

Sécurité, gestion des risques et surveillance

La Rédaction¹.

Sécurité et gestion des risques se retrouvent au carrefour de la demande technique et de la réglementation. La surveillance se conçoit et se met en place en fonction de ces deux demandes. Comme la réglementation varie d'un pays à l'autre, voire d'une région administrative à l'autre (États aux États-Unis, Länder en Allemagne...) chaque pays, en lien avec les industriels, va prendre en main sa vision de la sécurité et des risques, même si les problèmes se retrouvent largement entre un pays et un autre. Les Pays-Bas, les États-Unis et le Royaume-Uni, en particulier, sont en pointe sur ces sujets. Par voie de conséquence, c'est dans des projets internationaux que l'on s'efforcera de travailler sur des points de convergence entre pays.

La sécurité de chaque stockage de CO₂ doit être étudiée au niveau local, pour prendre en considération les impacts de cette activité sur la santé, l'environnement alentour et les autres utilisations du sous-sol. Ceci complète ainsi l'analyse de performance du stockage, qui se rapporte à un risque au niveau global, celui de ne pas produire les effets escomptés en termes de limitation des émissions de gaz à effet de serre, et donc de réponse aux changements climatiques.

Comme nous l'avons vu dans l'article consacré à la réglementation du captage - stockage de CO₂, la base législative est celle de la Directive européenne 2009/31/CE du 23 avril 2009, dont la transposition en droit français est prévue pour le 25 juin 2011. Entre temps, l'article 80 de la Loi Grenelle 2 du 12 juillet 2010 destiné à ouvrir le champ de l'exploration des sites a permis d'introduire des modifications dans le Code minier et le Code de l'environnement, qui concernent aussi les questions de sécurité. Il faut mettre à part le pilote de Lacq qui a démarré antérieurement à ces modifications législatives, sur la base d'une autorisation s'appuyant sur la législation en vigueur à l'époque.

Quoiqu'il en soit, les acteurs de la recherche dans ce domaine travaillent aujourd'hui à la fois sur une vision méthodologique théorique en prenant en compte différents scénarios et sur des sites pilotes en cours d'expérimentation ou prévus.

Lors de sa réunion de Londres en novembre 2006, le Groupe technique du CSLF² a décidé de créer un groupe de travail pour examiner les standards et les procédures d'évaluation de risque. Ce groupe est présidé par les États-Unis et plusieurs pays y sont représentés (Australie,

Canada, États-Unis, France, Inde, Japon, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni), ainsi que le programme de R&D de l'AIE³ sur les gaz à effet de serre. Le rapport d'activité de phase I du groupe⁴, dont nous tirons l'essentiel des commentaires qui suivent, souligne l'accent mis sur les risques spécifiquement associés au captage et au stockage à long terme du CO₂. Dans ce contexte, l'évaluation du risque peut s'appliquer à n'importe quel point de la filière, mais le groupe de travail a privilégié le stockage en formation géologique, considérant que les autres enjeux associés aux étapes précédentes de la filière sont relativement bien compris.

Pour cette évaluation, on peut s'appuyer sur des outils développés sur d'autres types d'opérations industrielles comme la récupération assistée du pétrole (EOR) en utilisant le CO₂, le stockage de gaz naturel ou la gestion des gaz acides. Dans tous ces cas, on injecte de grands volumes de fluide ou de gaz supercritique dans des réservoirs géologiques, avec l'impératif de contenir ces fluides dans la zone concernée du réservoir. L'échelle, relativement petite, de ces opérations reste du même ordre de grandeur que celle d'un site de stockage de CO₂, même si on la compare aux grands volumes de CO₂ à injecter, et permet donc un retour d'expérience.

Certains aspects sont toutefois spécifiques au stockage de CO₂, en lien avec les échelles d'espace et de temps (décennies à siècles) du stockage, certains types de contextes géologiques comme les formations salines profondes ou tout simplement l'incertitude liée à l'hétérogénéité des systèmes géologiques et à notre impuissance à bien les caractériser. L'évaluation du risque englobe la probabilité d'occurrence d'un événement, mais également les impacts potentiels durant une opération de stockage ou après sa fermeture. On distingue ainsi les impacts directs comme une fuite de CO₂ à partir d'un réservoir et les impacts indirects dus au déplacement des fluides originellement présents dans le réservoir (saumures, autres gaz...) ou à la propagation de pressions résultant de l'opération d'injection de CO₂.

