

# LA QUESTION DE LA REVERSIBILITE DANS UN SYSTEME EVOLUTIF, CAS DU STOCKAGE GEOLOGIQUE DE CO<sub>2</sub>

J. Rohmer, O. Bouc, H. Fabriol, BRGM, [j.rohmer@brgm.fr](mailto:j.rohmer@brgm.fr)

A l'instar du stockage de déchets radioactifs, le stockage de CO<sub>2</sub> a pour objet la structure géologique sur des échelles de temps dépassant celle du siècle. Cependant, cette technologie émergente présente des spécificités intrinsèques cruciales par rapport à celle nucléaire, à l'aune desquelles la question sur la réversibilité se doit d'être réévaluée. Après une brève présentation du contexte du stockage géologique de CO<sub>2</sub>, nous donnons tour à tour différents éclairages de la question de la réversibilité, sur les plans législatif, physique et de la gestion des risques. Dans une dernière partie, nous abordons la question transverse des incertitudes inhérentes à l'évaluation de la réversibilité dans le contexte de la gestion des risques.

## Contexte

Depuis la moitié du 18<sup>ème</sup> siècle et, en particulier, le début de l'ère industrielle, l'utilisation des énergies fossiles (principalement charbon, gaz naturel, pétrole) s'est fortement accrue pour satisfaire les besoins de nos sociétés (e.g. transport, production d'énergie, production industrielle,...) et de ce fait, la dépendance de nos sociétés à cette forme d'énergie s'est profondément renforcée.

De nombreuses études ont montré le lien entre changement climatique, avec les impacts environnementaux associés, et émissions de gaz à effet de serre résultant de cette utilisation intense d'énergies fossiles. Une transition vers des infrastructures et technologies dites « propres » *i.e.* qui ne perturbent pas le climat apparaît comme nécessaire, mais exigera du temps. Des solutions à court terme dites « de transition » doivent par conséquent être envisagées. Dans l'éventail des solutions proposées, la technologie du « Captage et Stockage de CO<sub>2</sub> » (CSC) apparaît comme prometteuse avec une contribution aux objectifs de réduction des gaz à effets de serre à hauteur de 33 % d'ici 2050 [1].

Le CSC consiste à capter le CO<sub>2</sub> émis principalement par les activités d'origine industrielle (centrale thermiques a charbon, aciéries, cimenteries,...), représentant à elles seules près de 60 % des émissions mondiales annuelles. Le CO<sub>2</sub> est alors transporté par bateau ou par canalisations jusqu'à un site de stockage, où il sera injecté *via* des techniques pétrolières en profondeur dans la structure porale d'une cible géologique adéquate (aquifères profonds, réservoirs d'hydrocarbures en fin de vie, veines de charbon non exploitables, figure 1).

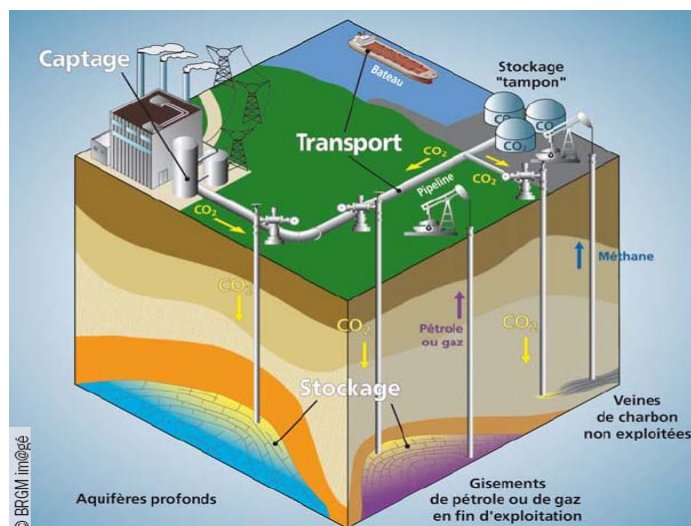


Figure 1 : Illustration de la chaîne de Captage, transport, stockage géologique de CO<sub>2</sub>

## La question de la réversibilité

### Eclairage « Législatif »

Dans le domaine nucléaire, les textes de loi de 1991 et 2006 du programme relatif à la gestion durable des matières radioactives mettent clairement en avant la notion de réversibilité.

