

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-08-86168-00481D

11/01/2010

**SYNTHESE DE L'ETAT DES CONNAISSANCES ET
DES PRATIQUES EN MATIERE D'ABANDON DES
STOCKAGES SOUTERRAINS**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Synthèse de l'état des connaissances et des pratiques en matière d'abandon des stockages souterrains

Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

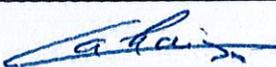
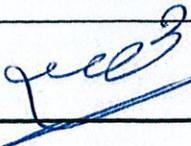
Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

REMERCIEMENTS

Ce rapport a été soumis à la relecture de deux experts reconnus en France et à l'étranger : Messieurs Pierre Bérest (Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique) et Emmanuel Ledoux (Centre de Géosciences de l'Ecole des Mines de Paris). Leur relecture détaillée et leurs remarques constructives sur le document sont chaleureusement remerciées.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Arnaud CHARMOILLE Alain THORAVAL	Franz LAHAIE	Mehdi GHOREYCHI
Qualité	Ingénieurs respectivement à l'Unité ESEG et RNOS à la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol	Ingénieur à l'Unité AS2G à la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-Sol
Visa			

RESUME

L'objet du présent rapport est d'établir, à destination de l'Administration centrale et des services instructeurs concernés par la problématique, une synthèse des connaissances et des pratiques en matière d'abandon des stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés et de produits chimiques à destination industrielle. Ce document pourra éventuellement servir de base à l'élaboration ultérieure de règles de bonne pratique destinées à assurer dans les meilleures conditions, lors de l'abandon d'un stockage souterrain, la sécurité à long terme des personnes et des biens, ainsi que la préservation de l'environnement, autour du site concerné.

Le document traite de la problématique de l'abandon dans son ensemble, couvrant à la fois les aspects réglementaires (en France et à l'étranger), la description des opérations techniques d'abandon, l'analyse des cas d'accidents les plus intéressants du point de vue de l'abandon, l'identification des principaux aléas ou impacts liés à l'abandon d'un stockage souterrain, le recensement de méthodes et éléments bibliographiques pouvant aider à l'évaluation des aléas et enfin, la présentation de techniques qui pourraient être envisagées pour la surveillance des stockages souterrains pendant et après l'abandon. Le document s'attache à couvrir les différents types de stockages, que ce soit en milieux poreux, en cavités salines ou en cavités minées. Un résumé des points importants de ce rapport est fourni en conclusion, au chapitre 8.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	9
2. CADRE LEGISLATIF ET REGLEMENTAIRE REGISSANT L'ABANDON DES STOCKAGES SOUTERRAINS	11
2.1 Réglementation en vigueur en France	11
2.1.1 Régime général applicable aux stockages souterrains.....	11
2.1.2 Dispositions prévues lors de l'ouverture et de l'exploitation d'un stockage souterrain.....	11
2.1.3 Dispositions prévues lors de l'arrêt des travaux	12
2.1.4 Dispositions prévues lors de la renonciation à une concession.....	14
2.2 Réglementation en vigueur dans d'autres pays	15
2.3 Conclusion	16
3. LES RETOURS D'EXPERIENCE DISPONIBLES EN MATIERE D'ABANDON DES STOCKAGES SOUTERRAINS	19
3.1 Le stockage en cavités salines de Carresse-Cassaber.....	19
3.2 Le stockage en cavité minée de May-sur-Orne.....	21
3.3 Les autres cas d'abandon en France et dans le monde.....	22
3.4 L'expérience acquise au cours de la phase d'exploitation.....	23
3.5 L'expérience acquise dans des domaines connexes	24
3.5.1 Les exploitations de gisements de gaz et d'hydrocarbures	24
3.5.2 Les exploitations de sel par dissolution	24
3.5.3 Les anciennes mines et carrières souterraines	25
4. DESCRIPTION DES OPERATIONS TECHNIQUES D'ABANDON	27
4.1 Les opérations de déstockage	27
4.1.1 Dans le cas des stockages en milieu poreux.....	27
4.1.2 Dans le cas des stockages en cavités salines.....	27
4.1.3 Dans le cas des stockages en cavités minées non revetues.....	28
4.2 L'établissement d'un état du stockage avant fermeture des ouvrage d'accès.....	29
4.2.1 Dans le cas des stockages en milieux poreux.....	30
4.2.2 Dans le cas des stockages en cavités salines.....	31
4.2.3 Dans le cas des stockages en cavités minées non revetues.....	31
4.3 Le bouchage des puits et des ouvrages d'accès.....	31

