

manière à créer son propre chemin de migration à travers le recouvrement par le biais de fractures ouvertes.

D'autre part, le principal impact d'une fuite concentrée de CO₂ en surface est de stimuler la végétation puis, dès lors que la teneur en CO₂ dépasse 20 à 30% dans l'atmosphère, de la faire dépérir sur une petite superficie. Sur la Figure 16, on voit bien apparaître une auréole de dépérissement de la végétation autour du point d'émission de CO₂ mais on constate également que la croissance de la végétation redevient normale à quelques mètres de distance seulement.



Figure 16 : Impact en surface d'une fuite naturelle de CO₂ (Lombardi 2007)

Il existe également une dizaine d'analogues naturels en France, essentiellement localisés dans le sud-est de la France (voir Figure 17) ainsi que dans le Massif Central (notamment le site de Sainte-Marguerite dans le Puy-de-Dôme). Certains sont captés par forages profonds comme le site de Montmiral dans la Drôme. De même, les nombreuses sources carbo-gazeuses de notre territoire sont également l'indice de zones de production de CO₂ avec accumulation naturelle dans un aquifère profond, le plus souvent en relation avec la surface par le biais d'accidents tectoniques (failles).

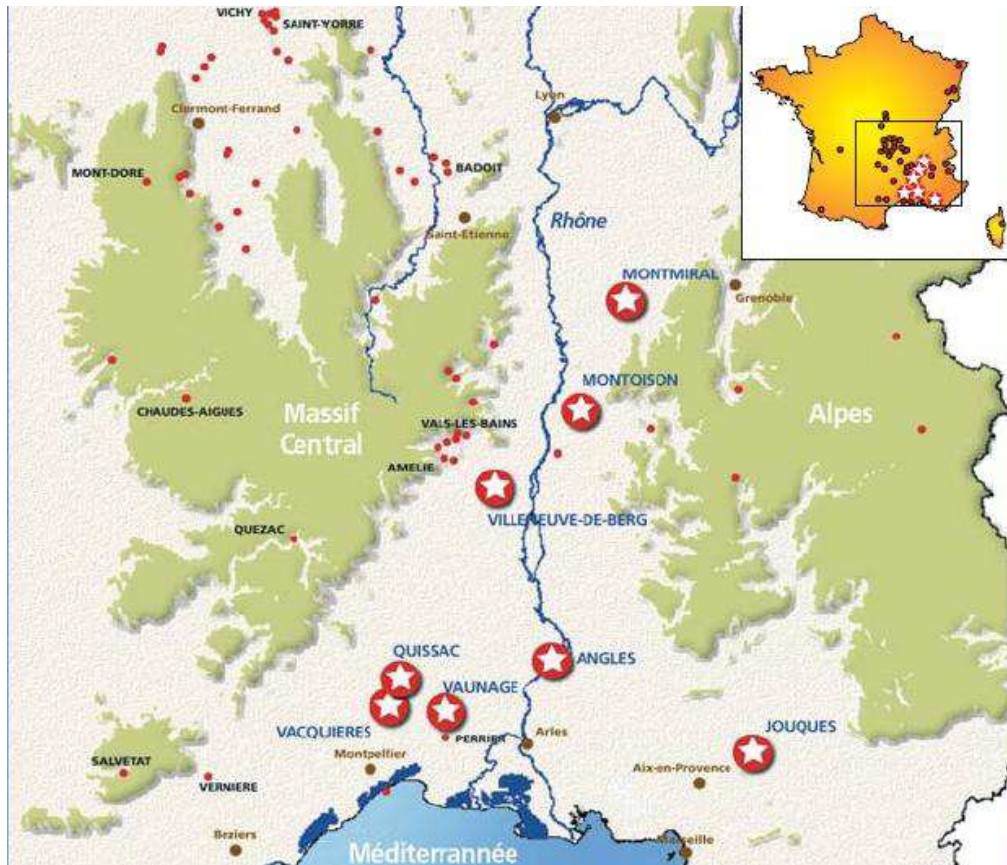


Figure 17 : Localisation des principaux analogues naturels de stockage de CO₂ en France (CO₂GeoNet, 2008)

Bien que nombre de ces sites soient exploités par forages profonds, Lewicki et al. (2006) font remarquer que les fuites résultant de leur exploitation industrielle sont assez peu fréquentes et que la plupart d'entre elles proviennent des phases de creusement des forages d'exploitation : peu d'entre elles résultent de l'abandon de ces forages après la phase d'exploitation. Cependant, ces informations sont biaisées par le faible retour d'expérience dont nous disposons sur le comportement des puits après l'abandon (quelques années à dizaines d'années au maximum) et par l'absence de généralisation des mesures de surveillance des sites après leur abandon. De ce fait, ces sites ne peuvent servir d'analogues aux futurs sites de stockage géologique de CO₂ que dans le court terme et le moyen terme.

Que ce soit dans des analogues naturels en exploitation ou dans des stockages souterrains de gaz autres que du CO₂ (gaz naturel par exemple), il existe des exemples de fuites en surface par les forages. Lewicki et al. (2006) ont ainsi recensé quelques cas types dont les fuites atteignent la surface sous la forme de geysers de gaz ou de fuites diffuses à travers le sol, les plans d'eau ou les fractures du terrain (voir Tableau 6).

L'importance et les conséquences des fuites dépendent fortement du site étudié voire même - à l'intérieur d'un même site - du secteur considéré. Lewicki et al. (2006) ont synthétisé les principales caractéristiques des fuites observées en surface au droit des sites analogues précédemment décrits (Tableau 6) : leur intensité varie en général de

10 à 1500 tonnes/jour¹⁴ et la surface affectée peut atteindre 500 000 m². Plusieurs cas de décès ont été rapportés mais la plus grande catastrophe liée à une fuite de CO₂ résulte du dégazage naturel brutal du lac Nyos au Cameroun (1700 morts).

Bien que les caractéristiques des fuites soient spécifiques à chaque réservoir, il est possible d'identifier quelques types majeurs d'événements à l'origine de fuites :

- la survenue d'événements naturels qui stimulent les fuites comme un séisme ou une activité volcanique ;
- l'existence de zones fracturées ou de failles permettant des relations directes entre le réservoir souterrain et la surface ;
- la présence de forages mal construits ou mal abandonnés qui peuvent devenir les vecteurs de fuites importantes.

¹⁴ excepté le cas exceptionnel du Lac Nyos (Cameroun) avec 240 000 tonnes dans une journée

Site	Geographic setting/land use	Magnitude of surface CO ₂ or CH ₄ leakage	Consequences of release	Monitoring and remedial measures
A1. Mammoth Mountain, CA USA (N)	Recreational area (US national forest, ski resort)	~250 t day ⁻¹ from 480,000 m ² area	Formation of tree kill areas, one person with symptoms of asphyxiation, four people killed	Temporal and spatial monitoring of CO ₂ concentrations and fluxes in tree kill areas; measurements of groundwater chemistry; public education
A2. Solfatarata, Italy (N)	Recreational area (private park/campground) surrounded by urban area	1,500 t day ⁻¹ from 0.5 km ² area	No vegetation in degassing area	Temporal and spatial monitoring of soil CO ₂ fluxes, monitoring of heat release; monitoring of fumarole gas chemistry; seismic and deformation monitoring; public education
A3. Albani Hills, Italy (N)	Urban area	74 t day ⁻¹ as surface gas emissions (61,000 m ² area) and 506 t day ⁻¹ as dissolved CO ₂ in shallow ground water	High CO ₂ concentrations in homes; deaths of livestock (1999 event); past human deaths	Measurements of soil CO ₂ fluxes and concentrations; monitoring groundwater chemistry; identification of residential areas at risk, development of zoning bylaws, and development of public education programs
A4. Clear Lake, CA, USA (N)	Rural	~1 t day ⁻¹	Four people killed	Measurements of soil and vent CO ₂ fluxes and concentrations, mineral pool closed to public
A5. Latera caldera, Italy (N)	Rural, small towns	Unknown	Vegetation stress or kill	Soil gas concentration surveys, hazard mapping
A6. Mátradereske, Hungary (N)	Rural area, village	Average CO ₂ flux ~200-400 g m ⁻² day ⁻¹ (total degassing area unknown)	High CO ₂ concentrations in homes, death of several people	CO ₂ detection and control devices installed in homes, demolition of homes with hazardous CO ₂ levels, public education
A7. Dieng, Indonesia (N)	Rural	Unknown	~145 people killed, vegetation stress or kill	Vent gas chemical analysis
A8. Southern Negros, Philippines	Rural	Unknown	Vegetation stress or kill, animals killed	Vent and diffuse gas chemical analysis
A9. Rabaul, Papua New Guinea	Rural	Unknown	Three people killed, birds killed	NA
A10. Lakes Monoun and Nyos, Camaroon (N)	Rural, villages	Nyos: 240,000 t CO ₂ in eruptive event	Loss of human (~1800 combined) and animal life (e.g., thousands of cattle),	Controlled lake degassing using pipes, monitoring of lake chemistry, public education
A11. Laacher See, Germany (N)	Rural	~14 t day ⁻¹	NA	Monitoring CO ₂ fluxes and concentrations from lake surface and shore
A12. Paradox Basin, UT, USA (N)	Rural	Soil CO ₂ fluxes up to 100 g m ⁻² day ⁻¹ ; total emission rate unknown	NA	Measurements of soil CO ₂ fluxes; monitoring groundwater chemistry
A13. Florina Basin, Greece (N)	Rural, small towns	Unknown	NA	Measurements of groundwater chemistry
B1. Sheep Mountain, CO, USA (I)	Rural	Unknown	NA	Dynamic injection of drag-reduced brine followed by mud
B2. Paradox Basin, UT, USA (I)	Rural	Crystal Geyser: ~33 t day ⁻¹	NA	Measurements of atmospheric CO ₂ concentrations
B3. Florina Basin, Greece (I)	Rural, small towns	Unknown	Death of one person	Leakage area closed off to people
B4. Torre Alfina geothermal field, Italy (I)	Rural	~25,000 t	NA	Cementation of exploration well; borehole installation to focus subsurface gas flow and vent CO ₂ at height in atmosphere; atmospheric CO ₂ concentration monitoring
B5. Travale geothermal field, Italy (I)	Rural	Unknown	NA	Well allowed to discharge fluid, monitoring of fluid temperature, pressure, and chemistry
B6. Yaggy gas storage facility, KA, USA	Small town	Unknown	Gas explosions, two people killed, buildings damaged	Geophysical monitoring, wells plugged
B7. Leroy gas storage facility, WY, USA	Rural	~1.8 × 10 ⁷ m ³	NA	Tracer tests, decreased injection pressures
B8. Kingfisher, OK, USA	Rural	Unknown	NA	Geophysical, geochemical monitoring. Well plugged.