Concernant les activités liées au stockage géologique de CO<sub>2</sub>, le texte de loi en vigueur correspond à la directive européenne récemment publiée au journal officiel le 23 avril 2009 et transposable dans le droit national de chaque état membre de l'Union à horizon 2011 : « directive 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil » [2].

Le cadre qui y est défini est celui d'un stockage sans mention de caractère réversible ou non. A ce titre, nous citons le chapitre 1, Article premier, Alinéa 2 : « L'objectif du stockage géologique du CO<sub>2</sub>, en toute sécurité pour l'environnement, est le confinement permanent du CO<sub>2</sub> de façon à prévenir et, lorsque cela est impossible, à supprimer le plus possible les effets néfastes et tout risque pour l'environnement et la santé humaine ». Ainsi le caractère définitif du stockage est affirmé.

### Eclairage « Phénomènes physiques »

Sur le plan des phénomènes physiques, la question de la réversibilité apparaît plus complexe. Alors que le stockage des déchets radioactifs utilise une structure artificielle (colis, laboratoire souterrain) entreposée dans une structure naturelle (couche géologique), le CO<sub>2</sub> est, quant à lui, directement piégé dans la structure naturelle (roche poreuse) selon différents modes [1].

(1) Le CO<sub>2</sub> est injecté en profondeur (au-delà de 800 m) à l'état supercritique dans la roche poreuse du réservoir via des techniques pétrolières. Par contraste de densité avec l'eau initialement présente dans la structure poreuse de la roche réservoir, le CO<sub>2</sub> a naturellement tendance à migrer vers le haut. Cette migration est stoppée par la présence d'une roche moins perméable que celle du réservoir *i.e.* la roche de couverture : c'est le piégeage « stratigraphique ». A ce stade, le CO<sub>2</sub> est sous sa forme la plus mobile *i.e.* sa forme supercritique.

(2) le deuxième processus quasi-immédiat après l'injection est le piégeage (dit « résiduel ») du CO<sub>2</sub> dans les pores étroits de la roche réservoir par des effets

capillaires. Le CO<sub>2</sub> reste sous sa forme supercritique, mais est immobilisé dans la structure de la roche.

(3) le CO<sub>2</sub> réagit avec l'eau initialement présente au sein du réservoir et prend alors sa forme ionique par dissolution dans l'eau : c'est le piégeage « par dissolution ». Ce processus résulte en un fluide plus dense que celui initialement présent, qui tend donc naturellement à migrer vers le bas du réservoir, diminuant ainsi le risque de fuite.

(4) Enfin, en combinaison avec l'eau du réservoir, le CO<sub>2</sub> peut réagir avec les minéraux en présence et ainsi précipiter en un minéral stable (dont la forme la plus commune est le calcaire).

La réversibilité d'un tel stockage n'est donc pas binaire (totalement réversible ou irréversible), mais est graduelle. Le degré de réversibilité dépend directement du degré de mobilité du CO<sub>2</sub>, qui varie selon la forme de piégeage dans lequel le CO<sub>2</sub> se trouve. Alors que sous sa forme supercritique, le degré de réversibilité est maximal, la mobilité du CO<sub>2</sub> diminue fortement sous sa forme ionique jusqu'à s'annuler sous sa forme stable minérale. Réfléchir à la réversibilité dans un tel système tri-modal, est d'autant plus compliqué que la proportion de CO<sub>2</sub> sous chaque forme, et donc le degré de réversibilité du stockage, évolue au cours du temps. La figure 2 illustre ce processus en schématisant (figure B) le lien entre degré de mobilité, forme du CO<sub>2</sub> et degré de réversibilité.