On peut aussi invoquer une série d'impacts potentiels sur l'environnement (géosphère, biosphère, hydrosphère et atmosphère) : espace du réservoir, autres ressources minérales profondes, propriétés géomécaniques profondes, eaux de surface et souterraines, écosystèmes terrestres, accumulation dans des zones de faiblesse de circulation atmosphérique, fuites de gaz déplacés vers

1. Remerciements à Hubert Fabriol et à Olivier Bouc, BRGM, pour leur aide dans l'élaboration de ce texte.

2. Carbon Sequestration Leadership Forum.

3. Agence Internationale de l'Énergie.

4. Phase I Final Report from CLSF Risk Assessment Task Force. CLSF T-2009-04, October 2009, 52 p.

l'atmosphère. Le rôle de l'évaluation de risque est donc de déterminer la probabilité d'occurrence et les conséquences de chacun de ces impacts potentiels, de façon à les minimiser avec des pratiques de gestion de risque.

Un certain nombre d'outils ont été développés pour évaluer les risques dans des installations industrielles, comme la méthode HAZOP⁵ pour les systèmes thermohydrauliques, ou l'approche FMECA⁶ qui met l'accent sur la défaillance possible d'un système, ou encore la méthode SWIFT⁷ qui se réfère à des listes de contrôle pour identifier les risques au niveau d'un système, ou l'analyse probabiliste de risque par la méthode PRA⁸. Toutes ces méthodes n'ont qu'une pertinence limitée dans le cas du stockage de CO₂.

L'approche par FEPs⁹ a été couramment utilisée pour le stockage géologique du CO₂, selon plusieurs adaptations. Il s'agit d'un catalogue de caractéristiques, événements et autres processus qui peuvent influencer le comportement d'un système géologique aménagé, catalogue prenant la forme d'une base de données permettant de décrire les enjeux liés à un site géologique donné ou de choisir les FEPs significatifs susceptibles d'être utilisés dans les scénarios et modèles, et dans leur évaluation. Le système des FEPs peut être employé dans une analyse de site en trois étapes dont l'ensemble relève de l'évaluation de la sécurité : analyse de scénarios à partir de modèles conceptuels, développement de descriptions mathématiques des scénarios critiques et évaluation des conséquences potentielles résultant des scénarios critiques. Le système des FEPs a été utilisé, par exemple, à Sleipner (Norvège), Weyburn (Canada) et In Salah (Algérie).

Le projet SAMCARDS (2002-2003) coordonné par TNO¹⁰ et auquel participait le BRGM, portait sur la technologie d'évaluation de sûreté pour le stockage du CO₂. L'objectif était de développer une méthodologie et des outils de modélisation pour évaluer les risques à long terme associés au stockage de CO₂. SAMSCARD faisait partie d'un ensemble plus large (*CO₂ Capture Project, CCP*) conduit sous la supervision de 9 groupes industriels¹¹ et dont l'objectif était de développer des technologies et méthodes pour le captage et stockage de CO₂.

La démarche proposée par TNO repose sur l'analyse déjà évoquée des facteurs de risques (FEPs), la sélection des plus critiques (scénarios de fuite discrets) et la modélisation de scénarios identifiés à partir de la base de FEPs mise au point, appliquée par exemple au site de Schweinrich (Allemagne du NE) dans le cadre du projet CO₂STORE. Le retour

d'usage des utilisateurs semble montrer que la méthode présente l'avantage de l'exhaustivité et de la transparence, mais l'inconvénient de la lourdeur et de la complexité.

Au fil des années, de nombreux travaux ont fait le point sur l'état d'avancement des recherches dans ce domaine. On peut d'abord citer les programmes cadres comme la synthèse du GIEC (2005), les programmes européens, notamment CO₂ReMoVe ou le Programme sur les gaz à effet de serre de l'AIE¹². La littérature est également abondante par thématique (modèles de systèmes ou de processus pour l'évaluation du risque, étude d'analogues naturels...) ou les études de cas. Cette abondante littérature permet d'identifier des risques et des enjeux partagés, parmi lesquels le risque de fuite par d'anciens forages est considéré comme très supérieur au risque de fuite par failles, sans oublier les impacts sur l'environnement à diverses échelles évoqués plus haut.

Face à cette diversité de situations à risques, la surveillance joue un rôle essentiel en réduisant les incertitudes et en vérifiant les prévisions de performance d'un site. En cas de fuite avérée, c'est la remédiation qui doit intervenir en s'appuyant, au stade de connaissances actuel, sur les techniques utilisées dans l'industrie pétrolière : recyclage de gaz à profondeur moindre, contrôle de la pression dans l'aquifère et scellement de la couverture ou des puits.

