette ressource, considérée comme étant d'un coût relativement faible, leur a permis de retrouver l'indépendance d'approvisionnement en énergie et la renaissance d'activités manufacturières créatrices d'emplois, tout en assurant une réduction des émissions de carbone. Ces avantages ont cependant un impact sur les collectivités situées dans les régions dans lesquelles cette ressource est en exploitation. La plupart de ces zones sont peuplées et les riverains sont peu familiers avec les activités d'exploitation pétrolière et gazière. Le développement du gaz de schiste est mis en question par les résidents, les groupes environnementaux et les organismes de réglementation. Ces préoccupations sont à la base d'un dialogue actif en matière de développement du gaz de schiste aux États-Unis [4]. Bien que des négligences majeures aient été commises dans les premiers temps, l'expérience américaine a montré que l'exploitation des gaz de schiste peut être développée de manière responsable lorsque les organisations concernées s'engagent à utiliser des méthodes appropriées et développent une communication ouverte et transparente avec toutes les parties prenantes [4].

2. Les recommandations britanniques

Les études réalisées dans le cadre de la Royal Society et de la Royal Academy of Engineering britanniques [3,6] par un comité présidé par Robert Mair, donnent des pistes concrètes. Les éléments principaux sont rassemblés ci-après sous la forme d'une suite d'observations exprimées dans le contexte britannique, mais qui peuvent tout aussi bien s'appliquer à la France :

- La fracturation hydraulique peut être développée de manière efficace au Royaume-Uni à condition que les meilleures pratiques opérationnelles soient mises en oeuvre et solidement encadrées par la réglementation.
- Une réglementation forte et des systèmes de suivi (monitoring) efficaces doivent être mis en place et les meilleures pratiques strictement observées au cas où le gouvernement donnerait le feu vert à de nouvelles explorations.
- On s'attend à ce que la sismicité induite par la fracturation hydraulique soit plus faible que celle ressentie naturellement au Royaume-Uni ou celle liée aux activités minières – elles-mêmes faibles si on les juge selon les standards mondiaux. Il faut cependant mettre en place un suivi (monitoring) de la sismicité robuste et efficace.
- Les risques de contamination des aquifères à partir des fractures sont très faibles à condition que l'extraction de gaz se fasse à partir des profondeurs de plusieurs centaines de mètres en dessous des nappes phréatiques.

On peut tirer parti de cette expérience et des analyses réalisées pour définir les cahiers des charges, élaborer des réglementations adaptées et s'appuyer sur les meilleures pratiques. Les recommandations sont les suivantes :

- Donner la responsabilité principale de la réglementation de l'extraction des gaz de schiste à un régulateur unique.
- Renforcer le rôle et les moyens des agences de régulation, en leur apportant des ressources supplémentaires en tant que de besoin.
- Imposer une évaluation des risques environnementaux pour toutes les opérations portant sur les gaz de schiste, et faire en sorte qu'elles soient soumises pour analyse aux régulateurs.
- Réaliser une cartographie de l'état initial et assurer le suivi de la contamination éventuelle avant puis pendant la durée de l'activité d'exploration et d'exploitation.
- Assurer une surveillance rigoureuse du méthane dans les eaux souterraines, de la sismicité et des fuites de méthane avant, pendant et après la fracturation hydraulique.

- Renforcer le système d'inspection des puits pour garantir que leur conception inclut non seulement une perspective « santé et sécurité » mais aussi une perspective environnementale.
- Pratiquer des tests adaptés d'intégrité des puits dans un cadre standardisé.
- Établir des procédures de pilotage intégré pour s'assurer que l'eau est utilisée de façon durable et pour minimiser les déchets.

