

# Construction de scénarios d'évolution pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> : méthode et application

Rapport final

BRGM/RP-56592-FR  
Septembre 2008



# Construction de scénarios d'évolution pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> : méthode et application

Projet CRISCO2 – Volet 2

Rapport final

**BRGM/RP-56592-FR**

Septembre 2008

Étude réalisée dans le cadre de la  
Convention ANR-06-CO2-003

**O. Bouc**

**Vérificateur :**

Nom : H. Fabriol

Date :

Signature :

**Approbateur :**

Nom : H. Modaressi

Date :

Signature :

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

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.**

**Mots clés** : CRISCO2, Sécurité, critères, stockage géologique, CO<sub>2</sub>, scénario, risques, phénomène dangereux, cibles, long terme, méthode, Bassin de Paris

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**BOUC O.** (2008) – Construction de scénarios d'évolution pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> : méthode et application. BRGM/RP-56592 – FR, 108 p., 23 ill., 3 ann.

## Synthèse

Le captage et stockage géologique du CO<sub>2</sub> fait figure de recours possible pour atténuer les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, et ainsi limiter le réchauffement climatique du globe. Sa mise en œuvre nécessite cependant un cadre garantissant la sécurité des opérations. La difficulté principale pour cela tient aux échelles de temps concernées, puisque l'efficacité de cette technologie requiert un confinement du CO<sub>2</sub> pour une durée de l'ordre du millénaire. Les autres spécificités de cette technologie proviennent des incertitudes relatives au milieu géologique et de sa variabilité. Actuellement, il n'existe pas de normes communément acceptées pour évaluer la sécurité d'un stockage géologique de CO<sub>2</sub>, traitant aussi bien le court que le long terme.

Le projet CRISCO2 « Critères de sécurité pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> : approche qualitative / quantitative de scénarios de risque » cherche à progresser sur cette voie. Il a pour objectif de déterminer une méthodologie de définition de critères de sécurité pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Ce projet rassemble le BRGM, organisme français de référence pour l'étude du sous-sol, le Centre de Géosciences d'Armines, l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (université Paul Sabatier), le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel et TOTAL, et est cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche.

La démarche développée dans CRISCO2 se base sur l'identification de scénarios de risque. Le présent rapport fait état des travaux relatifs au mode d'établissement de ces scénarios, qui est désiré simple.

Une étude bibliographique concernant les projets où ont été élaborés des scénarios d'évolution pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> révèle un nombre de méthodes assez faible. Deux familles émergent, l'une mettant en avant l'aspect systématique proposé par l'outil FEPs, l'autre préférant l'usage de listes restreintes d'événements de risque. Nous avons placé notre approche dans la seconde.

L'examen du processus de réalisation d'une étude de dangers, pour les risques industriels classiques, montre des différences significatives avec le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Parmi elles figurent la difficulté, pour le stockage de CO<sub>2</sub>, de réaliser un découpage fonctionnel du système, l'impossibilité de prendre en compte une vulnérabilité fixée, vues les évolutions à venir sur les durées considérées, et l'intérêt limité du retour d'expérience d'un site à l'autre. Bien que les techniques couramment employées paraissent difficilement transposables au stockage de CO<sub>2</sub>, la démarche globale d'analyse des risques est instructive. Le principe du travail d'un groupe pluridisciplinaire d'experts et certains outils associés semblent adaptables.

Nous présentons par la suite un lexique adapté aux besoins du projet CRISCO2.

Nos travaux se sont ensuite efforcés de développer une méthode à partir des leçons tirées des phases bibliographiques. En s'inspirant d'un projet réalisé en Australie, intitulé GEODISC, des listes génériques ont été établies, recensant :

- les événements de risque ;
- les cibles et impacts potentiels.

Ces listes, conçues initialement pour le stockage en aquifère, doivent servir de support à la réflexion d'un groupe d'experts, en charge d'identifier, au cas par cas, les événements possibles sur le site étudié et leurs conséquences potentielles. Les différents événements sélectionnés feront par la suite l'objet de modélisations, afin de déterminer l'intensité des effets des phénomènes dangereux.

Cette démarche ne va pas jusqu'à l'identification de possibles combinaisons d'événements. Bien que nous ne l'ayons pas essayé, nous proposons toutefois un protocole d'élaboration de telles séquences accidentelles. Celui-ci s'appuie sur un découpage du modèle conceptuel du site en compartiments, en essayant de détecter les voies de transfert possibles d'un compartiment au suivant. Nous suggérons de réaliser cette tâche après la modélisation des événements, afin de bénéficier des éléments de quantification qu'ils fourniront pour hiérarchiser les phénomènes et ainsi simplifier le processus.

La méthode a été testée, bien que de façon incomplète, sur l'exemple du stockage en aquifère dans le Bassin de Paris. Les résultats obtenus sont rapportés ici et critiqués. Des travaux supplémentaires s'avèrent nécessaires pour valider cette approche ; ils consisteront en particulier à appliquer la démarche avancée pour déterminer des séquences accidentelles.

Nous concluons sur les perspectives de poursuite de ces travaux. Les étapes suivantes du projet se consacreront à la modélisation des événements de risque, puis à l'exploitation des scénarios de risque grâce aux résultats de ces modèles. Celle-ci devra aboutir à la définition des critères de sécurité. Nous adopterons pour cela une approche déterministe. Plusieurs questions se font jour pour ce traitement, notamment la nécessité de connaître des seuils d'effets pour les différents phénomènes dangereux et les différentes cibles.

## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Revue bibliographique des méthodes d'élaboration de scénarios</b> .....	<b>11</b>
2.1. APPROCHE GEODISC (AUSTRALIE).....	11
2.2. APPROCHE TNO (PAYS-BAS).....	14
2.3. APPROCHE BATTELLE (ETATS-UNIS).....	18
2.4. EXPERIENCE DE WEYBURN (CANADA).....	19
2.5. RECOMMANDATIONS DE QUINTESSA.....	20
2.6. L'OUTIL CO <sub>2</sub> -PENS (ETATS-UNIS).....	21
2.7. APPROCHE DU CARBON CAPTURE PROJECT (ETATS-UNIS) .....	21
2.8. EXEMPLE DES ANALOGUES NATURELS .....	22
2.9. EXEMPLE DU STOCKAGE DE DECHETS RADIOACTIFS .....	22
2.10. BILAN .....	23
<b>3. Elaboration et exploitation de scénarios de risque pour l'analyse des risques industriels</b> .....	<b>25</b>
3.1. CONTEXTE DES ANALYSES DE RISQUES INDUSTRIELS .....	25
3.2. PROCESSUS DE REALISATION D'UNE ETUDE DE DANGERS.....	27
3.2.1. Démarche d'ensemble.....	27
3.2.2. Conduite de l'analyse de risques.....	32
3.3. APPLICABILITE AU CAS DU STOCKAGE GEOLOGIQUE DE CO <sub>2</sub> .....	39
3.3.1. Principes généraux guidant l'étude de dangers .....	39
3.3.2. Identification des scénarios de risque .....	40
3.3.3. Caractérisation des risques .....	42
3.3.4. Processus de réalisation de l'analyse des risques .....	44
3.3.5. Moyens de maîtrise des risques.....	46
3.3.6. Bilan pour CRISCO2 .....	47
<b>4. Terminologie adoptée dans le cadre du projet CRISCO2</b> .....	<b>51</b>

4.1. INTRODUCTION .....	51
4.2. DEFINITIONS.....	51
<b>5. Mise au point d'une méthode de construction de scénarios adaptée à la problématique du stockage géologique de CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>53</b>
5.1. INTRODUCTION .....	53
5.2. EXAMEN DE LA METHODE <i>GEODISC</i> .....	53
5.3. PROCESSUS D'ADAPTATION DE LA METHODE .....	56
5.3.1. Déroulement.....	56
5.3.2. Synthèse et critique.....	58
5.4. RESULTAT : APPROCHE PRECONISEE .....	59
5.4.1. Outils .....	59
5.4.2. Mode d'utilisation .....	65
5.4.3. Critique.....	71
5.4.4. Synthèse .....	73
<b>6. Application au cas du Bassin de Paris .....</b>	<b>75</b>
6.1. CONTEXTE .....	75
6.2. SELECTION DE SCENARIOS DE RISQUE .....	77
6.2.1. Description de l'exercice .....	77
6.2.2. Résultats .....	77
6.3. POURSUITES NECESSAIRES .....	79
<b>7. Conclusion.....</b>	<b>81</b>
7.1. APPROCHE PROPOSEE : ATOUTS ET LIMITES .....	81
7.2. SUITES A DONNER .....	82
<b>8. Bibliographie .....</b>	<b>85</b>



## Liste des illustrations

Illustration 1 - Echelle de probabilité utilisée dans l'approche australienne (Hooper et al., 2005) .....	13
Illustration 2 - Arbre des conséquences utilisé dans l'approche australienne (Bowden & Rigg, 2004).....	13
Illustration 3 - Démarche d'utilisation de la base de FEPs dans l'approche TNO .....	15
Illustration 4 - Grille de croisement entre probabilité et impact des EPs .....	16
Illustration 5 - Grille de répartition des EPs entre scénarios.....	16
Illustration 6 - Grille de présentation des accidents potentiels (Arrêté du 10 mai 2000 modifié).....	27
Illustration 7- Etapes de réalisation d'une Etude de Dangers (d'après INERIS, 2006[a]) .....	29
Illustration 8 - Tableau de présentation des caractéristiques des phénomènes dangereux, pour l'estimation de l'aléa.....	30
Illustration 9 - Les différentes conceptions du risque.....	31
Illustration 10 - Exemple de nœud papillon : inflammation d'un silo (d'après MEEDDAT, 2008) .....	35
Illustration 11 - Déroulement et produits de sortie de l'analyse des risques préliminaire (d'après INERIS, 2006[a]) .....	36
Illustration 12 - Exemple de tableau pour l'analyse des risques préliminaire (d'après INERIS, 2006[a]) .....	37
Illustration 13 - Déroulement et produits de sortie de l'étude détaillée des risques (d'après INERIS, 2006[a]) .....	38
Illustration 14 - Eléments vulnérables aux risques liés au stockage géologique de CO <sub>2</sub> .....	61
Illustration 15 - Types d'impacts potentiels des phénomènes dangereux liés au stockage géologique de CO <sub>2</sub> sur les éléments vulnérables .....	62
Illustration 16 - Aperçu de la page d'accueil de l'interface MS Access® développée .....	63
Illustration 17 - Aperçu de la page de traitement des événements de risque.....	64
Illustration 18 - Aperçu de la liste descriptive des événements de risque .....	65
Illustration 19 – Schéma pour l'application de la méthode proposée .....	70
Illustration 20 - Arbre d'événements correspondant à l'exemple de l'illustration 19 .....	70
Illustration 21 - Démarche proposée pour l'identification de scénarios de risque pour le stockage géologique de CO <sub>2</sub> dans le cadre du projet CRISCO2 .....	74
Illustration 22 - Modèle de site pour l'établissement de scénarios de risque, dans l'hypothèse d'un stockage en aquifère dans le Bassin de Paris.....	76
Illustration 23 - Page de résultats de l'atelier d'évaluation des scénarios de risque dans le contexte du Bassin de Paris.....	78

## Liste des annexes

Annexe 1 Glossaire .....	89
Annexe 2 Liste des participants à l'atelier du 10 septembre 2007 .....	97
Annexe 3 Liste des participants à l'atelier du 8 janvier 2008 .....	101

# 1. Introduction

Le projet CRISCO2 « Critères de sécurité pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> : approche qualitative / quantitative de scénarios de risque » a pour objectif de proposer une méthodologie de détermination de critères permettant de garantir la sécurité du stockage géologique de CO<sub>2</sub> à court comme à long terme. Monté avec le soutien de l'Agence Nationale de la Recherche, il rassemble le BRGM, le Centre de Géosciences d'Armines, l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (université Paul Sabatier), le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel et TOTAL, au sein d'une initiative d'une durée de 36 mois, débutée en décembre 2006.

La raison d'être de ce projet tient au déficit actuel de normes communément acceptées pour l'évaluation de la sécurité des stockages géologiques de CO<sub>2</sub>, en réponse aux spécificités de cette technologie. La première de celles-ci concerne les échelles de temps impliquées dans l'analyse. La technique du stockage géologique du CO<sub>2</sub> vise à limiter les émissions atmosphériques de gaz à effet de serre d'origine anthropique ; son principe consiste à injecter le dioxyde de carbone en profondeur, en recherchant un confinement le plus long possible. Pour atteindre l'objectif poursuivi, la rétention du gaz doit être suffisamment performante : la durée de piégeage en jeu doit être de l'ordre du millénaire. Elle dépasse par conséquent l'échelle de durée de la vie humaine et les échelles d'analyse des risques des opérations industrielles usuelles.

Au cours de cette période, il est nécessaire d'évaluer la performance du stockage, afin de se prémunir contre un risque global, le réchauffement excessif de la planète, mais également d'estimer les risques locaux susceptibles d'être induits par les opérations. L'injection de CO<sub>2</sub> pourrait en effet générer, pendant la phase opérationnelle comme ultérieurement à l'abandon du site, des risques liés :

- à des fuites de fluide vers la surface ou les autres formations souterraines, notamment les aquifères ;
- au dérangement mécanique des terrains ;
- aux modifications physico-chimiques du sous-sol.

Les impératifs de sécurité exigent une conduite scrupuleuse des opérations et la bonne gestion de ces risques, sur le court comme le long terme. Les impacts locaux sur l'homme et son environnement doivent ainsi tendre vers zéro, et les risques être limités à des niveaux aussi faibles que raisonnablement atteignables.

Afin de répondre à ce souci, le projet CRISCO2 cherche à fournir des moyens simples pour évaluer si la sécurité à court et à long terme d'un site de stockage géologique de CO<sub>2</sub> est assurée. Le parti pris méthodologique est de baser cette évaluation sur l'élaboration et l'analyse de scénarios de risque, faisant intervenir des paramètres quantifiés, autant que possible, mais également des informations plus qualitatives.

Cette démarche suppose d'abord d'identifier les scénarios de risque plausibles. Ceci se heurte aux difficultés engendrées par les échelles de temps en jeu et les incertitudes portant sur le système naturel ainsi que sur son évolution sur de telles durées. Le présent rapport entend rendre compte des travaux réalisés pour mettre sur pied une méthode répondant à ces interrogations, au cours de la tâche 2 du projet : « Méthodologie de construction de scénarios ». Il s'appuie pour ce faire sur la revue de l'existant qui constituait la tâche 1. En particulier il inclut les enseignements de l'étude sur les analogies possibles avec d'autres types d'opérations industrielles, synthétisées dans le premier livrable du projet (Critères de sécurité pour les analogues industriels au stockage géologique du CO<sub>2</sub>, rapport BRGM/RP-55840 – FR, Bouc & Auclair, 2007).

Un état de l'art relatif aux méthodes de construction de scénarios d'évolution pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> a ainsi été brossé au cours de la tâche 1 (chapitre 2). Nous avons par la suite examiné comment sont élaborés les scénarios de risque dans le cadre des études de dangers d'installations industrielles de surface classiques, et si certains aspects méthodologiques peuvent en être transposés au cas du CO<sub>2</sub> (chapitre 3).

Nous présentons ensuite les résultats de la tâche 2 du projet elle-même. Il nous est apparu souhaitable, afin de lever d'éventuelles ambiguïtés, de dresser une terminologie à l'usage du projet (chapitre 4 et annexe 1). Puis nous avons cherché, à partir des travaux préalables, à établir une méthode de construction de scénarios adaptée au stockage de CO<sub>2</sub>. Le développement méthodologique en lui-même (chapitre 5) s'est appuyé sur la conduite en parallèle d'une application au cas du Bassin de Paris (chapitre 6), afin d'enrichir la démarche et de la critiquer. En conclusion du rapport (chapitre 7), nous donnons les atouts et limitations de l'approche proposée, ainsi que les suites à donner à ces travaux.

## 2. Revue bibliographique des méthodes d'élaboration de scénarios

Ce chapitre récapitule les enseignements tirés au cours de la sous-tâche 1.3 du projet CRISCO<sub>2</sub>, intitulée « Revue des méthodes de construction de scénarios ». Il a pour objectif de dresser une revue des méthodes, telles qu'identifiées dans la littérature internationale, susceptibles d'être employées pour construire des scénarios d'évolution à long terme (plusieurs siècles), dans le cadre de l'étude de la sécurité de stockages géologiques de CO<sub>2</sub>. Il s'appuie essentiellement sur les recherches menées spécifiquement sur le stockage de CO<sub>2</sub>, autour de projets précis ou de manière plus générique.

### 2.1. APPROCHE GEODISC (AUSTRALIE)

L'approche australienne est probablement la méthode d'évaluation des risques liés au stockage géologique de CO<sub>2</sub> la plus documentée. Elle a été mise au point par les chercheurs du CO<sub>2</sub> Cooperative Research Centre au sein du programme GEODISC (Bowden & Rigg, 2004), à partir d'une méthode non spécifique au stockage de CO<sub>2</sub> dénommée RISQUE. Il s'agit d'une méthode semi-quantitative reposant sur les jugements d'un groupe d'experts, issus de diverses disciplines, afin de donner une valeur à la probabilité d'un événement de risque et à ses conséquences. Outre quatre exemples d'application qui ont servi à son développement (Bowden & Rigg, 2004), elle a été mise en œuvre pour trois sites de projets concrets en cours :

- The Gorgon project (Chevron Australia Pty Ltd, 2005);
- The Latrobe Valley CO<sub>2</sub> storage (Hooper *et al.*, 2005);
- The Otway Basin Pilot Project (Sharma & Cook, 2007).

Il s'agit au départ d'une méthode d'évaluation de tous les risques d'un projet, techniques, économiques et pour la communauté, constituant un outil de comparaison de sites potentiels. Elle est donc plus large qu'une analyse de sécurité. De plus, elle considère en priorité la performance du réservoir, avant les impacts sociétaux et les bénéfices en termes de lutte contre l'effet de serre. Néanmoins, deux indicateurs (sur six) sont calculés pour évaluer ces derniers, exprimant le risque pour l'homme par le nombre annuel de décès ou de blessures graves, et celui pour les biens et l'environnement par un coût monétaire annuel.

L'identification des risques repose sur une approche du type « arbre d'événements ». Le panel d'experts se voit soumettre au cours d'un atelier « des modes et effets de défaillances » la liste suivante d'événements de risque :

- zones perméables dans la couverture
- fuite par des failles

- fuite par des puits (en distinguant au besoin puits d'injection, d'observation, de production)
- surpressurisation du réservoir à l'échelle régionale
- surpressurisation locale au niveau du puits
- dépassement du point de fermeture
- fracturation induite par un séisme
- mauvaise prédiction de la direction de migration
- défaillance de la tête de puits
- défaillance du pipeline
- défaillance du compresseur
- défaillance de la plate-forme (stockage offshore).

Ainsi, il n'y a pas véritablement de construction de scénarios, mais uniquement un choix des phénomènes pertinents parmi une liste restreinte, établie au préalable.

Pour chaque événement, le panel d'expert estime :

- sa probabilité, sur une échelle de probabilité annuelle comportant à la fois une description qualitative et un ordre de grandeur correspondant (illustration 1).
- ses conséquences, évaluées, suivant l'indicateur considéré, en termes de masse de fuite, de victimes, ou de coût monétaire. Ces conséquences sont identifiées sur un arbre lui aussi pré-établi (illustration 2).
- son échelle de temps d'occurrence.

Par indicateur, un quotient de risque est calculé pour chaque événement en multipliant la probabilité, les conséquences et la durée (si les conséquences sont rapportées à une année). La période d'étude considérée est 1000 ans. Un quotient de risque total est obtenu en additionnant les quotients pour chaque événement. Dans ce calcul, trois niveaux de confiance sont retenus :

- une estimation de planification : 80% de confiance ;
- une estimation optimiste : 50% de confiance ;
- une estimation pessimiste : 95% de confiance.

Ensuite, le risque est comparé à des critères d'acceptabilité déterminés au préalable :

- pour le risque total ;
- pour le risque résultant d'un seul événement. Ce seuil est apparemment fixé à  $\frac{1}{4}$  du seuil de risque total acceptable.

Pour les indicateurs d'impact sur l'homme, d'une part, sur les biens et l'environnement d'autre part, les seuils d'acceptabilité retenus reprennent les références adoptées pour les accidents sur les grands barrages : risque inacceptable au-delà de  $10^{-3}$  victimes par

an, « acceptable marginalement » au-delà de 10<sup>-4</sup> victimes par an ; risque pour les biens et l'environnement supérieur à 1000\$ US par an inacceptable.

Classe de probabilité	Ordre de grandeur de la probabilité annuelle	Référence
Certain	1 (ou 0.999)	Certain, ou si proche que cela ne fait pas de différence
Presque certain	0,2 – 0,9	Un ou plusieurs incidents de nature semblable se sont produits sur le site
Très probable	0,1	Un incident passé s'est produit sur le site
Possible	10 <sup>-2</sup>	Aurait pu se produire, sans intervention
Improbable	10 <sup>-3</sup>	Récemment relevé ailleurs
Très improbable	10 <sup>-4</sup>	S'est déjà produit ailleurs
Hautement improbable	10 <sup>-5</sup>	Des informations existent dans la littérature, dans un contexte légèrement différent
Presque impossible	10 <sup>-6</sup>	Aucune information publiée sur un cas semblable

Illustration 1 - Echelle de probabilité utilisée dans l'approche australienne (Hooper et al., 2005)

Consequence of CO <sub>2</sub> release	Issue	Consequences	Costing basis	50% CL Est Cost (\$M)	95% CL Est Cost (\$M)
CO2 loss	Community reaction		PR, community consultation	1.0	2.0
Non-compliance	Penalty		Fine	1.0	3.0
Damages	Oil and gas contamination	Sterilised resources	Resource value	5.0	10.0
		Increased processing	Treatment	1.0	1.0
	Aquifer contamination	Clogging-yield reduction	Water value, consequential loss	2.0	5.0
		Polluted stock supply	Stock value, consequential loss	0.1	0.4
		Polluted domestic supply	Water value, consequential loss	0.5	1.0
		Environmental damage	Fines, restoration, PR campaign	0.1	0.1
	Surface water contamination	Polluted stock supply	Water value, consequential loss	0.1	0.1
		Polluted domestic supply	Water value, consequential loss	0.5	0.5
		Environmental damage	Fines, restoration, PR campaign	3.0	5.0
		Outrage	PR campaign	1.0	2.0
	Soil contamination	Vegetation dieback	Restoration, consequential loss	2.0	4.0
		Outrage	PR campaign	1.0	1.0
	Atmosphere/ocean contamination	Human health damage	Third party claims	0.0	0.0
		Livestock/fishstock damage	Stock value, consequential loss	0.2	0.4
Native fauna damage		Fines, restoration	3.0		
Outrage		PR campaign	1.0		

Illustration 2 - Arbre des conséquences utilisé dans l'approche australienne (Bowden & Rigg, 2004)

Cette méthode d'évaluation du risque n'est qu'un élément d'un cadre de gestion des risques fondé sur la simulation, la surveillance et la réaction, qui suppose que tous les problèmes peuvent être maîtrisés. Un programme de monitoring et d'actions correctives accompagne donc l'évaluation du risque, ainsi qu'une liste de critères

devant déclencher la suspension de l'injection (Chevron Australia Pty Ltd, 2005). Les actions correctives envisagées concernent la réparation des puits, la modification de leur localisation ou le forage de nouveaux puits, l'adaptation de la stratégie d'injection ou de surveillance, ou l'extraction d'eau souterraine pour réduire la pression du réservoir.

## **2.2. APPROCHE TNO (PAYS-BAS)**

La démarche d'analyse de risques préconisée par TNO repose sur la modélisation de scénarios identifiés à partir de la base de FEPs (Features, Events, Processes) qu'ils ont mise au point (Wildenborg *et al.*, 2004). Un exemple de l'utilisation de cette base est fourni par l'étude du site de Schweinrich dans le cadre du projet CO<sub>2</sub>STORE (Svensson *et al.*, 2005). Cette méthode, organisée en sept étapes (illustration 3), consiste en l'examen qualitatif par des experts de la base de FEPs. Au cours des travaux BRGM 2006 (Bouc *et al.*, 2006), nous avons tenté de décrire ces étapes et de les appliquer à un cas d'école. Nous rapportons ci-dessous les différentes phases de l'analyse, telles que nous les avons comprises.

### **1. Identification des FEPs**

Il s'agit d'exclure les items situés hors du cadre de l'évaluation, à la lumière des hypothèses effectuées pour l'analyse et des données générales de caractérisation disponibles. On cherche ici à ne retenir que ce qui peut influencer sur l'objet final de l'étude. Cette étape est aussi le moment de la caractérisation des Fs à partir des informations disponibles. Enfin, la liste des FEPs est scindée entre Fs (paramètres « statiques ») d'une part, Es et Ps (phénomènes dynamiques) d'autre part. Les étapes suivantes portent avant tout sur la liste d'EPs.

### **2. Evaluation des EPs**

La deuxième étape consiste à évaluer qualitativement chaque item de la liste d'EPs résultant de la première étape en termes de probabilité d'occurrence et d'impact potentiel.

Les probabilités sont ainsi estimées sur une échelle à quatre barreaux :

- Très probable
- Probable
- Improbable
- Très improbable



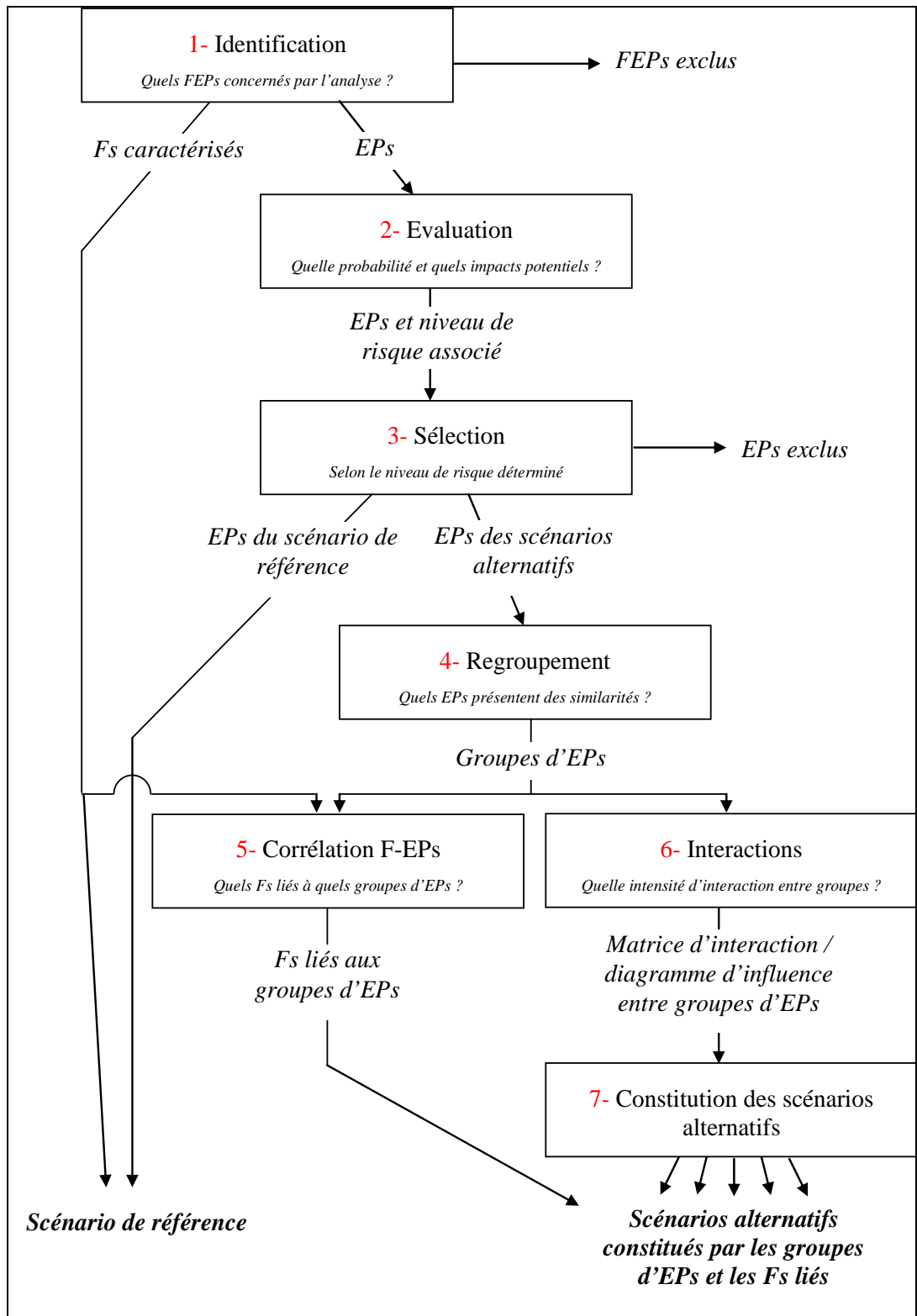


Illustration 3 - Démarche d'utilisation de la base de FEPs dans l'approche TNO

Le jugement des impacts potentiels comporte lui trois degrés :

- Significatif
- Modéré
- Négligeable

Le croisement de la probabilité et de l'impact selon la grille présentée à l'illustration 4 fournit une évaluation du « risque » de l'événement ou du processus concerné. Cette estimation reflète l'importance qu'il y a à inclure cet item dans les scénarios d'évolution.