Comme il ne serait pas raisonnable d'aborder, même succinctement chacun des très nombreux projets de R&D consacrés à ces thèmes du stockage souterrain de CO₂ de par le monde, nous nous limitons à quelques projets majeurs dans lesquels les partenaires français ont été impliqués.

Projet Surveillance et monitoring du stockage géologique de CO₂ (Geocarbone Monitoring)

Il s'agit d'un projet ANR qui s'est déroulé de décembre 2005 à mai 2008, pour un budget total de 1,801 million d'euros, dont 0,972 d'aide. La coordination du projet a été confiée au BRGM, les autres partenaires étant : IFP¹³, INERIS¹⁴, INPL¹⁵, GDF Suez, Schlumberger et TOTAL. L'objectif du projet était double : 1) évaluation des méthodes de détection et de cartographie du CO₂ dans le réservoir, 2) détection et quantification des fuites éventuelles entre le réservoir et la surface. Les cibles test ont été choisies dans le Bassin parisien (Dogger carbonaté entre 1 500 et

5. Hazard and Operability Study.

6. Failure Modes, Effects and Criticality Analysis.

7. Structured What-If Technique

8. Probabilistic Risk Assessment.

9. Features, Events, Processes.

10. Netherlands Organisation for Applied Scientific Research.

11. BP, Chevron, ENI, Norsk-Hydro, PanCanadian, Shell, Statoil, Suncor and Texaco.

12. Agence Internationale de l'Énergie.

13. Institut français du pétrole.

14. Institut national de l'environnement industriel et des risques.

15. Institut national polytechnique de Lorraine.

1 800 m, Trias argilo-gréseux entre 2 000 et 2 500 m) et deux méthodes de détection privilégiées : géophysique et géochimie.

Le site de St-Martin-de-Bossenay (10) a été choisi pour tester numériquement la **sismique active répétée** dans la mesure où les diagraphies étaient disponibles. Les résultats montrent que la faiblesse des variations d'amplitude attendues (augmentation du temps de transit et baisse de vitesse) ne seraient pas décelée par sismique classique et que l'acquisition de nouvelles données de puits serait indispensable.

En matière de **résistivité électrique**, des modélisations ont été réalisées pour évaluer la variation du champ électrique en surface créé en injectant du courant dans la couche conductrice profonde au moyen de deux forages métalliques utilisés comme de longues électrodes. Dans le cas précis de St-Martin-de-Bossenay, le contraste de résistivité entre le CO₂ supercritique, résistant, et la saumure conductrice serait insuffisant pour entraîner une variation mesurable en surface (moins de 0,5%). Par contre, la méthode est applicable dans d'autres cas de contrastes plus favorables, lorsque des enregistrements répétitifs sont en cours, comme sur le site pilote de Ketzin en Allemagne.

Des tests de **gravimétrie** (état zéro et 3 répétitions effectuées entre octobre 2006 et octobre 2007), réalisés sur le stockage de gaz saisonnier de Chémery (Loir et Cher, 41), ont montré de faibles variations temporelles du signal, en partie liées à des effets hydrologiques superficiels (battements de nappes, humidité du sol). L'approche par inversion a permis néanmoins de proposer un scénario d'évolution et de migration de l'eau à l'intérieur du réservoir, en accord avec les informations disponibles. Sur le même site de Chémery, ainsi que sur le site de Soings-en-Sologne (41)¹⁶, l'**interférométrie radar**, testée avec succès sur le gisement pétrolier d'In Salah (Algérie) pour détecter des déformations de surface liées à des modifications géomécaniques en profondeur, n'a souligné aucun changement entre juillet 1995 et mars 1997, malgré la précision de la mesure : 1 cm par la méthode classique et 1 mm par la méthode des réflecteurs persistants (PSI)¹⁷. On évoque l'importance du couvert végétal, la densité trop faible des réflecteurs naturels ou anthropiques ainsi que le faible écart temporel maximum entre deux couples d'images (70 jours).

Les méthodes de prélèvement et d'analyse de gaz ont été testées jusqu'à 200 m de profondeur, ce qui a montré que de très faibles concentrations de CO₂ peuvent être décelées. Pour les mesures de proche surface, les chambres à accumulation ont été adaptées pour des mesures de très faibles flux et un dispositif de mesure continue de CO₂ par spectrométrie FT-IR a été développé.