NA not analysed

Tableau 6 : Caractéristiques et conséquences de quelques fuites naturelles et artificielles de gaz (Lewicki et al., 2006)

En France, sur l'analogue naturel de Sainte-Marguerite, Pokryszka & Charmoille (2008) ont mis en évidence à l'INERIS des variations spatio-temporelles très importantes de flux de CO₂ en surface (voir également Battani et al., soumis). Elles se marquent non seulement d'un secteur à l'autre mais aussi, pour un secteur donné, d'une année sur l'autre (Figure 18). Ce site est un réservoir de CO₂ d'origine volcanique profonde et des variations très significatives des flux de CO₂ mesurés en surface ont été mises en évidence d'une année sur l'autre sans qu'une hypothèse crédible sur l'origine de ces variations ait pu être émise et validée. Les flux mesurés varient ainsi d'un minimum relativement stable à $2,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (ou $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) jusqu'à un maximum variant de $5 \cdot 10^{-6}$ à $46 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ suivant l'année considérée¹⁵.

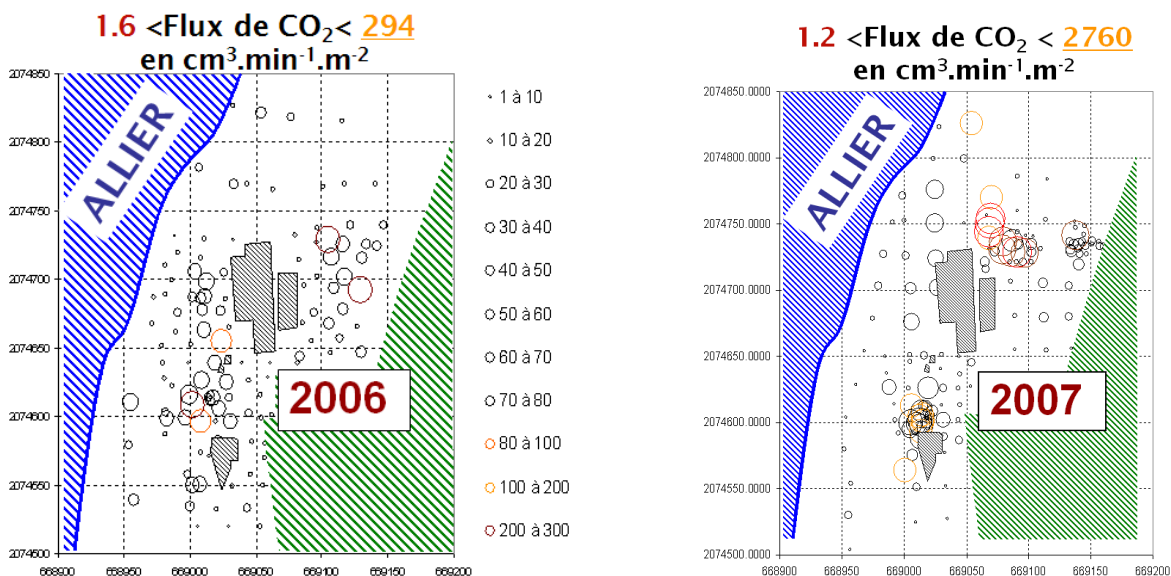


Figure 18 : Variations d'intensité du flux de CO₂ en surface sur le site analogue naturel de Sainte-Marguerite (Pokryszka & Charmoille, 2008)
Nota : $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} = 6 \cdot 10^7 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

En outre, au droit des sites où une surveillance de la chimie des eaux souterraines a été mise en place, (cf. analogues A1, A3, A11 et A12 du Tableau 6), des modifications ont été observées suite à des fuites de CO₂ : il s'agit d'une acidification des eaux souterraines et d'interactions avec la roche encaissante. Mais les eaux sont restées potables dans tous les cas.

Abou Akar et al. (2005) ont cependant constaté, au droit du site de Weyburn (Canada), « une certaine corrélation entre le flux de CO₂ et la teneur en Sr [strontium] et B [bore] » de l'eau souterraine. De même, en posant des capteurs à charbons au droit de l'analogue naturel de Vorderrhön (Allemagne), le BRGM a montré que « les composés métalliques de minéralisations en profondeur peuvent être transportés vers la surface » par un flux de CO₂. Ainsi, le rapport systématique entre les anomalies sol-gaz (CO₂, hélium ou radon) et le contenu métallique anormal emprisonné par le charbon actif démontre que les signaux anormaux en métal repérés en surface sont liés au flux de gaz naturel. La capacité de ces gaz à se déplacer vers la surface

¹⁵ les mesures sont toujours en cours en 2009.

dépend des types de roches et particulièrement de la présence de voies préférentielles, telles que les fractures ».

Lafortune (2007) a étudié la contamination d'un aquifère superficiel au droit de l'analogue naturel de Montmiral dans la Drôme. Les fuites dues au mauvais colmatage d'un ancien forage d'exploitation se répercutent dans l'aquifère jusqu'à une quinzaine de kilomètres de distance mais seulement sous la forme d'une faible perturbation du rapport isotopique helium/néon (Figure 19).

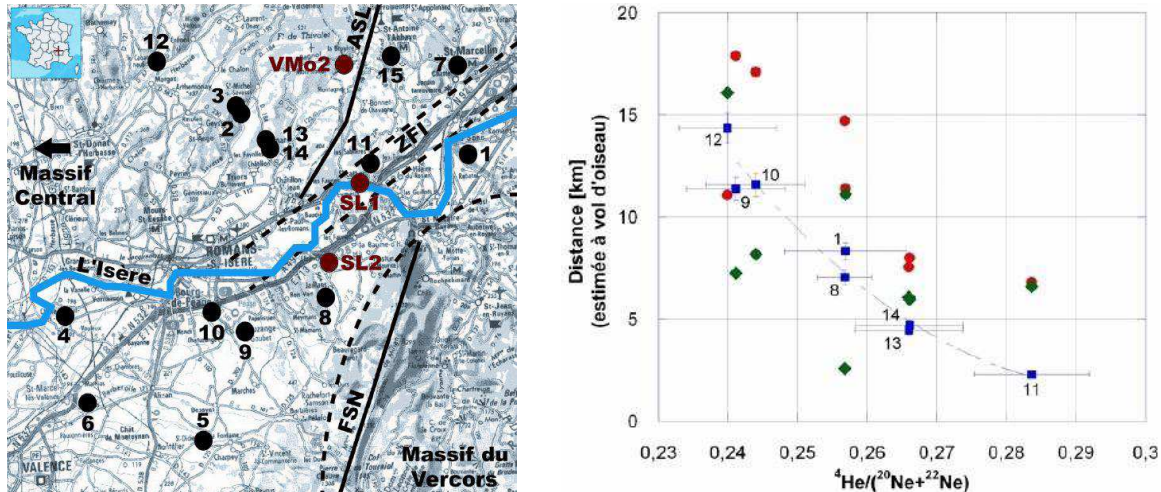


Figure 19 : Localisation du puits fuyard (SL1) et impact isotopique d'une fuite de CO₂ sur l'aquifère superficiel près de Montmiral (Lafortune, 2007)

Enfin, un autre intérêt des analogues naturels est l'étude des conditions à long terme de stockage du CO₂ dans le sous-sol (BRGM, 2005). Les méthodes géophysiques et l'analyse des carottes des roches du réservoir et du recouvrement rendent en effet possible une meilleure compréhension des interactions chimiques et physiques à long terme entre le gaz stocké et les roches encaissantes.

3. IDENTIFICATION DES RISQUES LIES AU STOCKAGE GEOLOGIQUE DU CO₂

3.1 GENERALITES ET DEFINITIONS SUR L'ANALYSE DES RISQUES

L'évaluation et la maîtrise des risques, au cours de l'injection ou après la fermeture du site, sont des éléments clefs pour envisager le développement à l'échelle industrielle des sites d'injection et de stockage géologique du CO₂.

Rappelons en premier lieu la définition du risque : selon le guide ISO/CEI 73, il s'agit de la « combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences ». Classiquement, on mesure donc le risque selon deux dimensions : d'une part, la gravité (ou sévérité¹⁶) des conséquences et, d'autre part, la probabilité d'occurrence.

Précisons qu'il s'agit là d'une définition très technique du risque, qui ne doit pas être considérée comme une réponse absolue au « sentiment de sécurité » dont notre société exprime le besoin de manière plus générale. Elle est cependant utilisée de manière très courante pour gérer la sécurité des personnes et des biens ou la protection de l'environnement de la façon la plus objective possible : dans le domaine du risque technologique (ou sécurité industrielle), dans le domaine du risque naturel (inondations, séismes, etc.) ou dans le domaine de l'impact environnemental et sanitaire (rejets industriels, stockages de déchets, etc.)