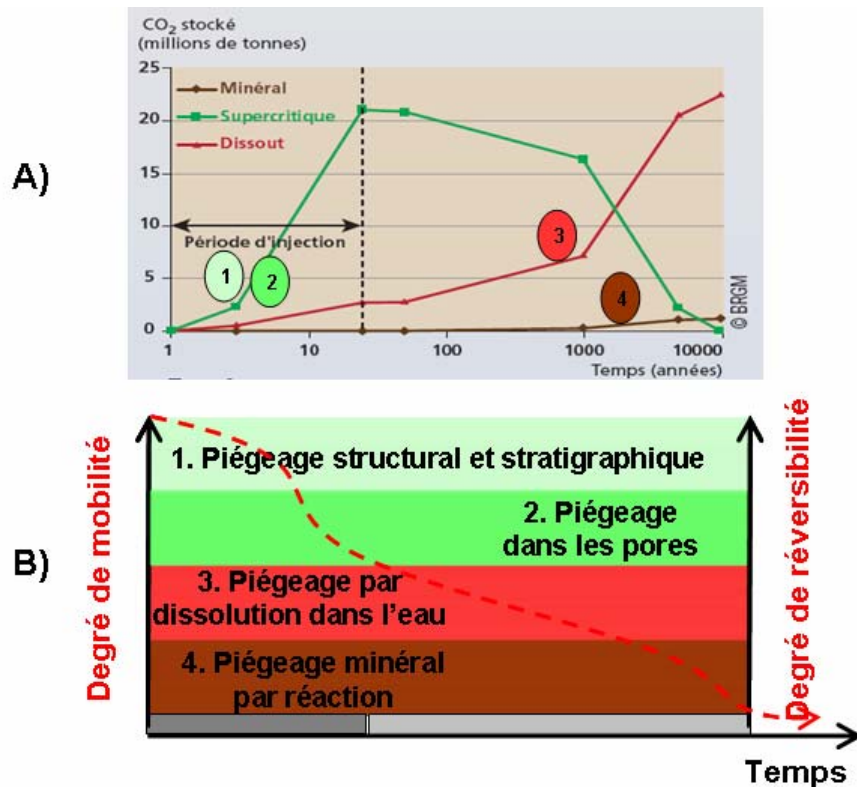


Figure 2: Evolution simulée de la forme de piégeage du CO<sub>2</sub> dans le réservoir de Sleipner (adapté de [3]) en fonction du temps (figure A) et schématisation du lien entre degré de mobilité de chaque forme de piégeage et degré de réversibilité (figure B)

Les simulations réalisées sur le site de stockage norvégien de Sleipner [3], nous donnent des ordres de grandeur des différents phénomènes de piégeage (Figure 2, A). Ainsi, environ 15 % du CO<sub>2</sub> injecté se trouve sous forme dissoute après 10 ans et seul 5 % du CO<sub>2</sub> injecté

devrait être minéralisé tandis que 95 % sera dissout après 10 000 ans.

### **Eclairage « Gestion des Risques »**

Alors que dans un stockage en souterrain basé sur des structures artificielles (tunnels, béton, soutènement,...), la notion de réversibilité doit être intégrée dès la phase de conception du projet, elle est « contrainte par les phénomènes naturels en présence » dans le cas du stockage géologique de CO<sub>2</sub>. Comme détaillé ci-dessus, le degré de réversibilité va de pair avec le degré de mobilité du CO<sub>2</sub> selon ses différentes formes de piégeage, avec une tendance décroissante au cours du temps. En termes de gestion des risques, une telle évolution temporelle va donc dans le sens de la sécurité [1]. Cependant, les études à long terme du stockage géologique de CO<sub>2</sub> montrent que les temps de piégeage peuvent être importants (Figure 2, A).