		Probabilité			
		Très probable	Probable	Improbable	Très improbable
Impact	Significatif	Haut	Haut	Moyen	Moyen
	Modéré	Moyen	Moyen	Moyen	Faible
	Négligeable	Moyen	Faible	Faible	Très faible

Illustration 4 - Grille de croisement entre probabilité et impact des EPs

### 3. Sélection des EPs

La grille obtenue permet alors de répartir les EPs entre différents types de scénarios. Les EPs jugés « très probables » forment le scénario de référence. Les EPs de « risque » « haut » ou « moyen » constituent les scénarios alternatifs. Enfin, les EPs estimés avec une importance « faible » sont exclus de la suite de l'étude (illustration 5).

		Probabilité			
		Très probable	Probable	Improbable	Très improbable
Impact	Significatif		Haut	Moyen	Moyen
	Modéré	Référence	Moyen	Moyen	Faible
	Négligeable		Faible	Faible	Très faible

Illustration 5 - Grille de répartition des EPs entre scénarios

EPs du scénario de référence / EPs des scénarios alternatifs / EPs exclus

La suite de la procédure vise à préciser ce que comprennent les scénarios alternatifs.

#### **4. Regroupement des EPs des scénarios alternatifs**

L'objectif de cette étape est de réduire le nombre d'éléments constitutifs des scénarios, en regroupant les EPs similaires en termes de types de processus et d'effets, d'échelles de temps d'occurrence et de durée.

#### **5. Corrélation entre Fs et groupes d'EPs**

Il s'agit de détecter les relations de cause à effet entre les Fs retenus pour les scénarios à l'étape 1 et les groupes d'EPs constitués à l'étape 4. Le but poursuivi est de déterminer les caractéristiques (Fs) à inclure dans les scénarios qui seront élaborés à partir des groupes d'événements et processus : les caractéristiques liées à un groupe d'EPs devront être représentées dans tous les scénarios où ce groupe interviendra.

#### **6. Interactions entre groupes d'EPs**

Pour pouvoir définir des scénarios à partir des groupes d'EPs construits, il faut évaluer les interactions entre ces différents groupes. La sixième étape de la méthode consiste donc à remplir une matrice d'interactions. Pour chaque groupe, l'influence sur chacun des autres groupes est quantifiée sur une échelle de quatre niveaux d'intensité :

- pas d'influence
- influence marginale
- influence forte
- influence déterminante

Cette estimation du degré d'intensité ne correspond à aucune valeur absolue : il s'agit d'un classement relatif. Par la suite, la matrice d'interaction obtenue peut être traduite sous forme de diagramme d'influence, fournissant un support visuel plus aisé à interpréter.

#### **7. Constitution des scénarios**

L'étape finale se base sur la lecture du diagramme d'influence élaboré. Les groupes d'EPs sont tous liés entre eux, directement ou indirectement. Les relations directes sont caractérisées par une intensité. Les groupes entre lesquels une influence directe déterminante a été détectée ne sauraient être séparés dans la constitution de scénarios ; autrement dit, si un scénario comprend un groupe donné, il doit forcément englober tous ceux sur lesquels ce groupe a une influence forte. En revanche, les groupes d'EPs qui ne présentent pas de relation directe, ou pour lesquels cette interaction est faible, peuvent être appréhendés dans des scénarios distincts.

En suivant ce principe schématique, et en s'appuyant, comme à l'étape de groupement, sur des considérations de types de phénomènes et d'effets ou d'échelles de temps, il est possible de scinder le diagramme en quelques arbres. Chacun de ces

arbres rassemble des groupes d'EPs interdépendants, qu'on ne peut – a priori – pas séparer davantage. Cela constituerait alors autant de scénarios.

Ainsi, cette démarche mène à des scénarios sous forme d'ensembles de groupes d'EPs en interactions.

Une fois ces ensembles réalisés, il suffit de « remonter » dans le processus pour déterminer les FEPs à inclure dans les scénarios alternatifs. Ceux-ci sont en effet formés de groupes d'EPs ; retrouver les EPs membres de ces groupes (cf. étape 4) permet de dresser la liste des EPs constituant les scénarios. Les Fs à prendre en compte dans chaque scénario sont obtenus en recherchant dans la table de corrélation établie à l'étape 5 ceux qui sont liés à ces groupes d'EPs.

Les tentatives que nous avons faites en 2006 pour employer cette méthode nous ont paru peu convaincantes : elle semble très fastidieuse pour des résultats à valeur ajoutée somme toute relativement faible (Bouc *et al.*, 2006). Cela peut provenir de la méthode elle-même, ou bien de son application de notre part, notamment du fait que nous avons travaillé sur la base de FEPs Quintessa, disponible en ligne, et non sur celle de TNO. Les étapes 4 à 7 en particulier paraissent contestables, car perdant le systématisme qui fait la force des premières étapes, et introduisant par là une forte subjectivité. L'aspect fastidieux est reconnu par les auteurs de l'évaluation de Schweinrich eux-mêmes (Svensson, 2004).

### **2.3. APPROCHE BATTELLE (ETATS-UNIS)**

Une autre méthode d'utilisation des FEPs est proposée par la compagnie Battelle, pour le site des Mountaineer – Ohio River Valley (Sminchak *et al.*, 2006). Cette approche a été utilisée pour évaluer la sécurité et la performance d'un site pilote, non à l'échelle industrielle. Elle repose sur l'examen qualitatif de la base générique de FEPs mise en ligne par Quintessa ([www.quintessa-online.com/co2/](http://www.quintessa-online.com/co2/)). Cet examen se veut moins poussé que dans l'approche TNO, et est orienté vers la décision de gestion. Il se décompose en 5 étapes.

#### **a) Compilation d'un modèle conceptuel spécifique au site**

Comme dans tout processus de constitution de scénarios, le préalable est de rassembler les données de caractérisation pour élaborer un modèle représentatif du site.

#### **b) Premier examen : élimination des items non applicables / improbables**

Le premier élagage consiste à exclure de l'analyse les FEPs qui ne correspondent pas aux objectifs ou à la configuration du projet : par exemple, les FEPs liés au cadre réglementaire, à l'environnement marin pour le cas d'un stockage terrestre, etc.

#### **c) Deuxième examen, basé sur les conditions générales du site ou les résultats de la caractérisation du site**

La deuxième lecture de la base FEPs considère les réponses fournies par la configuration du site aux items restants : les résultats de la caractérisation en termes de conditions géologiques, hydrogéologiques, minéralogiques, géomécaniques ou de dimension du pilote permettent d'affirmer qu'un certain nombre de FEPs ne posent pas de problème. Il s'agit là, d'après les auteurs, de l'étape demandant le plus d'attention.

**d) Troisième examen, à l'aide de tests sur site et/ou de spécifications opérationnelles**

Le dernier examen des FEPs subsistants a recours aux résultats des investigations spécifiques menées sur le site : forages, analyses de carottes ou d'échantillons d'eau, inspection sismique... Il permet d'éviter également les items auxquels la conception des opérations apporte une réponse satisfaisante.

**e) Recommandations pour répondre aux FEPs restants par la conception du système, la surveillance ou la conduite de nouveaux tests.**

Cette série d'analyses aboutit à un petit nombre de FEPs, qui sont examinés en détail : il s'agit d'identifier le risque potentiel soulevé par chacun de ces items, ainsi que les solutions qui peuvent y être apportées. Des recommandations en sont tirées en termes de conception des équipements, de surveillance, de conduite des opérations, ou d'analyses complémentaires.

En comparaison de l'approche TNO, celle proposée par Battelle paraît relativement économe en temps et en efforts, tout en conservant l'aspect systématique qui constitue l'avantage principal de l'outil FEPs. Néanmoins, ses auteurs soulignent que cette approche pourrait ne pas convenir à un projet à grande échelle, et qu'une certaine subjectivité est introduite. De plus, elle ne constitue pas directement un outil de constitution de scénarios : elle vise à identifier quels sont les types d'éléments ou de phénomènes susceptibles de poser problème.

## **2.4. EXPERIENCE DE WEYBURN (CANADA)**

La première utilisation des FEPs pour le stockage géologique de CO<sub>2</sub> a été effectuée pour le site de récupération assistée de pétrole à Weyburn. C'est autour de ce projet qu'a été développée la base générique de Quintessa. Cet outil devait permettre une analyse systémique formelle rigoureuse. Le rapport sur la première phase du projet Weyburn, 2000-2004, (Whittaker *et al.*, 2004) fait référence aux FEPs pour la construction d'un scénario de base, représentant l'évolution de long terme attendue, et de scénarios alternatifs, figurant un futur hypothétique, mais possible. Cependant, le mode de traitement des FEPs pour aboutir aux scénarios n'est pas détaillé. Le modèle du système pour les établir comprenait quatre composants :

- la biosphère, s'étendant de la surface jusqu'à 300 m de profondeur, et incluant l'atmosphère, le sol, les eaux de surface, les aquifères d'eau potable, la faune, la flore ;
- la géosphère supérieure, comprenant les aquifères et aquitardes entre le réservoir et la biosphère ;

- la géosphère inférieure, constituée du réservoir et des couches sous-jacentes ;
- les puits.

Dans le scénario de base furent modélisées les migrations de CO<sub>2</sub> par des voies naturelles ou des puits abandonnés, sous l'effet de gradients de pression, de masse volumique et de concentration. Les évaluations de risques correspondantes ont eu recours à des approches déterministes et probabilistes. Les scénarios alternatifs identifiés portaient, eux, sur :

- les options de conception de la récupération assistée d'hydrocarbures : augmentation de la pression d'injection, conduisant potentiellement à la surpressurisation du réservoir ou à la fracturation de la couverture ;
- les options dans les modes d'abandon des puits, pouvant influencer sur les risques de fuite ;
- l'impact de la dissolution minérale, susceptible d'induire le développement de fractures ;
- l'activation ou la réactivation de failles ;
- l'activité tectonique, pouvant altérer l'intégrité des couvertures ;
- l'intrusion humaine à la recherche de pétrole.

Il n'est pas précisé comment ces scénarios ont été obtenus. De plus, l'objectif premier de cette évaluation, au cours de la phase 2000-2004 du projet, s'attachait à la performance du stockage, non à sa sécurité vis-à-vis de l'homme et de l'environnement. Seule une étude préliminaire s'est intéressée à un type d'impact précis, l'exposition humaine à une augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> dans une habitation suite à une fuite située directement en dessous. De ce fait, l'identification de scénarios n'a pas cherché à détecter les différents modes d'exposition des différentes cibles possibles (fuite vers les aquifères potables,...).

Il convient de souligner que la première phase du projet Weyburn se consacrait avant tout à l'évaluation de la performance, dans le cas du scénario de base. L'approfondissement des scénarios alternatifs et des impacts potentiels de fuites pourrait se réaliser au cours de la phase 2005-2009 de ce projet.

## **2.5. RECOMMANDATIONS DE QUINTESSA**

Concernant l'usage des FEPs, il est légitime de s'interroger sur l'utilisation préconisée par les auteurs de la base générique Quintessa. Les responsables de ces travaux mentionnent deux usages possibles :

- une utilisation « bottom-up », servant directement à développer le modèle, à l'aide de matrices d'influence ou de diagrammes d'interactions. Ceci se rapproche donc de la méthode proposée par TNO, développée ci-dessus.
- une utilisation « top-down », où la base de FEPs est employée comme outil d'audit pour assurer qu'aucun oubli n'a été commis. La liste sert ainsi à vérifier que les

FEPs pertinents ont été inclus dans les scénarios – établis d'une autre manière – et à documenter les raisons justifiant l'exclusion des autres FEPs.

Les auteurs de la base Quintessa jugent ce second usage comme outil d'audit en général « plus pratique et efficace » (Maul *et al.*, 2005).

## **2.6. L'OUTIL CO<sub>2</sub>-PENS (ETATS-UNIS)**

Les chercheurs de Los Alamos National Laboratory (LANL), aux Etats-Unis, développent une plate-forme, intitulée CO<sub>2</sub>-PENS, destinée à l'évaluation du risque à long terme pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> (Pawar *et al.*, 2006). Cet outil a pour principe d'intégrer au niveau du système entier des processus modélisés à leur échelle, et de coupler ainsi les différents phénomènes élémentaires. Chaque processus fait ainsi l'objet d'un module propre. Le cadre d'analyse distingue cinq types d'éléments :

- Réservoir de stockage ;
- Couverture ;
- Mécanismes de fuite potentiels ;
- Transport du CO<sub>2</sub> à partir du réservoir ;
- Libération du CO<sub>2</sub> à la surface.

Pour chacune de ces catégories, un nombre limité d'items est proposé. Ceci constitue ainsi en quelque sorte une approche graphique aux FEPs. L'utilisateur choisit les phénomènes qu'il veut inclure dans son modèle en sélectionnant les items correspondant dans chaque catégorie ; ceci constitue en définitive un scénario. Il s'agit donc ici d'une conception plutôt intuitive des scénarios, même si l'interface graphique sert de mode de contrôle de leur exhaustivité.

## **2.7. APPROCHE DU CARBON CAPTURE PROJECT (ETATS-UNIS)**

Un groupe de chercheurs des Etats-Unis, mené par le Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), travaille actuellement au sein du CO<sub>2</sub> Capture Project à un cadre de certification pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub> (Oldenburg & Bryant, 2007). Ce cadre doit permettre une évaluation simple de la sécurité du stockage.

Dans ce cadre, le site est conceptualisé dans un modèle où sont identifiés différents compartiments (typiquement, le réservoir, les failles, les puits, les ressources profondes, les eaux potables, l'environnement de surface et l'atmosphère). Les scénarios de fuite sont déterminés en analysant les relations entre ces différents compartiments.

Le risque de fuite est évalué en estimant la probabilité d'une intersection entre le CO<sub>2</sub> et un conduit (faille/puits) d'une part, et de ce conduit avec une cible d'exposition d'autre part. Le transport du CO<sub>2</sub> est calculé par des modèles simples, et les impacts de la fuite évalués en comparaison à des seuils. Le produit de la probabilité de fuite

avec son impact donne le risque. Son calcul est probabiliste pour l'existence du chemin de fuite, déterministe pour le flux le long de ce chemin.

En définitive, ce cadre se réfère donc à un nombre très restreint de scénarios de fuite simples.

## 2.8. EXEMPLE DES ANALOGUES NATURELS

D'autres chercheurs du LBNL se sont intéressés aux scénarios de fuites significatives de CO<sub>2</sub> hors de réservoirs naturels (Birkholzer *et al.*, 2006). Leurs observations ne permettent pas de définir une méthode d'élaboration de scénarios. Toutefois, elles mettent en avant quelques points importants pour le choix des scénarios de fuite hors de sites de stockage :

- les voies de fuites préférentielles pour les analogues naturels sont les failles et les fractures, offrant des chemins de libération rapide au CO<sub>2</sub> ;
- la plupart des fuites naturelles furent déclenchées par un événement spécifique, comme l'activité sismique ;
- l'accumulation de CO<sub>2</sub> dans une formation secondaire peu profonde peut être spécialement problématique, puisque cela ouvre la possibilité d'un relâchement massif soudain en cas de déstabilisation géomécanique.

## 2.9. EXEMPLE DU STOCKAGE DE DECHETS RADIOACTIFS

Les travaux sur l'utilisation des FEPs pour l'évaluation de la sûreté d'installations de stockage de déchets radioactifs ou l'évaluation de risques environnementaux se poursuivent. On trouve ainsi dans El Ghonemy *et al.* (2004) des préconisations sur cet outil.

La méthode avancée repose sur la décomposition du site en composants (F) et l'identification des phénomènes (EP) qui gouvernent leurs interactions, sur la base de jugement d'expert. La décomposition est faite progressivement : on considère au départ les domaines majeurs, source, biosphère, géosphère, dont on analyse les interactions ; puis chacun de ces trois compartiments est divisé de manière plus précise en composants, et de nouvelles matrices d'interactions sont construites. Ce processus aboutit à l'identification de tous les FEPs spécifiques au site. Cette liste peut faire l'objet d'un audit à l'aide d'une liste de FEPs génériques.

Chaque FEP est ensuite évalué par un groupe d'experts adéquat, pour déterminer quelle est son importance pour l'évaluation de la sûreté à long terme, et comment il doit être représenté.

Il s'agit là d'une méthode systématique en apparence exigeante.

Nous ne détaillons pas davantage ici les activités de construction de scénarios réalisées pour appréhender la sûreté de stockages souterrains de déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Il est fait plus spécifiquement mention des méthodes



d'évaluation de la sûreté de ces installations dans le premier livrable du projet CRISCO<sub>2</sub> (Bouc & Auclair, 2007).

## 2.10. BILAN

Les méthodes identifiées dans la littérature pour bâtir des scénarios d'évolution à long terme d'un stockage géologique de CO<sub>2</sub> sont assez peu nombreuses. Elles font toutes intervenir, à un certain point, le jugement d'experts ayant une connaissance du site, ce qui paraît bien légitime au vu de l'influence des caractéristiques locales sur le comportement du stockage et les risques potentiels. Ces experts doivent représenter différentes disciplines.

Deux grands types d'approches peuvent être distingués :

- la décomposition systématique en FEPs, par l'usage « bottom-up » d'une base de FEPs et/ou à l'aide de matrices d'interactions et de diagrammes d'influence (TNO, El Ghonemy *et al.* [2004], Weyburn) ;
- la sélection de scénarios de fuite ou des phénomènes à représenter parmi une liste restreinte élaborée au préalable (CO<sub>2</sub>CRC, CO<sub>2</sub>-PENS, Carbon Capture Project). Cette liste peut éventuellement être contrôlée à l'aide d'une base de FEPs (utilisation « top-down »). L'approche Battelle se situe plutôt dans cette lignée : il ne s'agit pas de construire des scénarios à partir de la base de FEPs, mais plutôt de réaliser un audit du modèle de site avec cet outil, en documentant les éléments significatifs et en identifiant les points critiques.

La première catégorie fait appel à un processus nécessairement plus lourd que la seconde ; son avantage tient à son systématisme et à son exhaustivité. La tentative d'application de la méthode TNO effectuée au cours des travaux du BRGM (Bouc *et al.*, 2006) semblait indiquer que ce premier type d'approche n'est pas adapté aux objectifs du projet CRISCO<sub>2</sub>, où la simplicité d'usage est recherchée.

En conséquence, il nous a paru plus judicieux, pour le projet CRISCO<sub>2</sub>, d'adopter des techniques où le choix de scénarios est moins vaste qu'au sein d'une liste de FEPs, quitte à ne pas prendre conscience de certaines nuances qui peuvent séparer deux phénomènes. L'exhaustivité de nos scénarios pourrait être validée a posteriori par un audit à l'aide des FEPs.

Deux approches nous ont finalement semblé intéressantes pour les travaux CRISCO<sub>2</sub> :

- L'approche Battelle, pour son aspect audit d'un modèle de site et documentation des choix.
- L'approche GEODISC, un atelier d'experts autour d'une liste restreinte de risques.

La difficulté de la première dans notre cadre risque d'être le manque de données spécifiques au site et l'absence de possibilité de tests de terrain, pour une étude de cas théorique et non un projet concret. L'étape 4 de cette méthode semble ainsi

compromise. Il convient peut-être plutôt d'en retenir le principe, l'audit d'un modèle de site par les FEPs.

La seconde a constitué notre base de travail dans la tâche 2 de CRISCO2. Au stade de l'état de l'art, nous avons jugé que la liste de risques pourrait être repensée au préalable, si besoin en la comparant à la liste de FEPs Quintessa. Autrement, et sans que ces deux options soient mutuellement exclusives, l'audit avec cette base pourrait intervenir dans un second temps dans la démarche, ce qui forcerait à un effort de documentation précise des choix. Cette seconde étape pourrait par exemple suivre le processus proposé par Battelle.

### **3. Elaboration et exploitation de scénarios de risque pour l'analyse des risques industriels**

Les risques engendrés par les activités économiques ont constitué l'objet de préoccupations croissantes depuis la Révolution Industrielle, dans l'objectif de toujours les réduire. L'exercice d'analyse des risques industriels a ainsi été inscrit dans la réglementation, par exemple en Europe via les directives SEVESO (1982 ; 1996) ; il a fait l'objet au fil du temps de développements théoriques et pratiques et continue à évoluer. La conduite d'une analyse de risques industriels repose aujourd'hui communément sur l'identification de séquences accidentelles, c'est-à-dire d'enchaînements d'événements menant à un accident.

Une telle acception des scénarios de risque ne correspond pas exactement à l'ensemble des questions soulevées pour étudier les risques liés au stockage géologique de CO<sub>2</sub> : dans le cas de notre application, il est nécessaire d'identifier le comportement du complexe de stockage dans le temps, avec les incertitudes qu'il comprend, et de détecter des déviations potentielles par rapport à cette situation attendue. Le terme de scénarios peut désigner ces deux aspects. L'analyse de risque industriel « classique » ne se réfère, elle, qu'au second : il s'agit d'envisager les possibles écarts au déroulement normal des opérations, qui est lui théoriquement connu.

Il est par conséquent indispensable de rester prudent dans la comparaison et dans l'usage des termes. Néanmoins, compte tenu des objectifs de CRISCO2, il paraît judicieux de s'intéresser aux méthodes communément employées pour déterminer les évolutions imprévues et leurs conséquences dans une installation industrielle, et pour analyser les scénarios ainsi construits.

#### **3.1. CONTEXTE DES ANALYSES DE RISQUES INDUSTRIELS**

Nous replaçons ici brièvement les analyses de risque dans le cadre réglementaire français. Des dispositions semblables sont valables dans toute l'Union Européenne, puisque la législation française sur ce thème correspond, en partie, à la transposition des directives SEVESO.

L'analyse de risques constitue le cœur d'une étude de dangers (EDD). Celle-ci est requise pour que le Préfet admette l'établissement d'une installation soumise à autorisation, d'après les seuils de la nomenclature des Installations Classées. Selon l'article L.512-1 du Code de l'Environnement, le but d'une étude de dangers est de préciser « *les risques auxquels l'installation peut exposer, directement ou indirectement, les intérêts visés au L.511-1 CE en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'installation. Le contenu de l'étude de dangers doit être en relation avec l'importance des risques engendrés par l'installation.* » Le guide proposé le 28 décembre 2006 par le MEDD pour la réalisation d'études de dangers d'installations

soumises à autorisation avec servitudes (MEDD, 2006) précise : « elle a donc pour objet de rendre compte de l'examen effectué par l'exploitant pour caractériser, analyser, évaluer, prévenir et réduire les risques d'une installation [...] autant que technologiquement réalisable et économiquement acceptable. [...] ». L'étude de dangers vise ainsi la démonstration, par les soins de l'exploitant, de la maîtrise des risques d'accident majeurs, c'est-à-dire dont les conséquences peuvent dépasser les limites de l'établissement. Les textes réglementaires (décret 77-1133<sup>1</sup> modifié, arrêté du 10 mai 2000<sup>2</sup>) insistent sur deux principes forts présidant à l'étude de dangers :

- la recherche d'un niveau de risque aussi bas que possible (principe ALARA) ;
- le principe de proportionnalité, l'étude étant liée à l'importance des risques, en fonction des potentiels de danger de l'établissement, mais également de la vulnérabilité de son environnement.

« Fondée sur le principe d'amélioration continue du niveau de sécurité des installations [...], l'étude de dangers est basée sur l'analyse des risques. Ses versions successives proposent ou prennent en compte les évolutions des installations et de leur mode d'exploitation, ainsi que les évolutions de l'environnement et des connaissances techniques et scientifiques » (MEDD, 2006). L'arrêté du 10 mai 2000 modifié détaille le rôle de l'analyse de risques : elle « constitue une démarche d'identification et de réduction des risques réalisée sous la responsabilité de l'exploitant. Elle décrit les scénarios qui conduisent aux phénomènes dangereux et accidents potentiels. Aucun scénario ne doit être ignoré ou exclu sans justification préalable explicite. » La notion de scénario de risque apparaît donc centrale. D'après les dispositions introduites par l'arrêté du 29 septembre 2005 (arrêté « PCIG »)<sup>3</sup>, les scénarios de risque identifiés doivent être caractérisés en termes de :

- probabilité d'occurrence ;
- cinétique ;
- intensité des effets des phénomènes dangereux et gravité des conséquences potentielles des accidents associés.

L'arrêté donne les règles d'évaluation de ces différents points. En particulier, la méthode d'estimation des probabilités peut être qualitative, quantitative ou semi-quantitative. L'intégralité des scénarios de risque susceptibles d'affecter l'extérieur de l'établissement doit finalement être positionnée dans une grille probabilité – gravité des conséquences sur les personnes (cf. illustration 6 ; voir également Bouc *et al.*, 2006).

---

<sup>1</sup> Décret 77-1133 du 21 septembre 1977 pris pour l'application de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement.

<sup>2</sup> Arrêté ministériel du 10 mai 2000 modifié le 29 septembre 2005 relatif à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.

<sup>3</sup> 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

En revanche, aucune prescription nationale n'existe pour la prise en compte des conséquences des scénarios d'accident sur l'environnement.

<b>Gravité des conséquences sur les personnes exposées au risque</b>	<b>Probabilité d'occurrence (sens croissant de E vers A)</b>				
	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>
<i>Désastreux</i>					
<i>Catastrophique</i>					
<i>Important</i>					
<i>Sérieux</i>					
<i>Modéré</i>					

*Illustration 6 - Grille de présentation des accidents potentiels (Arrêté du 10 mai 2000 modifié)*

### **3.2. PROCESSUS DE REALISATION D'UNE ETUDE DE DANGERS**

Ainsi que le montre le paragraphe précédent, les études de dangers sont bien cadrées réglementairement. Il n'existe néanmoins pas de prescription sur le protocole à adopter. Nous ne prétendons pas faire une description des différentes méthodes existantes, ni une présentation détaillée d'une approche ; nous rapportons simplement dans les grandes lignes la démarche préconisée par l'INERIS dans son ouvrage dédié à l'« étude de dangers d'une installation classée » (Ω9 - INERIS, 2006[a]), auquel le lecteur intéressé pourra se reporter. Ce document se concentre sur le cas des établissements soumis à autorisation avec servitude, qui constituent le cas le plus encadré (notamment par l'intermédiaire du guide publié par le MEDD le 28 décembre 2006) ; les installations à simple autorisation suivent des principes similaires, le niveau de détail demandé étant fonction du niveau de risque engendré.

#### **3.2.1. Démarche d'ensemble**

Le processus de réalisation d'étude de dangers proposé par l'INERIS suit les étapes représentées à l'illustration 7, la phase déterminante étant l'analyse de risques. Celle-ci s'appuie sur des travaux préliminaires :

- En préalable, il est nécessaire de préciser le cadrage de l'étude de dangers en indiquant son contexte et en bornant son champ, notamment par l'identification précise de l'objet auquel elle s'applique.
- Le premier temps de l'étude de dangers consiste à rassembler les données d'entrée pour la suite de l'examen. Cela concerne :
  - l'environnement des installations, qu'il soit naturel ou anthropique. Il s'agit d'identifier à la fois les cibles potentielles d'accident en dehors de l'établissement (cours d'eau, sites faunistiques ou floristiques protégés, zones d'habitations, établissements recevant du public, autres installations industrielles, ...) et les causes potentielles d'accident extérieures à l'établissement (crues, aléas

géotechniques ou météorologiques, autres installations industrielles, trafic terrestre, maritime ou aérien, ...)

- l'activité de l'établissement, son fonctionnement, son organisation, en particulier sur tous les aspects relatifs à la sécurité, et les moyens dont il dispose, notamment en termes de prévention et de gestion des accidents ;
- la description des procédés mis en jeu par l'activité industrielle et des installations associées avec, entre autres, leur organisation spatiale ;
- l'inventaire des produits présents sur le site au cours des différentes phases de l'activité industrielle : nature et quantités.

Cette collecte doit fournir les informations nécessaires à l'identification, dans les étapes suivantes, des phénomènes dangereux susceptibles de se produire, des éventuels « effets dominos », des éléments potentiellement vulnérables à ces phénomènes et des mesures à même de réduire les dangers ou de permettre la maîtrise des risques

- La seconde phase de réalisation de l'étude de dangers vise à interpréter les données ainsi récoltées en termes de risque. L'analyse du retour d'expérience relatif aux incidents et accidents survenus dans l'établissement, ou dans des installations du même type, informe sur les scénarios d'accidents potentiels, leurs causes les plus fréquentes, le rôle et la performance des barrières de sécurité ; elle pose ainsi les bases pour l'analyse des risques. Pour la bonne conduite de celle-ci, il convient également d'identifier les éléments vulnérables présents dans l'installation et à l'extérieur, et de les localiser précisément. Il faut faire de même pour les sources potentielles d'agressions externes. Le dernier préalable à l'analyse de risques est la caractérisation des potentiels de dangers présents dans l'établissement. L'INERIS distingue quatre types de dangers à recenser :
  - les dangers liés aux produits utilisés ;
  - les dangers associés aux procédés employés, en particulier à certaines réactions physico-chimiques ;
  - les dangers provenant des équipements en action ;
  - les dangers correspondant aux conditions opératoires mises en œuvre.