Dans le cas particulier de la filière CCS, il est légitime et nécessaire d'analyser la chaîne dans son ensemble, avec ses quatre maillons –captage, transport, injection stockage– à la fois pour la sécurité et pour l'impact environnemental ou sanitaire. Pour cela il faut considérer plusieurs échelles de temps – depuis le court terme, à savoir la phase de conception et d'exploitation, jusqu'au long terme à l'horizon d'au moins un millier d'années. Il semble légitime d'appliquer (ou de développer si besoin) une méthode d'analyse structurée et systématique, qui s'appuie à la fois sur la pratique du monde industriel et sur celle des stockages souterrains (notamment le confinement des déchets), en mettant en avant les MMR ou « barrières de sécurité ».

Nous nous intéressons aux impacts sur les deux « **cibles** » que sont l'homme et l'environnement. Une cible donnée est susceptible d'être impactée par des « **phénomènes impactants** »¹⁷, lesquels se traduiront par des « dommages » (ou conséquences). Il s'agira ici de :

- i) l'impact sanitaire pour l'homme,
- ii) la contamination des aquifères superficiels susceptibles d'être exploités,
- iii) les impacts possibles sur les écosystèmes.

En pratique, un phénomène impactant correspond à la libération, dans un compartiment donné de l'environnement, d'un « **potentiel de danger** » : dans notre cas il s'agit avant tout du CO₂, mais également de la saumure potentiellement chargée en éléments traces toxiques - ces éléments pouvant être d'une part les impuretés du

¹⁶ Le terme « gravité » renvoie généralement à un impact immédiat sur l'homme ; ici, ce terme englobe également les impacts sur l'environnement et les impacts à plus long terme – et on peut lui préférer le terme « sévérité » qui correspond mieux à la traduction en anglais (severity).

¹⁷ Ce terme de « phénomène impactant » est proposé ici, par parallélisme avec celui de « phénomène dangereux » qui est utilisé dans les études de dangers pour les risques technologiques, avec la volonté d'inclure les impacts à long terme et/ou les impacts environnementaux.

fluide injecté, d'autre part les métaux lourds ou actinides mis en solution dans le sous-sol.

Chaque « phénomène impactant » peut avoir plusieurs causes (ou événements initiateurs) possibles, et chaque cheminement depuis une cause donnée, incluant les événements intermédiaires, est appelé « **scénario de risque** ».

Nous utiliserons également ci-après la notion d'« **aléa** » : il s'agit d'un événement, survenant en un lieu donné, caractérisé par son **intensité** et par sa **probabilité** d'occurrence (laquelle inclut la probabilité de ses différentes causes). L'aléa est considéré indépendamment de la présence des cibles potentiellement impactées, et donc de la gravité réelle des impacts : en fait, c'est la combinaison de l'aléa et de la **vulnérabilité** de la cible qui donne une mesure du risque.¹⁸

L'objet de « l'analyse des risques » est de permettre d'identifier les scénarios possibles puis de les caractériser ou de les mesurer (en probabilité et gravité notamment), de la manière la plus objective possible. De manière schématique, l'analyse de risques est donc un processus qui doit permettre de répondre à quatre questions (Kirchsteiger, 1999) :

- a) Qu'est-ce qui peut mal tourner ?
- b) Quelle est la probabilité que cela se produise ?
- c) Si cela se produit, quelles en seront les conséquences (donc la gravité) ?
- d) Quelle confiance peut-on accorder au résultat obtenu ?

La réponse à la question (a) consiste à identifier les scénarios de risques, elle se fonde sur les avis d'expert et sur la connaissance des phénomènes possibles et déjà observés, c'est-à-dire le retour d'expérience (accidentologie). Afin de caractériser plus précisément ces risques, il faut répondre aux questions (b) et (c), ce qui nécessite d'identifier les causes possibles de dysfonctionnement et leurs conditions. Pour la question (c), on utilise le plus souvent un modèle numérique, qui va permettre d'estimer l'intensité du phénomène : en couplant cette intensité à la vulnérabilité de la cible, on peut en estimer la gravité. La prise en compte de la question (d) appelle au traitement - formel ou informel - des incertitudes, qui sort du cadre du présent rapport.

Enfin, cette analyse doit aider à proposer des améliorations, par le choix de « mesures de maîtrise des risques » (MMR) appropriées, qui vont idéalement empêcher le scénario de se dérouler, ou en réduire fortement la probabilité ou bien la gravité.

3.2 ANALYSE DE L'ACCIDENTOLOGIE

La première démarche permettant d'appréhender la nature et l'importance des aléas qui peuvent survenir sur un site de stockage géologique de CO₂ consiste à étudier l'accidentologie recensée dans ce domaine ou dans des domaines proches.

¹⁸ Ceci revient à donner définition plus complète de la mesure du risque :

$$\text{Risque} = 1.\text{Probabilité} \times 2.\text{Intensité} \times 3.\text{Vulnérabilité de la cible.}$$

Au sein de cette relation : $1.\text{Probabilité} \times 2.\text{Intensité} = \text{Aléa}$ (donc $\text{Risque} = \text{Aléa} \times 3.\text{Vulnérabilité}$), et par ailleurs : $2.\text{Intensité} \times 3.\text{Vulnérabilité} = \text{Gravité}$ (donc $\text{Risque} = 1.\text{Probabilité} \times \text{Gravité}$, comme précisé dans la définition initiale).

On peut par ailleurs noter que le concept d'aléa est également utilisé d'une manière différente, spécifique à la gestion en France des risques de nature accidentelle (formalisée dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Miniers / Naturels / Technologiques) : on ne parle plus d'un aléa comme d'un événement, mais d'une notion spatialisée destinée à être cartographiée : en un point donné du plan, l'aléa est la probabilité qu'un phénomène d'une intensité donnée y soit observé.

Dans le domaine du stockage géologique du CO₂, l'accidentologie est pour l'instant peu fournie, voire inexistante, du fait du faible nombre de stockages (ou pilotes industriels) opérationnels dans le monde et du fait de leur faible durée d'existence à ce jour : le site de stockage géologique de CO₂ le plus ancien est en effet celui de Sleipner (N) qui ne date que de 1996.

Dans le cadre du projet PICOREF l'INERIS a effectué une recherche sur la base des données française ARIA du Ministère en charge de l'Ecologie, qui recense les incidents et accidents industriels (Roux et al, 2009) : y sont rassemblés les cas d'accidents documentés dans la littérature concernant les stockages de gaz. Ici nous reprenons simplement les enseignements de cette recherche, en l'illustrant avec des éléments qui nous semblent constituer un retour d'expérience intéressant pour l'analyse des aléas liés au stockage géologique du CO₂.

Pour des activités similaires du type transport et stockage de produits chimiques et combustibles gazeux, on trouve un exemple de fuite notable en 2001 à Hutchinson aux Etats-Unis : du gaz, provenant d'un stockage souterrain en site naturel, s'est infiltré à travers les anfractuosités du terrain et les failles et a provoqué l'éruption de plusieurs geysers. Cependant, Cela montre que, dans des conditions spécifiques, des phénomènes d'occurrence soudaine peuvent avoir lieu, bien qu'étant initiés par des mécanismes dans le sous-sol, à cinétique plutôt lente.

En France, une seule éruption de puits dans le contexte d'un stockage souterrain a été décrite ; elle est intervenue en 1989 lors d'une intervention technique sur un puits d'exploitation du stockage de Chémery (41). L'intervention consistait en un remplacement de crépine, organe destiné à retenir les particules solides, essentiellement du sable. Un phénomène de pistonnage a entraîné l'éruption du puits, prenant la forme d'une fuite importante de gaz naturel sous pression (150 000 m³/h pendant 50h). L'intervention d'une société spécialisée a permis d'arrêter la fuite après 2 jours.

La grande majorité des accidents recensés concernent les installations de surface, à savoir : i) des ruptures de canalisations dues à des chocs externes (exemple : accident de chantier) ou à de la corrosion, ii) des incendies ou autres accidents sur les équipements connexes (de type compresseurs, local électrique, etc.) et iii) des fuites de gaz - qui s'enflamme ou non - sur les postes de chargement ou de déchargement, principalement suite à la rupture de raccords souples ou d'éléments de bras articulés.

L'IEA (2006) a également recensé 9 incidents avant 1970 et 8 sur la période 1980-2004 dans les sites de stockages souterrains de gaz naturel dont un dans un stockage en aquifère et un en gisement épuisé. D'après Bouc et Auclair (2007), les fuites catastrophiques sont plutôt liées aux cavités minées alors que celles survenant dans les réservoirs poreux sont plutôt diffuses. Par ailleurs, ces accidents sont surtout liés à des défaillances ou à des pertes de contrôle des puits.

Sans prétendre à une analyse précise de chaque cas, qui dépasse l'objectif de ce document, on peut souligner que la typologie des accidents ainsi relevés consiste essentiellement en :

- des éruptions de gaz en surface (phénomène appelé « blowout ») ;
- des pollutions d'eaux souterraines ou superficielles.

Il n'y a pas de cas recensés de mouvements critiques au niveau de la surface du sol, de type séisme, induit par le stockage¹⁹.

En ce qui concerne les causes ou facteurs ayant participé à l'occurrence de ces accidents et qui sont pertinents pour les stockages géologiques de CO₂, on relève principalement les suivants :

- une dégradation (voire une absence) du cuvelage et/ou de la cimentation des puits ;
- une dégradation de la couverture ;
- un défaut d'étanchéité au niveau des vannes régulatrices du débit de gaz.

En dehors du domaine industriel, des accidents d'origine naturelle peuvent également se révéler riches d'enseignement pour le stockage géologique du CO₂. C'est le cas, par exemple, de l'accident qui s'est produit au lac Nyos au Cameroun en 1986 (Bouc *et al.*, 2006) : 240 000 tonnes de CO₂ d'origine profonde se sont brutalement échappées de ce lac volcanique et se sont dispersées sur 14 km aux alentours. L'accumulation du CO₂ dans les vallées confinées a provoqué la mort par asphyxie de 1700 personnes et de dizaines de milliers d'animaux.