La réversibilité du stockage géologique de CO<sub>2</sub> est corrélée au niveau de risque : elle est maximale lorsque le CO<sub>2</sub> est le plus mobile, donc le plus susceptible de fuir ; sa diminution au fil du temps, par l'évolution du système de stockage vers des formes de piégeage stable, est à comparer à l'atténuation du risque de fuite qui en résulte également. En matière de gestion des risques, la réversibilité naturelle du stockage géologique de CO<sub>2</sub> peut ainsi, en première approche, être perçue comme une contrainte, car elle correspond à une propension du CO<sub>2</sub> à la fuite. En revanche, elle apparaît également comme un recours possible face à un dysfonctionnement éventuel, puisqu'elle est justement mobilisable au cours de la période où un tel événement est le moins improbable. Gérer les risques impose d'anticiper le plan d'actions à mettre en œuvre face à une défaillance éventuelle de la structure de confinement (*i.e.* une fuite de CO<sub>2</sub>). Adopter une telle démarche constitue une garantie supplémentaire pour les pouvoirs publics et les populations face à cette nouvelle technologie émergente.

Dans le domaine du stockage du CO<sub>2</sub>, la réversibilité s'inscrit donc dans ce cadre de gestion des risques. Une option simple de mesure de correction est l'extraction du CO<sub>2</sub> stocké par les techniques habituelles de production d'hydrocarbures [4], [5]. La faisabilité d'une telle technique a été démontrée entre autres sur le site norvégien de Sleipner. Les simulations réalisées montrent que 47.7 % du CO<sub>2</sub> injecté pourraient être extraits en 7 ans de production utilisant un puits horizontal unique [6].

## **La question des incertitudes**

### **Les sources d'incertitudes**

Pour une gestion efficace des risques liés au stockage géologique de CO<sub>2</sub>, il faut pouvoir fournir aux décideurs une estimation de la quantité de CO<sub>2</sub> mobilisable en fonction du temps et donc du degré de réversibilité du stockage.

Cependant, cette estimation est intimement liée à la connaissance de l'objet géologique, qui est un objet complexe et par essence hétérogène faisant intervenir de multiples phénomènes sur des échelles spatio-temporelles larges (depuis la taille du pore de la roche à celle du bassin, et de l'ordre du siècle à celui du millénaire).

La connaissance d'un tel objet d'étude est donc entachée d'incertitudes. Face à l'incertain, deux sources d'incertitudes sont à considérer (*e.g.* [7], [8]). La première source d'incertitudes correspond à la variabilité naturelle du système et aux phénomènes stochastiques le régissant ; ces incertitudes sont dites « aléatoires ». Alors que cette première source est liée à la nature même du système, la seconde est liée à notre capacité à recueillir de la connaissance et des informations sur le système. Par exemple, le nombre, la répartition, la qualité et l'exhaustivité des mesures que l'on peut réaliser sur une surface de sol donnée sont déterminées au regard des nécessaires considérations de temps, de moyens matériels et bien sûr financiers. L'information disponible sur le système présente par

conséquent un caractère imprécis, incomplet, voire vague, à l'origine d'incertitudes dites « épistémiques ».

En matière de gestion des risques, une réflexion est donc à mener sur le lien entre caractérisation des phénomènes en jeu, caractérisation de l'incertitude inhérente, outils de représentation mathématique [9] et aide à la décision.

### L'aide à la décision face à l'incertain

Considérons le modèle de MacMinn et Juanes [10], qui permet d'évaluer le temps maximal de piégeage d'une bulle de CO<sub>2</sub> dans les pores. L'objectif n'est pas ici le détail de ce modèle, mais l'illustration d'une prise de décision face aux deux sources d'incertitudes mentionnées ci-dessus. Supposons, dans un premier temps, que l'incertitude puisse être considérée comme purement aléatoire. Dans ce cas, le modèle fournit au décideur une unique courbe probabiliste dite de « décision ». Cette courbe associe à un temps maximal de piégeage, une unique probabilité de réalisation (Figure 3 A). Ainsi, pour une bulle de 100 Mt, la probabilité que le temps de piégeage soit inférieur à 65 000 ans est de 95 %.

En pratique, notre capacité à recueillir l'information la plus exhaustive possible n'est jamais parfaite et un degré d'imprécision existe. Dans ce cas, l'incertitude est non seulement de caractère aléatoire, mais également épistémique et la courbe probabiliste de décision n'est plus unique, mais imprécise. Une famille de courbes de décision (e.g. [8]) résulte de la combinaison des deux sources d'incertitudes et est traduite par la donnée d'une paire de courbes de décision dites « extrêmes », correspondant respectivement aux visions « la plus pessimiste » et « la plus optimiste » du système (courbes rouge et verte, figure 3 B). La probabilité que le temps de piégeage soit inférieur à 65 000 ans est alors comprise entre deux bornes « basse » et « haute » définies par les courbes de décision « extrêmes ». Dans le cas de la figure 3 B), cette probabilité est comprise entre 95 et 100 %.