Il s'agit s'abord, comme pour les agresseurs externes et les éléments vulnérables, de procéder à l'identification et la localisation de ces potentiels de dangers. Ensuite, l'INERIS préconise une phase de réflexion sur ces potentiels de dangers, cherchant à évaluer la légitimité de leur existence et à les réduire si possible, voire à les supprimer, en modifiant la conception des opérations et/ou des installations. Cet exercice fait appel à une comparaison aux pratiques existantes dans le secteur d'activité considéré.

- Une fois ces travaux préliminaires accomplis, peut débuter la phase d'analyse des risques. Effectuée en général en groupe de travail, elle comprend deux phases qui peuvent en pratique être conduites simultanément :
  - l'analyse des risques préliminaire ;
  - l'étude détaillée des risques.

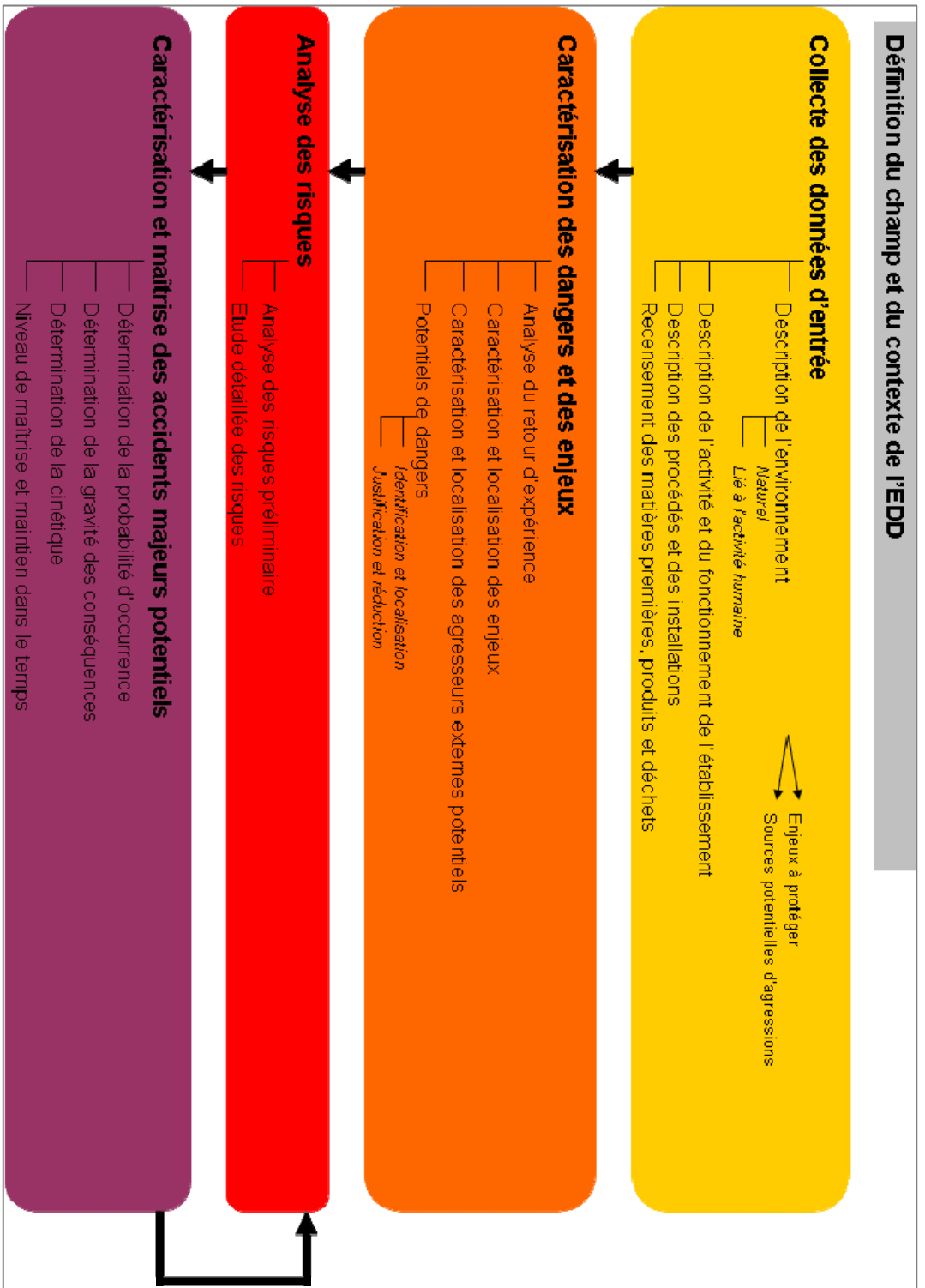


Illustration 7 - Etapes de réalisation d'une Etude de Dangers (d'après INERIS, 2006[a])

Cœur de l'étude de dangers, cette étape constitue l'intérêt majeur dans le cadre des travaux qui font l'objet du présent rapport CRISCO<sub>2</sub>, dans la mesure où c'est là qu'intervient la construction et l'exploitation des scénarios. Nous revenons par conséquent plus en détail sur cet exercice ci-dessous (§ 3.2.2).

L'analyse de risques débouche sur une liste de scénarios d'accident, caractérisés en probabilité, cinétique, intensité et gravité, ainsi que sur un inventaire de fonctions et barrières importantes pour la sécurité.

- La dernière étape de l'étude de dangers réside dans la traduction des produits de l'analyse des risques pour répondre aux contraintes réglementaires. Il s'agit d'abord de réaliser la synthèse des scénarios d'accidents majeurs potentiels en les plaçant dans la grille figurant à l'illustration 6. Ensuite, il faut rédiger un argumentaire démontrant la maîtrise des risques et présentant les dispositions prises pour assurer son maintien au fil du temps. Ceci se concrétise, entre autres, dans un tableau décrivant les éléments importants pour la sécurité et dans une liste des améliorations de sécurité envisageables, présentant les bénéfices escomptés au regard des coûts engendrés. L'étude de dangers doit enfin fournir un résumé non technique, une cartographie des zones d'effets des phénomènes dangereux ainsi que les éléments nécessaires à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Technologiques (PPRT), pour les installations soumises à autorisation avec servitudes exclusivement. Le PPRT répond à une logique de maîtrise de la vulnérabilité qui diffère de celle de l'étude de dangers. Dans le cas de l'EDD, on considère un environnement donné, et on cherche à atteindre un niveau de risque induit sur cet environnement par les installations faisant l'objet de l'étude qui soit admissible, par des mesures de prévention des phénomènes dangereux, d'atténuation de leurs effets ou de protection des cibles. Pour le PPRT, on raisonne au contraire en supposant que l'installation représente un aléa existant connu, et que l'on peut agir sur le milieu environnant, par des mesures d'urbanisme, pour limiter sa vulnérabilité et maintenir ainsi le risque à un niveau acceptable. Cette distinction correspond aux deux décompositions possibles du risque, illustrées à l'illustration 9. En conséquence, alors que la grille de présentation des accidents potentiels met en avant le couple {probabilité ; gravité}, le développement d'un PPRT requiert de raisonner en termes d'aléa. C'est pourquoi il convient de proposer également, à l'issue de l'analyse des risques, un tableau synthétique des phénomènes dangereux accompagnés de leur probabilité et leur intensité (renseignée sous forme de distances d'effets), ainsi que d'une indication sur leur cinétique de propagation (*cf.* illustration 8).

N°	Description détaillée	Probabilité	Type d'effets	Intensité du phénomène dangereux				Cinétique
				Distance Effets Létaux Significatifs	Distance Effets Létaux	Distance Effets Irréversibles	Distance surpression 20 mbar	

Illustration 8 - Tableau de présentation des caractéristiques des phénomènes dangereux, pour l'estimation de l'aléa



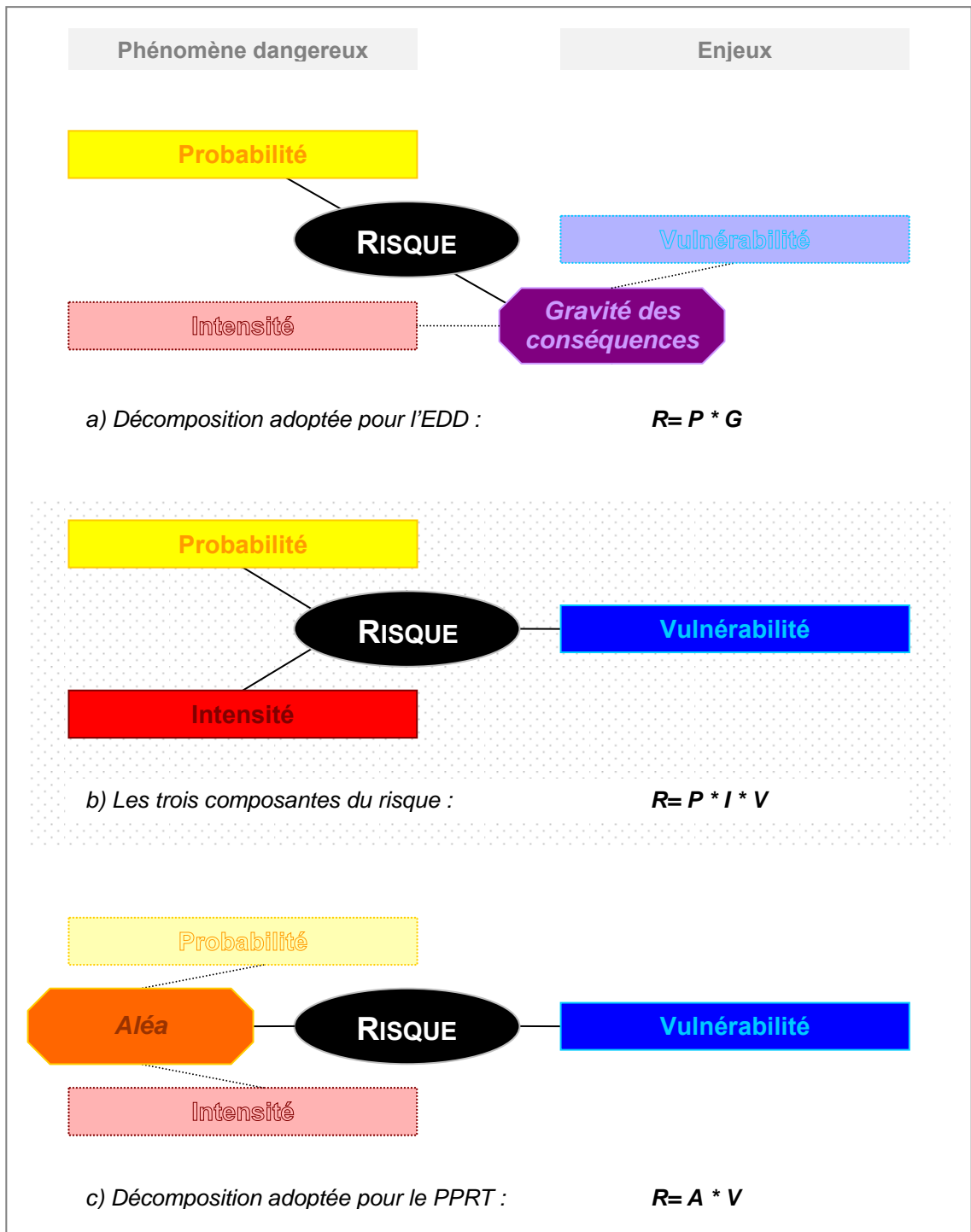


Illustration 9 - Les différentes conceptions du risque

### 3.2.2. Conduite de l'analyse de risques

Ainsi que mentionné plus haut, l'analyse des risques peut en théorie être divisée en deux phases, même si celles-ci peuvent fréquemment être, dans les faits, conduites de concert :

- L'analyse des risques préliminaire vise à identifier les combinaisons d'événements non désirés pouvant mener à l'apparition de phénomènes dangereux, hiérarchiser ces situations et détecter les phénomènes pouvant engendrer des effets à l'extérieur des limites de l'établissement.
- L'étude détaillée des risques approfondit l'examen des scénarios d'accident repérés au cours de la première phase, de leurs conséquences et des mesures mises en place pour assurer la maîtrise des risques.

L'objectif de l'analyse des risques réside ainsi en l'identification et la caractérisation des scénarios d'accident possibles. « Scénario d'accident (majeur) » est défini dans le glossaire accompagnant la circulaire du 7 octobre 2005<sup>4</sup> comme un « enchaînement d'événements conduisant d'un événement initiateur à un accident (majeur), dont la séquence et les liens logiques découlent de l'analyse de risques. En général, plusieurs scénarios peuvent mener à un même phénomène dangereux pouvant conduire à un accident (majeur) : on dénombre autant de scénarios qu'il existe de combinaisons possibles d'événements y aboutissant. » Il ne s'agit donc pas d'un événement isolé ; l'analyse de risques doit déterminer l'ensemble de la séquence accidentelle, depuis la dérive d'origine et ses causes jusqu'aux conséquences sur les éléments vulnérables.

L'INERIS (2006[a]) insiste sur le caractère itératif du processus d'analyse de risques, « qui consiste à :

- identifier de la façon la plus exhaustive possible les phénomènes dangereux susceptibles de se produire, suite au déroulement de scénarios accidentels identifiés par la mise en œuvre d'une méthode adaptée aux installations, conduite le plus souvent en groupe de travail [...] ;
- pour chaque phénomène dangereux, déterminer l'intensité des effets, la probabilité d'occurrence et la cinétique en tenant compte des barrières de sécurité techniques ou organisationnelles mises en place par l'exploitant lorsque celles-ci sont performantes et en adéquation avec le risque [...] ;
- caractériser la gravité de chaque accident majeur potentiel, fonction de la présence de personnes exposées d'une part ou d'effets dommageables à l'environnement d'autre part ;

---

<sup>4</sup> Glossaire technique des risques technologiques – Pièce jointe à la circulaire n° DPPR/SEI2/MM-05-0316 du 7 octobre 2005 relative aux Installations classées - Diffusion de l'arrêté ministériel 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. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD).

- caractériser la maîtrise des risques pour chaque phénomène dangereux susceptible de conduire à un accident majeur et s'assurer que les fonctions de sécurité permettent autant que possible une défense en profondeur, c'est-à-dire qu'elles agissent tant en prévention, qu'en protection et en intervention ;
- identifier des paramètres et équipements importants pour la sécurité [...] et s'assurer de leur performance et de leur pérennité dans le temps. »

Il est recommandé que ce travail soit assuré par un groupe de personnes ayant une connaissance avancée des installations, afin d'intégrer dans l'analyse les spécificités propres à l'établissement concerné, et que les personnes en charge des installations s'approprient l'analyse de risques et ses résultats. Réunir des compétences complémentaires au sein du groupe d'étude offre l'opportunité d'une meilleure exhaustivité dans l'identification des scénarios d'accident.

L'INERIS juge utile en préambule au travail du groupe :

- de bien circonscrire le champ de l'analyse, sa démarche et ses outils ;
- de rappeler les données collectées lors des phases précédentes concernant les installations, les potentiels de dangers, les enjeux identifiés, le retour d'expérience ;
- de « réaliser un découpage fonctionnel des installations » et d'identifier les enjeux et potentiels de dangers pour chacun des ensembles ainsi individualisés.

Par la suite, l'exercice d'analyse des risques doit s'appuyer sur des méthodes d'analyse systématiques pour prétendre à un maximum d'exhaustivité. Il est hors du propos du présent rapport de détailler les techniques existantes en la matière ; celles-ci ont fait l'objet d'une publication par l'INERIS (2006[b]). Nous mentionnons simplement les méthodes les plus communément employées. Pour l'analyse des risques préliminaire, peuvent être mises en avant les approches suivantes :

- l'APR (Analyse Préliminaire des Risques), adaptée pour les installations peu complexes ou pour une étude adoptant une maille large, avant raffinement par d'autres outils ;
- l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité), décrite par la norme CEI 60812<sup>5</sup>, examine à l'aide de listes-guides les modes de défaillance potentiels sur des sous-ensembles bien déterminés d'un système ;
- l'HAZOP (Hazard and Operability study), conçue pour les systèmes thermo-hydrauliques et codifiée dans la norme CEI 61882<sup>6</sup>, cherche à identifier de manière systématique les écarts possibles de fonctionnement et leurs conséquences ;

---

<sup>5</sup> Techniques d'analyse de la fiabilité du système - Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)

<sup>6</sup> Études de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) - Guide d'application

- la SWIFT (Structured What-If Technique) consiste à alimenter la réflexion collective par des listes aide-mémoire, afin d'identifier les dangers au niveau d'un système entier.

Les techniques les plus utiles à l'étude détaillée des risques prennent, elles, la forme de schémas arborescents consistant à relier des événements suivant une logique :

- déductive : on détermine à partir de l'événement non désiré les événements qui peuvent l'entraîner, jusqu'à remonter à ses causes élémentaires (arbres de défaillances) ;
- inductive : on détermine à partir de l'événement non désiré les conséquences dont il peut être à l'origine (arbres d'événements).

La combinaison des deux types d'arbre dans un « nœud papillon » permet la visualisation de l'ensemble des scénarios accidentels, depuis leurs causes jusqu'à leurs atteintes aux éléments vulnérables, autour d'un événement redouté central. Elle constitue ainsi un outil de recours très courant pour l'analyse détaillée des risques. Un exemple, relatif aux risques d'auto-inflammation du produit stocké dans un silo, figure à l'illustration 10.

A propos des diverses méthodes employées pour structurer l'analyse des risques, l'INERIS (2006[a]) souligne que « beaucoup suivent un cheminement similaire à savoir : identifier une dérive ou défaillance d'origine, en identifier l'ensemble des causes puis des conséquences, effectuer une cotation et enfin, identifier les barrières de sécurité existantes ou devant être proposées pour limiter les risques d'accident ou d'incident. [...] En définitive, la qualité d'une analyse des risques tient essentiellement dans la qualité du groupe de travail, et en particulier sa connaissance des installations, et dans les moyens qui lui ont été consacrés. Les méthodes et outils d'analyse des risques servent de support pour guider la réflexion de manière systématique. »

### ***L'analyse des risques préliminaire***

L'objectif premier de l'analyse des risques préliminaire est l'identification des scénarios de risque qui devront faire l'objet d'un examen approfondi dans la seconde phase de l'étude. Il s'agit donc avant tout de dresser un recensement aussi exhaustif que possible des situations de dangers pouvant causer un accident. Celles-ci doivent inclure les possibilités d'« effets dominos » internes à l'installation, c'est-à-dire de déclenchement par un phénomène dangereux d'un autre phénomène dangereux, résultant en un accident aux conséquences plus graves. D'où la nécessité d'adopter une démarche itérative, qui ne doit, par ailleurs, négliger aucune phase de l'exploitation.

Le déroulement et les résultats attendus de cette phase de l'exercice sont schématisés à l'illustration 11. L'analyse consiste d'abord à identifier, pour chaque composant du système, les situations de dangers potentielles. Pour chacune d'entre elles, il est ensuite nécessaire de déterminer l'ensemble de ses causes, les phénomènes dangereux qu'elle peut engendrer et leurs possibles conséquences. Dans un second temps, doivent être attribuées des cotations :

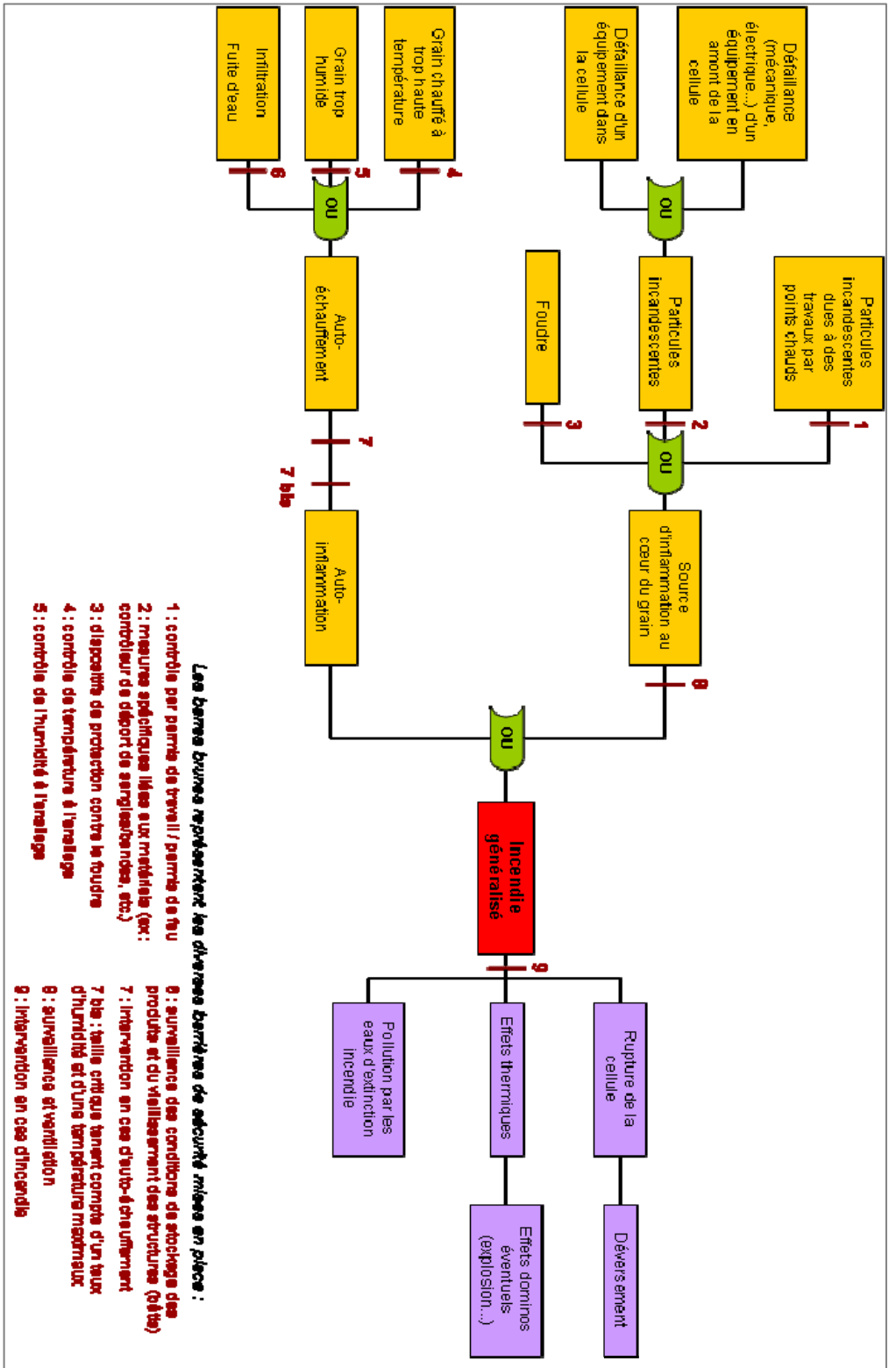


Illustration 10 – Exemple de nœud papillon : inflammation d'un silo (d'après MEEDDAT, 2008)  
 La partie gauche correspond aux causes (arbre de défaillances, jaune), la droite aux conséquences (arbre d'événements, violet).

- pour la fréquence de chacune des causes considérées, sur une échelle quantitative ou semi-quantitative ;
- pour l'intensité des effets des phénomènes dangereux provoqués. A ce stade de l'analyse des risques, une évaluation simple, à même d'indiquer si les enjeux situés en dehors du périmètre des installations peuvent être atteints par les effets des phénomènes dangereux ou si des effets dominos peuvent être générés, se montre suffisante : cela révèle si le scénario considéré peut constituer une séquence d'accident majeur.

Ces estimations ne prennent pas en compte les barrières de sécurité mises en œuvre. L'examen de celles-ci constitue l'étape suivante de l'analyse. Le groupe de travail doit ainsi identifier les barrières permettant de supprimer les causes des événements redoutés, ou d'atténuer les effets des phénomènes dangereux associés. Il juge l'indépendance de la barrière ainsi que sa performance, afin de pouvoir évaluer le niveau de maîtrise des risques qu'elle confère. Il tâche notamment d'attribuer un niveau de confiance (NC) à chacune des barrières.

Ces barrières jouent sur la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux et/ou sur la gravité de leurs conséquences. Toutefois, constituant un composant du système, leur fonctionnement ou leur défaillance peuvent éventuellement générer de nouveaux scénarios de risque. L'analyse des risques préliminaire doit par conséquent intégrer les scénarios introduits par l'ajout des barrières de sécurité dans ses itérations.

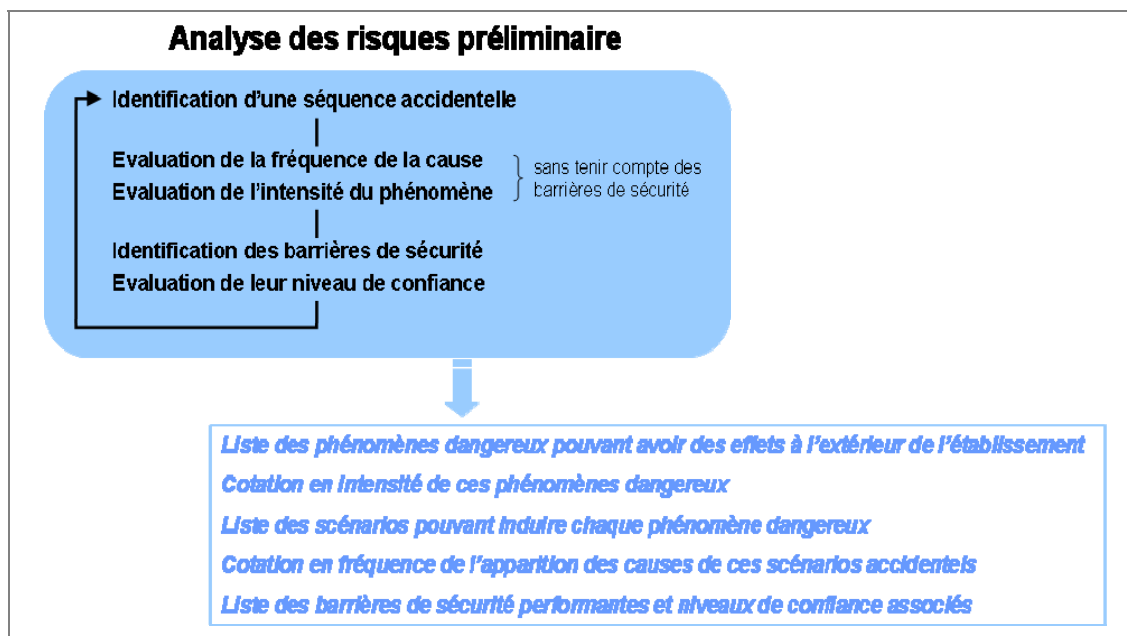


Illustration 11 - Déroulement et produits de sortie de l'analyse des risques préliminaire (d'après INERIS, 2006[a])

Le processus d'évaluation décrit ci-dessus doit être mené pour chaque événement redouté central (ERC) pouvant affecter un composant ; lorsque l'analyse d'un événement est terminée, le groupe passe à l'événement suivant pouvant affecter le composant. Lorsque tous les événements ont été traités, il choisit un nouveau composant à étudier, jusqu'à épuisement des constituants du sous-système considéré.

Les résultats de l'analyse des risques préliminaire peuvent être synthétisés, pour chacun des sous-systèmes issus de l'analyse fonctionnelle, dans un tableau tel que celui proposé à l'illustration 12.

N°	Cause (de la dérive)	Dérive	Evénement redouté central	Phénomène dangereux	Fréquence de la cause	Intensité	Barrières de sécurité				NC	
							Intitulé	Cause	Dérive	ERC		Phénomène

Illustration 12 - Exemple de tableau pour l'analyse des risques préliminaire (d'après INERIS, 2006[a])

### **L'étude détaillée des risques**

A l'issue de l'analyse des risques préliminaire, le groupe de travail dispose donc de la liste des scénarios susceptibles de conduire à un accident majeur ; le travail d'élaboration de scénarios est effectué en majeure partie dans cette première étape. L'étude détaillée des risques concerne davantage l'exploitation et le traitement approfondi de cette liste de scénarios. Elle consiste :

- à regrouper les séquences accidentelles menant à un même phénomène dangereux ;
- en conséquence, à caractériser la probabilité d'apparition, la cinétique et l'intensité de ce phénomène ;
- à évaluer la gravité des diverses conséquences qu'il peut avoir, en intégrant dans l'analyse la performance des barrières de sécurité mises en place.

Ce processus et les résultats attendus sont schématisés à l'illustration 13. Il s'agit là encore d'une démarche itérative, en particulier pour prendre en considération dans l'étude les effets dominos. De plus, l'analyse du niveau de maîtrise des dangers pour chacun des scénarios identifiés conduit éventuellement à introduire des barrières de sécurité supplémentaires. Celles-ci sont susceptibles de générer à leur tour de nouveaux scénarios de risque, non détectés lors de l'analyse préliminaire, nécessitant une nouvelle boucle dans la démarche.

L'agrégation des scénarios constitue un élément-clé de cette étape. Un outil utile pour cela est le nœud papillon (voir plus haut). Outre la représentation complète des combinaisons d'événements conduisant des causes primaires de l'accident à l'exposition des éléments vulnérables, il permet le positionnement des barrières de sécurité au niveau où elles interviennent.