Cet échappement de CO₂ est cependant à comparer aux 11,5 MtCO₂ émises lors de l'éruption du volcan Pinatubo, survenue aux Philippines en 1991 : du fait de la dispersion de ce gaz dans l'atmosphère, aucun problème de ce type n'a été observé. En accord avec Benson *et al.* (2002), on constate donc que les problèmes posés par un échappement naturel de CO₂ semblent plus dépendre de la nature du phénomène, en particulier de la dispersion du gaz, que du volume relâché.

3.3 LES PRINCIPAUX PHENOMENES REDOUTES ET LEURS MECANISMES INITIATEURS

En phase d'injection (objet du présent rapport), les risques seront principalement limités au puits d'injection et au « proche-puits », c'est-à-dire à la portion du réservoir située dans l'environnement rapproché du puits d'injection (nous ne traitons pas les phénomènes accidentels propres aux installations de surface, telles les canalisations). En phase d'abandon, les risques concerneront l'ensemble du réservoir et pourront impliquer d'éventuels ouvrages présents à une certaine distance (puits de contrôle, autres puits et forages profonds comme ceux exploitant, par exemple, les gîtes géothermiques) voire les compartiments les plus superficiels de la géosphère.

Les principaux « phénomènes impactants » (au sens de la définition du 3.1) liés à la phase d'injection sont :

- les éruptions de CO₂ (ou fuites massives),
- les fuites plus diffuses ainsi que les contaminations de compartiments de l'environnement,
- les phénomènes de sismicité induite et les mouvements de terrain.

En amont, les principaux mécanismes possibles (causes) de déclenchement de ce type de phénomènes peuvent être regroupés en deux grandes catégories, et sont présentés ci-après :

1. la corrosion des éléments constitutifs des puits d'injection : cimentation, tubage, cuvelage, équipements ;

¹⁹ toutefois des résultats récents mais non encore publiés feraient état d'une surrection des terrains de l'ordre du centimètre au droit du site d'injection de CO₂ de In Salah en Algérie

2. les mécanismes de perturbations THMC, voire bactériologiques, du réservoir dans la zone proche de la base du puits - cette zone renfermant essentiellement du CO₂ à l'état supercritique au cours de la phase d'injection.

Ces principaux mécanismes seront davantage détaillés aux chapitres 4 et 5 afin de permettre une première appréciation de leur occurrence et de leur intensité²⁰.

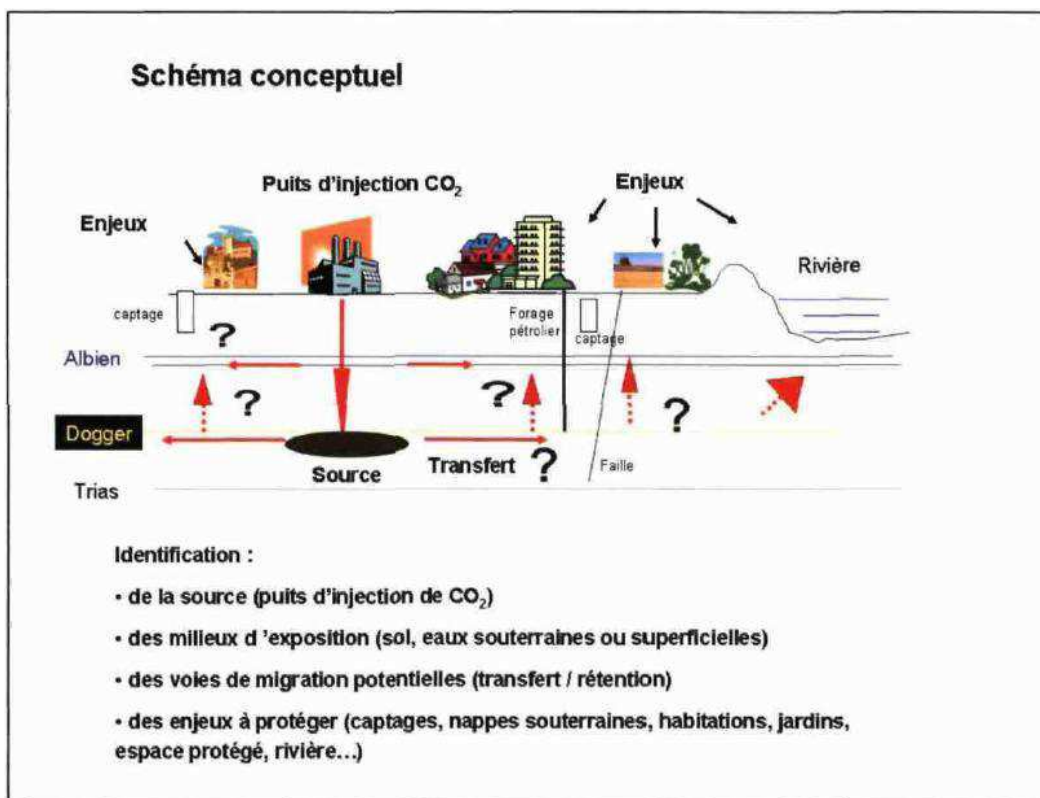


Figure 20 : Représentation schématique des éléments à prendre en compte pour l'identification des enjeux au niveau d'un site de stockage géologique de CO₂ (Bouc et al. 2006)

3.3.1 MECANISMES LIES AUX PUIITS D'INJECTION

Les puits d'injection de CO₂ sont à ce jour d'une conception très proche de celle des puits d'exploitation que l'on peut trouver dans le contexte des stockages souterrains de gaz naturel (voir Figure 47, page 131).

Le risque de fuite dans un puits d'injection de CO₂ dépend de plusieurs facteurs :

- l'adéquation globale de l'architecture du puits à l'environnement géologique, c'est-à-dire son adaptation en termes de protection des horizons les plus vulnérables ;
- l'étanchéité à long terme de chaque élément constitutif du puits. La Figure 21 schématise les différentes possibilités de fuites le long d'un puits abandonné, en distinguant celles qui apparaissent dans le ciment, dans le cuvelage

²⁰ c'est-à-dire pour caractériser les aléas correspondants, sans chercher à caractériser la gravité des impacts sur les cibles (environnement, personnes).

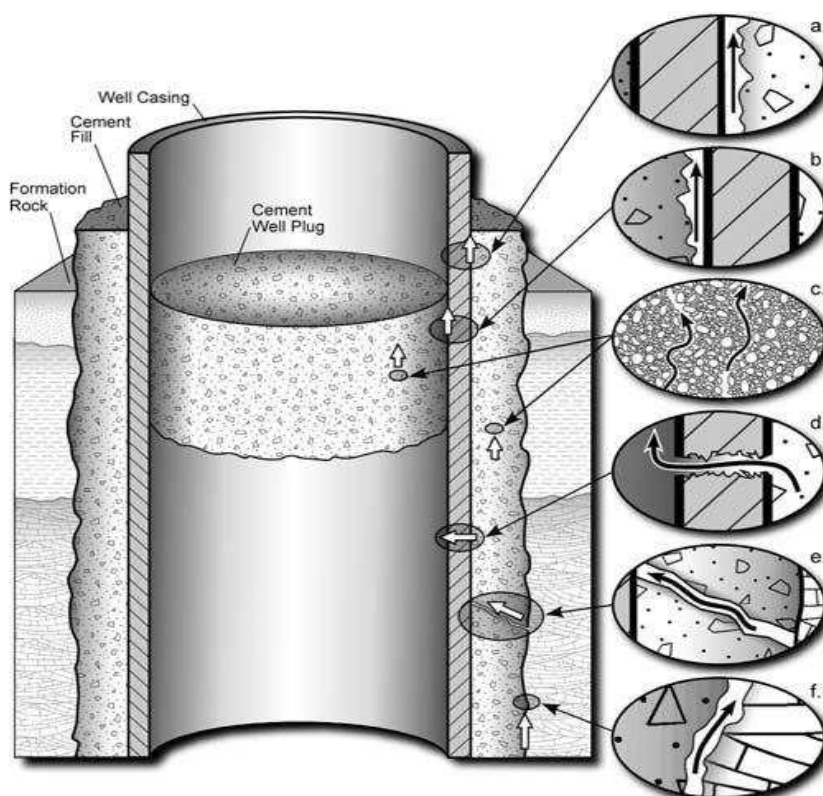
(casing), dans le bouchon, dans la roche ainsi qu'aux interfaces entre ces éléments²¹.

Les valves en tête de puits et les collerettes doivent être adaptées aux conditions plus contraignantes de l'injection de CO₂ afin de résister à des pressions élevées et à l'environnement corrosif dû au CO₂.

Les technologies à mettre en œuvre ont déjà été développées dans le cadre des opérations de récupération assistée d'hydrocarbures (EOR et EGR) et d'injection de gaz acide. En particulier, des puits horizontaux injecteurs de CO₂ ont déjà été mis en œuvre dans le cadre du stockage de Weyburn au Canada ou de Sleipner en Norvège.

D'une façon générale, les équipements employés doivent présenter les particularités suivantes (Jarrel et al., 2002):

- être en adéquation avec les pressions, volumes et températures maximales envisagées,
- être composés de matériaux compatibles avec l'injection de CO₂.



Légende : fuites entre le ciment et le cuvelage acier (a et b), à travers le ciment (c et e), à travers le cuvelage (d), entre le ciment et la roche (f).

Figure 21 : Présentation de voies de fuites dans un puits d'injection de CO₂ abandonné (Celia et al., 2004)

²¹ En particulier, il convient de ne pas négliger l'interface roche-ciment, qui constitue un chemin d'écoulement privilégié du fait de l'endommagement des parois du puits induit, d'une part, par le creusement de celui-ci et renforcé, d'autre part, par les sollicitations (variations de pression et de température) qui s'appliquent au puits au cours de la phase d'injection (Roegiers, 2002 ; Heffer, 2002 ; Oldenburg, 2007).