Quatre partenaires du projet ont comparé leurs outils et méthodes de **mesure de gaz dans les sols et à l'interface sol-air** en les testant sur le réservoir naturel de CO₂ de Montmiral (26) exploité depuis 1990 et sur le site volcano-sédimentaire de Ste-Marguerite (03). La comparaison, répétée en 2006 et en 2007, a porté sur les mesures en continu par spectromètre FT-IR (voir plus haut), l'analyse de différents gaz dans les sols aux différents points d'une grille et des mesures de flux avec chambres à accumulation, ainsi que des mesures de vitesse de remontée du radon avec capteurs Barasol. Même si des concentrations anormales de CO₂ et de radon ont été détectées, on observe une grande variabilité spatiale (liée ou non à des accidents tectoniques) et temporelle (variations de perméabilité liées à l'hygrométrie) des résultats, ainsi qu'une contribution biologique prépondérante dans les sols. Ces résultats militent pour l'installation d'une ligne de base pendant un an sur un site, avant tout projet d'injection, afin de caractériser les gaz et leurs fluctuations naturelles.

Enfin, une campagne aéroportée de mesures hyperspectrales, réalisée sur ces deux sites, a montré que le CO₂, en l'absence de gaz nocifs (H₂S, SO_x), ne semble pas perturber le couvert végétal, sauf en cas de forte concentration comme à Sainte-Marguerite. À noter aussi la réalisation de deux études de microbiologie pour évaluer et quantifier l'impact des fuites de CO₂ sur la microflore du sol.

Au final, ni la géophysique, ni la géochimie ne proposent, seules, de solutions évidentes à mettre en place, que ce soit pour suivre les mouvements du CO₂ en profondeur ou déceler des fuites en surface. À l'issue de ce projet ANR, il paraissait clair que des expérimentations pluridisciplinaires plus complexes et de plus longue durée sont nécessaires pour parvenir à des méthodologies opérationnelles sur ces objectifs. Depuis, les nombreux projets collaboratifs en cours en France et dans le monde participent activement à tester et proposer des méthodes de monitoring intégrées pour répondre aux exigences de sécurité et de gestion des risques.

Projet CRISCO₂ (Critères de sécurité pour le stockage géologique du CO₂ : approche qualitative / quantitative de scénarios de risque)

Introduction

Ce projet ANR, coordonné par le BRGM avec pour partenaires Armines - ENSMP, le Centre de Géosciences, l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (Université Paul Sabatier), le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel et TOTAL SA, s'est déroulé de décembre 2006 à février 2010. Il porte sur l'élaboration

16. À Chémery, mis en service en 1968, le gaz est stocké à une profondeur de 1 085 m. Dans le site de Soings-en-Sologne, mis en service en 1981, le gaz est stocké à une profondeur de 1 140 m.

17. Les PSI (Persistent Scatterer Interferometry) sont des « cibles radar » privilégiées dont les caractéristiques sont telles qu'elles permettent des mesures précises de distance au capteur. Les PS peuvent correspondre à des infrastructures comme des bâtiments, des structures métalliques ou à des éléments géologiques naturels (types de roches).

d'une approche simple pour identifier les conditions de sécurité applicables à un site de stockage de CO₂ et repose sur la construction de scénarios d'évolution pour le stockage géologique du CO₂, en fonctionnement normal et en situation dégradée. Le comportement du stockage doit être évalué, non seulement pour se prémunir contre le risque global de réchauffement excessif de la planète, mais également afin d'estimer les risques locaux liés à des fuites de fluides, des modifications géomécaniques des terrains ou des modifications physico-chimiques du sous-sol. Dans le projet, l'accent a été mis sur les méthodes de construction de scénarios d'évolution pour le stockage géologique du CO₂ puis sur la possibilité de transposer au cas du CO₂, certains aspects méthodologiques relatifs aux installations industrielles classiques, et la constitution de modèles simples pour étudier les risques. Les renseignements qui suivent sont tirés pour l'essentiel du rapport final du BRGM¹⁸.

Des risques industriels aux risques liés au stockage de CO₂

Les risques liés au stockage géologique de CO₂, notamment la prise en compte du système dans le temps long, ne peuvent être appréhendés exactement par une analyse de risques industriels classique qui repose communément sur l'enchaînement d'évènements menant à un accident. En l'occurrence, il s'agit de développer des scénarios pertinents pour déterminer le comportement du stockage dans le temps et détecter les déviations potentielles par rapport à la situation attendue.