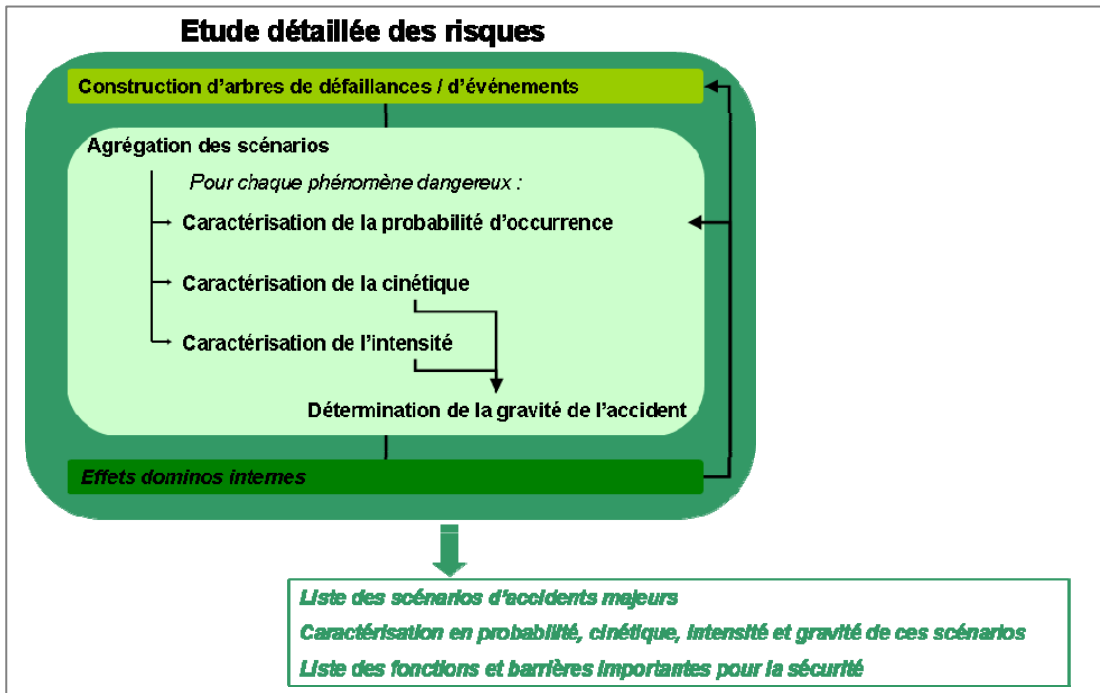


Illustration 13 - Déroulement et produits de sortie de l'étude détaillée des risques (d'après INERIS, 2006[a])

Le traitement de l'arbre suivant les principes de l'algèbre de Boole offre un moyen d'estimer la probabilité du phénomène de manière semi-quantitative ou quantitative, si les données disponibles sont suffisantes (fréquence d'occurrence des événements initiateurs, niveaux de confiance des barrières de sécurité). Par ces règles, les fréquences d'occurrence ou probabilités d'apparition des événements initiateurs peuvent être combinées pour fournir une évaluation de la probabilité des scénarios agrégés, tout en incluant la réduction de celle-ci par la mise en œuvre de barrières de sécurité, au vu de leur performance.

La cinétique des différents phénomènes dangereux doit également faire l'objet d'une évaluation à ce stade. Celle-ci s'avère cependant délicate ; l'estimation doit surtout chercher à faire une distinction qualitative entre cinétique rapide et lente, au sens de l'arrêté du 29 septembre 2005 « PCIG » : un phénomène est qualifié de lent s'il laisse le temps de mettre en pratique les mesures de protection des populations suffisantes à l'extérieur de l'établissement.

Pour les scénarios d'accident majeur identifiés, l'intensité des effets des phénomènes dangereux correspondants doit ensuite être caractérisée de manière plus précise que lors de la phase d'analyse préliminaire. Pour répondre aux exigences réglementaires, l'analyse de risques cherche ainsi à renseigner sur les distances d'effets correspondants aux différents seuils définis par l'arrêté « PCIG » (seuil des effets létaux significatifs, seuil des effets létaux, seuil des effets irréversibles, seuil des effets de surpression à 20 mbar). En fonction des installations, des phénomènes et des conditions d'environnement, diverses approches se montrent possibles : les distances



d'effets peuvent provenir du retour d'expérience, de l'application de formules à caractère majorant, ou requérir une modélisation spécifique du phénomène à l'aide d'outils adéquats.

Une fois ces distances d'effets calculées pour les différents scénarios, vient la caractérisation de la gravité de leurs conséquences. Comme figuré à l'illustration 9a, il est nécessaire pour cela de croiser l'intensité du phénomène avec la vulnérabilité de l'environnement. Cela suppose d'abord de connaître les enjeux exposés aux effets de chaque phénomène dangereux. Ces informations sont issues de la deuxième phase de réalisation de l'étude des dangers : la caractérisation des dangers et des enjeux (cf. § 3.2.1). L'annexe 3 de l'arrêté « PCIG », complétée par la fiche n°1 jointe au guide du 28 décembre 2006 (MEDD, 2006), précise le mode d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident, à partir du décompte des personnes exposées dans les zones d'effets déterminées pour chaque scénario. La grille imposée fournit ainsi l'évaluation de la gravité sur une échelle de cinq classes (reprises par les lignes de l'illustration 6). Cette estimation peut tenir compte des éventuelles mesures de protection des populations adoptées, par exemples les mesures constructives, si leur mise en application est jugée efficace et adaptée à la cinétique du phénomène, telle qu'établie auparavant. En revanche, comme mentionné au paragraphe 3.1, la réglementation ne prévoit pas comment apprécier la gravité des conséquences sur l'environnement en dehors des personnes : faune, flore, milieux aquatiques, structures...

Comme représenté à l'illustration 13, l'étude détaillée des risques débouche, à l'issue d'un nombre suffisant d'itérations intégrant l'introduction de barrières de sécurité et l'apparition de nouvelles séquences accidentelles, sur une liste réputée complète de scénarios d'accident majeur, caractérisés en probabilité d'occurrence, en cinétique, en intensité et en gravité. Elle fournit ainsi les éléments nécessaires à la caractérisation des scénarios d'accident majeur et du niveau de maîtrise des risques, dernière étape de l'étude des dangers (cf. § 3.2.1).

### **3.3. APPLICABILITE AU CAS DU STOCKAGE GEOLOGIQUE DE CO<sub>2</sub>**

#### **3.3.1. Principes généraux guidant l'étude de dangers**

Les études de dangers industriels, telles que présentées ci-dessous, cherchent à répondre aux préoccupations d'accident majeur. Cet adjectif caractérise les accidents dont les conséquences dépassent les limites de l'établissement étudié. Cette notion est difficilement transposable au contexte du stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Si, en surface, les installations seront bien délimitées durant la phase opérationnelle, voire pendant la période de surveillance ultérieure, à long terme il ne sera plus question de distinguer l'intérieur et l'extérieur du périmètre de l'établissement. D'autre part, en subsurface, il n'existera pas de bornes, hormis éventuellement celles du réservoir de stockage ; tous les scénarios d'accident considérés concerneraient ainsi, dans le sous-sol, des enjeux « extérieurs » au périmètre d'opération. Cette remarque renvoie au problème de la délimitation du secteur d'étude à inclure dans une analyse de risques liés à un stockage de CO<sub>2</sub>.

En dehors de cette distinction, les grands principes de l'EDD paraissent adaptés au cas du stockage de CO<sub>2</sub> :

- La recherche d'impacts aussi faibles que possible, dans des conditions techniques et économiques raisonnables au moment des opérations, doit y prévaloir, comme conclu dans le premier livrable de CRISCO2 (Bouc & Auclair, 2007).
- Le principe de proportionnalité de l'étude aux risques générés par le projet semble légitime. Toutefois, pour le CO<sub>2</sub>, celle-ci peut s'entendre par rapport aux potentiels de dangers représentés par l'opération et par rapport à la vulnérabilité des enjeux actuels ou dans un futur relativement proche ; mais les cibles présentes dans un avenir plus lointain ne peuvent pas être prises en compte.
- La responsabilité du demandeur dans l'analyse de risques est nécessaire, et ce besoin apparaît encore accru par les échelles de temps mises en jeu et le nécessaire transfert de la responsabilité du site de l'opérateur vers l'Etat comme étape ultime de la clôture du site. Pour les installations industrielles, les prescriptions de l'arrêté d'autorisation dépendent du contenu de l'étude de dangers fournie par l'exploitant ; il est à prévoir qu'une autorisation de stockage de CO<sub>2</sub> soit de même soumise à des dispositions découlant de l'analyse de risques présentée.
- La démarche de l'EDD donne la priorité à la réduction du risque à la source, par la diminution des potentiels de dangers, de la probabilité d'accident ou de l'intensité des effets. De même que pour une EDD, qui ne considère pas de possibilité d'action sur la vulnérabilité des cibles, la décomposition du risque en aléa et vulnérabilité ne paraît pas pertinente pour le stockage du CO<sub>2</sub>. En effet, ainsi que noté plus haut, les mesures de maîtrise des enjeux éventuellement mises en place ne feront qu'un temps : la vulnérabilité du milieu ne pourra être déterminée de façon définitive. Même si un PPRT accompagne le déroulement d'opérations de stockage, une analyse qui considère aussi bien le court que le long terme ne saurait reposer sur une estimation de la vulnérabilité actuelle pour évaluer les risques. Les leviers d'actions potentiels ne sauraient donc porter que sur la probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux et l'intensité de ses effets, d'où la justification d'une approche de maîtrise des risques à la source comparable à celle des études de dangers.

### **3.3.2. Identification des scénarios de risque**

Comme présenté plus haut, l'identification des scénarios de risque dans une étude des dangers suit un processus itératif, dont l'étape déterminante se situe au niveau de l'analyse des risques préliminaire. Celle-ci s'appuie sur la décomposition fonctionnelle du système. Chacun des sous-ensembles est lui-même constitué de composants élémentaires. L'opérateur d'une activité industrielle « classique » dispose de la connaissance de chacun de ces composants, il en maîtrise l'agencement et, normalement, le fonctionnement par la conception de son processus et de son installation.

L'analyse des risques préliminaire consiste à balayer les différents sous-systèmes, en descendant à un niveau de décomposition adéquat, pour identifier les situations de dangers pouvant les concerner et les séquences accidentelles correspondantes :

enchaînement des causes menant à cet événement, succession de ses conséquences. Le retour d'expérience joue un rôle primordial dans le processus d'analyse : au niveau du système ou du sous-système, il indique les scénarios d'accident déjà rencontrés sur des installations ou des types d'activités semblables ; au niveau du composant, il informe notamment sur les possibles dysfonctionnements ainsi que leur fréquence.

Nous trouvons là des différences considérables avec ce qu'il est possible de faire dans le cas du stockage géologique de CO<sub>2</sub>. En effet, cette technologie fait appel avant tout à la performance des attributs naturels du complexe de stockage pour assurer la rétention du CO<sub>2</sub> et la maîtrise des risques. Elle ne repose pas sur la combinaison de pièces ouvragées connues ; le sous-sol compose un milieu continu, et non un ensemble discret et fini de constituants. De plus, les options d'ingénierie disponibles sont limitées : elles concernent avant tout la conception des puits, la planification de l'injection et la stratégie de surveillance ; à cela s'ajoutent, en cas d'incident, les possibles mesures de correction. Les incertitudes sur le comportement du complexe se révèlent donc bien plus grandes que pour des installations industrielles classiques. En conséquence de tout cela, il paraît bien plus délicat de décomposer le système en éléments dont le comportement et les défaillances possibles seraient relativement bien connus, pour identifier les scénarios de risque par la combinaison des évolutions anormales ainsi repérées. Surtout, l'usage du retour d'expérience présentera un intérêt limité. Il est actuellement insuffisant faute d'un historique de stockage de CO<sub>2</sub> suffisamment fourni, mais, même à une phase plus avancée, la variabilité des conditions d'un site à l'autre empêchera d'en tirer des conclusions probantes. Au niveau du système, il pourra mettre l'accent sur la nécessité de considérer tel ou tel phénomène ; mais au niveau des différentes composantes du complexe de stockage, les comparaisons entre sites n'apporteront que des informations restreintes, hormis éventuellement sur les parties ouvragées, *i.e.* les puits.

Au cours de l'étude de dangers, un point important est de considérer l'environnement des installations comme source possible d'agression, aussi bien que comme cible potentielle d'un danger. L'analyse des risques pour le stockage de CO<sub>2</sub> devra faire de même. L'arrêté du 10 mai 2000 modifié, toutefois, souligne que certains événements initiateurs externes peuvent être éludés dans l'étude de dangers, dans la mesure où les installations industrielles répondent aux normes de construction en vigueur. Il s'agit :

- des phénomènes climatiques d'ampleur exceptionnelle (foudre, crues, neige et vent) ;
- de la rupture d'un barrage ;
- de la chute d'une météorite ;
- de la chute d'un avion, hors proximité d'un aéroport ;
- des séismes d'amplitude supérieure aux séismes maximums de référence ;
- des actes de malveillance.

Pour les installations de surface d'un site de stockage de CO<sub>2</sub>, présentes pendant la phase opérationnelle et de surveillance uniquement, les mêmes principes de réglementation peuvent s'appliquer. La partie sous-sol, elle, ne serait pas réellement concernée par les phénomènes climatiques extraordinaires mentionnés ou la rupture d'un barrage. Pour que les effets de la chute d'un avion ou d'une météorite atteignent le stockage, il faudrait une intensité telle que ce phénomène en lui-même générerait des conséquences dépassant largement celles d'une fuite de CO<sub>2</sub> depuis le réservoir de stockage ; ces événements peuvent par conséquent également être négligés. Il restera donc à s'interroger sur la pertinence d'inclure dans l'identification de scénarios de risques l'occurrence de séismes d'amplitude supérieure aux séismes de référence, compte tenu des échelles de temps en jeu, ou d'actes de malveillance.

### **3.3.3. Caractérisation des risques**

Comme nous l'avons présenté, l'évaluation des risques industriels repose sur la cotation des scénarios accidentels en probabilité, cinétique, intensité, gravité. Nous pouvons ici nous interroger sur la faisabilité de telles estimations pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub>.

#### ***Probabilité***

L'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un accident industriel s'appuie sur l'exploitation, au cours de l'analyse détaillée des risques, du nœud papillon, en partant des fréquences des événements initiateurs et du niveau de confiance des barrières de sécurité. Ces valeurs de base proviennent du retour d'expérience et de la connaissance des constituants (dimensionnement, taux de défaillance...). Comme souligné au paragraphe précédent, le stockage de CO<sub>2</sub> ne peut pas compter sur de telles données pour décrire les paramètres naturels gouvernant l'évolution du stockage. La probabilité de défaillance des composants géologiques du site paraît ainsi difficile à prédire. La nécessité de prendre en compte des échelles de temps inhabituelles s'ajoute à cette difficulté ; l'analyse de risques industriels calcule des probabilités annuelles, alors que dans le cas du stockage géologique il conviendrait de considérer des probabilités centennales, voire millénaires. Par conséquent, l'estimation des scénarios de risque en termes de probabilité pour le stockage de CO<sub>2</sub> apparaît comme un exercice très délicat ; elle ne pourrait résulter que de jugements d'experts, avec toute la subjectivité, et donc les incertitudes, que cela comporte, qui plus est sur les échelles de temps considérées. L'évaluation correspondante ne pourrait être au mieux que semi-quantitative et ne présente pas de réelle fiabilité.

#### ***Cinétique***

La question de la cinétique renvoie à celle des échelles de temps : l'une des difficultés de l'analyse des risques engendrés par le stockage de CO<sub>2</sub> réside dans la comparaison des échelles de temps d'occurrence des phénomènes dangereux et d'exposition des cibles, compte tenu de la cinétique de déroulement de ces phénomènes. L'atteinte des éléments vulnérables pourrait en effet être considérablement différée par rapport à l'apparition des causes du phénomène. Cela

se répercute sur l'évaluation de l'adéquation de la mesure corrective correspondante, qui dépend de la rapidité de sa mise en œuvre ainsi que de la cinétique de sa réponse. Par ailleurs, l'exposition des cibles à un phénomène dangereux pourrait être maintenue sur des durées bien plus longues qu'usuellement envisagé. En résumé, la dimension temporelle du risque s'avère centrale pour son estimation. Sa prise en compte semble délicate. Toutefois les modèles représentant les différents scénarios de risque devraient être à même de fournir des éléments quantifiés pour cela ; du moins ces aspects cinétiques font partie des interrogations auxquelles ils doivent chercher à répondre.

### ***Intensité***

Ces modèles viseront avant tout à déterminer l'intensité des phénomènes dangereux : amplitude de surrection, débit de fuite... En cela, la démarche est comparable à ce qui est réalisé dans une étude détaillée des risques industriels. Pour celle-ci, l'intensité est traduite en termes de distances d'effets, correspondant à des seuils prévus par la réglementation pour les différents types d'effets (toxiques, thermiques, surpression, projection). Cette démarche ne s'avère pas totalement adaptée à l'étude du stockage géologique de CO<sub>2</sub>. D'une part, les phénomènes engendrés ne correspondent pas tous aux types d'effets prévus par les textes réglementaires. Les risques résultant de déstabilisations géomécaniques par exemple (sismicité induite, surrection) ne se manifestent pas par un des quatre effets figurant dans l'arrêté « PCIG ». D'autre part, les effets souterrains doivent prendre en considération trois dimensions, tandis que l'analyse des risques industriels ne s'intéresse qu'aux impacts en surface. Au lieu de distance d'effet, il faudrait alors calculer un « polyèdre d'effets », ou du moins un périmètre d'effet par strate considérée. Mais les seuils d'effets associés devraient varier en fonction des couches : si la notion de distance d'effet pour une fuite dans un aquifère paraît judicieuse, elle ne saurait être quantifiée de manière similaire au calcul en surface. Ce défaut fait écho à l'absence de règles nationales pour traiter des conséquences d'un accident sur l'environnement. En surface également, le stockage de CO<sub>2</sub> nécessiterait des précisions sur la façon d'estimer l'intensité des effets dans l'optique d'une évaluation de la gravité des conséquences sur les enjeux environnementaux. Finalement, l'approche préconisée par la réglementation se montre appropriée surtout pour l'étude des effets toxiques d'une fuite en surface. Notons que le CO<sub>2</sub>, n'étant jusqu'alors pas considéré comme toxique, ne faisait pas l'objet des fiches de seuils de toxicité présentées par le Ministère de l'Ecologie et l'INERIS, considérées comme références par l'arrêté du 29 septembre 2005. Néanmoins, une note du MEDAD (Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables) en date du 16 novembre 2007 a précisé les concentrations à prendre en compte pour le CO<sub>2</sub> :

- Seuil des effets létaux significatifs : 20% (volumiques)
- Seuil des effets létaux : 10% (volumiques)
- Seuil des effets irréversibles : 5% (volumiques)

Il paraît crédible que ces seuils, références pour le projet pilote d'injection de CO<sub>2</sub> porté par TOTAL à Rousse (Pyrénées-Atlantiques), s'imposent de manière plus générale par la suite, à moins que d'autres valeurs ne soient adoptées à une échelle européenne.

### **Gravité**

L'évaluation de la gravité, comme figuré à l'illustration 9a, résulte du croisement des estimations de l'intensité des effets d'un phénomène dangereux et de la vulnérabilité des enjeux. Nous avons déjà discuté du fait que la notion de vulnérabilité apparaît mal adaptée à l'analyse des risques présentés par un stockage de CO<sub>2</sub>, dans la mesure où elle changera avec le temps, de façon potentiellement considérable. Par ricochet, un calcul de gravité ne paraît pas non plus judicieux. Il peut fournir une appréciation de la gravité des accidents dans la configuration actuelle, mais pas pour le long terme, sauf à faire des hypothèses sur la vulnérabilité future du milieu. Par ailleurs, rappelons encore une fois que la réglementation française ne prescrit pas de méthode pour évaluer la gravité des conséquences sur les enjeux non humains. Si un calcul de gravité était souhaité pour le stockage de CO<sub>2</sub>, il ne pourrait pas faire l'impasse sur les cibles environnementales. En particulier, chronologiquement, les enjeux présents en subsurface seraient affectés par une fuite avant les être humains ; la gravité des phénomènes sur ces cibles devrait alors nécessairement être évaluée.

#### **3.3.4. Processus de réalisation de l'analyse des risques**

Les paragraphes précédents révèlent que, si les principes présidant à l'étude des risques paraissent voisins entre stockage de CO<sub>2</sub> et ICPE<sup>7</sup>, l'identification et la caractérisation des scénarios de risque se heurtent à des différences notables. En termes de démarche, les étapes préalables à l'analyse de risque (*cf.* illustration 7) peuvent néanmoins être reprises de manière relativement similaire, hormis les bémols déjà mis à l'utilisation du retour d'expérience. La collecte des données d'entrée doit ainsi parvenir à l'identification :

- des potentiels de dangers ;
- des cibles ;
- des agresseurs externes.

Par la suite, le principe de recenser les phénomènes dangereux susceptibles de se produire, puis les scénarios y conduisant, comme séquences globales d'événements, ne suscite pas de remise en cause. Cependant, nous avons insisté sur le fait que l'identification des scénarios de risque ne pouvait se dérouler de la même façon que pour les risques industriels (§3.3.2). Ceci se traduit en particulier par la mauvaise applicabilité de la plupart des techniques d'analyse des risques préliminaire classiques : le système géologique paraît trop complexe pour une APR ; l'AMDEC est conçue pour des ensembles que l'on peut décomposer en constituants élémentaires ;

---

<sup>7</sup> Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

l'HAZOP s'applique aux systèmes ouvragés thermo-hydrauliques. Si de telles techniques pourraient éventuellement être envisagées, dans les activités de stockage de CO<sub>2</sub>, pour l'étude des risques opérationnels, elles ne peuvent en tout état de cause pas répondre aux besoins d'études des dangers sous-sol à long terme. Parmi les méthodes citées au §3.2.2, seule la SWIFT semblerait pouvoir être adaptée aux exigences posées par le stockage géologique de CO<sub>2</sub>.

Face à ces difficultés, le recours à un groupe interdisciplinaire d'experts paraît judicieux pour répertorier les scénarios de risque, plus encore peut-être que dans le cas des risques industriels. A ce propos, nous retenons les préconisations de l'INERIS (2006[a]), qui recommande de constituer un groupe de travail de 7-8 personnes issues de différents secteurs plus un animateur de l'atelier. Dans le cas du stockage de CO<sub>2</sub>, il ne sera pas question de rassembler des personnes qui ont une expérience au quotidien des installations ; néanmoins il faudra réunir des experts bénéficiant d'une bonne connaissance du milieu étudié. L'identification des scénarios de risque résultera d'une forme de réflexion collective de ce groupe. Il semble pertinent de présenter les conclusions de ce travail dans un tableau similaire à celui élaboré à l'issue d'une analyse de risques préliminaire (illustration 12). Le statut des colonnes dédiées aux barrières de sécurité demande toutefois à être discuté, suivant que l'on considère les éléments naturels du complexe de stockage comme des « barrières », ou si l'on réserve ce terme à des constituants anthropiques ajoutés, qui seraient peu nombreux dans le cas du stockage de CO<sub>2</sub> (voir discussion au paragraphe suivant).

L'étape suivante pour les risques industriels est l'agrégation des scénarios de risques dans des arbres et leur exploitation pour la caractérisation de ces scénarios. L'un des intérêts majeurs réside dans la capacité à combiner les valeurs de probabilité dans le nœud papillon pour déterminer la probabilité d'occurrence du scénario. Nous avons souligné plus haut qu'il était délicat, au vu des difficultés posées par le milieu géologique et les échelles de temps, de vouloir quantifier une probabilité dans le cas du stockage de CO<sub>2</sub>. En particulier, l'introduction dans les arbres des barrières de sécurité, avec leur niveau de confiance, pour estimer la modification de probabilité du scénario, ne paraît pas directement transposable à cette application. Néanmoins, la traduction d'un tableau d'identification des risques, tel que mentionné ci-dessus, sous forme d'arbres continue de présenter l'intérêt de figurer les combinaisons d'événements. Cet aspect d'agrégation nous semble fort utile pour ne pas oublier de chemins d'accidents, dans la mesure où l'on cherche bel et bien à établir les séquences d'événements potentiellement dangereuses. Quand bien même de tels arbres ne permettent pas, pour l'application au CO<sub>2</sub>, une caractérisation quantitative en probabilité des scénarios de risque, ils peuvent aider à hiérarchiser les priorités pour la prévention et la surveillance. Toutefois, la construction de ces arbres pourrait se montrer compliquée pour le stockage du CO<sub>2</sub>. En effet, pour les risques industriels, elle dépend directement de la décomposition du système étudié en sous-systèmes et en composants : chaque « case » d'un arbre d'événements se rapporte à un élément du système, et le niveau de détail recherché pour identifier les origines d'un accident peut varier. Dans le continuum composé par le milieu géologique, où une telle décomposition s'avère plus complexe (cf. § 3.3.2), l'élaboration d'arbres d'événements semble, en retour, plus difficile.

### 3.3.5. Moyens de maîtrise des risques

En plus des incertitudes liées au milieu souterrain, par comparaison aux constituants d'installations industrielles ouvragées (cf. § 3.3.2), l'une des différences majeures entre stockage géologique de CO<sub>2</sub> et activité industrielle classique provient des capacités de maîtrise des risques dont dispose l'opérateur. Le stockage de CO<sub>2</sub> reposant avant tout sur les attributs naturels du site, les moyens de prévention et d'intervention mobilisables par l'exploitant sont peu nombreux. Les opérations sur le système naturel, complexes et lourdes à mettre en œuvre, demeureront exceptionnelles, et se limiteront vraisemblablement aux interventions en cas de défaillance constatée. Pour un établissement industriel, les principaux moyens pour maîtriser les risques sont :

- la réduction, voire la suppression des potentiels de dangers ;
- l'éloignement des sources de dangers par rapport aux éléments vulnérables ;
- la fiabilisation des équipements et des opérations ;
- la mise en place de barrières de sécurité performantes.

Si nous tentons d'examiner ces actions dans l'optique du stockage de CO<sub>2</sub> :

- Les possibilités de réduction des potentiels de danger correspondent aux modifications de la stratégie d'injection : diminution de la pression d'injection, du volume injecté, amélioration de la qualité du flux de gaz injecté, modification de la température du fluide. Les leviers d'action restent peu nombreux, et il n'est pas envisageable de supprimer complètement les potentiels de dangers.
- L'éloignement des sources de danger par rapport aux enjeux renvoie au choix des sites de stockage. Sélectionner des sites éloignés des zones peuplées ou des zones naturelles sensibles réduit les risques par rapport aux enjeux actuels ; mais, encore une fois, cela ne prend pas en considération la vulnérabilité future, et ne garantit donc pas la maîtrise des risques à long terme.
- La fiabilisation des équipements ne peut concerner que les éléments ouvragés du système, *i.e.* les puits, et ne peut avoir lieu que pendant la phase opérationnelle.

La notion de barrière de sécurité apparaît problématique dans le cas du stockage de CO<sub>2</sub>. Elle s'applique aux composants ouvragés du système comme pour tout équipement industriel : ainsi, les vannes équipant les puits constituent des barrières de sécurité pendant la phase opérationnelle. En ce qui concerne le long terme, les bouchons de ciments coulés dans les puits exercent de même une fonction de sécurité. En revanche, pour le système naturel, sauf cas exceptionnel, aucun composant ne sera ajouté exprès pour réaliser une fonction de sécurité. Le site sera équipé de dispositifs de surveillance ; toutefois ceci ne suffit pas pour considérer qu'il existe une barrière de sécurité : une barrière ne se contente pas de détecter une anomalie, elle déclenche une action pour la corriger, limiter ses effets ou atténuer ses conséquences. La barrière de sécurité correspondante serait alors la détection par le programme de monitoring complétée par l'intervention humaine menée en réponse. Ceci ne peut pas être pris en compte pour l'analyse des risques à long terme. En ce sens, il n'existe pas, sur le long terme, de barrières de sécurité intervenant sur le système naturel. Cependant, le rôle attendu d'une roche couverture consiste



précisément à limiter ou atténuer les fuites. Elle assure alors une fonction de sécurité. De même, un aquifère supérieur offre une voie d'expansion à une fuite éventuelle, prévenant ainsi une fuite vers la surface. Mais dans le même temps, cette dispersion du CO<sub>2</sub> dans l'aquifère peut être considérée comme une contamination de celui-ci. Une telle couche peut ainsi être considérée, suivant le point de vue, comme assurant une fonction de sécurité ou comme un enjeu à protéger. Cet exemple montre que la difficulté à identifier les barrières de sécurité ramène à la complexité d'établir un découpage fonctionnel du système de stockage (cf. § 3.3.2). Si l'on convient de réaliser un découpage par strates géologiques, les couches imperméables peuvent être considérées comme des barrières passives contre les fuites. Ceci n'exclut pas qu'elles puissent induire des scénarios de risque, par leur déstabilisation géomécanique due à la mise en pression, ou par une défaillance de cette fonction de sécurité due à une étanchéité non-conforme aux prévisions. Toute la difficulté revient alors à estimer la performance de ces barrières. Vues les incertitudes accompagnant la connaissance des roches et la variabilité d'un site à l'autre, il semble délicat d'établir des taux de défaillance ou des niveaux de confiance relatifs aux couvertures. En bref, il ne paraît pas impossible de parler de barrières de sécurité pour le stockage de CO<sub>2</sub>, mais cette notion semble dans ce cas de manipulation peu commode, et elle ne présente de ce fait vraisemblablement pas le même intérêt que pour l'analyse des risques engendrés par une ICPE.