3. L'analyse des risques pour l'environnement associés à l'extraction des gaz de roche-mère

L'impact potentiel de l'extraction des gaz de roche-mère est un sujet d'inquiétude pour le public et les collectivités. Les préoccupations portent principalement sur : la contamination potentielle de l'eau potable à partir du méthane ou de produits chimiques utilisés dans la fracturation hydraulique, la pollution de l'air induite par les fuites d'hydrocarbures en cours d'exploitation, les perturbations pour les collectivités par les travaux associés à la mise en exploitation et lors de la production de gaz de schiste, les impacts cumulatifs négatifs sur les communautés et les écosystèmes. Les critiques de l'extraction des gaz de schiste concernent principalement les effets induits sur l'environnement [1,2].

La pollution des aquifères par le méthane

La question la plus importante est celle de la possibilité d'une pollution des aquifères par le méthane ou par les produits utilisés pour la fracturation. A ce stade, on peut rappeler que la présence de méthane peut avoir plusieurs origines qui n'ont pas toutes comme source des fuites dans l'exploitation des gaz de schiste. On trouve ainsi **du méthane biogénique** généré par la respiration des micro-organismes dans les couches plus superficielles, et du **méthane géogénique** correspondant à un flux naturel dans les zones de failles de forte pression. En général, cette production de méthane est connue ou peut l'être avant toute exploitation. En particulier, une différenciation des origines du méthane est possible au moyen de sa signature isotopique. En soi le méthane dissous dans l'eau peut présenter un risque explosif s'il se dégage dans l'air en milieu confiné, mais en solution et en faible quantité il ne présente pas de risque toxicologique ; ce sont plutôt les éventuelles molécules aromatiques qui l'accompagnent qui sont à surveiller. Une valeur de 10 mg/l de méthane est considérée comme un seuil de préoccupation par les autorités sanitaires américaines.

Des fuites induites par les activités d'exploitation pourraient aussi être source de méthane dans les aquifères. Les chemins de migration peuvent avoir des origines variées. Ils peuvent emprunter des fracturations existantes ou induites, ils peuvent résulter d'un défaut de cimentation entre le tubage (*casing*) et le terrain, d'un vieillissement de ces tubages, de la cimentation ou d'une fuite entre puits de production et puits voisin, ou encore d'une fuite associée au retour des fluides de fracturation.

Cependant, le risque de contamination directe due à la fracturation hydraulique est peu probable et il peut être maîtrisé si on respecte une distance verticale de sécurité avec les aquifères. Dans la grande majorité des exploitations, cette distance est

supérieure à plusieurs centaines de mètres ou au kilomètre. La profondeur des fracturations relevée à partir d'une cartographie fondée sur la micro-sismique indique la position des fractures par rapport aux aquifères et on peut constater que cette distance est généralement grande. Il apparaît donc assez facile de respecter cette condition et d'éviter ce type de risque. Le risque d'une mise en contact avec un aquifère profond du fait du réseau de fissures existant est considéré comme étant très faible si la distance verticale entre les zones d'hydrofracturation et les aquifères est suffisante.

L'intégrité du tubage

Une deuxième possibilité est celle d'une contamination associée à un défaut d'intégrité du tubage ; une mauvaise étanchéité du tubage (*casing*) au passage d'un aquifère peut aussi se produire pour les gisements conventionnels. Ce risque est bien identifié et maîtrisé par l'industrie du gaz et du pétrole. Il peut être réduit par un respect rigoureux des règles. La probabilité de défaillance est faible si les puits sont réalisés, exploités puis abandonnés selon les meilleures pratiques mais il y a aussi des exemples de ce qu'il ne faut pas faire [14] et c'est le rôle de la réglementation de les éviter.

La gestion des fluides de fracturation

Une contamination peut aussi résulter d'un débordement ou d'une défaillance des moyens de stockage en surface des fluides utilisés pour la fracturation. Ce risque, présent dans beaucoup de secteurs industriels, peut lui aussi être réduit par un respect rigoureux des meilleures pratiques.