Le CO₂ devient corrosif en milieu humide. Or l'eau sera presque toujours présente dans un site de stockage géologique de CO₂, soit à l'état d'impureté présente dans le CO₂ injecté, soit dans la roche réservoir qu'il s'agisse bien sûr d'un aquifère salin ou d'un gisement épuisé d'hydrocarbures, voire de veines de charbon (qui peuvent renfermer jusqu'à 5% d'humidité). Dans ce contexte corrosif, seuls les aciers inoxydables sont alors utilisables (bien que tous les aciers dits « inox » ne soient pas inoxydables à long terme). Cotiche et al. (2007), cités dans PICOREF (2007), ont montré, sur le site de St-Martin-de-Bossenay, qu'un CO₂ contenant plus de 100 ppm d'eau était susceptible de corroder l'acier au carbone généralement employé pour les tubages par formation d'acide carbonique. L'utilisation d'un acier inoxydable avec 13% minimum de teneur en chrome est cependant possible (bien qu'elle augmente le coût d'investissement d'un facteur 3,5 à 4).

En ce qui concerne les ciments, une étude bibliographique réalisée par Cotiche et al. (2007), cités dans (PICOREF, 2007), montre que les matériaux conventionnels utilisés pour la cimentation des tubages des puits de production de pétrole ou de gaz reposent sur des bases de ciment Portland, qui sont connus pour être thermodynamiquement instables et non durables dans des environnements riches en CO₂. En effet, le CO₂, notamment sous forme supercritique et en l'absence d'eau, pénètre dans les pores du béton et se dissout dans l'eau interstitielle qui s'y trouve. Il peut alors réagir avec le ciment et former des carbonates au détriment de l'hydroxyde de calcium (chaux) voir du silicate de calcium hydraté qui assurent la cohésion mécanique du ciment : c'est le phénomène de carbonatation qui commence donc à la surface du béton située en contact avec le CO₂ et se développe sur une certaine épaisseur dite profondeur de carbonatation. Le silicate de calcium hydraté étant le minéral qui compose principalement le ciment des puits, sa transformation minéralogique en carbonates néoformés peut notamment accélérer son processus de dégradation et conduire à son vieillissement prématuré (Jacquement, 2006) . De ce fait, une résistance complète et durable du ciment à la carbonatation du CO₂ ne peut pas être obtenue avec un système constitué de ciment Portland du fait de la présence dans ce ciment d'hydroxyde de calcium. Des études réalisées en laboratoire ou sur des puits montrent que le processus de réaction de carbonatation peut être ralenti en diminuant la proportion de ciment Portland et en ajoutant en contrepartie des additifs qui permettent de réduire la perméabilité du ciment, augmentant ainsi sa densité (Bonijoly et al., 2003 ; Cotiche et al., 2007 ; Carpenter & Gardner, 2008 ; Fabbri et al., 2008). D'autres études montrent également qu'une résistance complète pourrait être obtenue en utilisant un ciment fortement enrichi en alumine qui lui confère alors une résistance aux environnements gazeux corrosifs et aux hautes températures (Barlet-Gouédard et al., 2008).

L'utilisation de ces ciments de nouvelle génération implique de prendre de nombreuses précautions pour leur mise en œuvre notamment en ce qui concerne le stockage des additifs, le mélange des différents composants, la prévention de la contamination lors de leur mise en œuvre, le contrôle de la qualité du produit final, etc.

Enfin, on notera qu'à température ambiante, le CO₂ est compatible avec la plupart des élastomères et matières plastiques utilisées dans l'industrie du forage.

3.3.2 MECANISMES ET EFFETS POTENTIELS LIES AU RESERVOIR

Le champ dit « proche-puits » correspond à la portion du réservoir fortement influencée par la présence d'un puits injecteur. Son extension exacte n'est pas définie et semble dépendre à la fois des conditions d'injection (pression, température, durée, nature du fluide) mais également des caractéristiques intrinsèques du réservoir (porosité, perméabilité, nature de la roche).

Les aléas liés au réservoir d'un stockage géologique de CO₂ peuvent être regroupés en cinq catégories (Damen et al., 2006 ; IPCC, 2006), auxquelles s'ajoute une sixième suggérée par le retour d'expérience récent :

1. Fuite de CO₂ : il s'agit d'une migration du gaz injecté du réservoir vers les formations voisines et éventuellement vers la surface jusqu'à l'atmosphère ;
2. Fuite du gaz natif : l'injection de CO₂ dans des réservoirs contenant du méthane et/ou des alcanes légers (gisements pétroliers épuisés, veines de charbon) peut provoquer la désorption des gaz initialement en place et entraîner ainsi leur fuite, avec des conséquences locales potentielles (contamination des nappes d'eau potables, danger d'accumulation dans les zones confinées telles que des caves, risque explosif...) mais aussi globales (le méthane étant également un gaz à effet de serre) ; la prise en compte des fuites de méthane doit donc être intégrée dans le bilan d'un site de stockage de CO₂ afin d'en déterminer l'impact réel sur la limitation des rejets anthropiques de gaz à effet de serre ;
3. Sismicité induite : l'injection du CO₂ conduit à augmenter la pression du fluide dans le réservoir, ce qui peut conduire à un déséquilibre du champ des contraintes mécaniques, principalement à proximité du puits d'injection (champ proche-puits) ; dans un cas extrême, cela peut provoquer l'apparition d'une fracturation - voire même l'activation de failles – qui se manifesterait par l'intermédiaire de secousses sismiques pouvant dégrader la couverture ou l'étanchéité des puits ; les dégâts ainsi occasionnés peuvent atténuer la capacité de confinement du réservoir de stockage et fragiliser éventuellement les infrastructures de surface ;
4. Mouvement de la surface du sol : l'ajout de matière (CO₂ supercritique), l'activation de failles, ou bien la compaction de la roche réservoir sous le jeu de la dissolution chimique de l'encaissant provoquée par l'injection du CO₂, pourraient entraîner des mouvements de la surface du sol. Allant dans le sens d'une remontée du sol (surrection) ou de son enfoncement (subsidence) de l'ordre du mm ou du cm, ces mouvements seraient probablement à l'origine d'une activité microsismique éventuellement perceptible en surface ;
5. Impact hydraulique : par le jeu des modifications de pression, les écoulements hydrauliques en sous-sol sont susceptibles d'être perturbés, tandis que le niveau de certaines nappes proches de la surface pourrait être modifié.²²
6. Contamination des aquifères et autres réservoirs avoisinants : sous cette catégorie se cachent en réalité trois principaux types de causes, donc d'aléas :

²² Suggéré par le retour d'expérience récent, cet impact a fait l'objet en 2009 de plusieurs présentations dans des congrès scientifiques ; il n'est cependant pas relevé dans l'article qui a inspiré majoritairement le présent sous-chapitre.

- premièrement, au CO₂ injecté sont associées des impuretés qui s'accumulent dans le réservoir et dont certaines sont potentiellement polluantes ;
- deuxièmement, il est possible que l'injection du CO₂ et des impuretés associées (oxygène, eau, produits organiques, etc.) modifie localement les caractéristiques physico-chimiques de la saumure en place (pH, température, potentiel rédox) et entraîne la dissolution de métaux lourds initialement fixés à l'état de précipités, ou d'autres éléments traces ;
- troisièmement, une hypothèse est en train d'émerger sur le rôle potentiel des micro-organismes de subsurface qui seront involontairement injectés avec le CO₂ (de Gennaro et al., 2007) ; ces micro-organismes sont en effet capables de s'adapter très rapidement à des conditions environnementales changeantes et d'avoir à leur tour une influence sur la géochimie ; d'autre part, on ne connaît pas la réponse des micro-organismes présents dans la biosphère profonde aux injections de CO₂ (Dupraz et al., 2007)

Il apparaît que ces mécanismes multifactoriels sont peu étudiés, notamment les deux derniers, et méritent d'être mieux analysés à l'avenir en termes d'analyse des risques.

On peut préciser que les conséquences de ces aléas sont susceptibles de s'exprimer à plusieurs niveaux différents :

- Contamination des aquifères profonds : en premier lieu celui qui sert de réservoir, au sein duquel les mécanismes sont initiés, et qui peut être de grande étendue ;
- Contamination des aquifères superficiels : des produits toxiques en provenance du CO₂ injecté (impuretés) ou du réservoir profond initialement visé (métaux lourds) pourraient être entraînés et remonter dans le sous-sol par le biais de zones de faiblesses du recouvrement (failles, changement de faciès) ou de puits abandonnés ; de même, des saumures pourraient être déplacées et augmenter la salinité des aquifères plus superficiels, utilisables pour l'alimentation en eau potable ;
- Contamination d'autres réservoirs : les mêmes substances pourraient également migrer vers d'autres réservoirs souterrains voisins du site de stockage, en risquant d'affecter ces réservoirs utilisés potentiellement à d'autres fins (tels que les sites géothermiques ou de stockage de gaz naturel par exemple) et en réduisant éventuellement l'intérêt de zones potentiellement exploitables par contamination des réserves en place.

3.4 LES CRITERES DE CHOIX DES SITES

Avant de réaliser une analyse des risques plus spécifique des sites de stockage, il convient de citer ici les critères techniques qui doivent être pris en compte en amont, lors du choix du site : ces critères sont généralement basés sur des considérations de sécurité ou d'impact environnemental, et sont le plus souvent propres à être déclinés selon des paramètres techniques décrivant le contexte du stockage – par exemple la perméabilité ou les propriétés mécaniques.

Comme au chapitre 2, il est intéressant de raisonner ici par analogie en rappelant les critères du choix de site pour deux types de stockage souterrain de nature anthropique : celui de déchets radioactifs et celui de gaz et hydrocarbures en aquifère.