4.4	Le démantèlement des installations de surface.....	33
5.	IDENTIFICATION DES ALEAS LIES AUX STOCKAGES SOUTERRAINS ABANDONNES	35
5.1	Analyse de l'accidentologie	35
5.2	Les principaux phénomènes redoutés et leurs mécanismes initiateurs.....	39
5.2.1	Dans le cas des stockages en milieux poreux	39
5.2.1.1	Pollution des eaux souterraines par les gaz résiduels.....	39
5.2.1.2	Emission localisée de gaz résiduels en surface	40
5.2.1.3	Lessivage accidentel d'un niveau évaporitique (gypseux)	40
5.2.1.4	Autres aléas, impacts ou nuisances	41
5.2.2	Dans le cas des stockages en cavités salines	41
5.2.2.1	Mouvements de la surface du sol	42
5.2.2.2	Pollution des eaux souterraines par la saumure	44
5.2.3	Dans le cas des stockages en cavités minées.....	45
5.2.3.1	Perturbation du régime hydraulique environnant le stockage	46
5.2.3.2	Pollution des eaux souterraines ou superficielles	47
5.2.3.3	Emission de radon en surface	48
5.2.3.4	Mouvements de la surface du sol	48
6.	ELEMENTS D'EVALUATION DES ALEAS LIES AUX STOCKAGES SOUTERRAINS ABANDONNES	49
6.1	Evaluation des aléas liés aux fuites par les puits	49
6.1.1	Défaut d'étanchéité du cuvelage.....	50
6.1.2	Défaut d'étanchéité de la cimentation du cuvelage.....	53
6.1.3	Défaut d'étanchéité du bouchon de ciment.....	57
6.2	Evaluation des aléas propres aux stockages en milieux poreux	60
6.2.1	Fuite de gaz à travers la couverture.....	60
6.2.2	Transport du gaz et de ses composés par dissolution dans l'eau.....	62
6.2.3	Endommagement de la couverture	63
6.2.4	Cisaillement le long de discontinuités existantes	68
6.2.5	Mouvements de surface liés à la remise en équilibre du stockage après abandon.....	70
6.3	Evaluation des aléas propres aux stockages en cavités salines	71
6.3.1	Suppression de saumure dans la cavité.....	71
6.3.2	Mouvements de la surface du sol	76
6.3.3	Pollution de nappes aquifères par la saumure.....	78

6.4	Evaluation des aléas propres aux stockages en cavités minées.....	79
6.4.1	Effondrement brutal par rupture du toit d'une galerie ou d'un puits d'accès	80
6.4.2	Affaissement induit par une modification progressive de la géométrie des cavités de stockage	81
6.4.3	Effondrement brutal par rupture d'une cavité.....	82
6.4.4	Modification de la perméabilité du milieu	83
6.4.5	Emission de radon en surface	86
7.	METHODES DE SURVEILLANCE APPLICABLES AUX STOCKAGES SOUTERRAINS ABANDONNES	89
7.1	Surveillance de la stabilité des cavités ou des ouvrages d'accès	90
7.1.1	Techniques nécessitant une accessibilité des vides surveillés	90
7.1.2	Techniques applicables à partir de la surface.....	91
7.2	Surveillance des mouvements de surface.....	92
7.3	Surveillance de la qualité des aquifères environnants.....	93
7.4	Surveillance des arrivées de gaz en surface.....	94
7.4.1	Méthodes éprouvées et opérationnelles.....	95
7.4.2	Méthodes en cours de développement.....	97
8.	BILAN/CONCLUSION	99
9.	REFÉRENCES	103
10.	LISTE DES ANNEXES	115

1. INTRODUCTION

L'abandon, à moyen ou long terme, des stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés et de produits chimiques à destination industrielle¹, va devenir un sujet de préoccupation croissante, à la fois en termes de sécurité publique et d'impact environnemental. Les plus anciens stockages français de ce type ont été mis en service dans les années cinquante (1956 pour le stockage de Beynes). La plupart de ces stockages ne sont pas encore abandonnés, mais des cas concrets se présentent désormais, notamment l'abandon du stockage de Gargenville. Or, les pouvoirs publics ne disposent pas encore de retour d'expérience jugé suffisant et d'une maîtrise complète dans ce domaine.

Le document qui va suivre dresse un inventaire de problèmes qui peuvent se poser dans le cadre de l'abandon d'un stockage souterrain et qui par conséquent, se doivent d'être examinés avec attention par l'administration afin d'assurer au mieux la sécurité des personnes et des biens et la protection de l'environnement au voisinage de ces anciens sites de stockage. Nous avons dressé un inventaire, aussi exhaustif que possible, qui aborde à la fois les problèmes d'abandon des puits, de stabilité des cavités laissées en profondeur ou encore, de pollution et d'impacts environnementaux liés à l'ensemble de la structure de stockage.