Les effets sur l'environnement des produits injectés pour réaliser la fracturation hydraulique sont aussi à prendre en considération. Les contaminations qui pourraient être induites par ces produits et le devenir des eaux de forage sont des sujets de préoccupation. Les additifs permettent une fracturation et une productivité plus efficaces. Ils appartiennent à trois catégories : (1) des biocides qui réduisent la prolifération bactérienne dans le puits, (2) des produits qui aident la pénétration du sable injecté pour maintenir ouvertes les fractures, (3) des substances qui favorisent la productivité du puits. Il y a un réel besoin de transparence sur ces additifs et une évaluation des risques associés est nécessaire. Des études doivent aussi être engagées pour trouver des additifs compatibles avec les normes environnementales. Pour lever les interrogations, il faut assurer la plus grande transparence sur les additifs utilisés dans le procédé et remplacer les produits dangereux par des équivalents moins nocifs (en accord avec le règlement REACH adopté par le Conseil de l'Union européenne en 2006). Un site a été mis en place aux États-Unis sur lequel presque tous les fournisseurs indiquent désormais la composition précise des produits injectés, autrefois tenue secrète pour des raisons de compétition industrielle. Assurer le traitement des eaux de forage fait partie du cahier des charges des opérateurs. Les filières de traitement correspondantes doivent naturellement être envisagées avant toute exploration ou exploitation.

Qualité de l'air et fuites de méthane

La question de la qualité de l'air et des problèmes de fuite de méthane est aussi à prendre en compte. Ce risque, bien identifié par l'industrie du gaz et du pétrole, doit être réduit en multipliant les efforts pour contrôler les émissions de méthane en mettant en œuvre un contrôle des émissions sur les équipements du puits. Il s'agit

dans tous les cas de capter le méthane pour le torcher plutôt que de le libérer, puis de développer des alternatives au torchage.

Les nuisances

Les populations et les collectivités locales s'inquiètent aussi de l'occupation des sols, des modifications du paysage par déploiement d'un procédé de forage à une grande échelle avec multiplication des puits et des perturbations induites par les travaux associés à la mise en exploitation et lors de la production de gaz de schiste. Les opérations sont source de bruit, elles augmentent la circulation des camions, induisent une modification du paysage et ont un impact sur la valeur des biens. Il faut évidemment tenir compte de ces nuisances et chercher à les réduire. L'exploitation des gaz de roche-mère nécessite effectivement une densité de puits plus importante que celle qui est mise en œuvre dans le cas du gaz naturel conventionnel mais il est possible de concentrer plusieurs puits sur une même plate-forme, d'optimiser l'utilisation des plates-formes de forage à plusieurs puits en s'appuyant sur le forage horizontal pour accéder au sous-sol sur une plus grande surface, ou développer des technologies pour réduire la consommation d'eau. Il est aussi possible d'intégrer l'installation dans le contexte local et de minimiser les nuisances au moment du forage et ultérieurement pendant toute la phase d'exploitation, et de développer et mettre en œuvre des méthodes pour atténuer le bruit. D'une façon générale il importe de communiquer clairement et honnêtement sur les inconvénients et les avantages potentiels (avant toute exploration/exploitation) et de mettre en place un dialogue avec toutes les parties prenantes.

La ressource en eau

Les grandes quantités d'eau nécessaires à l'hydrofracturation sont souvent considérées comme *excessives par rapport aux ressources disponibles de plus en plus rares*. La consommation correspond uniquement aux phases de forage et de mise en exploitation et elle doit être comparée à d'autres utilisations de l'eau. Les quantités d'eau nécessaires, pour une quantité d'énergie récupérée donnée, sont généralement exprimées par million de Btu (le Btu ou British Thermal Unit est très utilisé par les pétroliers au Royaume-Uni et aux États-Unis, 1 MBtu = 1GJ). Tout en restant prudent sur les chiffres avancés ci-après, on note qu'il faut 2 à 20 L d'eau par GJ pour le gaz conventionnel, 30 à 80 L d'eau par GJ pour le gaz de schiste, 20 à 120 L/GJ pour le charbon. Lorsqu'on produit des biocarburants les quantités d'eau nécessaires sont de deux ordres de grandeurs plus importantes et il faut environ 1 000 L/GJ.