L'analyse de risques est au cœur de l'étude de dangers (EDD), telle que définie pour les installations classées (ICPE)¹⁹. En outre, d'après l'arrêté PCIG du 29 septembre 2005²⁰, les scénarios de risques identifiés doivent être caractérisés en termes de probabilité d'occurrence, cinétique, intensité des phénomènes dangereux et gravité des conséquences. Néanmoins, il n'y a pas de prescription nationale pour la prise en compte des conséquences des scénarios d'accident sur l'environnement, à la différence des conséquences sur les humains. Selon l'INERIS²¹, l'étude de dangers suit les 4 étapes suivantes :

- collecte des **données d'entrée** : environnement, activité et fonctionnement, procédés et installations, matières premières et déchets ;
- caractérisation des **dangers** et des **enjeux** : retour d'expérience, enjeux, agresseurs externes potentiels, potentiels de dangers ;
- analyse des **risques** : préliminaire et détaillée ; c'est la phase déterminante ;

- caractérisation et **maîtrise des accidents majeurs potentiels** : probabilité d'occurrence, gravité des conséquences, cinétique, niveau de maîtrise et maintien dans le temps.

La notion d'accident majeur dépassant les limites de l'établissement étudié, préoccupation centrale des études de danger, est difficilement transposable au contexte du stockage géologique du CO₂ au-delà de la phase opérationnelle du stockage. À plus long terme, on ne peut plus distinguer l'intérieur et l'extérieur du périmètre de l'établissement et, en subsurface, les limites sont éventuellement celles du réservoir de stockage. Se pose ainsi la délimitation du secteur d'étude à inclure dans une analyse de risques liés à un stockage de CO₂. En dehors de cette question des limites, les grands principes de l'EDD paraissent adaptés au stockage du CO₂ :

- recherche d'impacts aussi faibles que possibles, dans des conditions techniques et économiques raisonnables ;
- proportionnalité de l'étude aux risques générés ; toutefois se pose la question de la prise en compte des cibles à long terme ;
- responsabilité du demandeur, jusqu'au transfert de la responsabilité du site vers l'État comme étape ultime de la clôture du site ;
- priorité à la réduction du risque à la source.

Dans l'identification des scénarios de risque, l'analyse préliminaire des risques est déterminante. Mais, alors que dans une activité industrielle « classique », la décomposition en sous-ensembles fonctionnels et le retour d'expérience correspondent à des composantes bien maîtrisées de l'analyse, ce n'est pas le cas dans le stockage du CO₂ pour lequel les différentes composantes du système naturel ne sont que partiellement connues et les options d'ingénierie limitées (conception des puits, planification de l'injection et stratégie de surveillance).

Si l'on applique au stockage géologique du CO₂ la cotation retenue pour les scénarios accidentels dans le domaine des risques industriels (probabilité, cinétique, intensité, gravité), les incertitudes dominent. La composante probabilité en particulier ne peut résulter que de jugements d'experts, pas du retour d'expérience, compte tenu des échelles de temps en jeu. Ces experts, en outre, doivent essentiellement être des spécialistes du milieu naturel considéré. Par ailleurs, la notion de barrière de sécurité est problématique dans le cas du stockage du CO₂, puisque le site sera essentiellement équipé de dispositifs de surveillance. La notion de zone de stockage secondaire pourrait être assimilée à une barrière de sécurité, s'il existe un aquifère salin sus-jacent capable de stocker le CO₂ qui s'échapperait du réservoir. Sur le long terme,

18. BOUC O. et al. (2010) – Critères de sécurité pour le stockage géologique du CO₂ : approche qualitative / quantitative de scénarios de risque. Projet CRISCO₂ – Volet 4. Rapport final. BRGM/RP-58280 – FR, 122 p.

19. Voir : Article L.512-1 du Code de l'environnement, Guide 2006 du MEEDDM, Décret 77-1133 du 21 septembre 2007 sur les ICPE et arrêté du 12 mai 2000 modifié le 29 mai 2005 sur la prévention des accidents majeurs.

20. Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

21. INERIS, 2006 : L'étude de dangers d'une installation classée. Rapport d'étude no46055, INERIS – MEDD, 103 p.

il n'existe pas réellement de barrières de sécurité intervenant sur le système naturel.