### 3.3.6. Bilan pour CRISCO2

L'analyse menée ci-dessus souligne plusieurs écueils, malgré des objectifs comparables, à la transposition de l'approche des études de dangers pour le stockage de CO<sub>2</sub>, liés notamment aux défauts de connaissance et de maîtrise du système étudié, à la variabilité entre les sites, aux échelles de temps incriminées. En particulier, deux difficultés se sont manifestées à plusieurs reprises :

- Le stockage de CO<sub>2</sub> repose par essence sur les caractéristiques naturelles du site sélectionné. Le complexe de stockage formé par le milieu géologique, continu, ne peut faire l'objet d'une décomposition aussi simple que des équipements industriels, assemblage de composants. Or la décomposition fonctionnelle de l'objet d'étude apparaît jouer un rôle clé dans les études de dangers industriels. La difficulté de réaliser un découpage similaire affecte les possibilités de constitution d'arbres d'événements, d'identification de barrières de sécurité, et l'ensemble du processus de détection et d'analyse des scénarios de risques, tel que conduit pour les ICPE.
- La vulnérabilité des alentours d'un stockage peut être connue en l'état présent, mais pas son devenir à long terme, sauf à faire des hypothèses sur cet état futur. De ce fait, l'analyse des risques présentés par un stockage de CO<sub>2</sub> ne peut pas raisonner, dans les leviers de maîtrise du risque, sur cette composante. Une cotation des scénarios en gravité paraît donc inadaptée ; l'évaluation ne semble pas pouvoir dépasser la détermination de l'intensité des phénomènes dangereux. Ceci est renforcé par l'absence de règles de prise en compte des enjeux environnementaux. Cela justifie par ailleurs la nécessité de travailler sur la maîtrise du risque à la source.

Rappelons ici les enjeux du projet CRISCO2 : il ne s'agit pas de transcrire la démarche d'analyse de risques, mais de fournir une méthodologie de détermination de critères de sécurité. Nous cherchons à mettre au point une méthode simple pour vérifier qu'un projet respecte un certain nombre d'exigences de sécurité, et non à développer une approche permettant une étude approfondie des risques.

Par conséquent, nous ne tentons pas de répondre à l'ensemble des interrogations soulevées dans les paragraphes précédents, mais de tirer les leçons de la comparaison effectuée pour l'élaboration et l'exploitation de scénarios de risque, dans le contexte de notre projet :

- Un premier pas pour construire des scénarios de risques doit être l'identification :
  - des potentiels de dangers ;
  - des cibles ;
  - des agresseurs externes.Des listes génériques peuvent être établies pour cela, à adapter en fonction des conditions spécifiques à chaque site.
- L'analyse des risques industriels s'appuie usuellement sur une décomposition fonctionnelle du système étudié. Complexe dans le cas du stockage géologique de CO<sub>2</sub>, un découpage équivalent s'avérerait néanmoins utile. Une piste simple pour cela consisterait à distinguer différents compartiments dans le sous-sol en fonction des propriétés des strates géologiques.
- Le retour d'expérience, qui joue un rôle primordial dans l'étude des dangers industriels, ne peut être mis autant à profit pour le stockage de CO<sub>2</sub>.
- L'analyse des risques doit prendre en compte l'ensemble des phases de travaux. Pour l'application au stockage du CO<sub>2</sub>, il pourrait être nécessaire d'examiner des scénarios distincts en fonction des différentes phases du projet (opérations, fermeture, post-fermeture).
- L'élaboration de scénarios de risque doit s'appuyer sur un groupe pluridisciplinaire rassemblant des experts du site de stockage.
- Les conclusions de la réflexion collective ainsi organisée peuvent être présentées dans un tableau similaire à celui proposé pour l'analyse des risques préliminaire, dans le cas des ICPE (illustration 12).
- La traduction d'un tel tableau sous forme d'arbre ou de nœud papillon, bien que plus compliquée que pour les établissements industriels, paraît utile pour la représentation des combinaisons d'événements formant les scénarios de risque, leur agrégation et leur hiérarchisation. La faisabilité dépend notamment de la réussite de la décomposition du système en compartiments proposée ci-dessus.
- La vulnérabilité de l'environnement d'un site de stockage ne sera pas connue de manière définitive ; la cotation des scénarios de risque en termes de gravité ne présente donc qu'un sens limité. L'attribution de probabilités d'occurrence à ces scénarios ferait, elle, appel à des données d'entrée largement subjectives, et ne semble donc pas probante non plus. Parmi les quatre caractéristiques des accidents majeurs requises par la réglementation des Installations Classées, ne subsistent

donc que la cinétique et l'intensité des phénomènes dangereux pour faire l'objet d'évaluations crédibles, par le biais de la modélisation. L'approche proposée dans le cadre de notre projet resterait alors déterministe, en supposant l'occurrence de phénomènes dangereux physiquement envisageables, sans tenter d'en déterminer la probabilité, et l'exposition de cibles, et en évaluant si l'intensité demeure inférieure aux seuils d'effet. Sinon, des distances d'effets pourraient être calculées pour les effets toxiques. Une telle démarche présenterait l'intérêt de minimiser dans l'analyse l'importance de la date d'occurrence du phénomène dangereux.

- L'établissement de telles distances d'effets nécessiterait probablement une adaptation aux différents types d'enjeux. En particulier, les impacts sur les aquifères sus-jacents, exposés prioritairement, doivent faire l'objet d'un traitement différent des conséquences en surface.



## 4. Terminologie adoptée dans le cadre du projet CRISCO2

### 4.1. INTRODUCTION

Les études menées pour les chapitres précédents ont mené au constat que les mêmes termes, dans les différents contextes envisagés, peuvent avoir des acceptions légèrement différentes. Comme dans toute discipline, il est essentiel pour la bonne compréhension des objectifs et des résultats du projet de bien s'entendre sur la terminologie utilisée. Il nous a donc semblé judicieux d'établir un lexique précisant le sens d'un certain nombre de termes importants employés dans le cadre du projet CRISCO2. Ce travail s'est appuyé sur le glossaire élaboré dans Bouc *et al.* (2006), qui recensait des définitions provenant de sources officielles relatives au stockage géologique du CO<sub>2</sub> et à l'analyse de risques ; les expressions jugées les plus utiles dans le cadre du projet CRISCO2 en ont été extraites. Cette action a été complétée par l'adoption de définitions spécifiques pour certains termes importants dont la signification proposée par ces sources ne nous paraissait pas correspondre exactement au contexte de notre projet.

Le lexique résultant de ces efforts est proposé à l'annexe 1. Nous soulignons ci-dessous les définitions indispensables à la bonne compréhension du texte du rapport.

### 4.2. DEFINITIONS

**Domage** : Blessure physique ou atteinte à la santé des personnes, ou atteintes aux biens ou à l'environnement.

**Phénomène dangereux** : Libération d'énergie ou de substance produisant des effets susceptibles d'infliger un dommage à des cibles vivantes ou matérielles, sans préjuger l'existence de ces dernières.

**Effets d'un phénomène dangereux** : Caractéristiques des phénomènes physiques, chimiques,... associés à un phénomène dangereux concerné.

**Risque** : Possibilité de survenance d'un dommage résultant d'une exposition aux effets d'un phénomène dangereux.

= Combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences.

= Combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité.

**Enjeux / Eléments vulnérables / Cibles** : Eléments tels que les personnes, les biens ou les différentes composantes de l'environnement susceptibles, du fait de l'exposition au danger, de subir, en certaines circonstances, des dommages.

**Impact** : Effet d'une activité ou d'un produit sur l'homme ou l'environnement.

**Conséquences** : Combinaison pour un accident donné de l'intensité des effets et de la vulnérabilité des cibles situées dans les zones exposées à ces effets.

**Événement** : Fait aléatoire modifiant l'évolution du complexe de stockage.

**Scénario** : Evolution possible d'un complexe de stockage de CO<sub>2</sub>.

**Scénario de référence** : Evolution attendue du complexe de stockage, correspondant aux caractéristiques et aux plages de valeurs des paramètres régissant les processus d'évolution les plus probables.

**Scénario d'évolution altérée** : Evolution possible, mais peu probable, du complexe de stockage, correspondant à des caractéristiques ou valeurs de paramètres hors des domaines anticipés, ou à l'occurrence d'événements incertains.

**Scénario de risque** : Enchaînement d'événements conduisant à l'exposition d'éléments vulnérables aux effets d'un phénomène dangereux. Il s'agit donc de la combinaison :

- d'événements provoquant l'occurrence d'un phénomène dangereux
- et
- d'événements et processus décrivant les voies et modes d'exposition des enjeux.

**Critère de sécurité** : exigence imposée à l'opérateur de façon à assurer que les impacts sont négligeables :

- sur la sécurité et la santé des personnes ;
- sur l'environnement ;
- sur les ressources naturelles.

## **5. Mise au point d'une méthode de construction de scénarios adaptée à la problématique du stockage géologique de CO<sub>2</sub>**

### **5.1. INTRODUCTION**

Dans le premier livrable du projet CRISCO2 (Bouc & Auclair, 2007), nous avons conclu sur l'intérêt d'adapter au cas du stockage de CO<sub>2</sub> les principes encadrant l'approche de la sûreté des stockages géologiques de déchets radioactifs de haute activité et à vie longue :

- la recherche d'impacts aussi faibles que possible ;
- l'intégration dans l'évaluation de jugements qualitatifs avec des calculs déterministes retenant des hypothèses conservatives, et incluant des analyses de sensibilité et le traitement des incertitudes ;
- la distinction, à la base de l'analyse de sûreté, entre un scénario d'évolution normale et des scénarios aléatoires, représentant des futurs hypothétiques du stockage.

L'approche générale présidant au projet CRISCO2 correspond à ces préceptes : comme l'intitulé du projet l'indique, nous souhaitons en effet une approche reposant sur des scénarios de risque, qui se veut à la fois qualitative et quantitative, pour déterminer les exigences à imposer pour garantir des impacts négligeables.

L'objectif de la tâche 2 de CRISCO2, « Méthodologie de construction de scénarios », consiste à préciser ce cadre en proposant les lignes directrices pour l'identification des scénarios de risque à analyser. Ainsi que mentionné en conclusion du chapitre 2, nous avons choisi d'adopter, pour base de nos travaux, la méthode RISQUE établie en Australie dans le contexte du projet GEODISC. Après l'avoir discutée à la lumière des leçons tirées de la comparaison avec la démarche d'analyse de risque industriel (cf. §3.3.6), nous décrivons le processus suivi pour son adaptation. Nous en présentons ensuite les résultats, c'est-à-dire des outils et le mode d'utilisation que nous en préconisons. Nous tentons également de faire une critique de la méthode ainsi proposée, en gardant à l'esprit les objectifs précis guidant le projet CRISCO2, auxquels cette démarche prétend répondre.

### **5.2. EXAMEN DE LA METHODE *GEODISC***

La méthode RISQUE, telle qu'appliquée au stockage géologique de CO<sub>2</sub> dans le cadre du programme GEODISC, se veut une approche d'analyse de risques (Bowden & Rigg, 2004). Elle a ainsi pour objectif la quantification des risques, à partir d'estimations quantitatives de leur probabilité et de leurs conséquences. En ceci, elle se distingue des besoins du projet CRISCO2. Signalons également qu'elle a été

pensée initialement, d'après l'article de présentation, pour la comparaison de différents sites. Les produits de sortie permettent l'évaluation intrinsèque d'un site ; néanmoins, l'optique ayant présidé à sa conception suggère que cette démarche donne sa pleine mesure pour des appréciations relatives.

Comme souligné au paragraphe 2.1, elle couvre des aspects plus larges que la seule question de la sécurité : en plus des risques sur l'homme, l'environnement et l'effet de serre, elle s'intéresse aux risques techniques et financiers des opérations ainsi qu'aux risques pour le projet. Dans cette démarche globale, seule une partie peut nous servir dans le cadre de CRISCO2.

La méthode australienne repose sur le travail d'un groupe pluridisciplinaire d'experts afin :

- d'identifier les risques ;
- d'évaluer leur probabilité, sur une échelle semi-quantitative ;
- d'identifier leurs conséquences ;
- de quantifier ces conséquences.

Le travail de quantification ne nous concerne pas directement ; nous nous intéressons au processus de détection des risques et de leurs conséquences. L'approche par groupe d'experts rejoint les conclusions tirées de la comparaison avec l'analyse de risques industriels. Pour composer le panel, Bowden & Rigg (2004) conseillent de réunir des expertises « dans des domaines tels que : géophysique, ingénierie de réservoir, géomécanique, pétrophysique, hydrochimie, économie, écologie, hydrogéologie, relations avec les communautés, loi et réglementation », dans le contexte d'une évaluation plus large que les seuls aspects de sécurité, répétons-le. À titre d'exemple, pour l'analyse des risques liés au projet *Latrobe Valley* (Hooper *et al.*, 2005), le groupe se composait de 10 membres :

- 2 spécialistes d'analyse de risque ;
- 2 géologues / géophysiciens ;
- 1 spécialiste des couvertures ;
- 1 hydrogéologue ;
- 1 géomécanicien ;
- 2 géochimistes ;
- 1 ingénieur réservoir.

Au premier abord, il peut être reproché à l'encontre d'une telle composition de ne se consacrer qu'au sous-sol et de négliger la connaissance de la surface. En termes de nombre, ce panel correspond aux préconisations de l'INERIS (*cf.* §3.3.4).

Comme nous l'avons décrit au paragraphe 2.1, l'identification des risques repose sur la sélection, par le panel d'experts, des événements plausibles au sein d'une liste d'événements de risques élaborée au préalable. Une approche de type « arbre



d'événements » est ensuite adoptée pour détecter les cibles susceptibles d'être affectées par le risque, et les types d'impacts correspondants. Ainsi que nous l'avons mentionné, il ne s'agit pas réellement d'une construction de scénarios : en effet, les combinaisons de plusieurs événements ne sont pas envisagées. L'approche de séquences accidentelles mise en avant dans l'analyse de risques industriels est ici incomplète : si le panel d'experts tente de déterminer l'ensemble des cibles touchées par un phénomène, il n'examine pas les enchaînements de causes, seulement les événements pris un à un. En réalité, pour reprendre le déroulement de l'analyse des risques préliminaire (cf. §3.2.2), cette démarche permet de recenser les événements redoutés centraux, ainsi que les conséquences sur les cibles finales. Elle n'essaye pas de déterminer l'ensemble des causes, et n'intègre pas l'équivalent des « effets dominos ».

Néanmoins, cette utilisation afin d'identifier les événements redoutés constitue déjà un apport important, puisqu'il s'agit là de la première pierre de la construction de scénarios de risques. Rappelons de plus que l'approche GEODISC nous a paru intéressante par sa simplicité ; il ne semble pas illogique qu'en contrepartie elle demeure incomplète pour notre usage.

En définitive, ce que nous retenons dans cette méthode est l'examen par un groupe d'experts pluridisciplinaire :

- d'une liste préétablie d'événements de risque ;
- de listes de cibles et de types d'impacts potentiels.

Le premier travail que nous devons accomplir consiste à dresser des listes génériques équivalentes ; nous chercherons pour cela à adapter celles fournies par le projet GEODISC. Cela renvoie à la nécessité, mentionnée dans le bilan du chapitre 3, de recenser les potentiels de dangers, les agresseurs externes et les cibles.

De telles listes nous permettront de constituer ce que nous pouvons appeler des « scénarios simples », c'est-à-dire faisant simplement le lien entre un événement redouté plausible et les conséquences qu'il peut engendrer directement sur les enjeux étudiés. Par la suite, nous devons nous interroger sur la méthode à adopter pour combiner les événements afin d'identifier de réelles séquences accidentelles, que nous pouvons désigner par « scénarios complexes ». La question se posera toutefois de savoir si cette étape supplémentaire se montre adaptée aux objectifs du projet CRISCO2 : la démarche recherchée se voulant simple, celui-ci pourrait se contenter de l'examen des scénarios simples, si cela conduit à l'établissement de critères de sécurité prudents, quoique raisonnables.

En tout état de cause, il nous semble que la démarche proposée par GEODISC constitue une base de travail intéressante, comportant un certain nombre d'aspects cohérents avec les conclusions tirées de la comparaison avec les analyses de risque industriel. L'adaptation de cette approche aux objectifs et aux besoins du projet CRISCO2 ainsi que le développement, sur ces fondations, d'une méthode de construction de scénarios appropriée constituent le sujet de la suite du présent chapitre.

## 5.3. PROCESSUS D'ADAPTATION DE LA METHODE

### 5.3.1. Déroulement

Conformément aux commentaires ci-dessus, nos travaux se sont basés sur les listes proposées par le projet GEODISC. Nos objectifs consistaient à :

- reprendre et modifier ces listes pour élaborer nos listes génériques ;
- examiner comment un groupe d'experts pouvaient les utiliser en atelier.

Il est apparu, au préalable, que les événements de risque pouvaient varier selon les différents modes de stockage : aquifère, gisement déplété, stockage en veine de charbon... L'injection en aquifère profond représente l'option fournissant les plus grandes capacités et la meilleure répartition sur le globe. Elle constitue dans le contexte français la seule perspective vraisemblable pour répondre aux besoins de stockage. Il nous a par conséquent semblé naturel de privilégier cette option.

Pour tester l'usage des listes, il était nécessaire de considérer un cas d'application. Nous nous sommes appuyés pour cela sur les travaux réalisés dans le cadre du projet ANR PICOREF : nous avons envisagé l'injection de CO<sub>2</sub> dans le sud-est du Bassin de Paris, dans l'aquifère du Dogger (pour plus d'informations, voir par exemple Brosse *et al.*, 2007 ou Grataloup *et al.*, 2008).

Ces tâches ont surtout été accomplies au cours de deux ateliers. Le premier, interne au BRGM, s'est tenu le 10 septembre 2007. Il rassemblait 12 personnes issues de quatre services différents, afin de bénéficier d'une pluralité de compétences, plus un animateur. Le détail des participants est fourni à l'annexe 2. Cet atelier s'est consacré avant tout à la reprise des listes australiennes d'événements, d'une part, de cibles et d'impacts, d'autre part : modifications des intitulés et des descriptions précises, compléments, synthèse.

Le groupe réuni a tenu lieu de panel d'experts pour expérimenter l'utilisation de ces listes génériques au regard des conditions du site choisi pour l'étude. Une interface logicielle avait auparavant été développée sous Microsoft Access<sup>®</sup>, afin de faciliter la visualisation et d'automatiser par la suite l'exploitation des travaux. La tâche du groupe d'experts était restreinte : pour chaque événement de risque de la liste, il devait indiquer s'il est susceptible d'intervenir au cours de l'évolution du stockage, dans le contexte d'étude ; pour chaque événement jugé pertinent, le panel devait ensuite parcourir la liste d'impacts, et indiquer lesquels pouvaient être engendrés par l'événement. Le traitement restait donc exclusivement qualitatif, au lieu de fournir des estimations pour la probabilité d'occurrence et les conséquences, comme proposé par l'approche GEODISC. Notons que l'échelle de temps retenue pour l'analyse était de 1000 ans. Le panel était invité, pour les événements jugés pertinents, à proposer un ordre de grandeur de la durée de son occurrence, afin de fournir des éléments d'appréciation de cinétique.

Faute de temps, l'exercice n'a pu être réellement mené que sur un seul événement (une fuite par des zones perméables dans la couverture). Il a néanmoins soulevé un

certain nombre de commentaires et suggestions. Le groupe a ainsi souligné qu'il était peu probable qu'un événement seul provoque une fuite depuis le réservoir jusqu'en surface ; en revanche, l'enchaînement d'événements intervenant à différents niveaux pourrait conduire à des conséquences, en surface. Cette remarque met ainsi l'accent sur la nécessité de considérer des séquences accidentelles, et non simplement des événements isolés. En conséquence, il est apparu également souhaitable de pouvoir indiquer parmi les impacts lesquels peuvent se produire directement du fait de l'événement, indirectement, ou ceux qui sont exclus. Par ailleurs, au lieu d'une simple indication de la plausibilité des différents événements, le panel a émis le souhait qu'une gradation puisse être produite entre les événements, voire entre les couples événement – impact. Le groupe a cependant constaté que le nombre de scénarios de risque obtenus en considérant des combinaisons d'événements demeurerait relativement élevé ; pour faire face à cette préoccupation, il a été suggéré d'identifier les combinaisons en partant des cibles, et non des événements redoutés : il s'agirait de déterminer l'intensité des phénomènes nécessaire pour affecter un enjeu, puis l'événement capable de la produire, la cause qui peut le provoquer, et remonter ainsi la chaîne des causes jusqu'à l'origine. Cela permettrait d'élaguer d'emblée les scénarios qui ne peuvent mener à une atteinte des cibles. Les inconvénients tiennent en revanche aux faits :

- qu'il faudrait disposer a priori d'éléments de quantification de l'intensité des phénomènes ;
- que cette démarche suppose la vulnérabilité des enjeux connue, alors qu'elle ne peut pas l'être sur le long terme (cf. § 3.3.1).

Dernière proposition issue de cet atelier, il a été suggéré qu'un panel d'expert devrait inclure des regards extérieurs aux activités relatives au stockage de CO<sub>2</sub>.

Le second atelier, organisé le 8 janvier 2008, impliquait le BRGM, le Centre de Géosciences d'Armines, TOTAL et le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Il réunissait cette fois 26 personnes, répertoriées à l'annexe 3, en plus de l'animateur. Ce nombre important s'explique par le fait que l'atelier devait déboucher sur le choix des scénarios à modéliser dans le cadre de CRISCO2. Il a ainsi tenu lieu en quelque sorte de réunion de lancement de la tâche 2.5 dédiée à la modélisation, et tous les intervenants potentiels dans cette tâche avaient été conviés. Cette composition du groupe de travail ne tenait pas compte des préconisations sur le panel d'experts, ce qui s'avère a posteriori regrettable.

L'objectif premier de cette session était l'application, au cas du Bassin de Paris, des listes obtenues à l'issue du précédent atelier. Il est toutefois apparu, au cours de l'exercice, des besoins de modifications de ces listes, restées mineures. L'évolution notable a consisté en une réorganisation des 11 événements de risque en 5 familles. L'interface graphique avait été mise à jour pour tenir compte de certaines conclusions de l'atelier de septembre. Ainsi, le panel ne devait plus se prononcer simplement sur la pertinence d'un événement pour l'analyse des risques, il devait définir s'il était prioritaire, secondaire ou négligeable dans l'étude. Ceci voulait répondre à la volonté de hiérarchisation des événements. De manière similaire, l'animateur demandait aux experts d'indiquer pour chaque type d'impacts s'il était susceptible d'être une

conséquence directe de l'événement considéré, une conséquence indirecte, s'il était négligeable, voire absolument pas lié à l'événement.

Le travail de sélection des événements a été intégralement effectué. Celui d'identification des impacts correspondants n'a été conduit que pour deux événements (fuite par des failles, dépassement de l'extension latérale prévue). Sur le plan de la méthode, les conclusions furent les suivantes. La qualification de « prioritaire – secondaire » a été remise en question, la discrimination nécessitant une définition et des critères plus précis. Il est apparu qu'en réalité, la distinction majeure entre les différents événements tient à la possibilité d'intervenir pour corriger le problème (ingénierie du stockage) ou non (système naturel). De même, la caractérisation des impacts directs ou indirects ne s'est pas révélée particulièrement judicieuse : pour l'événement de dépassement de l'extension latérale, la quasi-totalité des impacts a été jugée possible de manière indirecte. Il semble par conséquent qu'il faille s'en tenir aux conséquences directes des événements considérés, dans cette phase d'analyse de groupe. La question des impacts indirects renvoie alors au problème de séquence accidentelle et à la construction de scénarios complexes, qui aurait lieu à un stade ultérieur. Enfin, le groupe d'experts a estimé que le travail d'identification des impacts devrait plutôt travailler sur les cibles, pour rentrer dans le détail des types d'impacts seulement dans une étape ultérieure, lorsque des modèles ont été établis pour représenter les phénomènes et disposer de données quantitatives.

### **5.3.2. Synthèse et critique**

Les deux ateliers se sont donc heurtés à la difficulté de la prise en compte des séquences accidentelles, sans finalement y apporter de réponse. Les modifications introduites dans le processus d'examen des listes pour tenir compte des commentaires exprimés lors du premier atelier ne se sont pas révélées probantes : en particulier, la tentative de hiérarchisation des événements n'a pas paru présenter d'intérêt évident, du moins telle qu'elle était proposée.

Nous déplorons par ailleurs maintenant la façon dont nous avons programmé la seconde réunion : plutôt qu'un atelier rassemblant autant de participants, il aurait été plus enrichissant de réaliser une série de 3 ou 4 ateliers en effectif plus réduit reprenant le même exercice. Ainsi, outre une conduite plus aisée, cela aurait fourni plusieurs essais d'application du même processus, permettant de l'améliorer d'une fois sur l'autre. Le panel aurait, de plus, compté à chaque fois un nombre d'experts cohérent avec ce qui est attendu pour notre méthodologie finale, d'après les recherches menées dans les tâches précédentes. Cela aurait enfin évité le déséquilibre de composition du groupe entre le BRGM et les autres partenaires, ressenti lors de l'exercice. Nous n'avons malheureusement pas réussi, pour des raisons de calendrier essentiellement, à mieux nous organiser.

Enfin, appliquer la démarche telle qu'elle a été mise au point sur un autre cas d'étude enrichirait ce processus d'adaptation : cela atténuerait les craintes que les outils comportent des omissions, du fait d'un développement centré autour d'un exemple. Le caractère générique de notre méthodologie se verrait ainsi confirmé et renforcé.

## 5.4. RESULTAT : APPROCHE PRECONISEE

Le processus, décrit ci-dessus, d'appropriation de la démarche GEODISC et d'intégration des leçons des analyses de risque industriel pour construire une méthodologie propre au projet CRISCO2 a abouti à des outils :

- Une liste générique d'événements de risque ;
- Une typologie des cibles et des impacts correspondant ;
- Une interface sous Microsoft Access<sup>®</sup> pour l'animation d'un atelier d'experts.

Nous présentons dans un premier temps ces supports à l'identification de scénarios de risque, puis l'usage que nous en préconisons.

### 5.4.1. Outils

#### a) *Liste d'événements de risques*

La liste à laquelle nous sommes parvenus compte 11 items, répartis en 5 catégories. Cette classification vise en particulier à distinguer les événements liés au site naturel de ceux, plus aisément maîtrisables, qui relèvent de la gestion opérationnelle.

#### **A. Événements liés à la conception et la conduite des opérations**

##### 1. Fuite par un puits en exploitation

Remontée de CO<sub>2</sub> du fait de défauts ou de la dégradation à long terme du cuvelage ou du scellement des puits opérationnels (injection, production [EHR], observation). Leur analyse et abandon soigneux réduisent les risques à long terme.

##### 2. Surpressurisation locale au niveau du puits d'injection

Développement de fractures à proximité immédiate du puits en réponse à l'injection de CO<sub>2</sub>, résultant en événements microsismiques et possibilités de fuite.

#### **B. Événements liés au dimensionnement des opérations par rapport à la réponse du système géologique**

##### 3. Surpressurisation du réservoir à l'échelle régionale

Possibilité de réactivation de failles ou de fracturation induite liées à la surpression engendrée par l'injection de CO<sub>2</sub>, permettant la remontée de CO<sub>2</sub> et causes d'événements sismiques, de subsidence ou de surrection.

##### 4. Dépassement de l'extension latérale prévue

Migration non-conforme aux prévisions, soumettant au CO<sub>2</sub> des voies de fuite non envisagées en surface ou en profondeur : affleurements, failles,...

### **C. Evénements liés à la caractérisation du site**

#### 5. Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture

Absence locale de couverture (discontinuité), ou présence de zones où la perméabilité est plus grande qu'anticipé ou bien est augmentée du fait des réactions chimiques engendrées par l'injection de CO<sub>2</sub>, offrant une voie de fuite par advection.

#### 6. Fuite par des failles existantes

Remontée de CO<sub>2</sub> à travers une faille préexistante, inconnue, ou bien détectée lors de la caractérisation du site, au cas où la migration de la bulle ne serait pas conforme aux prévisions.

#### 7. Fuite par un puits abandonné

Remontée de CO<sub>2</sub> par des puits mal scellés, ou dégradés au contact du CO<sub>2</sub>. A la différence des puits en exploitation, les puits abandonnés ne peuvent pas forcément faire l'objet de mesures de correction. Ils peuvent parfois même être méconnus.

### **D. Evénements liés à la possibilité d'occurrence d'effets secondaires**

#### 8. Formation d'un stockage secondaire plus proche de la surface suite à une migration verticale non attendue

Accumulation, suite à un premier événement de fuite depuis le réservoir, de CO<sub>2</sub> dans un piège proche de la surface, susceptible d'engendrer des phénomènes de fuite (dégazage) brutaux.