Il faut au total environ 15 000 m³ pour la réalisation d'un forage et pour la fracturation hydraulique correspondante (pour fixer les idées, la consommation en eau potable d'une ville comme Paris est d'environ 550 000 m³ par jour soit 200 millions de m³ par an, un golf haut de gamme de 18 trous en France consomme en moyenne 90 000 m³ par an). Il faut cependant, dans l'utilisation de ces données illustratives, considérer les quantités d'eau réellement consommées en prenant en compte leur restitution et la qualité de celle-ci.

Dans tous les cas, la gestion des ressources en eau est un aspect majeur et doit prendre en compte la disponibilité des ressources, le recyclage des eaux, et la prévention des contaminations des aquifères par les eaux de forage. Sur ce dernier point, on doit protéger les aquifères traversés par un tubage multiple et un

scellement complet du puits. Les eaux qui ressortent du puits peuvent avoir lessivé des éléments radioactifs ou des métaux lourds présents naturellement dans les roches et il faut donc les traiter. Il y a des possibilités de valorisation par extraction de substances d'intérêt commercial dans les eaux sortant des puits.

La consommation d'eau diminue nettement après la fin du forage, en cours d'exploitation, et c'est le sable qui maintient les fractures ouvertes. Les eaux qui ressortent du puits sont retraitées. L'exploitation des gaz de schiste est donc dépendante de la disponibilité en eau.

La sismicité induite

Des questions ont également été soulevées au sujet de la sismicité induite par la fracturation hydraulique. L'analyse effectuée au Royaume-Uni rappelle qu'il s'y produit un séisme de magnitude 5 tous les vingt ans, et de magnitude 4 tous les trois à quatre ans (il s'agit de la magnitude locale au sens de Richter). La sismicité associée à l'exploitation des mines de charbon est généralement de moindre ampleur que la sismicité naturelle et ne dépasse pas la magnitude 4. L'ampleur de la sismicité induite par la fracturation hydraulique ne serait pas supérieure à 3 (un niveau ressenti par quelques personnes et entraînant le cas échéant quelques effets de surface). La sismicité récente induite par la fracturation hydraulique dans le Royaume-Uni était de magnitude 2,3 (peu susceptible d'être ressentie). En définitive, les études réalisées indiquent que les niveaux sont plus faibles que ceux ressentis naturellement ou que ceux qui sont liés aux activités minières – elles-mêmes faibles. Il faudrait cependant distinguer le cas de régions où la sismicité est déjà forte du fait du mouvement local d'une faille. Dans tous les cas cette sismicité doit être suivie (*monitoring*) de façon robuste et efficace.

4. Le bilan global de l'exploitation des gaz de schiste en termes d'émission de gaz à effet de serre

Une des critiques soulevées à propos de l'exploitation des gaz de schiste est celle de l'impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre. On donne ici quelques éléments sur un sujet qui mérite d'être étudié de façon plus approfondie.

On note d'abord que pour obtenir une énergie de 50 MJ, il faut 1 kg de méthane, ce qui produit après combustion complète 2,75 kg de CO₂. Pour obtenir la même énergie il faut 1,52 kg de charbon et il en résulte 5,58 kg de CO₂. Pour la même quantité d'énergie, il y a donc un facteur deux en termes d'émissions de CO₂. Le remplacement du charbon par du gaz naturel dans les centrales à combustible fossile diminue de moitié les émissions de gaz à effet de serre. Avec des centrales à cycle combiné (incluant une turbine à gaz et des turbines à vapeur), on peut atteindre des rendements de l'ordre de 60 %, c'est-à-dire doubler le rendement d'une centrale classique brûlant du charbon. Le remplacement du charbon dans la production d'électricité a eu un effet direct sur les émissions de CO₂ des États-Unis qui ont effectivement diminué au cours des dernières années. Du point de vue de la contrainte climatique, le remplacement du charbon par du gaz naturel est positif si le niveau de fuite de méthane reste faible (un sujet qui est traité plus loin). On évite aussi des émissions polluantes particulières au charbon (dispersion de métaux lourds et d'éléments radioactifs naturels) et on réduit les émissions d'oxydes de soufre (d'un facteur 20), d'oxydes d'azote (d'un facteur 4) et de particules (d'un facteur 70).