Identification des scénarios de risques

Dans le captage et le stockage du CO₂, une des difficultés majeures, en dehors des incertitudes sur le milieu géologique, est liée à l'échelle de temps du confinement, de l'ordre du millénaire. Dans le projet CRISCO₂, l'objectif d'identifier des scénarios de risque pouvait se faire, soit en mettant en avant l'aspect systématique proposé par l'outil FEPs, soit en utilisant des listes restreintes d'événements de risque. C'est cette 2^{ème} voie qui a été retenue, en s'appuyant sur le projet australien GEODISC²².

Mise au point par les chercheurs du CO₂ Cooperative Research Centre, la méthode retenue dans GEODISC repose sur le jugement d'un groupe d'experts, issus de diverses disciplines, l'objectif étant de donner une valeur à la probabilité d'un événement de risque et à ses conséquences. Mise en œuvre sur trois sites de projets concrets (Gordon, Latrobe Valley et Otway Basin), la méthode d'évaluation porte sur tous les risques d'un projet (techniques, économiques...) et dépasse donc la seule analyse de sécurité. Sur les 6 indicateurs retenus, deux concernent les impacts sociétaux et environnementaux.

Les difficultés concernant le passage des risques industriels aux risques liés au stockage de CO₂ ont conduit, pour le projet CRISCO₂, à revenir vers la méthodologie proposée dans le projet GEODISC et à l'adapter en y intégrant certains aspects de l'analyse de risque industriel classique. Le système proposé comporte trois volets :

- une liste générique d'événements de risque ;
- une typologie des cibles et des impacts correspondants ;

- une interface informatique pour l'animation d'un atelier d'experts.

Le scénario de référence prévoit l'évolution attendue au niveau du réservoir de stockage. L'identification des déviations possibles par rapport à ce scénario relève, comme nous l'avons évoqué, d'un atelier pluridisciplinaire d'experts s'appuyant sur la liste générique de 11 événements et enjeux, regroupée en 5 catégories, présentée dans le tableau 1, et sur un système d'information géographique s'appuyant sur toutes les données nécessaires. À titre d'exemple, la figure 1 présente un schéma explicatif des événements liés à la caractérisation du site dans le cas d'un stockage en aquifère. Ce schéma resterait valable dans le cas d'un champ d'hydrocarbures dépleted, après quelques adaptations.

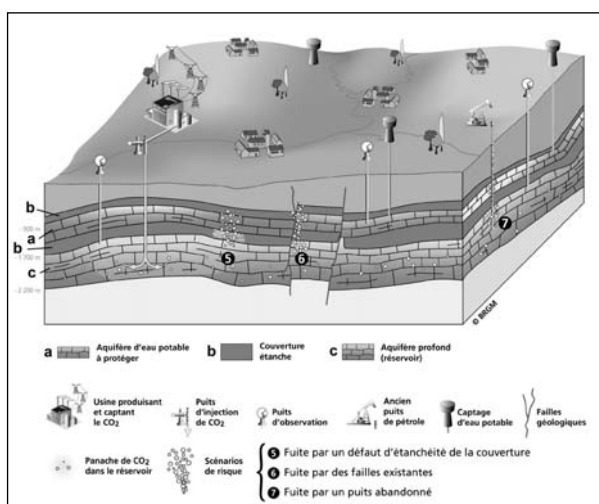


Figure 1. Schéma explicatif présentant les événements liés à la caractérisation du site (Rapport BRGM, Bouc O. et al., 2010).

Catégorie	N° Item	Item
A - Événements liés à la conception et la conduite des opérations	1	Fuite par un puits en exploitation
	2	Surpressurisation locale au niveau du puits d'injection
B - Événements liés au dimensionnement des opérations par rapport à la réponse du système géologique	3	Surpressurisation du réservoir à l'échelle régionale
	4	Dépassement de l'extension latérale prévue
C - Événements liés à la caractérisation du site	5	Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture
	6	Fuite par des failles existantes
	7	Fuite par un puits abandonné
D - Événements liés à la possibilité d'occurrences d'effets secondaires	8	Formation d'un stockage secondaire plus proche de la surface, suite à une migration verticale non attendue
	9	Modification des écoulements verticaux (drainance) suite aux changements des champs de pression
E - Événements liés à la vulnérabilité du complexe de stockage à des agressions externes	10	Forage ultérieur
	11	Fracturation induite par un séisme naturel

Tableau 1. Liste des événements de risque (source : rapport CRISCO₂).

22. Projet (1999-2003) de recherche de sites de stockage dans les bassins sédimentaires d'Australie.

Numéro	Type de cible
1	Homme
2	Aquifères
3	Eaux de surface
4	Environnement marin
5	Environnement terrestre de surface
6	Sols
7	Environnement bâti
8	Atmosphère
9	Autres ressources souterraines

Tableau 2. Types de cibles (source : rapport CRISCO₂).