#### 9. Modification des écoulements verticaux (drainance) suite aux changements des champs de pression

Modification des écoulements entre les couches en réponse à l'augmentation de pression dans le réservoir, pouvant notamment conduire au déplacement de saumure vers des aquifères utilisés pour l'eau potable.

### **E. Evénements liés à la vulnérabilité du complexe de stockage à des agressions externes**

#### 10. Forage ultérieur

Soit perforant la zone d'extension du CO<sub>2</sub>, soit modifiant les conditions d'écoulement et donc l'évolution du CO<sub>2</sub>.

#### 11. Fracturation induite par un séisme naturel

Vulnérabilité du réservoir à un séisme : fracturation ou réactivation de faille par un séisme d'origine naturelle, offrant une voie de fuite pour le CO<sub>2</sub> ; perte de confinement d'un puits sous l'effet du cisaillement.

**b) Listes d'enjeux et d'impacts**

D'après les enseignements issus du second atelier d'application, la liste des éléments vulnérables paraît plus importante que celle des impacts, dont le niveau de détail semble réservé à un second temps de l'application.

La liste des enjeux humains et environnementaux recense 9 types de cibles, figurés à l'illustration 14 ; elle se décline en 15 modes d'impact (illustration 15).

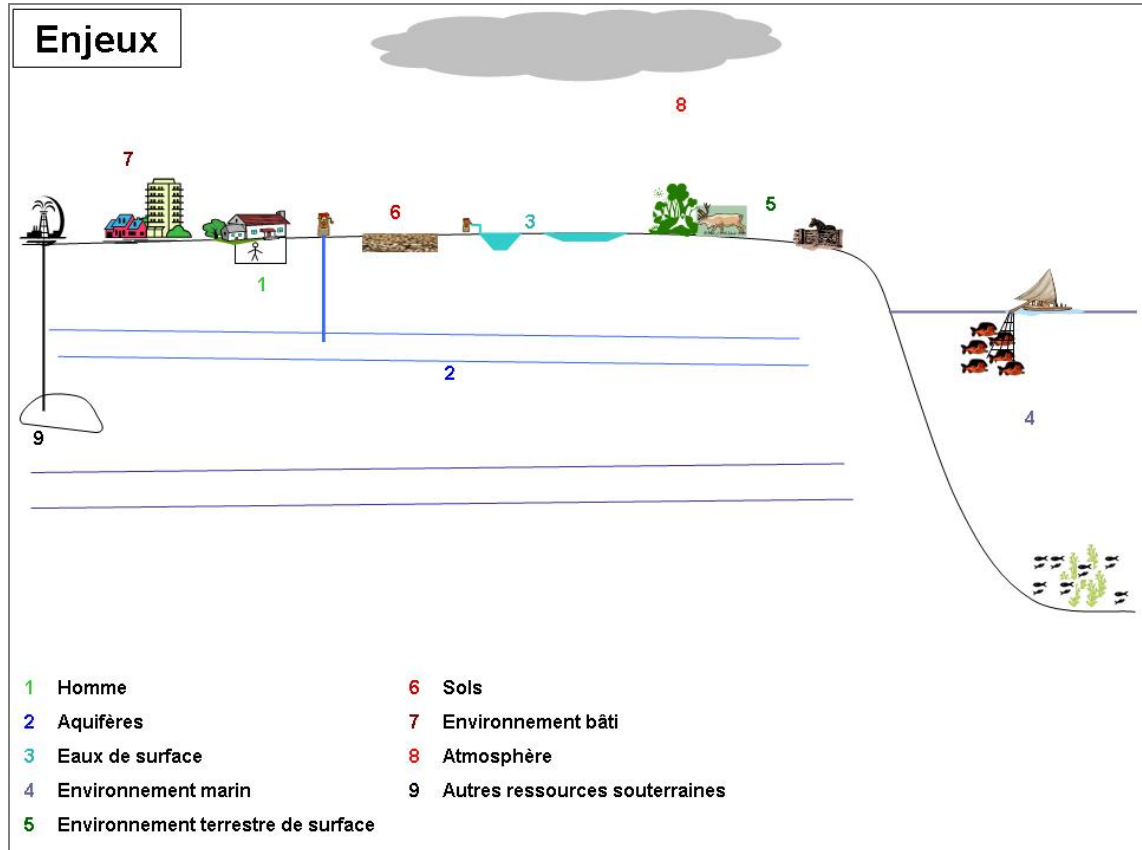


Illustration 14 - Eléments vulnérables aux risques liés au stockage géologique de CO<sub>2</sub>

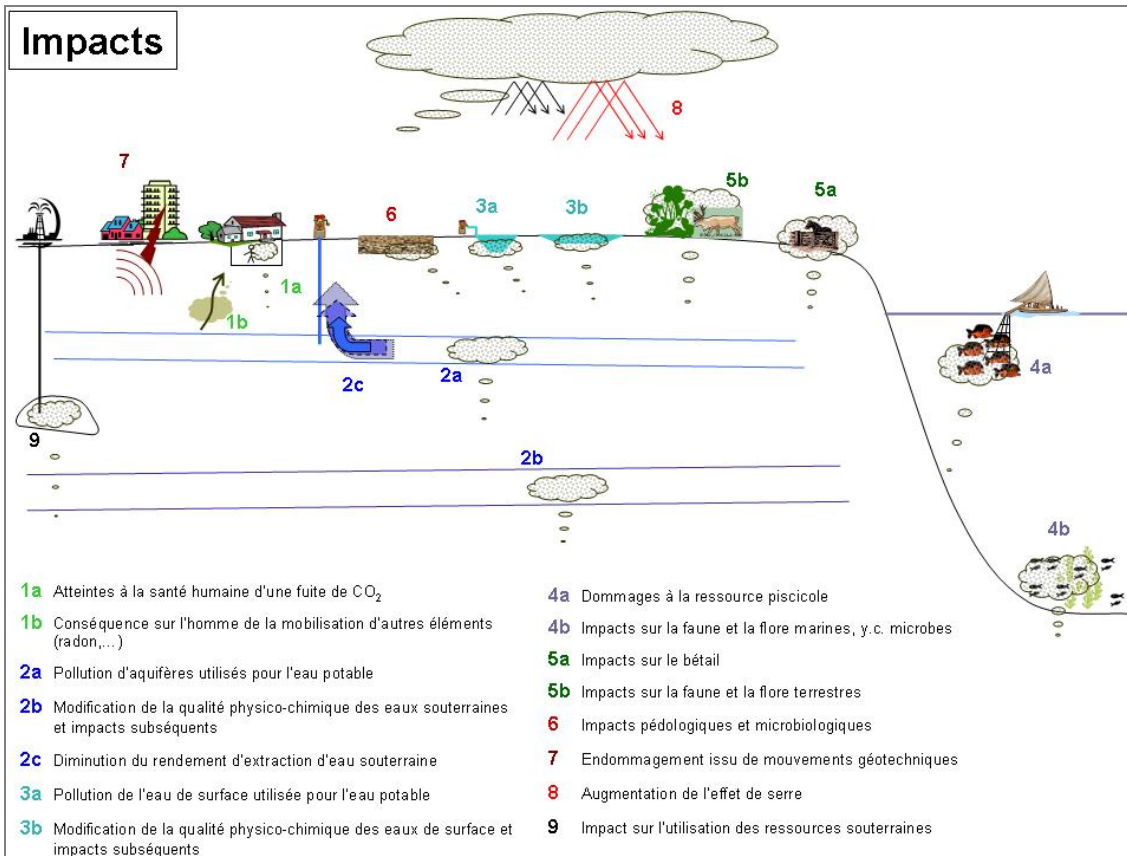


Illustration 15 - Types d'impacts potentiels des phénomènes dangereux liés au stockage géologique de CO<sub>2</sub> sur les éléments vulnérables

### c) Interface MS Access®

L'interface graphique proposée comme outil à l'atelier d'experts se présente sous la forme d'une base de données Microsoft Access®, avec navigation par boutons entre les différents formulaires. Au lancement de la base de données, s'affiche une page d'accueil, dont l'aperçu figure à l'illustration 16<sup>8</sup>.

Cette page permet de créer un formulaire par application de l'exercice d'analyse. Pour cela, le bouton **Evaluer un nouveau projet** affiche une page où indiquer le nom du projet, la date de réalisation de l'exercice, ainsi que d'éventuels commentaires.

<sup>8</sup> A la date de publication du présent rapport, l'interface en est à sa version 4 ; son développement sera poursuivi au cours du projet. Des modifications pourront donc intervenir ultérieurement par rapport à la description relatée ici, qui concerne cette version 4.



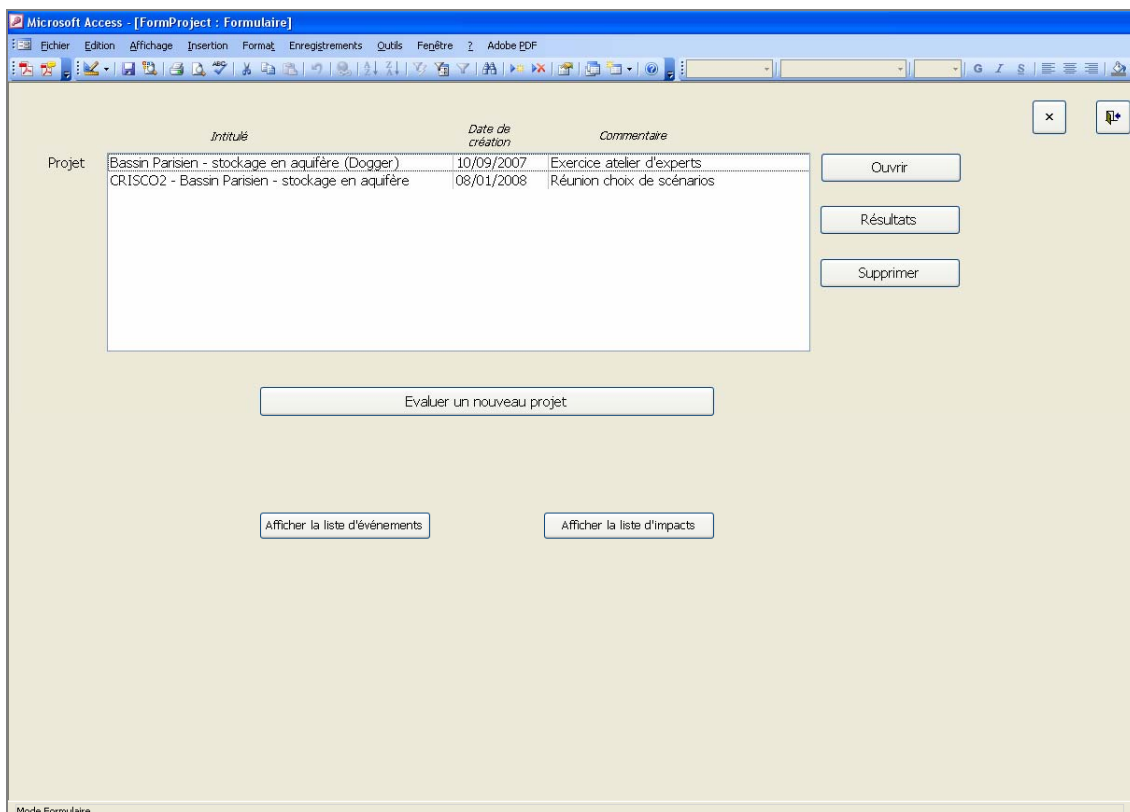


Illustration 16 - Aperçu de la page d'accueil de l'interface MS Access® développée

Après sélection d'un projet dans le menu affiché, le bouton **Ouvrir** édite la page principale d'évaluation. Celle-ci, représentée à l'illustration 17, reprend le nom du projet et montre les événements de la liste de risques un à un, avec pour chacun la liste des impacts, répartis par type de cible. Des champs sont à remplir pour chaque événement, afin d'indiquer, en résultat du travail de groupe, la pertinence dans le contexte étudié et éventuellement la durée d'occurrence, tout en les assortissant de commentaires pour documenter les choix. De même, des cases exposent, pour chaque type d'impact, si le panel d'experts a estimé qu'il pouvait être conséquence de l'événement en question, et les motifs de ce jugement. La navigation entre les pages de chaque événement utilise les boutons de défilement d'enregistrements.

Sur la page d'accueil, le bouton **Résultats** permet de visualiser (sans modifications possibles) les résultats relatifs à l'évaluation de la pertinence de l'événement.

Le bouton **Supprimer** efface toutes les données relatives au projet sélectionné.

Enfin, les boutons **Afficher la liste d'impacts** et **Afficher la liste d'événements** provoquent l'édition, pour consultation et/ou modification, des pages présentant respectivement la liste d'enjeux, détaillée en types d'impacts, et la liste d'événements de risque. Cette dernière (illustration 18), organisée par catégorie d'événements, propose, outre l'intitulé des événements, des champs permettant leur description ainsi

qu'une réflexion sur les critères de sécurité qui peuvent y être associés. Ces champs additionnels ont vocation à être enrichis au fil des applications et de l'évolution du projet CRISCO2.

Ces pages de présentation des listes peuvent également être accédées à partir de l'écran d'évaluation, par l'intermédiaire respectivement des boutons **Ajouter des conséquences** et **Ajouter des événements**.

Microsoft Access [FormMain : Formulaire]  
 Eichier Edition Affichage Insertion Format Enregistrements Outils Fenêtre ? Adobe PDF  
 Tahona 10

Projet: **CRISCO2 - Bassin Parisien - stockage en aquifère**

Événement de risque: **Fuite par des failles existantes**

Description: Remontée de CO<sub>2</sub> à travers une faille préexistante, inconnue, ou bien détectée lors de la caractérisation du site, au cas où la migration de la bulle ne serait pas conforme aux prévisions.

Occurrence: **Envisageable** / Négligeable    Commentaire: Présence de failles à proximité. On ne connaît pas leurs propriétés.    Durée d'occurrence:

Conséquences:

Enjeu:	Type d'impact:	Conséquence	Commentaire:
Homme	Atteinte à la santé humaine d'une fuite de CO <sub>2</sub>	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Certaines failles sont visibles en surface. Il faut déterminer si elles arrivent à des zones peuplées
Homme	Conséquence sur l'homme de la mobilisation d'autres éléments gazeux (radon...)	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Sauf s'il y a des impuretés. Pas de radon dans la région
Aquifères	Pollution d'aquifères utilisés pour l'eau potable	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Des failles traversent toute la pile
Aquifères	Modification de la qualité physico-chimique des eaux souterraines et impacts subséquents	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Des failles traversent toute la pile
Aquifères	Diminution du rendement d'extraction d'eau souterraine	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	La fuite peut obliger à diminuer le débit d'extraction pour ne pas produire du CO <sub>2</sub>
Eaux de surface	Pollution de l'eau de surface utilisée pour l'eau potable	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Certaines failles sont visibles en surface. Il faudrait voir si elles recoupent les cours d'eau ou des zones de karst
Eaux de surface	Modification de la qualité physico-chimique des eaux de surface et impacts subséquents	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Certaines failles sont visibles en surface. Il faudrait voir si elles recoupent les cours d'eau ou des zones de karst
Environnement marin	Dommages à la ressource piscicole	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Pas situé en milieu marin
Environnement marin	Impacts sur la faune et la flore marines, y.c. microbes	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Pas situé en milieu marin
Environnement terrestre de surface	Impacts sur le bétail	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Certaines failles sont visibles en surface
Environnement terrestre de surface	Impacts sur la faune et la flore terrestres	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Certaines failles sont visibles en surface
Sols	Impacts pédologiques et microbiologiques	0 <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> N	Certaines failles sont visibles en surface

Enr : 6 sur 11  
 Mode Formulaire    FILT

Illustration 17 - Aperçu de la page de traitement des événements de risque

Microsoft Access - [FormRiskEvents : Formulaire]

Événements liés au dimensionnement des opérations par rapport à la réponse du système géologique

Événement	<input type="checkbox"/> 3	<b>Surpressurisation du réservoir à l'échelle régionale</b>	Ancien numéro : 5
Description	Possibilité de réactivation de failles ou de fracturation induite liées à la surpression engendrée par l'injection de CO <sub>2</sub> , permettant la remontée de CO <sub>2</sub> et causes d'événements sismiques, de subsidence ou de surrection.		Phénomène(s) dangereux associé
			Sismicité induite, subsidence, surrection ; fuite de CO <sub>2</sub> ; fuite d'espèces toxiques conjuguées.
Exemple de forme de critère	Exigence envers l'opérateur		
Exemple de forme de critère	L'opérateur devra montrer que la pression engendrée dans le réservoir par l'injection de CO <sub>2</sub> reste inférieure aux seuils conduisant à la fracturation de la couverture, à l'entrée du CO <sub>2</sub> dans celle-ci ou à des mouvements du sol significatifs en surface.		
Commentaire			
Événement	<input type="checkbox"/> 4	<b>Dépassement de l'extension latérale prévue</b>	Ancien numéro : 7
Description	Migration non-conforme aux prévisions, soumettant au CO <sub>2</sub> des voies de fuite non envisagées en surface ou en profondeur : affleurements, failles,...		Phénomène(s) dangereux associé
			Fuite de CO <sub>2</sub> ; fuite d'espèces toxiques conjuguées.
Exemple de forme de critère	Exigence envers l'opérateur		
Exemple de forme de critère	L'opérateur devra justifier son modèle d'extension du panache de CO <sub>2</sub> , et envisager dans son analyse de risques des comportements déviant des prévisions, examinant les nouveaux scénarios de risque potentiels.		
Commentaire			
Événement	<input type="checkbox"/>		Ancien numéro : éero
Description			Phénomène(s) dangereux associé
Exemple de forme de critère	Exigence envers l'opérateur		

Enr : 14 sur 5

Mode formulaire

Illustration 18 - Aperçu de la liste descriptive des événements de risque

#### 5.4.2. Mode d'utilisation

L'adaptation de la démarche GEODISC au cours de nos ateliers n'a pas résolu la question de l'enchaînement des événements. Ainsi, la construction de séquences accidentelles pour déterminer les scénarios de risque paraît particulièrement ardue. Nos travaux ont en revanche stabilisé le mode d'identification des phénomènes et conséquences à prendre en considération, un à un, dans l'étude. Dans le cadre du projet CRISCO<sub>2</sub>, nous cherchons une méthode simple d'élaboration et d'exploitation de scénarios de risque. Dans la mesure où une méthode générale d'identification des combinaisons d'événements nous semble difficile à établir, nous privilégions une approche gardant un certain pragmatisme. Il s'agit d'identifier dans un premier temps des « scénarios simples », c'est-à-dire de considérer uniquement les événements potentiels et leurs conséquences directes plausibles sur les enjeux. Dans un second temps, les événements retenus feraient l'objet de modèles afin de caractériser leur intensité. Le traitement de ces scénarios simples consisterait à comparer cette quantification à des seuils d'effets dépendant des cibles considérées. Ces modèles fourniraient des éléments de quantification des différents phénomènes, qui permettraient d'exclure ceux sans conséquences significatives sur les éléments vulnérables. La prise en compte de combinaisons d'événements dans des scénarios complexes pourrait n'intervenir qu'après cette première tâche de modélisation : le premier élagage réalisé grâce aux calculs ainsi que les éléments de quantification que ceux-ci auront rendu disponibles simplifieront la tâche, en diminuant le nombre de

combinaisons envisageables. Ce travail de construction de séquences accidentelles demeure cependant, en l'état d'avancement de notre projet, prospectif ; il devrait être testé en temps voulu, *i.e.* à l'issue des modélisations simples, pour être précisé et validé.

### **a) Détermination de scénarios simples**

L'identification des événements à prendre en compte doit résulter de la réunion d'un groupe pluridisciplinaire d'experts, conformément aux préconisations de l'analyse des risques préliminaire, pour le risque industriel (*cf.* § 3.3.6). Le nombre de 7 à 10 participants au total paraît pertinent pour trouver un bon compromis entre réunion de compétences variées et réussite de l'animation de l'atelier. A titre indicatif, voici une proposition de composition du panel chargé de cette tâche :

1. Un animateur, spécialiste de l'analyse de risques ;
2. Un représentant de l'industriel, concepteur du projet de stockage ;
3. Un géologue ;
4. Un hydrogéologue ;
5. Un ingénieur réservoir ;
6. Un géomécanicien ;
7. Un géochimiste ;
8. Un environnementaliste ;
9. Un représentant de la population (élu local, représentant d'une organisation non gouvernementale ou d'une association locale).

D'autres compétences appréciables peuvent être recherchées auprès d'un géophysicien, d'un géographe, d'un géostatisticien ou encore d'un spécialiste des opérations de forage. Cette liste ne se prétend bien évidemment pas exhaustive.

Nous avons souligné, en conclusion de la comparaison avec l'analyse de risques industriels, et repris au §5.2, la nécessité de dresser, en préalable à l'identification des événements de risque, la liste :

- des potentiels de dangers présents sur les installations ;
- des cibles potentielles ;
- des agresseurs externes.

Pour la partie souterraine d'un stockage géologique de CO<sub>2</sub>, ce travail peut être effectué de manière générique. La première partie de l'atelier d'experts consisterait à reprendre et vérifier ces éléments génériques en les déclinant ou précisant, si besoin, selon les spécificités du site étudié et du protocole d'injection.

Ainsi, les potentiels de dangers présents pour un stockage géologique de CO<sub>2</sub> sont, en toute généralité :

- le dioxyde de carbone lui-même, présentant des effets toxiques ;
- les espèces associées dans le flux injecté provenant du processus de captage, ou mobilisées dans le sous-sol, et possédant des propriétés toxiques ;
- la pression dans le réservoir, source potentielle de désordres géomécaniques.

Les cibles potentielles sont recensées dans la liste de l'illustration 14. Enfin, les agresseurs externes jugés pertinents ont été inclus dans la catégorie E de la liste des événements de risque (§5.4.1.a) : pour les agressions humaines, il s'agit d'un forage ultérieur, délibéré ou non ; parmi les phénomènes naturels, seule l'activité sismique a été retenue.

Un atelier d'experts, utilisant les divers outils génériques présentés jusqu'ici, débutera par un rappel par l'animateur du contexte de l'analyse, du site et du protocole d'injection prévu, des échelles de temps et d'espace de référence. Puis le panel reverra et précisera, dans le contexte de l'étude de cas, les listes de potentiels de dangers et de cibles. Ensuite, à l'aide de l'interface graphique, manipulée par l'animateur (ou par un secrétaire n'ayant d'autre rôle), le groupe passera en revue la liste d'événements de risque. Pour chaque événement :

- il jugera s'il doit être inclus dans l'analyse ou non, suivant qu'il peut être envisagé dans les conditions du cas étudié ou non. S'il est considéré, indiquer une échelle de durée d'occurrence semble utile ;
- il examinera la liste de cibles et déterminerait celles susceptibles d'être directement impactées. Cette analyse devra intégrer les changements possibles, avec le temps, de la vulnérabilité du milieu. A ce stade de l'étude, il peut être suffisant de raisonner sur les cibles uniquement, sans rentrer dans le détail des types d'impacts par cible. L'interface permet d'aller à ce niveau de détail, mais le groupe d'experts pourra préférer se contenter d'indiquer les cibles potentielles, et en venir aux effets dans une phase ultérieure, une fois les événements caractérisés en termes d'intensité.

Notons que les risques liés à la toxicité de co-contaminants se manifestent par les mêmes événements que ceux engendrés par le CO<sub>2</sub> : il s'agit de fuites de CO<sub>2</sub>, impur ou mobilisant des impuretés, susceptibles d'avoir des conséquences plus graves que celles dues au seul CO<sub>2</sub> du fait des seuils de toxicité très bas de certaines espèces. Par conséquent, nous jugeons qu'une seule analyse des événements suffit : les mêmes scénarios sont construits pour les deux types de dangers ; la distinction entre les différentes natures d'effets toxiques interviendra seulement lors de l'exploitation de ces scénarios.

Au vu des commentaires issus de notre second atelier, nous préférons abandonner les idées de hiérarchisation des événements, d'une part, et des impacts, d'autre part. Ce choix est censé rendre plus simple et plus rapide le protocole de décision. Si certains événements paraissent moins probable que d'autres, donc moins prioritaires dans l'analyse, ceci pourra être indiqué dans les commentaires, mais la pertinence d'inclure un événement sera évaluée de façon binaire (occurrence à envisager ou négligeable). Concernant les conséquences, nous proposons une appréciation binaire également, les conséquences indirectes étant prises en compte ultérieurement par la combinaison

de scénarios. Là encore, les commentaires peuvent éventuellement mentionner le fait qu'une cible est concernée indirectement par un phénomène.

De manière générale, l'un des atouts de la méthode GEODISC était d'enregistrer les justifications des choix réalisés. Il demeure pour nous essentiel de bien documenter les résultats de l'atelier en inscrivant les éléments jugés importants par les experts et les raisons de leurs conclusions. L'interface le permet dans les cases de commentaire ; si besoin, des documents complémentaires peuvent être annexés, sous forme électronique ou imprimée, à cette base de données.

Les risques à court terme et à long terme ne sont pas identiques. L'analyse doit tenir compte de ces différences. Pour cela, le groupe d'experts peut indiquer dans ses commentaires les phases du projet correspondant aux événements sélectionnés. Alternativement, il peut préférer réaliser une analyse complète, telle que décrite précédemment, pour chacune des phases envisagées : injection, fermeture, post-fermeture.

Une fois les événements de risque pertinents identifiés par les experts ainsi que les cibles correspondantes, nous proposons de passer à l'étape de caractérisation en intensité des scénarios. Celle-ci s'appuiera sur les modèles simplifiés développés dans la tâche 2.5 de CRISCO2. Ainsi que mentionné en conclusion du chapitre 3, nous adoptons une approche déterministe. En supposant l'occurrence d'un événement, nous chercherons à estimer l'intensité des phénomènes dangereux correspondant, dans l'optique de repérer s'ils dépassent les seuils d'effets, et si oui à évaluer les distances d'effets correspondantes.

Lorsque ces éléments d'évaluation seront disponibles, une nouvelle réunion des experts pourra, au besoin, préciser le travail d'identification des impacts. La constitution de scénarios complexes par la combinaison d'événements pourra alors être envisagée.

## ***b) Scénarios complexes***

En l'attente des résultats des modèles représentant les phénomènes dangereux, la détermination de séquences accidentelles n'a pu être testée. Les éléments ci-dessous correspondent par conséquent davantage à des pistes de réflexion qu'à une méthodologie validée. Il conviendra de les préciser et d'en essayer l'application dans la suite du projet, une fois les modèles représentant les différents événements finalisés.

L'exemple de l'analyse de risques industriels a révélé que la combinaison d'événements dépendait de la décomposition fonctionnelle du système. Face aux difficultés, mentionnées au paragraphe 3.3, pour réaliser une telle décomposition dans le cas du stockage de CO<sub>2</sub>, notre proposition consiste à établir un modèle conceptuel de site découpé en plusieurs types de compartiments :

- les couches réservoirs (réservoir de stockage, aquifères supérieurs) ;
- les couches peu perméables (couvertures principale et secondaires) ;

- les voies de transfert entre les strates perméables (c'est-à-dire les défailances d'étanchéité des couches imperméables) ;
- les éléments vulnérables.

Les risques géotechniques ne posent pas véritablement de problèmes de combinaison, au contraire des séquences d'événements conduisant à des fuites. Le travail doit donc se concentrer sur celles-ci. La décomposition proposée revient à regarder les couvertures comme des barrières de sûreté, remplissant une fonction d'atténuation et de retardement des fuites d'une couche perméable vers la suivante. Le principe que nous suggérons consiste à considérer les différents événements de risque recensés lors de l'établissement des scénarios simples comme les modes de défaillance de ces barrières de sécurité.

De la sorte, déterminer l'enchaînement des événements se ramène à examiner les voies de transfert d'un compartiment réservoir au suivant, jusqu'à l'exposition des cibles. Réaliser une analyse « à rebours » en commençant par un compartiment où sont susceptibles de se trouver des éléments vulnérables, dans le présent ou à l'avenir, et en s'interrogeant sur les voies qui peuvent mener à leur exposition, permet d'éliminer d'emblée les scénarios sans conséquence sur les enjeux. Ce travail peut également s'appuyer sur les caractéristiques des phénomènes dangereux issues des modélisations, pour supprimer les scénarios physiquement irréalistes ou négligeables.

Ce processus d'identification des événements provoquant une fuite d'un compartiment vers le suivant, en partant des zones d'éléments vulnérables et en remontant jusqu'au réservoir de stockage, aboutit à un arbre d'événements, semblable à ce qui se fait en analyse de risques industriels. Dans la mesure où l'on ne cherche pas, ici, à faire une exploitation quantitative en probabilité de cet arbre, nous pouvons privilégier la représentativité à l'exhaustivité : dans notre approche déterministe, un scénario peut être négligé par rapport à un autre s'il provoque le même phénomène avec une intensité moindre. De cette manière, l'arbre peut être significativement simplifié : les résultats des modélisations des phénomènes fournissent un moyen de comparer et d'établir des priorités parmi les scénarios. Nous cherchons finalement à retenir des scénarios enveloppes, représentant des familles de phénomènes de même nature dans les conditions provoquant les effets les plus pénalisants.