L'objectif de ce document est de présenter une première revue des connaissances et des pratiques en matière d'abandon, basée sur le retour d'expérience français et étranger, à la fois pour les stockages en milieux poreux, les stockages en cavités salines et les stockages en cavités minées. Au niveau français, seront principalement exploités les retours d'expérience des stockages de Caresse-Cassaber et de May-sur-Orne², qui sont au moment de l'écriture de ce rapport les deux seuls stockages souterrains en France ayant fait l'objet d'une procédure d'abandon.

¹ Désignés dans la suite de ce document par le terme « stockages souterrains ».

² Comparativement aux stockages en cavités minées français en cours d'exploitation, celui de May-sur-Orne avait la double particularité d'être un stockage de produit liquide sans tension de vapeur (il s'agit d'un stockage de gasoil) et d'utiliser les chambres aménagées d'une ancienne exploitation minière, ce qui le rend relativement atypique.

2. CADRE LEGISLATIF ET REGLEMENTAIRE REGISSANT L'ABANDON DES STOCKAGES SOUTERRAINS

2.1 REGLEMENTATION EN VIGUEUR EN FRANCE

2.1.1 REGIME GENERAL APPLICABLE AUX STOCKAGES SOUTERRAINS

En France, le régime applicable aux stockages souterrains est, pour l'essentiel, le même que celui défini pour les mines. En effet, les stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux ou de produits chimiques à destination industrielle ont été intégrés dans le code minier par la loi n°2003-8 du 3 janvier 2003. Tout en ayant été créés antérieurement, ils sont donc depuis lors, au titre de l'article 3-1 et du Titre V_{bis} de ce code, assimilés à des gisements miniers.

Les décrets n°2006-648 et n°2006-649 du 2 juin 2006 ont précisé ensuite les modalités d'application du Titre V_{bis} du code minier. Le premier cité détermine les modalités d'attribution des titres de stockages souterrains tandis que le second régit la police des stockages souterrains.

Nous allons ci-après porter plus spécifiquement notre intérêt sur les dispositions qui, au sein de ce régime général, encadrent l'abandon des stockages souterrains. Ces dernières sont prévues dès l'ouverture du stockage (demande d'autorisation d'exploiter) jusqu'à sa fermeture (arrêt des travaux) et enfin, jusqu'à son abandon proprement dit (renonciation à la concession).

2.1.2 DISPOSITIONS PREVUES LORS DE L'OUVERTURE ET DE L'EXPLOITATION D'UN STOCKAGE SOUTERRAIN

Un titre d'exploitation de stockage souterrain (aussi appelé « concession ») est accordé pour une durée maximum de 50 ans. Celui-ci peut faire l'objet de prolongations successives, chacune d'une durée maximum de 25 ans.

Dès avant le démarrage de l'exploitation, le législateur a veillé à ce que l'exploitant anticipe les conditions d'abandon de son stockage. En effet, il est précisé au 6^{ème} alinéa de l'article 6 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 que l'exploitant doit, dans son dossier de demande d'autorisation, indiquer « *à titre prévisionnel [...] les conditions de l'arrêt des travaux ainsi que l'estimation de son coût* ». L'exploitant est également tenu, dans ce même dossier, de remettre une étude d'impact (4^{ème} alinéa de l'article 6 de ce même décret), dont la vocation est de s'assurer que l'exploitant évalue et maîtrise l'impact à long terme (y compris au-delà de la phase d'exploitation) que son stockage pourrait avoir sur l'environnement et la santé des personnes.

Au cours de l'exploitation, l'Etat continue de veiller à ce que l'exploitant maîtrise les conditions d'abandon de son stockage souterrain à travers notamment les rapports annuels d'exploitation. En effet, ces rapports doivent indiquer au moins une fois tous les 5 ans, « *les conditions d'arrêt des travaux ainsi que l'estimation de son coût* » (alinéa 11°, article 36 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006).

Enfin, les stockages souterrains sont soumis, par la loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003, à l'établissement de Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT). Ceux-ci, au travers d'une maîtrise de l'urbanisation (existante et future) autour des stockages souterrains lors de la phase d'exploitation, contribuent également, à réduire les risques qui pourraient subsister après l'abandon du stockage.

2.1.3 DISPOSITIONS PREVUES LORS DE L'ARRÊT DES TRAVAUX

L'arrêt de l'exploitation d'un stockage souterrain (ou d'une partie de celui-ci) s'accompagne d'une procédure juridique appelée « arrêt des travaux » ou « arrêt définitif des travaux ». L'arrêt des travaux constitue la première phase du processus d'abandon (Figure 1), la deuxième étant la « renonciation au titre de stockage souterrain » (voir détails au § 2.1.4) qui marque le retrait définitif de la concession à l'exploitant et le transfert des responsabilités à l'Etat.