Pour le stockage de déchets radioactifs, l'enjeu majeur est « la sûreté à long terme ». Le milieu géologique est la principale barrière (appelée barrière géologique) en termes de confinement de déchets. Il existe bien entendu d'autres barrières comme les conteneurs, les barrières ouvragées (en bentonite notamment), le scellement, le serrement ou encore le remblai.²³ En tenant compte de ces particularités, l'opérateur s'efforce de choisir un site présentant les caractéristiques suivantes :

- a) Stabilité géologique d'un point de vue tectonique : absence de mouvement de terrain, pas d'érosion forte ni d'activité sismique. Par exemple, en France, toute région sismique est immédiatement écartée (Alsace, PACA).
- b) Hydrogéologie : d'une part une très faible perméabilité de la formation d'accueil, incluant notamment l'absence de discontinuité : pas de faille susceptible de faciliter les transports de matière ; d'autre part un faible gradient hydraulique, limitant tout transport y compris dans les zones à topographie très marquée.
- c) Sécurité par rapport aux activités humaines : le milieu géologique d'accueil ne doit pas faire partie d'une zone qui pourrait présenter un intérêt en termes de ressources minérales (éviter le risque d'intrusion pour la recherche minérale) ; dans le même esprit, on respectera une profondeur minimale, de manière à ce que le stockage ne soit pas affecté de manière notable par une intrusion humaine –ni par des phénomènes d'érosion dus à des mécanismes naturels.
- d) Propriétés mécaniques de la roche réservoir : les effets du stockage doivent être compatibles avec les attentes en termes de sûreté, de stockage à long terme et de réversibilité – y compris les effets thermiques.
- e) Propriétés géochimiques de la roche réservoir : définition des critères d'altération de la roche et de migration des flux ; par exemple, on s'assurera que même en cas de dysfonctionnement d'un nombre plausible de colis radioactifs, les modifications des propriétés de la roche n'autoriseront que des relâchements de radioactivité limités vers l'environnement.

Pour le stockage de gaz naturels et d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés, les critères de choix du site sont définis comme suit :

- a) Absence de discontinuités (failles), particulièrement celles qui seraient ouvertes. Il est possible de vérifier ce dernier point par une campagne sismique selon la même procédure que celle suivie pour le stockage de déchets radioactifs.
- b) Existence d'une couverture étanche, à base d'argile en principe (marnes, argilites).
- c) Existence d'une couche géologique suffisamment épaisse présentant des propriétés adéquates sur le plan hydraulique (porosité, perméabilité) et mécanique pour le stockage en cavité saline ou minée.
- d) Structure en anticlinal pour le stockage en aquifère permettant le maintien du gaz (dans le cas d'un stockage de gaz naturel).
- e) Existence d'une nappe au toit de cavités minées permettant d'assurer le confinement du produit stocké par le choix d'un gradient hydraulique convergent vers la cavité (dans ce cas, la pression de stockage doit être inférieure à celle de la nappe). En l'absence de nappe, on doit alors réaliser un rideau d'eau ayant la même vocation, l'idée étant de s'appuyer sur le gradient

²³ Ceci illustre combien le domaine du déchet nucléaire met en avant le concept de « barrières », comme déjà précisé au paragraphe 3.1. Cela est à mettre en parallèle avec la notion de « barrière de sécurité » sur des installations industrielles à risque.

hydraulique plutôt que sur l'imperméabilité du milieu qui est bien souvent difficile à assurer à l'échelle d'un stockage étendu, étant donné les discontinuités du massif rocheux.

- f) Etanchéité du cuvelage et de son environnement immédiat (roche, ciment rapporté, etc.) afin de maîtriser les migrations vers la surface.

En se basant sur les caractéristiques des sites de stockage examinés ci-dessus, il est donc possible d'engager une première réflexion sur les critères de choix d'un site de stockage géologique de CO₂. Les remarques suivantes doivent alors être prises en considération :

1. La stabilité géologique d'un point de vue tectonique devra évidemment être recherchée, de même qu'une géométrie la plus adaptée possible au fluide stocké et au volume injecté : quelles sont les dimensions envisagées à terme (en incluant ou non d'éventuelles marges d'erreur) ? Quel est le périmètre d'un stockage et quelle est son évolution dans le temps ? Faut-il rechercher une structure de type anticlinal comme pour le stockage de gaz naturels ?

2. Concernant l'étanchéité et l'imperméabilité de la roche couverture:
 - On doit rechercher une couverture autant que possible étanche.
 - On doit rechercher une zone où il y a le moins possible de discontinuités préexistantes : failles connues, anciens puits, etc.
 - Une étanchéité nulle étant exclue à l'échelle du temps géologique, il convient de préciser une certaine tolérance, en terme de fuites, aussi bien diffuses (milieu géologique) que localisées (discontinuités). Ainsi, si l'on admet que chaque année une certaine proportion du CO₂ injecté peut sortir du stockage, deux cas de figure peuvent se présenter : soit cette quantité sort d'une manière uniforme sur toute la superficie du stockage (et dans ce cas, quelle perméabilité globale du milieu est exigée ?), soit cette même fuite est localisée sur quelques discontinuités (et dans ce cas, à quelle conductivité hydraulique ou perméabilité équivalente cela correspond-il ?).
 - La même question se pose pour les discontinuités d'origine anthropique, notamment les forages d'accès pour l'injection, voire les forages pour la surveillance ; la différence est qu'on peut agir sur les caractéristiques de ces ouvrages, en adaptant les techniques de forage ou de complétion. En revanche, le cas des forages anthropiques antérieurs (notamment en cas de gisement d'hydrocarbure épuisé) est différent car il est difficile d'intervenir dessus a posteriori ; de plus leur existence même peut avoir été oubliée.

3. Un compromis sera à rechercher au niveau de la perméabilité au sein du réservoir. Pour le stockage du CO₂ en aquifère, la cinétique d'injection comme la capacité de stockage dépendent de la porosité de l'aquifère. Or une porosité importante va souvent de pair avec une perméabilité importante, ce qui serait de nature à favoriser le transport horizontal du produit stocké sur de grandes distances (au moins à long terme). La question de la vitesse de transport se pose alors : en termes de gradient hydraulique, est-il ou non préférable d'avoir

un transport très lent du CO₂ et de ses impuretés associées ? Quels gradients faut-il éviter, ou au contraire retenir ?²⁴

4. Il conviendra d'étudier les propriétés mécaniques, tant pour la roche-réservoir qu'à l'interface avec la couverture : quelles caractéristiques minimales sont à rechercher afin d'éviter une fracturation induite par la surpression ? – ou à l'inverse, comment adapter la technique d'injection et la pression du stockage à la roche ? L'impact des phénomènes thermiques sera également à considérer, par exemple en cas d'injection de fluide plus froid que la roche ou en cas de détente voire de changement de phase du fluide, susceptibles d'induire un refroidissement localisé, et donc une rétractation de la roche.
5. En termes d'interactions géochimiques :
 - Comment le fluide injecté va-t-il interagir avec la roche, et à quelle échelle de temps ? Cela est-il susceptible d'influer sur les propriétés mécaniques de la roche ? Y a-t-il également un risque de remobilisation d'éléments traces potentiellement toxiques, présents dans le réservoir à l'état stable ?
 - Par ailleurs, si l'on admet que le CO₂ contient des impuretés (plus ou moins connues), quelle exigence de nature du milieu géologique doit-on réclamer ? Par exemple, on peut s'interroger sur les avantages et inconvénients d'un aquifère formé de grès/sables par rapport à un autre formé de calcaire : lequel est le plus favorable pour retenir ou laisser transiter des substances non désirées ?
 - On devra également s'interroger sur ces mêmes processus (mobilisation d'éléments traces, transit des différentes impuretés) au niveau de la couverture voire des recouvrements supérieurs. De même, entre les divers types de stockage (aquifère, gisements pétroliers, roches basiques), lequel est le plus favorable ou défavorable à la circulation des substances non désirées ?
6. Enfin, des critères spécifiques seront à considérer par rapport aux activités humaines et à l'utilisation du milieu :
 - D'une part éviter toute intrusion ultérieure, en choisissant une zone assez profonde et dépourvue d'intérêt en termes de ressources minérales
 - D'autre part, est-il possible de limiter la vulnérabilité en surface, par exemple en réglementant l'occupation du sol ? si oui, sur quelle échelle de temps ?

Ces nombreuses interrogations font actuellement l'objet d'études par de nombreux acteurs, elles seront développées et approfondies dans un rapport ultérieur de l'INERIS.

²⁴ La résistance au transfert horizontal est ici considéré indépendamment de la résistance au transfert vertical, qui lui sera gouverné par la roche-couverture : voir point 2 ci-avant.

4. ELEMENTS D'EVALUATION DES ALEAS LIES AUX FUTITES DE PUIITS

Après avoir recensé, d'une manière succincte mais relativement exhaustive, les scénarios de risque et les mécanismes qui peuvent être liés aux activités de stockage géologique du CO₂, nous allons dans ce chapitre nous intéresser de manière plus spécifique aux aléas²⁵ liés aux puits, en nous fondant sur l'état des connaissances actuelles. Nous aborderons principalement les aléas liés aux puits d'injection (ceux spécifiques aux puits de surveillance et aux puits abandonnés traversant ou avoisinant le stockage de CO₂ ne seront pas abordés dans ce rapport).

Comme on l'a vu au chapitre précédent (§ 3.2.1), le puits apparaît comme un chemin d'écoulement potentiel du CO₂ du stockage vers la surface ou les aquifères sus-jacents. Suivant leur origine, les fuites de CO₂ à travers le puits peuvent être lentes et diffuses ou soudaine et concentrée. Ces fuites sont principalement consécutives :

- à une mauvaise conception de l'architecture du puits qui ne serait pas en adéquation avec l'environnement géologique et ne permettrait pas la protection des horizons les plus vulnérables (nappes aquifères, niveaux évaporitiques potentiellement très solubles) ;
- à un défaut d'étanchéité des cuvelages et des cimentations. Celui-ci peut apparaître à moyen ou long terme du fait d'une altération des matériaux utilisés, éventuellement accélérée par les interactions entre ceux-ci et le gaz injecté ;
- à une erreur opératoire lors d'une intervention sur puits.