Le travail d'expert réalisé pour la typologie des cibles et des impacts a permis de recenser 9 types de cibles (Tabl. 2) susceptibles d'être affectées par les risques liés au stockage géologique, en particulier : le CO₂ lui-même, les composés annexes susceptibles de migrer avec le CO₂, les saumures et l'énergie mécanique résultant de la mise en pression du réservoir.

Pour l'élaboration de scénarios, un modèle conceptuel de site peut distinguer plusieurs types de compartiments : 1) les couches réservoirs (réservoir de stockage, aquifères supérieurs), 2) les couches peu perméables (couvertures principale et secondaires), 3) les voies de transfert entre les strates perméables (défaillances d'étanchéité des couches imperméables), 4) les éléments vulnérables.

Gestion des incertitudes et modélisation des risques

La démarche de gestion des incertitudes s'efforce de distinguer deux volets :

- la variabilité naturelle dans le temps et/ou dans l'espace de beaucoup de phénomènes physiques ;
- l'imprécision, c'est-à-dire le caractère incomplet de l'information.

La démarche préconisée vise à une représentation des incertitudes respectant l'information disponible. Ainsi la démarche de probabilité s'avère pertinente à condition de disposer de mesures statistiques en nombre suffisant. Dans la distribution de possibilité, on met en évidence un intervalle de valeurs possibles, au sein duquel sont exprimées des préférences. Pour l'étude de la propagation des incertitudes, on peut utiliser des calculs de Monte-Carlo si les informations sont probabilistes ou le calcul d'intervalles flous si les paramètres sont tous imprécis. Les méthodes hybrides permettent de combiner les deux. Ensuite, il s'agit de fournir une aide au décideur, à la fois en distinguant les deux types d'incertitude et sur la base d'une bonne évaluation du niveau de connais-

sance disponible, ce qui permet aussi d'identifier les sources d'imprécision et de déterminer les paramètres sur lesquels des mesures complémentaires rendraient la décision plus robuste.

Les modèles générés pour étudier les événements de risque doivent pouvoir s'appliquer de façon simple à différents types de sites, en privilégiant des hypothèses prudentes mais raisonnables. Ces modèles abordent divers événements de risque. D'abord, *l'intégrité mécanique de la couverture*, qui peut être abordée par une approche numérique (modèle multicouches 2D) ou analytique. La première est très consommatrice en temps de calcul, la seconde s'applique plutôt à des réservoirs de type fermé. En conséquence, une 3^{ème} approche est proposée basée sur la méthodologie de la « surface de réponse » des contraintes effectives qui implique au préalable, par une analyse de sensibilité, de sélectionner les variables les plus importantes parmi 16 paramètres de matériaux et 4 paramètres de site, puis de procéder à une régression variable par variable, par ordre d'importance, jusqu'au calage approprié. L'estimation de robustesse des modèles montre que la méthode est pertinente. Pour passer au stade de l'aide à la décision, on construit ensuite des abaques utilisables pour l'évaluation des critères de rupture, notamment de la surpression admissible, ou de l'évaluation des incertitudes (probabilité de rupture).

Deuxième système abordé : la *remontée de CO₂ par un puits défectueux*. Un premier modèle prend en compte la transition réservoir-puits (débit de CO₂ entrant dans le réservoir), tandis qu'un second simule la remontée du CO₂ à travers une colonne d'eau, une hypothèse prudente alors que les puits sont couramment remplis de liquides plus visqueux. En régime permanent, lorsque la colonne d'eau est saturée en CO₂ dissous, l'intégralité du débit entrant se retrouve à la sortie et le premier modèle suffit pour estimer ce débit. Toutefois, les débits de remontée sont très dépendants des propriétés de barrières des puits, ce qui est un facteur important d'incertitude.

Le modèle de *remontée à travers une colonne poreuse* a pour objet de simuler un défaut dans le système, susceptible de provoquer des désordres dans la remontée : faille, puits abandonné, variation de faciès. Les principaux paramètres d'entrée sont la profondeur du réservoir et celle du défaut, la pression et la perméabilité. Les incertitudes relèvent d'une géométrie simplifiée du système, de la non prise en compte des phénomènes thermiques et des incertitudes sur les caractéristiques pétrophysiques et la perméabilité du milieu.