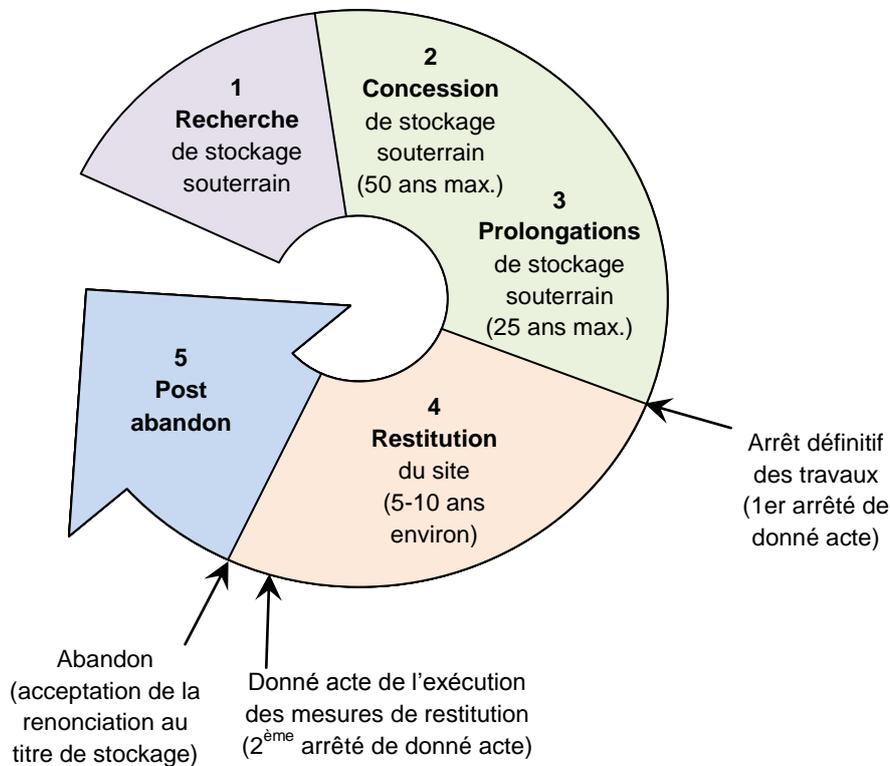


Figure 1 : Principales étapes réglementaires de la vie d'un stockage souterrain

Les dispositions qui régissent l'arrêt des travaux d'un stockage souterrain sont définies aux articles 91, 92 et 93³ du code minier. Le décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 (au chapitre V du Titre III) en précise les modalités d'application. Ces textes sont reportés en annexe A. La Figure 2 en reprend les principaux éléments.

L'exploitant fait connaître son intention de mettre fin (partiellement ou totalement) à l'exploitation de son stockage en adressant au préfet une « déclaration d'arrêt des travaux ». Ce dossier constitue l'élément essentiel du dossier d'abandon puisque c'est dans celui-ci que « l'exploitant fait connaître les mesures qu'il

³ Cet article ne concerne que les affaissements de terrain et les accumulations de gaz dangereux.

envisage de mettre en œuvre pour préserver les intérêts mentionnés à l'article 79 [du code minier (voir annexe A)], pour faire cesser de façon générale les désordres et nuisances de toute nature engendrés par ses activités, pour prévenir les risques de survenance de tels désordres, et pour ménager le cas échéant les possibilités de reprise de l'exploitation » (article 91 du code minier, 2^{ème} alinéa).