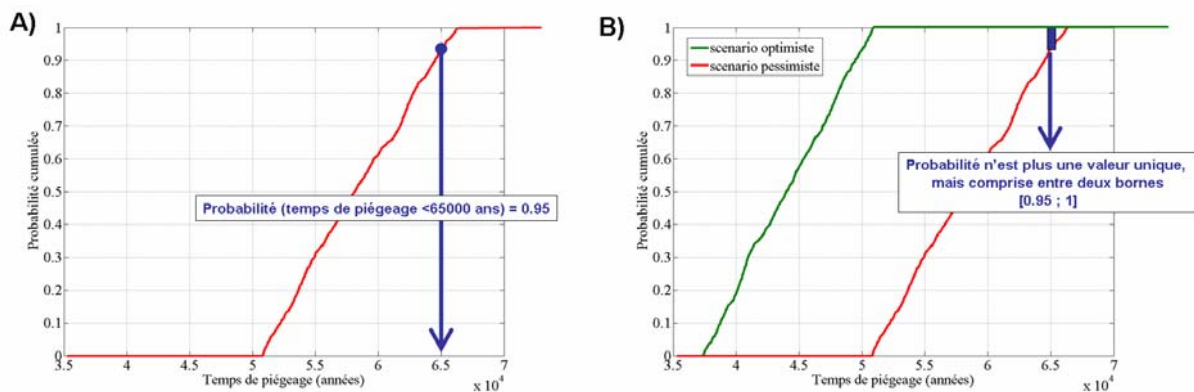


Figure 3: A) Courbe de décision face à une incertitude purement aléatoire ; B) Paire de courbes de décision face à une incertitude aléatoire et épistémique

Dans la chaîne de décision « évaluation du risque – analyse du risque – choix politiques », le rôle de l'expert est la revue de l'évidence, l'évaluation du risque sur la base d'hypothèses et de scénarios de risques (e.g. [11]). Ainsi, confronté à un contexte incertain pour l'évaluation de la réversibilité des stockages géologiques de CO<sub>2</sub>, il est du rôle de l'expert de traduire non seulement le caractère aléatoire de l'information disponible sur le système géologique, mais également son degré de méconnaissance, afin de garantir une transparence et une cohérence maximale de l'information réellement et techniquement accessible sur le risque. Le degré de méconnaissance est directement mesurable par l'écart entre les deux courbes de décisions pessimiste et optimiste. Dans l'exemple considéré, le degré de méconnaissance se traduit par une différence de 5% sur la probabilité d'un piégeage total au bout de 65000 ans.

Cependant, en gagnant en transparence, la démarche perd en efficacité, car il apparaît plus difficile de prendre une décision en tenant en compte d'un encadrement de valeurs et non plus une seule et unique information. Une démarche de synthèse de l'information incertaine doit être proposée.

Une première approche, pour le décideur, consisterait à invoquer le principe de précaution et à ne choisir que la courbe de décision pessimiste (courbe rouge, figure 3 B). Néanmoins, le résultat peut se révéler bien trop conservateur et négligerait toutes les informations qui suggèrent une vision plus optimiste (courbe verte, figure 3 B). Une alternative réside en la définition d'une courbe de décision combinant les deux courbes « extrêmes ». Le poids associé à chaque courbe représente alors une mesure de l'aversion du décideur au risque [12]. Cette approche a l'avantage de n'introduire un élément subjectif qu'*a posteriori* dans la phase de prise de décision et non dans les étapes de représentation de l'information sur le système géologique et d'évaluation du risque. De cette manière, « le monde des possibles » reste toujours « ouvert » *i.e.* le décideur a en mains toutes les courbes de décisions possibles face à l'incertain.