Le volet concernant la *perturbation en pression des aquifères sus-jacents au stockage* n'a pas été développé

dans le cadre du projet CRISCO₂. Les résultats des simulations réalisées antérieurement sur modèle multicouche 2D avec le code MARTHE, sur la colonne stratigraphique du bassin de Paris, ont été jugés peu concluants faute d'une connaissance appropriée des propriétés hydrodynamiques des roches, notamment des aquicludes.

Application au cas d'un aquifère du bassin de Paris

Un stockage dans l'aquifère carbonaté du Dogger dans le SE du bassin de Paris, étudié dans le cadre du projet ANR PICOREF, a été pris à titre d'exemple d'application. Cet aquifère se situe à environ 1700 m de profondeur et fait 150 m de puissance, pour une hauteur productive moyenne de 25 m. Le point d'injection supposé se situe entre Provins et Sens et l'on a testé plusieurs hypothèses d'injection, de 1 à 10 Mt de CO₂/an pendant 20 et 50 ans, à partir d'un seul puits injecteur.

Le travail de l'atelier d'experts a permis de considérer comme secondaires les événements de la catégorie A (voir tableau 1) et la modification des écoulements verticaux (catégorie D, Item 9), et d'écarter ceux de la catégorie E²³. Tous les autres événements ont été jugés prioritaires. Qu'ils soient jugés comme prioritaires ou secondaires, tous les événements doivent néanmoins être traités dans la modélisation, ce qui ne concerne pas la catégorie E, écartée.

Le bassin de Paris a aussi servi de terrain de jeu sur le problème de la gestion des incertitudes (voir ci-dessus). Par exemple, on s'est appuyé sur la carte de salinité de l'aquifère du Dogger qui permet de fournir une valeur de cette salinité ; un échantillonnage géographique sur la carte permet donc de représenter ce paramètre par une distribution de probabilité. Sur le même aquifère, la porosité, couramment située entre 10 et 20% d'après la littérature, a été représentée par une distribution de possibilité.

La méthode hybride de propagation des incertitudes a été appliquée dans le cas de simulations d'extension du CO₂ dans l'aquifère du Dogger. Dans chacune des simulations effectuées, on a utilisé une valeur unique pour les paramètres représentés par une distribution de probabilité et un intervalle pour ceux représentés par une distribution de possibilité. Sur un exemple de simulation, entre les bornes inférieures et supérieures de distribution de probabilité, la courbe d'indice de confiance peut être obtenue en affectant 2/3 à la borne pessimiste et 1/3 à la borne optimiste pour tenir compte de la faiblesse de l'information. Même si le décideur dispose ainsi d'un indi-

cateur unique, il n'en reste pas moins une grande incertitude pour la prise de décision. La prise de décision en présence d'information incomplète constitue un verrou qui devrait être levé par des recherches plus approfondies en concertation avec les décideurs.

Conclusion

La démarche proposée dans le cadre du projet CRISCO₂ se décompose en 6 étapes :

- rassemblement des données disponibles et élaboration du système d'information géographique ;
- simulation de l'injection de CO₂ par puits unique et détermination de l'extension de CO₂ dans le réservoir ;
- identification des scénarios par l'atelier d'experts ;
- simulations déterministes des situations spécifiques affectant le stockage (faille, changements de faciès, forage ancien) ;
- établissement des critères d'évaluation en tenant compte des seuils réglementaires existants ;
- comparaison des résultats des simulations aux critères retenus.

S'il s'avère que les hypothèses des modèles sont trop restrictives, on peut procéder à une nouvelle analyse de risques en mobilisant des modèles plus élaborés. Une connaissance insuffisante des propriétés du site peut être complétée par une étude bibliographique, mais surtout par de nouveaux travaux de caractérisation. Enfin, si le projet pose réellement des questions de sécurité, la conception des opérations peut être revue, suivie par une nouvelle analyse de risque.

À l'issue du projet CRISCO₂, il apparaît clairement que la bonne gestion d'un réservoir de CO₂, en minimisant les risques, reposera largement sur la qualité et la quantité de données disponibles et que la valeur des simulations dépendra pour une large part du renforcement de la connaissance sur les réservoirs sélectionnés. Comme l'indique la Directive européenne sur le stockage, la sécurité du stockage reposera également sur la surveillance continue et la détection précoce des comportements anormaux, associés à une panoplie de mesures correctives démontrant la capacité de l'opérateur à remédier à toute atteinte aux personnes et à l'environnement au sens large.

23. Événements liés à la vulnérabilité du complexe de stockage à des agressions externes.