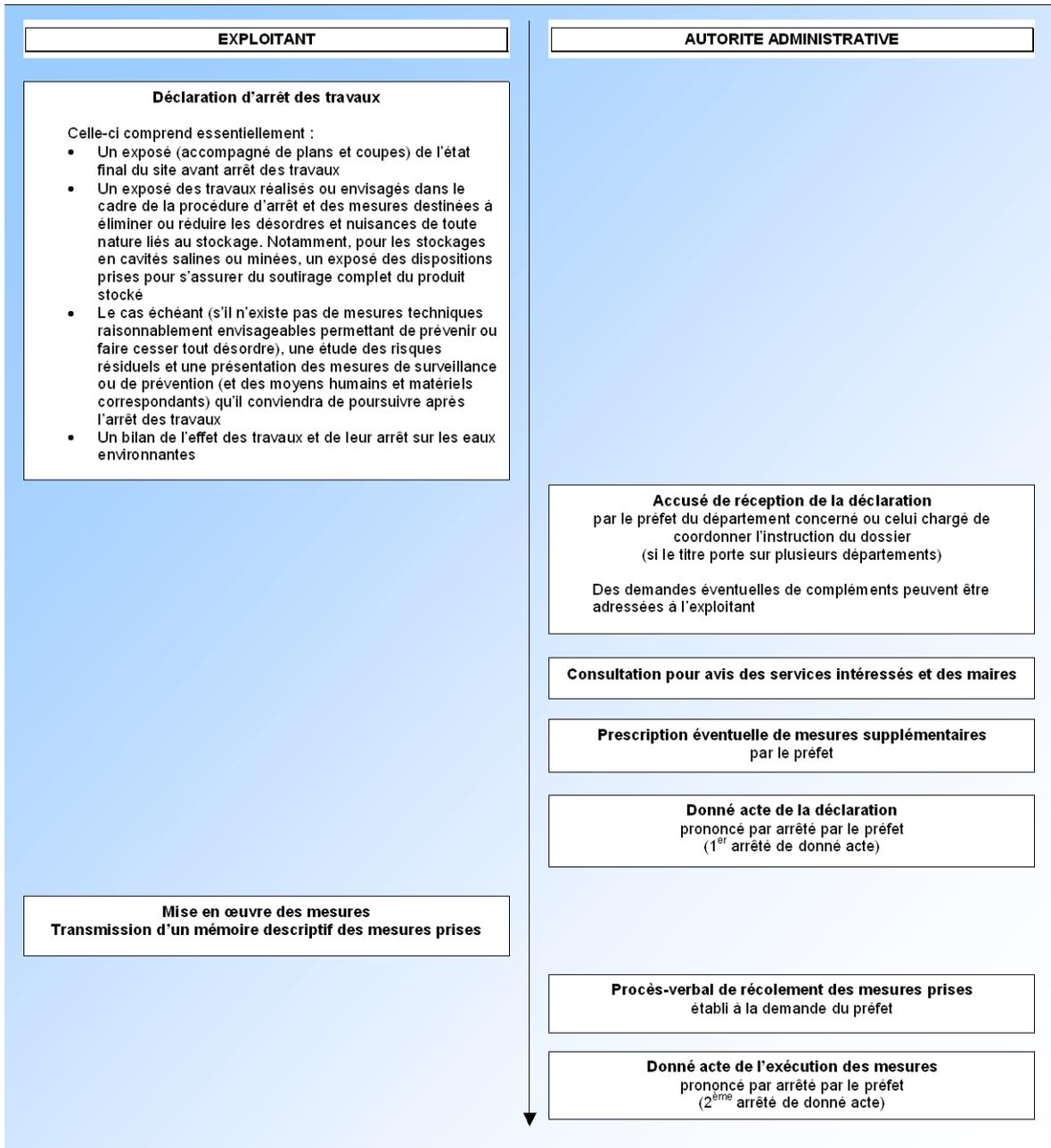


Figure 2 : Procédure d'arrêt des travaux d'un stockage souterrain

Par ailleurs, « dans le cas où il n'existe pas de mesures techniques raisonnablement envisageables permettant de prévenir ou faire cesser tout désordre, il incombe à [...] l'exploitant de rechercher si des risques importants susceptibles de mettre en cause la sécurité des biens ou des personnes subsisteront après l'arrêt des travaux. Si de tels risques subsistent, il étudie et

présente [dans ce dossier] les mesures, en particulier de surveillance, qu'il estime devoir être poursuivies après [l'arrêt des travaux]. » (article 91 du code minier, 3^{ème} alinéa).

Enfin, l'exploitant dresse dans ce dossier « le bilan des effets des travaux sur la présence, l'accumulation, l'émergence, le volume, l'écoulement et la qualité des eaux de toute nature, évalue les conséquences de l'arrêt des travaux ou de l'exploitation sur la situation ainsi créée et sur les usages de l'eau et indique les mesures envisagées pour y remédier en tant que de besoin. » (article 91 du code minier, 4^{ème} alinéa).

Notons qu'une procédure d'arrêt des travaux peut porter sur une partie seulement de la concession (article 91 du code minier, 1^{er} alinéa). Par exemple, un ou plusieurs puits peuvent être « arrêtés » sans pour autant que l'ensemble du stockage soit arrêté.

2.1.4 DISPOSITIONS PREVUES LORS DE LA RENONCIATION A UNE CONCESSION

Il peut être mis fin à une concession de stockage souterrain dans deux types de circonstances :

- 1- l'administration **retire** le titre à l'exploitant, par exemple parce que celui-ci est en défaut de paiement ou parce qu'elle considère que l'exploitant a manqué à ses obligations afférentes à la sécurité publique ou à la protection de l'environnement. Cette disposition de « retrait des titres » est prévue à l'article 119-1 du code minier et s'applique selon les modalités définies à l'article 54 du décret 2006-648 du 2 juin 2006 (les textes correspondants sont fournis en annexe A) ;
- 2- l'exploitant **renonce** à son titre. C'est le seul cas connu à ce jour. La procédure de « renonciation aux titres » de stockages souterrains est définie à l'article 55 du décret 2006-648 du 2 juin 2006 et reportée en annexe A. La Figure 3 en résume les principes.