Il convient donc de distinguer les fuites apparaissant après la réalisation des puits (fuite liée à un défaut de conception), au cours des opérations d'injection (fuite soudaine apparaissant au niveau de la tête de puits), ou encore à plus long terme (fuite diffuse apparaissant en surface).

Nous allons dans les paragraphes suivants fournir un certain nombre d'éléments d'analyses et de références bibliographiques qui nous ont semblé être utiles à l'évaluation du risque de fuite par un puits dans le contexte d'un stockage géologique de CO₂.

4.1 DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES DE FUTITES DE CO₂ PAR LE PUIITS

4.1.1 FUIITE SOUDAINE

Les fuites soudaines qui peuvent se produire au niveau des puits lors de leur creusement ou de leur maintenance sont classiquement dénommées « éruptions de puits » ou, en anglais « well blow-out ».

²⁵ Rappelons que, selon la définition du chapitre 3, l'**aléa** est un événement survenant en un lieu donné, caractérisé sa **probabilité** d'occurrence et par son **intensité** - les aléas donc considérés ici sans avoir l'ambition d'estimer la gravité réelle de leurs impacts sur les cibles (environnement, personnes susceptibles d'être présentes), ce qui serait à réaliser lors d'une analyse complète du risque.

Cette éruption est soudaine et inattendue et s'accompagne généralement de l'expulsion de tout le matériel situé dans le corps du puits et en particulier des boues de forage. La soudaineté de cet événement ne permet généralement pas à un opérateur seul de réagir suffisamment vite pour éviter une perte de pression. La détente brutale du gaz s'accompagne d'un refroidissement soudain dont les conséquences en surface peuvent être (Figure 22) :

- l'expulsion de particules de glace susceptibles de blesser le personnel ;
- l'expulsion de fluides (eau, CO₂) ;
- la réduction de la visibilité résultant de la condensation de l'eau.

et en profondeur, une fracturation des terrains situés à la base et le long du puits.

a) Débris de glace en surface



b) Expulsion de fluide



c) Condensation de vapeurs d'eau limitant la visibilité



Figure 22 : Conséquences en surface d'un blow-out (Skinner, 2003)

Cette détente brutale du gaz peut survenir suite à une surpression dans le réservoir ou à une erreur commise par un opérateur.

Des systèmes existent pour éviter la survenue de ce type d'événement. Il s'agit principalement d'un système de vannes placé en tête de puits et désigné sous l'acronyme de BOP (Blow-Out Preventor ou Bloc Obturateur de Puits, en français).

Outre ces équipements, les éruptions de puits peuvent être évitées ou traitées dans la mesure où les bonnes pratiques de forage sont respectées pendant la phase de creusement, d'équipement ou d'intervention sur puits.

La survenue d'éruption de puits en cours de fonctionnement de l'injection est a priori moins probable car il faudrait que se produise de façon conjointe :

- un défaut d'étanchéité au niveau d'un joint ou d'une bride sur la tête de puits,

- et une défaillance de la vanne de sub-surface.

L'analyse de la survenue de ces événements en phase de travaux peut être réalisée selon des approches classiques d'analyse de risques.

Compte tenu du peu de retour d'expérience pour les puits d'injection de CO₂, la probabilité d'occurrence de ce type d'événement est difficile à évaluer. L'analyse menée sur les puits d'injection relative à l'exploitation ou au stockage de gaz naturel révèle que la probabilité annuelle d'une fuite soudaine pour un puits est de l'ordre 1,8.10⁻⁵. Cette valeur pourrait être retenue sous réserve que les données concernant ces gaz soient transposables au cas du CO₂ à l'état supercritique.

4.1.2 FUITE DIFFUSE

Les fuites diffuses apparaissent suite à un défaut de conception ou suite à une lente dégradation des caractéristiques de résistance et de perméabilité des éléments constitutifs du puits. La recherche des mécanismes d'apparition des fuites diffuses au voisinage des puits est essentielle afin de pouvoir analyser et maîtriser ces fuites. Ces mécanismes sont liés à des perturbations mécaniques, hydrauliques, thermiques ou chimiques survenant au cours du creusement et de l'équipement du puits ou pendant les phases d'injection (et de post-injection) du CO₂. On décrit dans les paragraphes suivants, les mécanismes à l'origine de ces dégradations.

Les conséquences de ces fuites (en sub-surface et en surface) sont les suivantes :

- une acidification des eaux des aquifères plus superficiels, voire des eaux de surface, jusqu'à un pH de 4 ou 5 (Damen et al., 2006) ;
- une accumulation de CO₂ (et éventuellement d'autres gaz) dans des lieux non ventilés, pouvant entraîner des impacts sur l'homme et l'environnement.

En surface, les fuites diffuses peuvent se manifester directement par l'apparition de bulles, comme dans le cas du puits fuyard présenté en *Figure 23a*. On notera que des bulles de CO₂ ont également été observées à la surface des mares au droit de sites analogues naturels comme celui de Sainte-Marguerite dans le Puy-de-Dôme (*Figure 23b*) où les flux de CO₂ mesurés pouvaient atteindre en certains points 4,7 10⁻⁵ m³/s/m² (Pokryszka & Charmoille, 2008).



Figure 23 : Exemples de fuites diffuses de CO₂ : (a) formation de bulle en tête d'un puits (Bachu, 2007) ; (b) apparition de bulles à la surface d'une mare au voisinage de la source thermique de Sainte Marguerite (63)

4.2 PERTURBATIONS MECANIQUES INDUITES PAR LE CREUSEMENT DU PUIITS

Le creusement d'un puits induit nécessairement une perturbation du milieu dans son voisinage proche. Cette perturbation se traduit par une réorganisation du champ de contraintes pouvant s'accompagner de ruptures du massif rocheux. A titre d'exemple, suite au creusement du puits d'accès du laboratoire souterrain de Bure, dans les argilites de l'Est du Bassin Parisien, il a été observé l'apparition de perturbations instantanées et différées (Miehe, 2004).

4.2.1 PERTURBATIONS INSTANTANÉES

La perturbation mécanique instantanée la plus marquante est la rupture ou la fracturation de la roche. Celle-ci induit de très fortes augmentations de perméabilité qu'il est d'ailleurs difficile de quantifier dans l'état actuel des connaissances. Les essais en laboratoire montrent qu'il existe deux types de déformations avant la rupture, qui se traduisent toutes les deux par une modification de la perméabilité : il s'agit de la compaction, dans un premier temps, puis de l'endommagement à l'origine du développement d'une micro-fissuration. Ainsi, lorsque la roche subit un chargement, même largement inférieur à sa résistance à la rupture, une microfissuration diffuse se développe à partir des différents défauts et hétérogénéités et elle se développe jusqu'à l'apparition de fissures macroscopiques. Ce mécanisme est fortement irréversible (du Suau de la Croix, 2006).

L'anisotropie de l'état de contraintes initial du site ainsi que l'anisotropie structurelle de la roche encaissante jouent un rôle important dans l'occurrence et la répartition des zones en rupture autour de l'ouvrage.

4.2.2 PERTURBATIONS DIFFÉRÉES

Le comportement mécanique différé (dans le temps) est quant à lui lié au déconfinement causé par le creusement du puits qui va modifier l'équilibre mécanique existant (Miehe, 2004). Dans le cas des tunnels, dont le diamètre est d'ordre métrique et qui est en général ventilé (naturellement ou artificiellement), le massif rocheux se désature progressivement avec le temps, cherchant à se rééquilibrer hydriquement avec l'atmosphère du tunnel (du Suau de la Croix, 2006). Une zone désaturée apparaît assez rapidement autour de l'ouvrage, juste après son creusement, avec un gradient intense si la roche est très peu perméable. Si la roche est suffisamment gonflante et les contraintes orthoradiales en paroi assez faibles, son retrait en paroi induit une rupture par traction parallèle à la stratification.

Ce phénomène a pu être observé, par exemple, dans certaines galeries creusées dans les argilites du site de Tournemire, où une zone endommagée d'environ 1 m d'épaisseur, constituée de fractures ouvertes en « pelures d'oignon » parallèles aux parois, a été observée uniquement autour du tunnel datant du XIX^e siècle et non autour des galeries creusées plus récemment (en 1996 et en 2003).

Il semblerait donc que cette fracturation soit apparue de manière différée. Comme les modèles de comportement viscoplastiques, poromécaniques et de gonflement ne permettent pas d'expliquer son apparition, il est probable que cette zone en rupture ait pour origine la dégradation avec le temps de la résistance de la roche en paroi du tunnel. Cette dégradation peut être induite par les cycles successifs de désaturation/resaturation au cours du temps (Ben Slimane et al., 2008).

En ce qui concerne les puits d'injection de CO₂, Roegiers (2002) signale que l'épaisseur de la zone endommagée et l'intensité de l'endommagement dépendent des propriétés mécaniques du milieu considéré, des contraintes initiales dans le massif, du diamètre et de l'orientation du puits, de la méthode de foration utilisée et de la pression dans le puits.

L'évaluation de l'épaisseur de la zone endommagée, ainsi que la relation entre l'endommagement de la roche et la variation de sa perméabilité sont importantes pour l'analyse de risque car la zone endommagée est présente sur toute la longueur du puits et se présente donc comme un chemin d'écoulement préférentiel entre le réservoir et la surface. Elle nécessite notamment une caractérisation mécanique des différentes formations traversées par le puits.

4.2.3 SOLLICITATION DES CUVELAGES LORS DE LEUR MISE EN PLACE

L'intégrité des cuvelages peut être compromise lors de leur mise en place, lorsque les aciers sont soumis à des sollicitations mécaniques (courbure, pression de pore) mais également chimiques (présence d'H₂S). Il faut également noter que de simples chocs lors de leur manipulation peuvent également être à l'origine d'un affaiblissement localisé de leurs propriétés.