On remarquera que si l'aversion du décideur face au risque est maximale, le poids associé à la courbe de décision pessimiste est maximal et celui associé au scénario optimiste minimal ; dans ce cas, l'approche rejoint celle invoquant le principe de précaution.

### Synthèse

En guise de synthèse, nous soulignerons les points suivants :

- (1) Le cadre législatif du stockage de CO<sub>2</sub> ne fait pas mention de notion de réversibilité ;
- (2) Sur le plan physique, un stockage géologique de CO<sub>2</sub> est caractérisé par une réversibilité « naturelle » ;
- (3) La réversibilité du stockage de CO<sub>2</sub> est partielle, liée à la forme de piégeage du CO<sub>2</sub>, et graduellement décroissante au cours du temps ;
- (3) Dans une approche de gestion des risques liés au stockage de CO<sub>2</sub>, la notion de réversibilité apparaît comme une mesure de correction en cas de dysfonctionnement de la structure de confinement ;
- (4) L'évaluation du degré de réversibilité est liée à la connaissance d'un milieu géologique, qui est un objet complexe, hétérogène, variable, vaste, et qui fait intervenir de multiples phénomènes caractérisés par des échelles de temps larges. Dans un tel contexte, une aide à la décision en matière de gestion des risques exige une transparence et une cohérence face à l'information réellement accessible. La part de subjectivité dans la chaîne de décision ne doit être introduite qu'*a posteriori* dans la phase de prise de décision, et non dans l'étape de représentation de l'information sur le système géologique et d'évaluation du risque, afin que le décideur ait en mains toutes les courbes de décisions possibles face à l'incertain.

### Références

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2005) : *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge University Press, New York.
2. Directive Européenne, 2009, *Directive 2009/31/CE du parlement européen et du conseil, 23 avril 2009, relative au stockage géologique du dioxyde de carbone*, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:FR:PDF>
3. Audigane P., Gaus I., Czernichowski-Lauriol I., Pruess K., Xu T. (2007) : *Two-dimensional reactive transport modeling of CO<sub>2</sub> injection in a saline aquifer at the*

*Sleipner site, North Sea. Am. J. Sci.*, 307, 7, 974-1008.

4. Benson S., Hepple R., (2005) : *Chapitre 28 : Prospects for early detection and options for remediation of leakage from CO<sub>2</sub> storage projects*, Dans : Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations, Volume 2, D.C. Thomas and S.M. Benson (Eds.).
5. IEA-GHG, (2007) : *Remediation of leakage from CO<sub>2</sub> storage*, Technical Study, Report n°2007/11, 438 pp.
6. Akervoll I., Lindeberg E., Lackner A., (2009) : *Feasibility of Reproduction of Stored CO<sub>2</sub> from the Utsira Formation at the Sleipner Gas Field*, Energy Procedia 1,1, 2557-2564.
7. Casti J., (1990) : Searching for certainty. William Morrow (Ed.), New York.
8. Dubois, D., (2007) : *Uncertainty Theories: a Unified View*, IEEE SMC UK&RI 6th Conference on Cybernetic Systems 2007, September 6-7, 2007, University College Dublin, Irelande.
9. Ferson S., Ginzburg L., (1996). *Different methods are needed to propagate ignorance and variability*, Reliability Engineering and System Safety, 54, 133-144.
10. MacMinn C.W., Juanes R., (2009) : *A mathematical model of the footprint of the CO<sub>2</sub> plume during and after injection in deep saline aquifer systems*, Energy Procedia, 1, 1, 3429-3436.
11. Hurwicz L., (1951) : *Optimality Criteria for Decision Making under Ignorance*, Cowles Commission Discussion Paper n°370.
12. Zmirou-Navier D., (2009) : *Du contradictoire dans l'expertise scientifique : chacun à sa juste place*, séminaire « Recherche-expertise », des organismes du P 187 (BRGM, CEMAGREF, CIRAD, IFREMER, INRA et IRD), cadre du COMité OPérationel « Recherche », Grenelle de l'environnement, Paris, 27 mars 2009.