La « renonciation » peut être considérée comme une formalité administrative dès lors que le 2^{ème} arrêté de donné acte de l'arrêt des travaux (voir Figure 2) a été accordé à l'exploitant. Elle acte officiellement le retrait de la concession à l'exploitant et le transfert des responsabilités à l'Etat relativement aux désordres ou nuisances qui pourraient survenir après cette formalité.

A contrario, tant que la renonciation n'a pas été prononcée, le maintien des mesures de surveillance et de prévention des éventuels risques résiduels liés à l'exploitation reste de la responsabilité et à la charge de l'exploitant. D'autre part, lors de la renonciation, celui-ci verse à l'administration, le cas échéant, une soultte correspondant au coût estimé des dix premières années de la surveillance et de la prévention des risques et du fonctionnement des équipements.

Enfin, les stockages souterrains ne sont pas soumis, d'un point de vue juridique, à l'établissement de Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM). En effet, c'est l'article 94 du code minier qui prévoit l'établissement de PPRM pour les mines. Or, les stockages souterrains ne sont pas visés, à l'heure actuelle, par cet article (voir Titre V_{bis} du code minier). Il conviendra donc, pour permettre la gestion des risques résiduels après l'abandon des stockages, de mener une réflexion sur la possibilité d'étendre le champ d'application des PPRM aux stockages souterrains. Une autre piste de réflexion consisterait à étendre le PPRT au-delà de la phase

d'exploitation. Dans les deux cas, cela supposerait un certain nombre de modifications des textes réglementaires.