Les bénéfices en termes d'émission de CO₂ pourraient cependant être annulés si les fuites de méthane au cours de l'exploitation du stockage et du transport du gaz étaient trop importantes. Le méthane est effet lui-même un gaz à effet de serre avec un potentiel de forçage radiatif nettement plus élevé que celui du CO₂ mais sa durée de vie dans l'atmosphère est bien plus réduite.

Il n'y a pas consensus sur l'impact potentiel de fuites de méthane associées à l'exploitation de gaz de roche-mère. Certains, comme par exemple [10], affirment que les fuites de méthane des exploitations de gaz de schiste seraient de un tiers à deux fois supérieures à celles des gaz exploités de manière conventionnelle et pourraient conduire à un effet de serre supérieur à celui du charbon ou du pétrole à un horizon de 20 ans et équivalent sur une durée de 100 ans, alors que d'autres chercheurs comme par exemple [11] aboutissent à la conclusion inverse selon laquelle l'exploitation des gaz de schiste conduirait à une réduction d'un facteur deux ou même trois des émissions de gaz à effet de serre. Le problème des fuites se pose aussi pour les exploitations conventionnelles de gaz naturel. Dans tous les cas, il faut minimiser les fuites de méthane, que l'exploitation soit conventionnelle ou non conventionnelle.

Références

- [1] **Bruno Goffé** (2013). Aspects géologiques de l'exploration et de l'exploitation des gaz de schiste. Conférence Académie des sciences, 26 février 2013.
- [2] **Bruno Courme** (2013). Aspects technologiques ; point de vue de l'industriel ; code minier. Conférence Académie des sciences, 26 février 2013.
- [3] **Robert Mair** (2013). The Royal Society/Royal Academy of Engineering. *Report on shale gas extraction in the UK*. Conférence Académie des sciences, 26 février 2013.
- [4] **Robert Siegfried** (2013). Environmental concerns with shale gas development in the United States. Conférence Académie des sciences, 26 février 2013.
- [5] **Nicolas Arnaud** (2013). Étude de cas : les bassins du sud du Massif Central. Conférence Académie des sciences, 26 février 2013.
- [6] **Royal Society and Royal Academy of Engineering** (2012). Shale gas extraction in the UK: a review of hydraulic fracturing. <http://royalsociety.org/policy/projects/shale-gas-extraction/report/>
- [7] **Comité de prospective en énergie de l'Académie des sciences** (2012). *La recherche scientifique face aux défis de l'énergie*. EDP Sciences, Les Ulis, France.
- [8] **F. Kalaydjian et B. Goffé** (2012). *Programme de recherche sur l'exploitation des hydrocarbures de roches mères*. Rapport du groupe de travail ANCRE, juin 2012.
- [9] **R. Vially, G. Maisonnier et T. Rouaud** (2013). *Hydrocarbures de roche-mère. État des lieux*. Rapport IFPEN 62729, 22 janvier 2013-04-06.

[10] **R. W. Howarth, R. Santoro and A. Ingraffea** (2011). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas in shale formations. *Climate Change*, doi: 10.1007/s10584-011-0061-5.

[11] **L.M. Cathles III, L. Brown, M. Taam, A. Hunter** (2011). A commentary on « The greenhouse-gas footprint of natural gas in shale formations » by R. W. Howarth, R. Santoro and A. Ingraffea. *Climate Change*, DOI 10.1007/s10584-011-0333-0.

[12] **J.C. Lenoir et C. Bataille** (2013). *Les techniques alternatives à la fracturation hydraulique pour l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures non conventionnels*. Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques. Rapport d'étape, juin 2013.