Rappelons que l'arrêté du 22 mars 2000 (publié au JO n°73 du 26/03/2000 <http://www.industrie.gouv.fr/sdsi/dtss/regl/cdrgie/fo.htm>) décrit les dispositions applicables aux cuvelages des sondages et des puits²⁶ :

- caractéristiques du cuvelage choisies en fonction des sollicitations maximales et selon les gradients de pression auxquels ils peuvent être soumis ;
- calcul des contraintes de traction ;
- cimentation du cuvelage et vérifications de la qualité de sa mise en place (notamment des hauteurs de remontée de ciment derrière le cuvelage) ;
- essais d'étanchéité du cuvelage sur la base d'une étude tenant compte des caractéristiques du gisement, des particularités des terrains traversés et des pressions de fluide susceptibles d'exister.

²⁶ Le domaine d'application de cette arrêté est précisé dans l'article 2 comme suit : « Les travaux de recherche par forage sont réalisés dans le but de découvrir ou de reconnaître une formation géologique. Au sens du présent titre ne sont considérés comme travaux de recherche par forage que ceux conduits à partir de la surface de la terre, ou exécutés en mer. Le titre ne concerne pas les travaux de forage destinés à reconnaître un gisement par des méthodes géophysiques telle la sismique, par exemple, dans la mesure où ces travaux ne sont pas destinés à atteindre le gisement ; dans le cas contraire, réalisation de panneaux sismiques dans le gisement par exemple, le titre s'applique. De même, le titre ne s'applique pas aux travaux de forage conduits, à partir du fond, dans le cadre d'une exploitation souterraine classique. Les travaux de forage et autres travaux, rendus nécessaires pour l'exploitation du gisement, ne sont soumis au titre que s'ils sont menés à partir de la surface de la terre ou exécutés en mer, et destinés à extraire le gisement sous forme de fluides. Ne sont pas visées les opérations de dégazage conduites dans les mines souterraines de charbon. Les fluides gazeux ou liquide, visés par le titre, sont notamment ceux des gisements : géothermiques ; d'hydrocarbures liquides ou gazeux ; de gaz associés aux combustibles minéraux solides ; de gaz carbonique, à l'exception du gaz naturellement contenu dans les eaux qui sont ou qui viendraient à être utilisées pour l'alimentation humaine ou à des fins thérapeutiques. Sont également soumises, les exploitations du gisement en place s'effectuant par dissolution, liquéfaction, gazéification, lixiviation et tout autre procédé d'extraction par l'intermédiaire d'un fluide. »

4.2.4 INFLUENCE DE LA QUALITE DES CIMENTATIONS

La qualité de la cimentation joue un rôle fondamental dans l'étanchéité d'un puits. On considère qu'un ciment de très bonne qualité et correctement mis en place possède une perméabilité de l'ordre de 10^{-5} milliDarcy²⁷ (Nelson, 1990). Une telle perméabilité limiterait fortement la circulation des fluides et donc la possibilité de fuites (Randhol et al., 2007).

En revanche, cette perméabilité est fortement accrue dès qu'une zone dégradée apparaît. Pour illustration, une zone dégradée de 1 mm d'épaisseur au niveau des interfaces roche-ciment ou ciment-cuvelage aboutit à un accroissement significatif de la perméabilité, qui peut alors atteindre jusqu'à 100 Darcy (Celia et al., 2004). Par ailleurs, si le fluide est corrosif, l'ouverture de la fuite peut s'accroître au cours du temps et donc également son débit (Scherer et al., 2004).

Les interfaces ciment-cuvelage, ciment-roche hôte ou ciment-ciment se présentent comme des chemins préférentiels de fuite. Les opérations de cimentation du cuvelage sont donc cruciales pour assurer le maintien de l'intégrité du puits et de limiter le nombre d'interfaces entre les matériaux. Les problèmes de cimentation à l'origine des fuites de gaz sont les suivants :

- la création de chenaux (« mud channels ») au sein du ciment suite à une mauvaise évacuation des boues avant ou pendant la cimentation (voir *Figure 24a* et *Figure 25a*) ;
- l'apparition de ruptures de retrait au sein du ciment ou, au contraire, d'un gonflement du ciment suite à une hydratation (*Figure 24c*) ;
- la perte de ciment dans des fractures de l'encaissant ou par des ouvertures induites par des gradients de pression trop importants ou encore par la succession de cycles de pression-température ; ces discontinuités peuvent induire une perte de contact entre le ciment et le tubage ;
- la déviation des puits qui peut également affecter la mise en place du ciment lorsque l'espace annulaire devient insuffisant (*Figure 25b*).

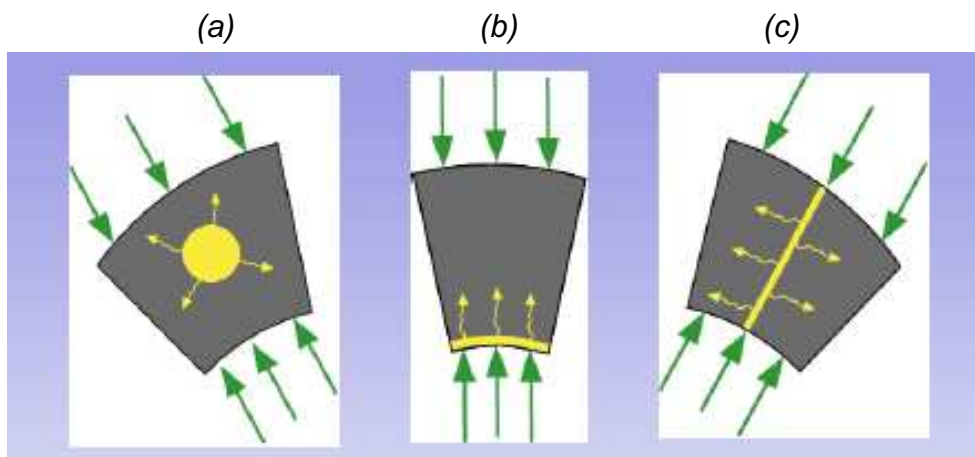


Figure 24 : Schéma des détériorations de la cimentation suite à sa mise en place (Huerta et al., 2007)

²⁷ Le Darcy est la perméabilité d'un milieu qui laisse passer, par seconde, 1 cm^3 de liquide de viscosité égale à celle de l'eau à 20°C (voisine de $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) sous l'effet d'une différence de pression de 1 atm. ($1 \text{ Darcy} = 10^{-12} \text{ m}^2 = 10^{-5} \text{ m/s}$).

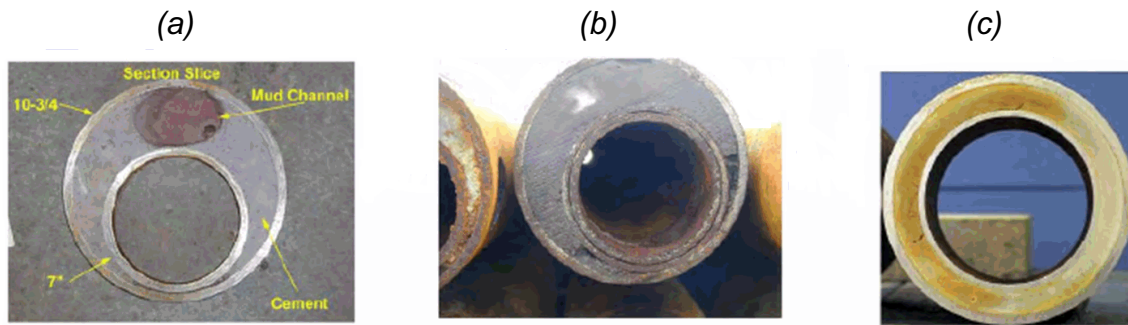


Figure 25 : Exemple de détérioration de la cimentation (Huerta et al., 2007) :
 (a) chenal de boue ; (b) Défaut de centrage ; (c) Microfissures radiales

Pour limiter ces phénomènes, il est nécessaire de s'assurer que :

- la boue de forage possède la densité appropriée ;
- la boue de forage est bien chassée lors de la phase de cimentation ; le nettoyage du forage est donc essentiel avant la mise en place du ciment pour éviter la création de chenaux de boue mais également pour limiter la perte de résistance du ciment consécutive à son mélange avec la boue ;
- la couche de protection des cuvelages est bien enlevée lors de la cimentation pour assurer une bonne adhérence du ciment ;
- le cuvelage est bien centré au sein du puits ;
- les manœuvres de tubes évitent tout effet de pistonage.

4.3 PERTURBATIONS APPARAISSANT LORS DE LA PHASE D'INJECTION

L'injection de CO₂ à l'état supercritique dans un réservoir géologique est de nature à induire des perturbations du cuvelage, de la cimentation et du massif rocheux dans le proche-puits. On peut distinguer ces perturbations suivant qu'elles sont d'origine thermique, hydraulique mécanique ou chimique, tout en sachant qu'il existe des couplages entre ces différents processus.

Les éléments constitutifs du puits (cuvelage, complétion et cimentation) ainsi que la roche endommagée par le creusement du puits, seront soumis au cours de l'injection à :

- des variations de contraintes effectives liées à l'augmentation locale des pressions de pore à proximité de la zone d'injection (Krillov et al., 2000) ;
- des variations de contraintes d'origine thermique induites, soit par le refroidissement dû à la détente du CO₂ supercritique à proximité du puits d'injection, soit par la différence de température entre le CO₂ injecté et la roche réservoir (Heffer, 2002 ; Oldenburg, 2007) ;
- des variations d'origine chimique liées à une dissolution ou à une précipitation de matière induisant une modification de la structure géométrique et des caractéristiques de résistance et de perméabilité du ciment et/ou de la roche.

En outre, la phase de fermeture du puits induit de nouvelles modifications THMC caractéristiques d'une évolution lente vers un nouvel état d'équilibre. Cette phase, qui débute lors de l'interruption de l'injection et/ou la mise en place d'un bouchon de scellement, a donc été distinguée de la phase d'injection et sera traitée dans le deuxième rapport qui complètera le présent document.