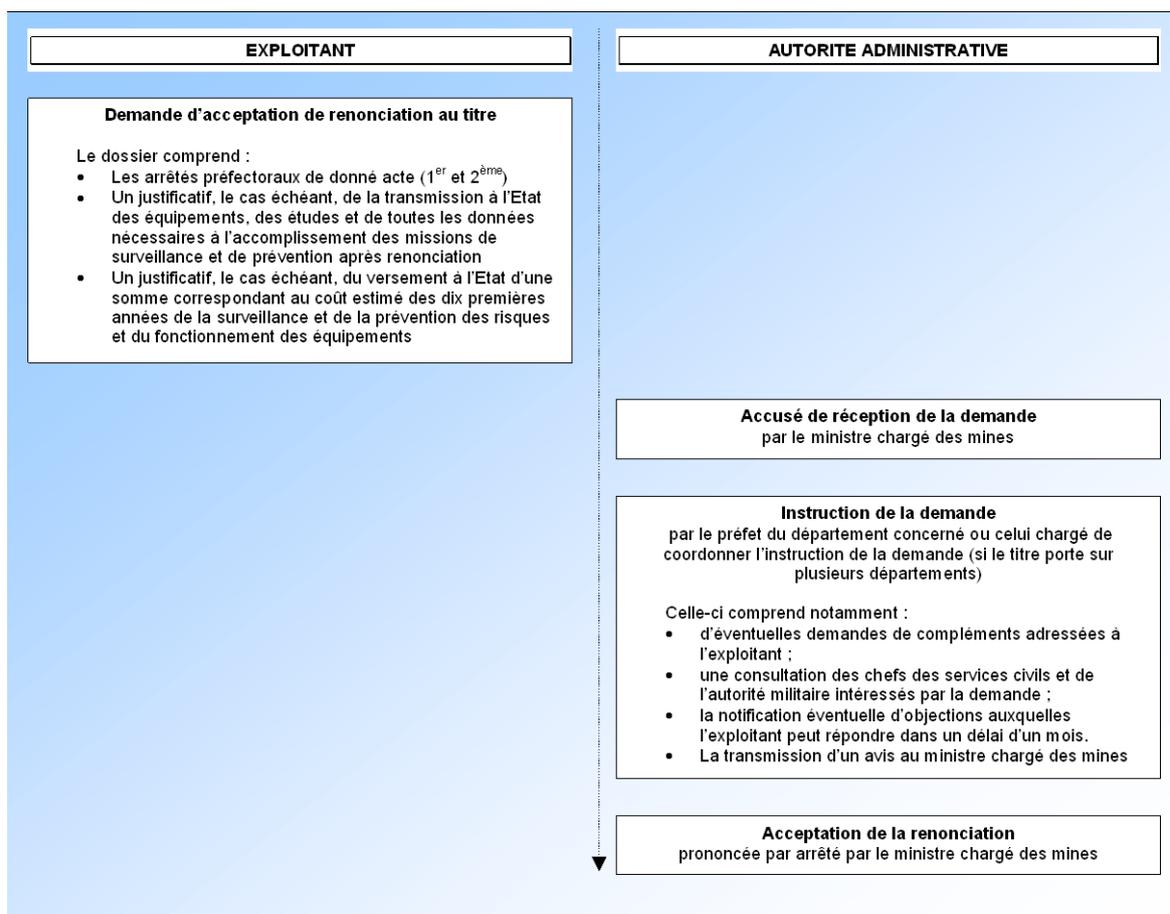


Figure 3 : Procédure de renonciation à une concession de stockage souterrain

2.2 REGLEMENTATION EN VIGUEUR DANS D'AUTRES PAYS

Afin de mettre quelque peu en perspective l'état actuel de la législation française en matière d'abandon (vue au § 2.1) au regard des situations à l'étranger, il nous a semblé intéressant d'établir un panorama des législations et des pratiques en cours dans d'autres pays. Nous n'avons pas pu, bien entendu, effectuer une analyse comparative détaillée de toutes ces législations par rapport à la législation française mais nous avons rassemblé (en annexe B) un certain nombre d'éléments bibliographiques, notamment de guides de bonnes pratiques en vigueur dans certains pays, que nous avons jugés extrêmement intéressants dans la perspective de la rédaction d'un guide de bonnes pratiques sur l'abandon des stockages souterrains en France.

D'une manière générale, la législation concernant l'abandon des stockages souterrains dans les principaux pays concernés (Etats Unis d'Amérique (E.U.), Allemagne, Belgique, Canada...) est assez difficile à appréhender du fait que certains aspects sont traités localement (au niveau d'un état par exemple pour les E.U.) alors que d'autres renvoient à une législation nationale ou fédérale.

Aux Etats-Unis, les réglementations définissent aujourd'hui de manière très précise, au moins dans certains états concernés comme le Texas et le Kansas,

les règles à respecter en ce qui concerne les opérations d'exploitation de stockages souterrains. Elle est moins riche, en revanche, en ce qui concerne les opérations d'abandon. Mises à part des consignes assez précises concernant le scellement des puits, les textes se limitent à demander que le site soit remis dans un état proche de l'état initial avant stockage de sorte qu'il ne constitue pas une menace, à moyen ou long terme, pour la santé et la sécurité des personnes et des biens.

Au Canada, les réglementations des provinces de l'Ontario, de l'Alberta et de la Nouvelle-Écosse sont également complètes en ce qui concerne la période d'exploitation des stockages mais elles ont également produit des normes ou des guides de bonnes pratiques, très intéressants, décrivant les règles à respecter lors de la conception, la construction et l'abandon des stockages souterrains. A titre d'exemple, la Nouvelle Ecosse a défini des exigences assez précises concernant l'évaluation de l'état initial avant abandon (sonar, essai d'intégrité mécanique des cuvelages et des cimentations), la description des opérations de scellement des puits ou la remise en état de la surface du site.

Au niveau européen, les stockages de gaz et d'hydrocarbures sont visés par la Directive 96/82/CE du 9 décembre 1996 relative à la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses (dite « Seveso II »), modifiée par la directive 2003/105/CE. Ces directives ont conduit la plupart des pays de l'Union Européenne à actualiser (et à homogénéiser autant que possible) leur législation concernant les stockages souterrains. On constate, là encore, que ces législations sont généralement moins précises pour la phase d'abandon que pour la phase d'exploitation, probablement en raison du faible nombre de cas à ce jour. Elles s'inspirent essentiellement de la législation existante concernant la fermeture des puits de production de gaz et d'hydrocarbures (notamment en Grande Bretagne et en Belgique) ou des guides de bonnes pratiques élaborés par le SMRI (Solution Mining Research Institute) pour les exploitations de sel (notamment en Allemagne).

2.3 CONCLUSION

Le cadre législatif et réglementaire en vigueur en France concernant l'abandon des stockages souterrains est essentiellement celui des mines. Ce cadre général est aujourd'hui bien posé (notamment par le Titre V_{bis} du code minier et les décrets n°2006-648 et n°2006-649 du 2 juin 2006) et apparaît globalement adapté aux stockages souterrains.