A titre d'exemple, imaginons un modèle de site très simple, comportant un aquifère de stockage (A), un aquifère supérieur (B), deux couches imperméables au-dessus de chacun (C, D), et deux puits (1,2) atteignant l'un l'aquifère supérieur, l'autre le réservoir de stockage (illustration 19). Supposons les puits seules voies de fuite possibles à travers les couvertures, et intéressons-nous à une fuite de CO<sub>2</sub> du réservoir jusqu'en surface.

Pour appliquer les principes décrits ci-dessus, nous commençons par recenser les voies de transfert de l'aquifère B vers la surface : il s'agit des 2 puits. Puis nous identifions les voies de fuite du réservoir A vers l'aquifère B : il n'y a que le puits 1. Il existe donc deux combinaisons possibles d'événements conduisant à une fuite en surface :

- Une fuite directe du réservoir vers la surface par le puits 1 (= enchaînement d'une fuite par le puits 1 de A vers B et d'une fuite par le puits 1 de B vers la surface)
- Une fuite par le puits 1 de A vers B, suivie d'une fuite par le puits 2 de B vers la surface.

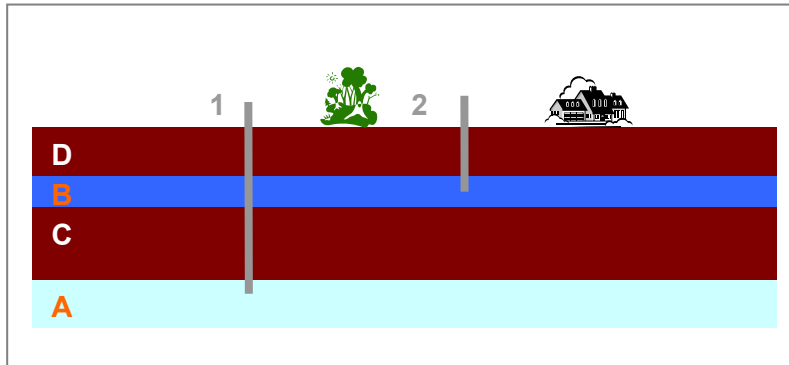


Illustration 19 – Schéma pour l'application de la méthode proposée

Le transport de CO<sub>2</sub> entre les deux puits dans le compartiment B s'accompagnera nécessairement d'atténuations des quantités de CO<sub>2</sub> disponibles pour la fuite. A supposer les deux puits équivalents en perméabilité, la fuite directe sera toujours plus intense que la succession des fuites par les deux puits. En conséquence, pour étudier les effets dans les zones situées à des distances voisines de chacun des deux puits (la forêt sur notre schéma), l'enchaînement des deux fuites peut être négligé par rapport à la fuite directe. En revanche, il doit être pris en compte pour étudier les secteurs proches du puits 2 et éloignés du puits 1 (ici, la ville). Cela signifie que sur l'arbre d'événements correspondant (illustration 20), la branche  $\gamma$  peut être négligée par rapport à la branche  $\alpha$ , pour laquelle les effets sont plus forts, mais la branche  $\delta$  ne peut l'être par rapport à  $\beta$ . Toutefois, dans un souci de minimisation des calculs, il est envisageable d'adopter une attitude pénalisante, en n'effectuant pas de modélisation représentant cette branche  $\delta$ , mais en appliquant les résultats du modèle utilisé pour les branches  $\alpha$  et  $\beta$  et en les transportant simplement à l'endroit du puits 2.

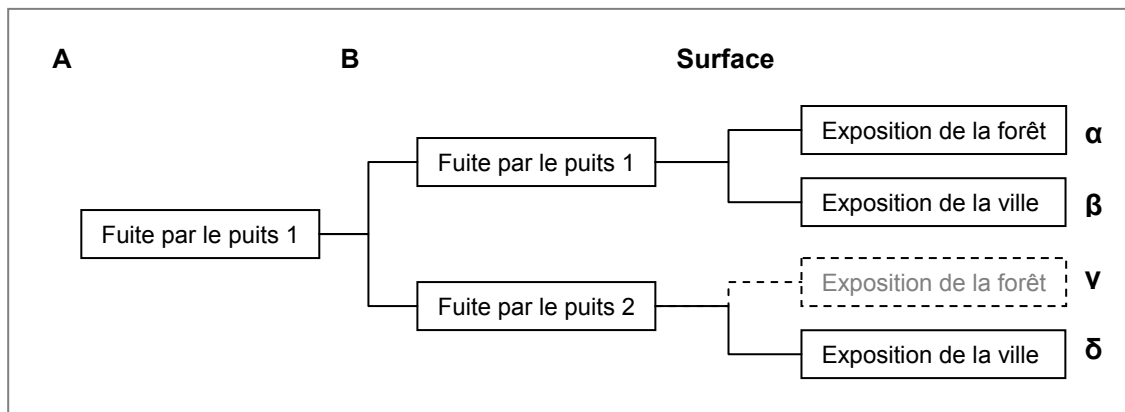


Illustration 20 - Arbre d'événements correspondant à l'exemple de l'illustration 19



L'exemple décrit est délibérément simpliste ; la démarche présentée est elle-même assez fruste. Néanmoins, elle nous semble une manière possible de recenser les combinaisons d'événements dans le cadre de CRISCO2, qui ne vise pas à entrer dans des processus complexes, mais à conserver une démarche relativement simple. Ce souci justifie que l'élaboration de séquences accidentelles attende de disposer d'éléments quantifiés de caractérisation des différents phénomènes, pour réaliser rapidement les simplifications faisables, plutôt que lors de l'atelier préliminaire d'identification des événements. Quoi qu'il en soit, cet exercice devrait lui aussi être accompli lors d'une réunion d'experts, à la lumière des résultats des modèles. L'idéal serait de réunir le même panel que pour la réunion initiale. Le travail pourrait employer le même type de supports que l'analyse des risques industriels, qu'il s'agisse de tableaux comme celui proposé à l'illustration 12, ou d'arbres d'événements. La réalisation de ce second atelier serait étroitement liée au processus et aux résultats du premier ; en particulier, conformément à la position adoptée lors de la première réunion, il pourrait être envisagé de réaliser une analyse distincte pour les différentes phases du projet.

### 5.4.3. Critique

La démarche décrite dans le présent chapitre ne constitue finalement pas véritablement une approche de construction de scénarios de risque : nos efforts ont porté sur les phases aboutissant à l'identification des différentes briques intervenant dans les scénarios, plus qu'à leur combinaison. Il nous semble néanmoins que le défrichage de ces étapes préalables fournit déjà une avancée considérable, et qu'il devait constituer la priorité du projet CRISCO2, compte tenu de ses objectifs. Les phases proposées pour la détermination des enchaînements d'événements demandent à être affinées et appliquées ; néanmoins elles nous paraissent à même de répondre aux attentes de nos travaux. Dans l'ensemble, la méthode développée nous semble correspondre aux exigences de simplicité qui s'imposent au projet. Elle s'appuie largement sur les modélisations représentant les phénomènes dangereux. Nous anticipons ainsi que celles-ci montrent les effets d'un certain nombre d'événements comme négligeables. De tels résultats faciliteraient l'exploitation des scénarios de risque pour la détermination de critères de sécurité ; ils simplifieraient aussi grandement la détermination des séquences accidentelles à prendre en considération. Une telle démarche itérative entre identification des scénarios et calculs peut paraître incomplète en comparaison de méthodes systématiques de construction de scénarios, qui précèdent les modélisations. Mais notre projet vise à identifier les scénarios de risque significatifs, plus qu'un recensement exhaustif ; elle nous semble donc la façon la plus efficace de le faire.

Un complément possible à la méthodologie proposée consisterait à réaliser un audit du processus d'identification des scénarios de risque à l'aide des FEPs (*cf.* chapitre 2). Cet exercice permettrait ainsi de consolider la méthode et de valider les scénarios obtenus, en palliant le manque de systématisme évoqué ci-dessus. Il s'agirait, à l'issue de la détermination des scénarios de risque, de parcourir une base de FEPs en examinant le statut de chacun des items. L'analyse ne devrait pas se restreindre aux scénarios finalement obtenus, mais concerner l'ensemble du processus. Ainsi, l'enregistrement des décisions des experts au cours de l'atelier documente leurs choix.

L'audit viserait à déterminer si les différents FEPs ont été traités, soit par leur inclusion dans les scénarios, soit par une exclusion justifiée au cours de l'analyse, afin de constater les éventuelles omissions. Celles-ci nécessiteraient de s'interroger plus avant sur les items correspondant. Nous n'entrons pas ici dans plus de détails concernant l'audit par les FEPs, dans la mesure où nous ne nous y sommes pas essayés. Soulignons toutefois qu'il alourdirait nécessairement notre démarche. Son atout principal tient à son systématisme. Encore une fois, ceci ne représente pas la priorité de notre projet, de sorte que cette tâche ne nous paraît pas incontournable.

Nos développements méthodologiques se sont appuyés sur l'exemple du stockage dans le Bassin de Paris. De ce fait, il paraît nécessaire de s'interroger sur le caractère général de la démarche auquel ils ont abouti. Nos travaux se sont consacrés avant tout à l'élaboration des outils génériques que sont les listes d'événements, de cibles et d'impacts. Le cas du Bassin de Paris n'a réellement été étudié qu'au cours du second atelier d'experts. Celui-ci n'a pas conduit à des modifications notables de ces listes. De plus, cet exemple a constitué un contexte d'application, plus qu'un ensemble de données très précises. La démarche décrite ci-dessus et les outils qui l'accompagnent nous paraissent donc réellement génériques et pouvoir être appliqués à des sites différents, sans problèmes ni modifications majeures.

Le bémol à apporter à ce commentaire correspond à la remarque effectuée en introduction du paragraphe 5.3 : nos travaux ont été conduits dans l'optique d'un stockage en aquifère, option fournissant les capacités de stockages les plus vastes et les mieux réparties. Il pourrait donc être nécessaire d'adapter les outils développés aux autres formes de stockage, et en particulier aux gisements épuisés d'hydrocarbures. Toutefois, si les risques varient entre stockage en aquifère et en réservoir déplété, il s'agit avant tout de l'importance relative des événements, plus que des événements eux-mêmes. De ce fait, si elle gagnerait peut-être à être transposée de manière générique pour le stockage en gisement épuisé, il nous semble que la liste proposée peut convenir à l'étude d'un site de ce type, moyennant quelques modifications mineures qui pourraient être effectuées, au cas par cas, par le groupe d'experts en charge de l'examen. Il nous paraît de plus intéressant de ne présenter qu'une seule liste générique, et non une par type de stockage, pour ne pas introduire de confusions.

Les dernières questions auxquelles peuvent mener les travaux relatifs à l'identification des scénarios de risque concernent l'exploitation de ces scénarios pour la détermination de critères de sécurité. Afin d'éviter l'estimation de la probabilité d'événements mal connus, et pour faire face à la difficulté de ne pas savoir l'évolution des enjeux et de leur vulnérabilité au fil du temps, nous avons choisi de raisonner :

- de manière déterministe ;
- en termes d'intensité des effets des phénomènes dangereux, plutôt que de gravité de leurs conséquences.

Toutefois, travailler sur l'intensité des effets des phénomènes ne dispense pas de s'interroger sur les voies d'exposition des éléments vulnérables. Pour pouvoir prendre en compte les effets sur les différentes cibles, il sera ainsi nécessaire de convertir les résultats des modèles décrivant les phénomènes en termes d'exposition, ce qui pourra

varier selon les types d'enjeux. Par exemple, un modèle de fuite de CO<sub>2</sub> à travers un puits pourra fournir en sortie un débit de fuite ; mais celui-ci devra être traduit en teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> pour pouvoir étudier les effets sur les humains. Par ailleurs, pour déterminer si les phénomènes sont susceptibles ou non d'engendrer des conséquences sur les différents éléments vulnérables, il s'avère nécessaire de disposer de seuils d'effets pour tous ces enjeux. Or, à l'heure actuelle, de telles valeurs de référence n'existent, à propos d'une fuite de CO<sub>2</sub>, que pour l'exposition humaine. Déterminer des seuils d'effets pour les différents enjeux, sans oublier d'envisager les effets toxiques des différentes espèces de co-contaminants, demande d'entreprendre des recherches complémentaires. Il nous semble que cette tâche ne relève pas du ressort du projet CRISCO2. Elle réclame des moyens, des compétences et une organisation spécifique dont ce projet ne dispose pas, notamment pour réaliser des expérimentations d'exposition. Néanmoins, afin de déduire des critères de sécurité de l'exposition des cibles, il sera nécessaire de trouver des références contre lesquelles l'évaluer. Une réponse partielle simple pourrait être d'utiliser les seuils pour l'homme pour plusieurs types de cibles en surface. En revanche, un enjeu particulier réside dans l'élaboration de seuils d'effets pour les fuites de CO<sub>2</sub> vers les nappes d'eau, et notamment les aquifères d'eau potable, éléments vulnérables primordiaux à long terme, et exposés prioritairement par rapport à la surface. Quoi qu'il en soit, si le projet CRISCO2 ne parvenait pas à résoudre ces problèmes de seuils d'effets ou à les contourner, il devrait apporter des réflexions pour leur détermination, sur la forme qu'ils peuvent prendre et les manières potentielles de les établir.

Enfin, nous avons mentionné la possibilité de traduire les seuils d'effets sous forme de zones d'effet (*cf.* §3.3.6, §5.4.2), comme pour les études de dangers industriels, où elles servent à déterminer la gravité des scénarios. Dans le cas du stockage de CO<sub>2</sub>, à la différence d'une EDD, la vulnérabilité ne peut pas être considérée comme fixée. De plus, pour certains événements (fuite par des zones perméables dans la couverture, par exemple), la localisation de la concrétisation de l'aléa ne sera pas connue. L'utilisation de la notion de zones d'effets se montre donc délicate. Ainsi qu'évoqué plus haut, nous nous attendons à ce que les modèles démontrent, pour certains événements, que les effets des phénomènes dangereux demeurent négligeables. Pour les autres, l'élaboration de critères de sécurité visera d'abord la prévention de l'aléa : nous chercherons à déterminer les exigences garantissant l'absence d'occurrence des événements susceptibles d'affecter les enjeux. Cette approche par critères de sécurité se montrera ainsi pénalisante, mais elle nous semble la meilleure façon de traiter une vulnérabilité variable au regard des échelles de temps concernées.

#### **5.4.4. Synthèse**

L'illustration 21 synthétise la démarche d'élaboration de scénarios de risque proposée. Les trois premières étapes correspondent au travail effectué lors de nos ateliers, aboutissant à l'élaboration de « scénarios simples ». La quatrième renvoie à la modélisation des événements de risque, en cours dans la tâche 2.5 de CRISCO2. Dans l'attente de ses résultats, la démarche est plus hypothétique pour l'exploitation des scénarios simples afin de déterminer des critères de sécurité (étape 5) ainsi que pour la constitution de « scénarios complexes » (étape 6) puis leur exploitation. Elle demande à être confortée, si besoin modifiée, et validée dans la suite du projet.



Illustration 21 - Démarche proposée pour l'identification de scénarios de risque pour le stockage géologique de CO<sub>2</sub> dans le cadre du projet CRISCO2

## 6. Application au cas du Bassin de Paris

L'objet principal du projet CRISCO2 tient à l'élaboration de la méthodologie de détermination des critères de sécurité, qui implique la construction de scénarios de risque. L'application sur un cas constitue un appui au développement méthodologique, et non un objectif en soi. Néanmoins, cet exemple va soutenir la suite des travaux du projet, pour les améliorations de la méthode d'identification de scénarios ainsi que pour la simulation d'événements à l'aide de modèles simplifiés, et finalement pour la déduction de critères de sécurité. Le cas choisi présente donc une importance certaine pour la continuation du projet ; les scénarios jugés pertinents dans ce contexte déterminent ainsi les modélisations effectuées au cours de la tâche dédiée 2.5. Nous jugeons de ce fait judicieux de présenter brièvement le cas d'étude, l'exercice d'identification des scénarios qui a été conduit et les scénarios sélectionnés.

### 6.1. CONTEXTE

Nous avons considéré pour application un stockage en aquifère dans le sud-est du Bassin de Paris. Nous avons utilisé pour source d'informations les travaux réalisés dans le projet ANR PICOREF, auxquels le BRGM et TOTAL, parmi les participants de CRISCO2, collaborent. Nous renvoyons aux livrables issus de ce projet ou aux communications correspondantes (e.g. Brosse *et al.*, 2007 ou Grataloup *et al.*, 2008) pour des informations détaillées, et brosons seulement ici un tableau rapide du contexte. L'illustration 22 présente le modèle proposé lors de l'atelier d'experts comme support pour l'identification des scénarios de risque.

L'injection est envisagée dans l'aquifère du Dogger, largement étudié dans le cadre des explorations pétrolières et géothermiques (Rojas *et al.*, 1989). Il s'agit d'un réservoir carbonaté, de profondeur moyenne de 1700 m et d'une épaisseur d'environ 150 m. Il présente trois formations, l'Oolithe blanche, la Dalle nacrée et le Comblanchien. L'essentiel des niveaux producteurs se localise dans l'Oolithe, qui forme donc la couche d'intérêt pour l'injection. Le réservoir dispose d'une hauteur productive moyenne d'environ 25 m, pour une transmissivité équivalente de 38 D.m et une porosité moyenne de 15%.

L'aquifère se caractérise par un comportement quasi hydrostatique équilibré avec les conditions aux limites. Sa pression varie entre 130 et 200 bars, sa température entre 50 et 80°C et sa salinité entre 2 et 20 g.L<sup>-1</sup>. Quasiment plat, avec un pendage de moins de 1° vers le nord-ouest, il est marqué par un très faible écoulement régional, de l'ordre de 1 m/an, dans le sens du pendage. Le Dogger est surmonté par les couches argileuses du Callovo-Oxfordien, qui constituent une couverture très peu perméable.

Le point d'injection supposé se situe entre Provins et Sens. Outre les éléments humains dans les villes et villages, les enjeux environnementaux dans ce secteur concernent en surface la vallée de la Seine, où certaines zones écologiques font l'objet de mesures de protection. Dans le sous-sol, l'aquifère de l'Albien, localisé à environ

900 m de profondeur, est considéré comme stratégique et doit être préservé (Blanchard, 2006). La zone faillée de Saint-Martin de Bossenay, siège de réservoirs d'hydrocarbures exploités, se trouve à quelques kilomètres à l'est du puits d'injection présumé.

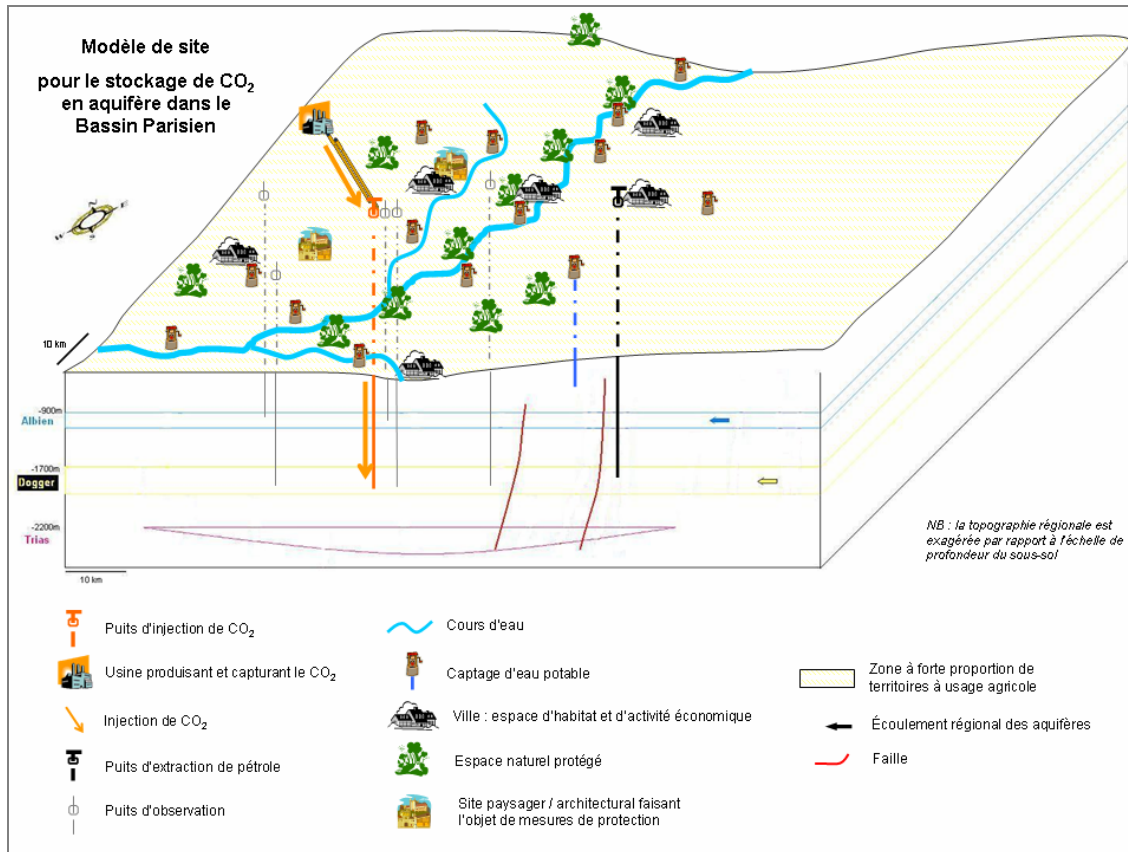


Illustration 22 - Modèle de site pour l'établissement de scénarios de risque, dans l'hypothèse d'un stockage en aquifère dans le Bassin de Paris

Le protocole opérationnel retenu comme hypothèse de base pour l'établissement des scénarios de risque, puis leur modélisation et leur exploitation, prévoit l'injection de 1 Mt CO<sub>2</sub>/an pendant 20 ans, par le biais d'un seul puits injecteur. Le flux est supposé pur, et l'injection est réalisée sur une hauteur de 40 m. A partir de cette référence, des alternatives pourront être étudiées :

- Débits de 5 MT CO<sub>2</sub>/an voire 10 MT CO<sub>2</sub>/an, en adaptant au besoin le nombre de puits injecteurs ;
- Durée d'injection de 50 ans ;
- Présence de gaz annexes dans le flux injecté.

Enfin, l'échelle de temps gouvernant l'analyse des risques est de 1000 ans, en accord avec les préconisations du GIEC<sup>9</sup> relatives à la durée de rétention du CO<sub>2</sub> nécessaire à une contribution efficace du stockage géologique dans la lutte contre le réchauffement climatique.

## **6.2. SELECTION DE SCENARIOS DE RISQUE**

### **6.2.1. Description de l'exercice**

Les scénarios de risque ont été établis au cours d'un atelier d'experts, tenu le 8 janvier 2008, dans les conditions décrites au paragraphe 5.3. Il constituait un test d'application de la méthode développée, et a enrichi celle-ci par les retours qu'il a fournis. Il reste sujet à l'ensemble des critiques accompagnant la méthode décrite au paragraphe 5.4. En particulier, il s'est finalement contenté de recenser les événements de risque à prendre en considération, plutôt que de parvenir à ce que nous avons dénommé « scénarios complexes » rendant compte de possibles enchaînements d'événements. Le travail d'identification des cibles concernées par les différents événements n'a été mené à bien que pour deux d'entre eux ; nous ne présentons donc ci-dessous que les résultats relatifs aux événements de risque.

La méthode proposée au paragraphe 5.4 recommande d'évaluer l'intérêt d'inclure un événement dans l'étude de façon binaire. Cependant, comme expliqué au 5.3, l'atelier testait une estimation hiérarchisée (prioritaire / secondaire / négligeable), qui apparaît donc dans ce chapitre, bien qu'elle ait été abandonnée par la suite.

### **6.2.2. Résultats**

Les résultats de l'atelier sont rapportés à l'illustration 23. Au moment de la tenue de l'atelier de groupe, les événements de risque n'avaient pas été rassemblés en cinq catégories ; ils n'étaient d'ailleurs pas présentés dans l'ordre figuré ici. Après reclassement des événements, il apparaît que :

- les scénarios correspondant à la classe A (événements liés à la conception et la conduite des opérations) ont tous deux été jugés secondaires, au motif que des moyens de maîtrise des risques existent ;
- les événements de la catégorie E (vulnérabilité à des agressions externes) ont tous deux été écartés ;
- tous les autres événements ont été jugés prioritaires, à l'exception de la modification des écoulements verticaux, estimée secondaire.

En conséquence, et conformément à l'abandon de la distinction entre prioritaire et secondaire, tous les scénarios doivent être traités au cours de la tâche 2.5 dédiée à la modélisation, à l'exception du forage ultérieur et des effets d'un séisme naturel.

---

<sup>9</sup>Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

**CRISCO2 - Bassin Parisien - stockage en aquifere**

<i>Evénement</i>	<i>Description</i>	<i>Pertinence</i>	<i>Justification</i>
<b>Fuite par puits en exploitation</b>	Remontée de CO <sub>2</sub> du fait de défauts ou de la dégradation à long terme du couvrage ou du scellement des puits opérationnels (injection, production [EHR], observation). Leur analyse et abandon soigneux réduisent les risques à long terme.	<b>Secondaire</b>	Possibilité d'intervention et remédiation. Il y a des garanties sur la tenue des puits par l'existence d'un cahier des charges.
<b>Surpressurisation locale au niveau du puits d'injection</b>	Développement de fractures à proximité immédiate du puits en réponse à l'injection de CO <sub>2</sub> , résultant en événements micro-sismiques et possibilités de fuite.	<b>Secondaire</b>	Ceci sera pris en compte dans le dimensionnement. On dispose de moyens de maîtrise.
<b>Surpressurisation du réservoir à l'échelle régionale</b>	Possibilité de réactivation de failles ou de fracturation induite liée à la surpression engendrée par l'injection de CO <sub>2</sub> , permettant la remontée de CO <sub>2</sub> et causes d'événements sismiques, de subsidence ou de surruction.	<b>Prioritaire</b>	L'augmentation de pression ne peut être négligée.
<b>Dépassement de l'extension latérale prévue</b>	Migration non-conforme aux prévisions, soumettant au CO <sub>2</sub> des voies de fuite non envisagées en surface ou en profondeur : affleurements, failles,...	<b>Prioritaire</b>	On n'utilise pas de piège structural. Cela peut engendrer des problèmes de conflits d'usage (géothermie, gisements d'hydrocarbure...)
<b>Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture</b>	Absence locale de couverture (discontinuité), ou présence de zones où la perméabilité est plus grande qu'anticipé ou bien est augmentée du fait des réactions chimiques engendrées par l'injection de CO <sub>2</sub> , offrant une voie de fuite par advection.	<b>Prioritaire</b>	Nécessite des précisions sur la connaissance de la couverture : continuité, propriétés hydrauliques, tenue en pression...
<b>Fuite par des failles existantes</b>	Remontée de CO <sub>2</sub> à travers une faille pré-existante, inconnue, ou bien détectée lors de la caractérisation du site, au cas où la migration de la bulle ne serait pas conforme aux prévisions.	<b>Prioritaire</b>	Présence de failles à proximité. On ne connaît pas leurs propriétés.
<b>Fuite par puits abandonné</b>	Remontée de CO <sub>2</sub> par des puits mal scellés, ou dégradés au contact du CO <sub>2</sub> . A la différence des puits en exploitation, les puits abandonnés ne peuvent pas forcément faire l'objet de mesures de correction. Ils peuvent parfois même être méconnus.	<b>Prioritaire</b>	Il existe des forages anciens sur le secteur, avec des bouchons anciens en mauvais état. Certains puits ne sont pas accessibles (dans le village...)
<b>Formation d'un stockage secondaire plus proche de la surface suite à une migration verticale non attendue</b>	Accumulation, suite à un premier événement de fuite depuis le réservoir, de CO <sub>2</sub> dans un piège proche de la surface, susceptible d'engendrer des phénomènes de fuite (dégazage) brutaux.	<b>Prioritaire</b>	Important dans le cas du Bassin de Paris : il existe des réservoirs potentiels pour une accumulation sous une phase différente.
<b>Modification des écoulements verticaux (drainance) suite aux changements des champs de pression</b>	Modification des écoulements entre les couches en réponse à l'augmentation de pression dans le réservoir, pouvant notamment conduire au déplacement de saumure vers des aquifères utilisés pour l'eau potable.	<b>Secondaire</b>	Possibilité de remobiliser des éléments traces et de les transporter vers des aquifères. A replacer dans le contexte hydrogéologique et minéralogique du BP. Expérience de valeurs de drainance verticale entre le Néocomien et l'Albien, pas en dessous.
<b>Forage ultérieur</b>	Soit perforant la zone d'extension du CO <sub>2</sub> , soit modifiant les conditions d'écoulement et donc l'évolution du CO <sub>2</sub> .	<b>Négligeable</b>	Des servitudes seront mises en place. Cela dépasse le cadre du projet de stockage. Le forage devra faire l'objet d'une analyse de risques.
<b>Fracturation induite par un séisme naturel</b>	Vulnérabilité du réservoir à un séisme : fracturation ou réactivation de faille par un séisme d'origine naturelle, offrant une voie de fuite pour le CO <sub>2</sub> ; perte de confinement d'un puits sous l'effet du cisaillement.	<b>Négligeable</b>	Zone d'aléa sismique négligeable

Illustration 23 - Page de résultats de l'atelier d'évaluation des scénarios de risque dans le contexte du Bassin de Paris



### 6.3. POURSUITES NECESSAIRES

Le protocole décrit au chapitre 5 n'a, jusque là, été appliqué que très partiellement à l'exemple du Bassin de Paris. D'une part, comme nous l'avons indiqué, aucune tentative de combinaison d'événements dans une séquence accidentelle n'a été menée ; d'autre part, même pour l'élaboration de « scénarios simples », les cibles concernées n'ont été identifiées que pour deux événements. Nous avons déjà critiqué notre organisation de ce travail (cf. §5.3.2). La priorité a en fait été donnée à la détection des événements à retenir et à la conduite de leur modélisation, qui éclairera le recensement des cibles affectées ainsi que la constitution de « scénarios complexes ».