[13] **Conseil Régional d'île-de-France** (2012). *Risques potentiels de l'exploration et de l'exploitation des hydrocarbures non conventionnels en île-de-France*. Rapport du Conseil scientifique régional d'île-de-France.

[14] **R.E. Jackson, A.W. Gorody, B. Mayer, J.W. Roy, M.C. Ryan and D.R. van Stempvoort** (2013). Groundwater protection and unconventional gas extraction: the critical need for field-based hydrogeological research. *Groundwater*. doi: 10.1111/gwat.12074.

[15] **Board on environmental change and society**. Workshop on risks of unconventional shale gas development.
http://sites.nationalacademies.org/DBASSE/BECS/CurrentProjects/DBASSE_069201#.UezLThaJKKE)

[16] **International Energy Agency** (2012). *Golden rules for a golden age of gas*. International Energy Agency.

[17] **Dossier sur les gaz de schiste** (2012). *Science et pseudo-sciences de l'AFIS* (Association Française pour l'Information Scientifique), numéro 301, juillet-août.

Les conférences [1] à [5] peuvent être visionnées sur le site de l'Académie :
<http://www.academie-sciences.fr/video/v260213.htm>

Composition du groupe de travail

Roger Balian – Membre de l'Académie des sciences
Sébastien Balibar – Membre de l'Académie des sciences
Yves Bréchet – Membre de l'Académie des sciences
Édouard Brézin – Membre de l'Académie des sciences
Sébastien Candel (président) – Membre de l'Académie des sciences
Catherine Césarsky – Membre de l'Académie des sciences
Michel Combarnous – Correspondant de l'Académie des sciences
Vincent Courtillot – Membre de l'Académie des sciences
Jean Dercourt – Membre de l'Académie des sciences
Jean-Claude Duplessy – Membre de l'Académie des sciences
Pierre Encrenaz – Membre de l'Académie des sciences
Marc Fontecave – Membre de l'Académie des sciences
Robert Guillaumont – Membre de l'Académie des sciences
Marc Pélegrin – Correspondant de l'Académie des sciences
Olivier Pironneau – Membre de l'Académie des sciences
Michel Pouchard – Membre de l'Académie des sciences
Paul-Henri Rebut – Correspondant de l'Académie des sciences
Didier Roux – Membre de l'Académie des sciences
Bernard Tissot – Membre de l'Académie des sciences

Liste des experts auditionnés

Comité de prospective en énergie

22 novembre 2011

- Olivier Appert – Président de l'IFP Énergies nouvelles – Président de l'Ancre
- François Kalaydjian – Directeur de la Direction des technologies de développement durable – IFP Énergies nouvelles
- Nicolas Arnaud – Directeur de recherche – OSU-OREME – CNRS
- Françoise Elbaz-Poulichet – Directrice de recherche – OSU-OREME – CNRS
- Michel Séranne – Chargé de recherche – OSU-OREME – CNRS

Conférence débat 26 février 2013

- Nicolas Arnaud – Directeur de recherche – OSU-OREME – CNRS
- Bruno Courme – Total
- Bruno Goffé – Insu-CNRS
- Robert Mair – Cambridge University and Royal Society
- Robert Siegfried – Research Partnership to Secure Energy for America (RPSEA)

Comité de prospective en énergie

27 février 2013

- Robert Siegfried – Research Partnership to Secure Energy for America (RPSEA) – *Environmental concerns with shale gas development in the United States*

Remerciements

à Serge Abiteboul, Robert Dautray, Gérard Férey, Jean-Dominique Lebreton, Jean-Marie Lehn, Michel Le Moal, Ghislain de Marsily, Bernard Meunier, Yves Meyer, Jean-François Minster, Jean Salençon, Philippe Sautet et Alain-Jacques Valleron,

pour leurs commentaires, critiques et constructifs, lors du processus de discussion, dont il a été tenu compte dans la rédaction finale et qui ont permis d'améliorer la teneur du présent Avis.