Il sera néanmoins indispensable de compléter le processus d'identification des scénarios de risque, afin de valider l'application de la démarche. Le programme de travail du projet CRISCO2 en donne la possibilité au sein de la tâche 4.3 d'amélioration de la méthode. Déterminer les cibles potentiellement impliquées par les différents événements apparaît critique, dans la mesure où cela constitue un pré-requis pour la définition des critères de sécurité. Dans un second temps, les propositions méthodologiques pour l'élaboration de séquences accidentelles émises dans la partie 5.4.2 pourront être testées, selon les résultats des modèles simples. Il s'agira donc, au cours d'atelier(s) d'expert(s) :

- de décomposer un modèle conceptuel du site en compartiments ;
- de déterminer, en fonction des travaux et modélisations préalables :
  - les voies possibles d'exposition des cibles aux effets de fuites ;
  - les événements susceptibles de provoquer les migrations de fluide d'un compartiment vers le suivant ;
- de placer ces événements sur un arbre pour en déterminer les combinaisons possibles.

Nous avons suggéré, dans la partie théorique, l'audit à l'aide des FEPs comme étape supplémentaire potentielle, tout en ne la jugeant pas indispensable. Elle ne nous paraît ainsi pas prioritaire dans nos travaux futurs. De la sorte, au stade actuel d'avancement, il nous semble peu probable que nous y ayons recours sur notre cas d'étude, d'autant que le niveau de détail des connaissances à son égard ne permettrait pas forcément de tirer profit de celui offert par les FEPs.

L'application décrite ici, et les poursuites que nous en proposons, sont en effet conçues avant tout comme démonstration des développements théoriques, plus que pour les résultats concrets qu'elles apporteront à propos du site étudié. L'exemple choisi, bien que documenté, notamment grâce au projet ANR PICOREF, constitue seulement un cas hypothétique de stockage, et les données utilisées demeurent relativement générales. Pour accompagner un projet d'injection précis, l'élaboration de critères de sécurité nécessiterait un programme d'acquisition de données, afin de disposer d'un jeu de données caractéristiques du site plus étoffé. Ce niveau de description fait défaut à notre application pour tirer des conclusions détaillées en termes de scénarios de risque et de critères. Ce déficit n'est cependant pas intrinsèque

à notre méthode. Pour un projet concret, l'analyse proposée serait menée après l'obtention par le demandeur d'une connaissance suffisante pour dimensionner ses opérations. S'appuyant sur cette caractérisation poussée, l'identification et la modélisation des scénarios de risque se trouveraient facilitées et déboucheraient sur des résultats nécessairement plus aboutis.

Enfin, la suite des travaux de CRISCO<sub>2</sub>, dans la tâche 4, se consacrera à la déduction des critères de sécurité à partir des scénarios de risque, pour que l'élaboration de ceux-ci serve réellement. Encore une fois, l'application au Bassin de Paris aura valeur de démonstration de la capacité de la démarche développée à répondre à son objectif. Elle sera confrontée aux difficultés soulignées au paragraphe 5.4.3. Plus que les résultats sur les critères en tant que tels, son intérêt proviendra des solutions trouvées pour contourner ces écueils, voire des nouvelles interrogations qui se font jour et des pistes de réflexion suggérées pour y répondre.

## 7. Conclusion

### 7.1. APPROCHE PROPOSEE : ATOUTS ET LIMITES

Nous décrivons dans ce rapport une approche méthodologique pour l'identification de scénarios d'évolution altérée de stockages géologiques de CO<sub>2</sub>, dans l'optique d'une détermination des critères de sécurité à appliquer. Elle a été établie à partir de l'analyse des méthodes recensées, parmi les projets traitant du stockage de CO<sub>2</sub>, pour déterminer des scénarios, ainsi que de la démarche de réalisation des analyses de risque industriel usuelles. Les techniques employées pour celles-ci ne peuvent pas être transposées directement au stockage de CO<sub>2</sub>, du fait de certaines spécificités de cette technologie, liées au recours à des systèmes naturels et non ouvrages, connus de façon incomplète, à la variabilité entre les sites et aux échelles de temps incriminées.

Notre approche s'est en particulier appuyée sur les travaux d'analyse de risque menés dans le cadre du projet australien GEODISC : elle en a repris le principe d'une identification au sein de listes restreintes des briques constitutives des scénarios – événements de risque, cibles et impacts potentiels. Elle ne prétend pas constituer une méthode systématique, mais répondre aux objectifs du projet CRISCO2, qui consistent à détecter, de manière relativement simple et souple, les scénarios de risque les plus significatifs afin d'en déduire les critères de sécurité à appliquer.

Nos travaux ont ainsi conduit à la construction d'outils voués à servir de support à la construction des scénarios. Il s'agit avant tout de trois listes génériques :

- Une liste de 11 événements de risque, regroupés en 5 catégories ;
- Une liste de 9 types de cibles, complétée par une liste de 15 types d'impacts correspondant.

Ces listes ont été conçues pour le stockage en aquifère, option numéro un en termes de capacité de stockage. Elles nous semblent néanmoins également convenir à l'étude des risques en gisement d'hydrocarbure épuisé, au prix de quelques adaptations mineures. Celles-ci ne justifient pas, à nos yeux, l'édition de listes distinctes.

La démarche proposée consiste à réunir un panel d'experts pluridisciplinaire, bénéficiant d'une connaissance du site étudié, afin qu'il procède à l'examen de ces listes au vu des conditions locales. Il cherchera ainsi à identifier les événements de risque susceptibles de se produire, et les cibles potentiellement concernées.

Des scénarios de risque simples peuvent être élaborés de la sorte. Dans la bibliographie relative à la construction de scénarios pour le stockage de CO<sub>2</sub>, nous avons constaté un déficit pour élaborer des séquences accidentelles plus complexes, c'est-à-dire des enchaînements d'événements conduisant à un phénomène redouté. Or, pour l'analyse de risques industriels, ces séquences accidentelles représentent l'objet recherché. Notre méthodologie n'a pas réellement réussi à combler ce défaut

pour le stockage de CO<sub>2</sub>. En effet, si elle permet de repérer les éléments à prendre en compte, nous n'avons pas validé d'approche menant à l'identification de leurs combinaisons potentielles. Néanmoins, nous avançons une proposition pour accomplir cela. Celle-ci se baserait sur une décomposition du système en compartiment, et à la détermination, par le groupe d'experts, des voies de transfert possibles d'un compartiment au suivant. Nous cherchons ainsi à nous rapprocher du processus adopté pour l'analyse de risque industriel, où des arbres d'événements sont établis en s'appuyant sur le découpage fonctionnel du système étudié. Un tel découpage se montre cependant délicat à définir dans le cas d'un stockage de CO<sub>2</sub> ; la méthode suggérée, dont l'applicabilité n'a pas été vérifiée, demeure par conséquent au stade de conjecture.

Notre proposition accorde une place importante à la représentation et la quantification des événements de risque dans la constitution des séquences accidentelles. En effet, nous conseillons, après un premier temps de sélection des événements à prendre en compte, de réaliser leur modélisation. Celle-ci fournira des éléments d'évaluation de leur importance. Les tentatives d'enchaînement des différents événements entre eux n'interviendraient qu'ensuite, afin de tirer profit de ces éléments pour éliminer certaines combinaisons apparaissant négligeables, intrinsèquement ou par rapport à d'autres. Sacrifiant au systématisme, ce mode de travail gagnerait en facilité d'application.

## **7.2. SUITES A DONNER**

La démarche avancée n'a été mise en pratique que partiellement, sur l'exemple du stockage dans l'aquifère du Dogger dans le bassin de Paris. Ce travail devra être complété. En particulier, il sera nécessaire d'essayer d'appliquer à cet exemple les propositions pour l'identification de séquences accidentelles plus complexes, afin de critiquer le processus suggéré, de l'améliorer ou de le modifier. Un ou plusieurs ateliers d'experts seront réunis en ce sens, lors de la tâche 4.3 du projet (« Amélioration de la méthode »), après l'obtention de premiers résultats relatifs aux événements de risque jugés pertinents sur le cas d'étude.

Dans l'immédiat, l'accent est en effet placé sur la mise au point de modèles pour représenter ces différents événements, objet de la tâche 2.5 « Modélisation et simulation numérique des scénarios retenus ». Ces modélisations devront également inclure la simulation du scénario de référence. Pour une application concrète de la démarche de détermination des critères de sécurité, l'opérateur devrait déjà avoir fourni les évolutions attendues du stockage. Celui-ci pourra servir de base à la représentation des scénarios de risque ; il demeure néanmoins judicieux de disposer d'un autre modèle pour le vérifier.

Une fois ces modèles élémentaires disponibles, ils pourront être exploités pour déduire les critères de sécurité, et éventuellement être combinés pour représenter les enchaînements d'événements. La ligne guidant la construction des modèles vise la simplicité d'usage : de même que la méthode d'identification des scénarios cherche à rester aisée à mettre en œuvre, les modèles doivent pouvoir être appliqués avec un nombre d'outils limités et dans un délai raisonnable. Les modèles analytiques, abaques ou modèles numériques restreints sont ainsi privilégiés ; en contrepartie, ils ne

prétendent pas à la meilleure précision. Dans une perspective de calculs d'ordres de grandeur ou de résultats approchés, une attitude prudente doit être respectée, afin que ces approximations ne sous-évaluent pas les risques. Le cadre de gestion des incertitudes, mis au point dans le volet 3 du projet, confortera cette démarche en cherchant une utilisation optimale de l'information disponible, permettant la décision la mieux informée possible.

Le projet aura ensuite pour enjeu l'exploitation des scénarios de risque élaborés selon l'approche développée pour définir des critères de sécurité. Le cadre de ce traitement correspond à celui adopté pour les études de dangers industriels, et à celui que nous avons également noté pour les analyses des risques liés au stockage de déchets radioactifs, dans le premier livrable du projet : il s'agit de la recherche de niveaux de risques aussi faibles que possible. Les analyses de risques industriels recherchent une évaluation des scénarios de risque en termes de probabilité, de cinétique, d'intensité et de gravité. Pour des événements géologiques, compte tenu des incertitudes et des échelles de temps en jeu, il semble illusoire de vouloir estimer des probabilités d'occurrence fiables. Par ailleurs, il s'avère impossible de déterminer la vulnérabilité de l'environnement d'un stockage de CO<sub>2</sub> sur la durée d'analyse considérée, puisque les éléments vulnérables changeront probablement au cours du temps. Dans le cadre du projet CRISCO2, nous renonçons donc aux cotations en probabilité et gravité des scénarios. Nos travaux s'inscrivent dans un raisonnement déterministe : nous supposons l'occurrence des événements de risque, et nous nous efforçons d'estimer l'intensité des effets des phénomènes correspondants. Les critères de sécurité seront alors déterminés en évaluant l'exposition des éléments vulnérables présumés présents.

Cette exploitation soulève plusieurs interrogations. D'abord, les modèles représentant les événements de risque ne fourniront pas forcément directement des niveaux d'exposition ; des conversions pourraient être nécessaires pour passer de l'intensité des effets d'un phénomène dangereux à l'exposition des cibles. Ensuite, une appréciation de l'exposition des enjeux suppose des références de comparaison. Ces seuils d'effets n'existent, pour la toxicité du CO<sub>2</sub>, que pour l'homme. Il conviendra de déterminer comment évaluer les effets du CO<sub>2</sub>, mais aussi des autres types de phénomènes dangereux associés au stockage de CO<sub>2</sub> (impuretés toxiques, désordres géomécaniques) sur les différents types d'enjeux. La priorité à ce propos nous semble concerner la contamination des aquifères d'eau potable. Enfin, pour les risques industriels classiques, les seuils d'effets sont usuellement employés pour circonscrire des zones d'effets. Pour le stockage de CO<sub>2</sub>, compte tenu des incertitudes sur la localisation de l'aléa et la vulnérabilité du milieu, l'usage de telles zones d'effets paraît problématique. Il semble que, dans le cadre de CRISCO2, nous devions adopter un comportement prudent, en déterminant des critères de sécurité pour prévenir les phénomènes susceptibles, s'ils se produisaient, de dépasser les seuils d'effets. Ces questions relatives à la définition des critères de sécurité feront l'objet d'investigations dans la tâche 4 du projet ; il paraît toutefois improbable que le projet puisse y répondre entièrement. En particulier, l'établissement de seuils d'effets pour les différents enjeux semble dépasser les limites du projet.

Par ailleurs, certains travaux complémentaires paraissent souhaitables pour conforter la méthode développée dans CRISCO2, mais ne pourront vraisemblablement pas être conduits dans les ressources et les délais du projet. Ainsi, la démarche gagnerait à faire l'objet d'applications supplémentaires dans des contextes différents ; cela permettrait de l'enrichir et de l'affiner. Il conviendrait surtout de la tester sur le site d'un projet concret, où des acquisitions de données spécifiques ont eu lieu, pour se placer dans des conditions représentatives de son application ultérieure. En outre, un audit, à l'aide des bases de FEPs, du processus d'identification de scénarios et de ses résultats constituerait une expérience intéressante pour évaluer leur exhaustivité. Là encore, il prendrait tout son sens sur un site réel.

## 8. Bibliographie

**Birkholzer J., Pruess K., Lewicki J., et al.** (2006) Large releases from CO<sub>2</sub> storage reservoirs: analogs, scenarios, and modeling needs. *In*: Eighth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-8) 19-22 June 2006.

**Blanchard F.** (2006) Piégeage du CO<sub>2</sub> dans les réservoirs géologiques en France : Projet PICOREF – Cadrage réglementaire et enjeux environnementaux. Contrat RTPG. Rapport BRGM/RP-54638 – FR, 86 p.

**Bouc O., Bellenfant G., Fauconnier D., et al.** (2006) Critères de sécurité pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Rapport BRGM/RP-55158 – FR, 186 p.

**Bouc O., Auclair S.** (2007) Critères de sécurité pour les analogues industriels au stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Rapport BRGM/RP-55840 – FR, 64 p.

**Bowden A.R. & Rigg A.** (2004) Assessing risk in CO<sub>2</sub> storage projects. Australian Petroleum Production and Exploration Association Journal, 44, pp. 677-702.

**Brosse E., Hasanov V., Bonijoly D., et al.** (2007) The PICOREF project: selection of geological sites for pilot CO<sub>2</sub> injection and storage in the Paris Basin. GEOTECHNOLOGIEN Science Report No. 9. 1<sup>st</sup> French-German Symposium on Geological Storage of CO<sub>2</sub>, 21-22 June 2007, Geoforschungszentrum Potsdam, Germany.

**Chevron Australia Pty Ltd** (2005) Draft Environmental Impact Statement/Environment Review and Management Programme for the Proposed Gorgon Development: Executive Summary, September 2005.

**El Ghonemy, Watts & Fowler** (2004) Treatment of uncertainty and developing conceptual models for environmental risk assessments and radioactive waste disposal safety cases. Environment International, Vol. 31, pp.89-97.

**GIEC** (2005) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 p.

**Grataloup S., Bonijoly D., Brosse E., et al.** (2008) PICOREF: A site selection methodology for saline aquifer in Paris Basin. *In*: Ninth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9) 16-20 November 2008.

**Hooper B., Murray L., Gibson-Poole C.** (2005) Latrobe Valley CO<sub>2</sub> Storage Assessment – Final Report. CO2CRC Report No: RPT05-0108, November 2005.

**INERIS** (2006 [a]) Ω-9 L'étude de dangers d'une installation classée. Rapport d'étude n°46055, INERIS – Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006, 103 p.

**INERIS** (2006 [b])  $\Omega$ -7 Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle. Rapport d'étude n°INERIS-DRA-2006-P46055-CL47569, INERIS – Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006, 140 p.

**Maul P., Savage D., Benbow S., Walke R. and Bruin R.** (2005) Development of A FEP Database for the Geological Storage of Carbon Dioxide. *In* : Seventh International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7) 7-11 September 2004.

**MEDD** (2006) Principes généraux pour l'élaboration et la lecture des études de dangers des installations classées soumises à autorisation avec servitudes d'utilité publique. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 28 décembre 2006, 17 p. Disponible en ligne sur <http://www.ecologie.gouv.fr/Methodologie-des-etudes-de-dangers.html> (accédé le 01/08/2008).

**MEEDDAT** (2008) Guide de l'état de l'art sur les silos pour l'application de l'arrêté ministériel relatif aux risques présentés par les silos et les installations de stockage de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables - Version 3. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, 72 p.

**Oldenburg C., Bryant S.** (2007) Certification Framework for Geologic CO<sub>2</sub> Storage. *In*: Sixth Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration, Pittsburgh, PA, USA, 7-10 May 2007.

**Pawar R., Carey J., Chipera S., et al.** (2006) Development of a framework for long-term performance assessment of geologic CO<sub>2</sub> sequestration sites. *In*: Eighth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-8) 19-22 June 2006.

**Rojas J., Giot D., Le Nindre Y.-M., et al.** (1989) Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger Bassin Parisien, France. Rapport Final BRGM R30169, 258 p.

**Sharma S., Cook P.** (2007) Australia's first geosequestration demonstration – the CO2CRC Otway Basin Pilot Project. *In*: Sixth Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration, Pittsburgh, PA, USA, 7-10 May 2007.

**Sminchak J., Kelley M., Gupta N.** (2006) Performance and Safety Screening for the Ohio River Valley CO<sub>2</sub> Storage Site Using Features, Elements, and Processes Database. *In*: Fifth Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration, Alexandria, VA, USA, 8-11 May 2006.

**Svensson R.** (2004) Presentation at the CO2STORE risk assessment workshop, 27 October 2004, Utrecht (NL).

**Svensson R., Bernstone C., Eriksson A., et al.** (2005) Safety assessment of structure Schweinrich – Part of CO2STORE case study Schwarze Pumpe. Vattenfall Utveckling AB, TNO, BGR, 93 p.



**Whittaker S., White D., Law D., Chalaturnyk R.** (2004) IEA GHG Weyburn CO<sub>2</sub> monitoring & storage project summary report 2000-2004. *Eds:* Wilson M, University of Regina, Regina, Saskatchewan, CA; Monea M, PTRC, Regina, Saskatchewan, CA. Petroleum Technology Research Centre (PTRC), Regina, Saskatchewan, CA.

**Wildenborg T., Leijnse T., Kreft E., et al.** (2004) Long-term safety assessment of CO<sub>2</sub> storage : the scenario approach. *In :* Seventh International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7) 7-11 September 2004.



# **Annexe 1**

## **Glossaire**



## SOURCES UTILISEES

### Rapports officiels d'organismes internationaux

#### **GIEC PSC :**

- - GIEC (2005). Piégeage et stockage du dioxyde de carbone – Résumé à l'intention des décideurs et résumé technique. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 58 p.
- - GIEC (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 p.

**OCDE :** OCDE (2003). Principes directeurs de l'OCDE pour la prévention, la préparation et l'intervention en matière d'accidents chimiques. OCDE, Paris, 230 p.

### Lexiques du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

**MEDD RT :** Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD). Glossaire technique des risques technologiques – Pièce jointe à la circulaire n° DPPR/SE12/MM-05-0316 du 7 octobre 2005 relative aux Installations classées - Diffusion de l'arrêté ministériel 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

**MEDD SP :** Site Internet des sites et sols pollués, édité par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) : [www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr](http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr)

### Sites Internet divers

**ADEME :** Glossaire du site Internet de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=12843>

**EEA :** Site Internet de l'Agence Européenne de l'Environnement (European Environmental Agency) – EEA multilingual environmental glossary : <http://glossary.eea.europa.eu/EEAGlossary>

### Définitions propres

Les termes dont la source de la définition n'est pas précisée, figurés en rouge, ont fait l'objet d'une définition adaptée à leurs usages spécifiques dans le cadre du projet CRISCO<sub>2</sub>, sur la base de différentes sources telles que celles mentionnées ci-dessus.

<b>Mot français</b>	<b>Définition</b>	<b>Equivalent anglais</b>	<b>Source</b>
Aléa	Probabilité qu'un phénomène accidentel produise en un point donné des effets d'une intensité donnée, au cours d'une période déterminée	<i>Hazard</i>	MEDD RT
Analyse du risque	Utilisation systématique d'informations pour identifier les phénomènes dangereux et pour estimer le risque	<i>Risk analysis</i>	MEDD RT
Caractéristique	Paramètre statique participant à la description du complexe de stockage	<i>Feature</i>	
Cause fondamentale	La ou les principales causes qui conduisent à une action ou à une situation non sûres, se traduisant par un accident ou quasi-accident. Autrement dit, une cause fondamentale est une cause qui, si elle était éliminée, empêcherait le scénario d'évoluer vers un accident	<i>Root cause</i>	OCDE
Cible	Récepteur physique ou environnemental, être vivant exposés (homme, faune, flore, eau, bâtiments, ...) aux effets d'un danger, direct ou indirect, ou soumise à un risque	<i>Target, receptor</i>	MEDD SP
Cinétique	Vitesse d'enchaînement des événements constituant une séquence accidentelle.		MEDD RT
Conséquences	Combinaison pour un accident donné de l'intensité des effets et de la vulnérabilité des cibles situées dans les zones exposées à ces effets	<i>Consequences</i>	MEDD RT
Critère de sécurité	Exigence imposée à l'opérateur de façon à assurer que les impacts sont négligeables : <ul style="list-style-type: none"> <li>- sur la sécurité et la santé des personnes ;</li> <li>- sur l'environnement ;</li> <li>- sur les ressources naturelles.</li> </ul>	<i>Safety criterion</i>	

<b>Mot français</b>	<b>Définition</b>	<b>Equivalent anglais</b>	<b>Source</b>
Danger	Propriété intrinsèque à une substance, à un système technique, à une disposition, à un organisme, etc., de nature à entraîner un dommage sur un élément vulnérable	<i>Hazard</i>	MEDD RT
Dompage	Blessure physique ou atteinte à la santé des personnes, ou atteintes aux biens ou à l'environnement	<i>Damage</i>	MEDD RT
Dose	Quantité totale d'une substance administrée à, prise ou absorbée par un organisme	<i>Dose</i>	EEA
Dose – réponse	Relation entre la dose absorbée et l'incidence et la gravité des effets	<i>Dose-response</i>	ADEME
Effets d'un phénomène dangereux	Caractéristiques des phénomènes physiques, chimiques,... associés à un phénomène dangereux concerné	<i>Effects</i>	MEDD RT
Éléments vulnérables	Éléments tels que les personnes, les biens ou les différentes composantes de l'environnement susceptibles, du fait de l'exposition au danger, de subir, en certaines circonstances, des dommages	<i>Targets</i>	MEDD RT
Enjeux	Éléments tels que les personnes, les biens ou les différentes composantes de l'environnement susceptibles, du fait de l'exposition au danger, de subir, en certaines circonstances, des dommages	<i>Targets</i>	MEDD RT
Evaluation de l'exposition	Processus d'estimation ou de mesure de l'intensité, de la fréquence et de la durée de l'exposition à un agent. Idéalement, ceci décrit les sources, voies, ampleur, durée et cadre de l'exposition, les caractéristiques de la population exposée et les incertitudes dans l'évaluation	<i>Exposure assessment</i>	EEA
Evaluation des dangers	Evaluation des caractéristiques conduisant à des effets indésirables qu'une substance est intrinsèquement capable de provoquer	<i>Hazard assessment</i>	ADEME

<b>Mot français</b>	<b>Définition</b>	<b>Equivalent anglais</b>	<b>Source</b>
<b>Evénement</b>	<b>Fait aléatoire modifiant l'évolution du complexe de stockage.</b>	<b><i>Event</i></b>	
Exposition	Contact d'une cible avec un agent chimique ou physique pendant une certaine période. L'exposition est quantifiée par la quantité de substance entrant en contact avec les barrières d'échange de l'organisme et disponible pour une éventuelle absorption	<i>Exposure</i>	MEDD SP
Fuite	En matière de stockage de carbone, échappement d'un fluide injecté hors du lieu de stockage.	<i>Leakage</i>	GIEC PSC
Gravité	Résulte de la combinaison en un point de l'espace de l'intensité des effets d'un phénomène dangereux et de la vulnérabilité des personnes potentiellement exposées	<i>Gravity</i>	MEDD RT
<b>Impact</b>	<b>Effet d'une activité ou d'un produit sur l'homme ou l'environnement</b>	<b><i>Impact</i></b>	
Impact environnemental	Toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des activités, produits ou services d'un organisme	<i>Environmental impact</i>	ADEME
Intensité des effets d'un phénomène dangereux	Mesure physique de l'intensité du phénomène	<i>Intensity</i>	MEDD RT
Phénomène dangereux	Libération d'énergie ou de substance produisant des effets susceptibles d'infliger un dommage à des cibles vivantes ou matérielles, sans préjuger l'existence de ces dernières	<i>Hazardous phenomenon</i>	MEDD RT
<b>Processus</b>	<b>Phénomène physique, chimique, biologique de surface ou de subsurface participant à la dynamique du complexe de stockage.</b>	<b><i>Process</i></b>	



<b>Mot français</b>	<b>Définition</b>	<b>Equivalent anglais</b>	<b>Source</b>
Réduction du risque	Actions entreprises en vue de diminuer la probabilité ou les conséquences négatives (ou dommages) associés à un risque, ou les deux	<i>Risk mitigation</i>	MEDD RT
Risque	Possibilité de survenance d'un dommage résultant d'une exposition aux effets d'un phénomène dangereux. = Combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences. = Combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité.	<i>Risk</i>	MEDD RT
Scénario	Evolution possible d'un complexe de stockage de CO <sub>2</sub> .	<i>Scenario</i>	
Scénario de référence	Evolution attendue du complexe de stockage, correspondant aux caractéristiques et aux plages de valeurs des paramètres régissant les processus d'évolution les plus probables.	<i>Reference scenario</i>	
Scénario d'évolution altérée	Evolution possible, mais peu probable, du complexe de stockage, correspondant à des caractéristiques ou valeurs de paramètres hors des domaines anticipés, ou à l'occurrence d'événements incertains.	<i>Altered evolution scenario</i>	
Scénario de risque	Enchaînement d'événements conduisant à l'exposition d'éléments vulnérables aux effets d'un phénomène dangereux. Il s'agit donc de la combinaison : - d'événements provoquant l'occurrence d'un phénomène dangereux et - d'événements et processus décrivant les voies et modes d'exposition des enjeux.	<i>Scenario of risk</i>	
Surveillance	Combinaison d'observations et de mesures de la performance d'un plan, d'un programme ou d'une mesure, et sa compatibilité avec la politique environnementale et la législation	<i>Monitoring</i>	EEA

<b>Mot français</b>	<b>Définition</b>	<b>Equivalent anglais</b>	<b>Source</b>
Voie d'exposition	Voie de passage d'une substance de la source vers une cible. Une voie d'exposition inclut une source, un point d'exposition et une voie d'administration. Si le point d'exposition diffère de la source, il existe également un mécanisme de propagation et un compartiment intermédiaire où le polluant est transporté	<i>Exposure pathway</i>	MEDD SP
Vulnérabilité	Aptitude d'un milieu, d'un bien, d'une personne à subir un dommage à la suite d'un événement, naturel ou anthropique	<i>Vulnerability</i>	MEDD SP

## **Annexe 2**

### **Liste des participants à l'atelier du 10 septembre 2007**



*Service Aménagement et Risques Naturels :*

- O. Bouc (animateur)
- J. Rohmer

*Service Eau :*

- P. Audigane
- I. Czernichowski
- P. Durst
- M. Gastine
- I. Gaus
- N. Jacquemet
- C. Kervevan
- J. Lions

*Service Environnement industriel et Procédés Innovants :*

- F. Blanchard
- D. Fauconnier

*Service Géologie :*

- S. Grataloup



## **Annexe 3**

### **Liste des participants à l'atelier du 8 janvier 2008**





## **BRGM**

### *Service Aménagement et Risques Naturels :*

- O. Bouc (animateur)
- H. Fabriol
- T. Le Guenan
- J. Rohmer
- D. Seyedi
- S. Sy

### *Service Eau :*

- L. André
- P. Audigane
- M. Azaroual
- M. Gastine
- N. Jacquemet
- C. Kervevan
- J. Lions
- G. Picot
- F. Wertz

### *Service Environnement industriel et Procédés Innovants :*

- G. Bellenfant
- F. Blanchard
- D. Fauconnier

### *Service Géologie :*

- D. Bonijoly
- A. Fabbri
- S. Grataloup

### *Département Géothermie :*

- A. Blaisonneau

### **Armines / Ecole des Mines de Paris, Centre de Géosciences**

- J-P. Chilès

- S. Séguret

**Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel :**

- P. Renard

**TOTAL :**

- M. Lescanne
- G. Mouronval





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