Toutefois, en France comme à l'étranger, la mise en pratique de cette réglementation n'est pas toujours précise et la présente synthèse confirme clairement la nécessité, à ce stade, de définir en France des règles de bonnes pratiques à respecter lors de l'abandon d'un stockage souterrain : règles afférentes au déstockage, à la fermeture des puits, aux mesures de prévention et de surveillance à mettre en place, etc. Il existe d'ores et déjà un certain nombre de documents, notamment au Canada, qui peuvent servir de base à ce travail. C'est également l'objet du présent rapport que de constituer une étape préparatoire à l'élaboration de telles règles.

Il faut aussi noter que, dans le domaine pétrolier, un certain nombre de règles ont été définies pour la fermeture des puits. Celles-ci sont précisées dans le

Règlement général des industries extractives (Titre « Recherche par forage, exploitation de fluides par puits et traitement de ces fluides » du RGIE (Règlement Général de l'Industrie Extractive) institué par le décret n° 2000-278 du 22 mars 2000). Le lecteur pourra en trouver une synthèse, ainsi que les principaux extraits, en annexe C. Il conviendrait probablement d'en prévoir la transposition aux stockages souterrains, soit sous la forme d'un texte réglementaire, soit sous la forme d'un guide. C'est une recommandation qui apparaît également dans un rapport du 5 avril 2006 du Conseil Général des Mines [CGM, 2006].

Enfin, les stockages souterrains ne sont pas soumis, à l'heure actuelle, à l'établissement de Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM). Il conviendra donc, pour les risques résiduels après l'abandon, de mener une réflexion sur la possibilité d'étendre le champ d'application des PPRM, au moins pour partie ou pour certains concepts, aux stockages souterrains. Une piste de réflexion alternative consisterait à étendre le PPRT au-delà de la phase d'exploitation. Dans les deux cas, cela suppose un certain nombre de modifications des textes réglementaires. Dans ce cadre, l'INERIS serait tout à fait disposé à apporter son appui à l'Administration.

3. LES RETOURS D'EXPERIENCE DISPONIBLES EN MATIERE D'ABANDON DES STOCKAGES SOUTERRAINS

A l'heure actuelle, la plupart des stockages souterrains sont toujours en phase d'exploitation. Néanmoins, quelques cas d'abandon sont d'ores et déjà recensés et des expériences sont menées ici ou là en France ou à l'Etranger. D'autre part, une première expérience a été acquise au cours de ces dernières années dans des domaines connexes tels que l'abandon des cavités salines exploitées par dissolution, l'abandon des puits d'exploitation dans le domaine pétrolier ou encore l'abandon des mines et carrières souterraines. Ces retours d'expérience peuvent être grandement mis à profit pour la spécification des bonnes pratiques à mettre en œuvre lors de l'abandon d'un stockage souterrain, comme peut être mise à profit, également, l'expérience accumulée par les exploitants tout au long de la phase d'exploitation.

Le but de ce chapitre est de dresser un inventaire le plus exhaustif possible des retours d'expérience disponibles à l'heure actuelle en matière d'abandon. L'objectif est de constituer une base informative à partir de laquelle pourra s'engager un travail de réflexion et d'élaboration des bonnes pratiques concernant l'abandon des stockages souterrains. Cette base informative est naturellement utilisée, avant tout, pour l'élaboration du présent document et notamment, la rédaction des chapitres 4, 5 et 6.

Pour les lecteurs non-spécialistes, nous proposons, en préambule au présent chapitre de se référer à l'annexe D pour un rappel général sur les principes des stockages souterrains et sur la configuration d'un stockage (installations types) en phase d'exploitation. Ce rappel peut permettre de mieux comprendre la nature des opérations techniques réalisées lors de la phase d'abandon (qui seront décrites au chapitre 4).

3.1 LE STOCKAGE EN CAVITES SALINES DE CARRESSE-CASSABER

Le stockage de Carresse-Cassaber (Pyrénées-Atlantiques) est un des deux cas d'abandon de stockage souterrain (avec le stockage en cavités minées de May-sur-Orne) actuellement recensés en France. Il s'agissait d'un stockage de propane liquéfié en cavités salines, d'une capacité totale relativement faible d'environ 44 000 m³, réparti en 3 cavités situées à des profondeurs de 300 à 400 m, exploité par Total Exploration & Production France depuis 1960 (Figure 4). La méthode d'exploitation utilisée était la méthode de compensation par balancement de saumure (voir annexe D, § D.3.2).

La fermeture de ce stockage a été décidée en 2001 suite à la décroissance de la production de propane à Lacq. L'arrêt de l'exploitation a été notifié en 2002 au préfet des Pyrénées-Atlantiques après le déstockage complet du propane.

Les opérations de fermeture, réalisées en association avec Geostock, l'Ecole Polytechnique et Brouard Consulting ont consisté en la réalisation successive des actions suivantes [de Laguerie et al., 2004] :

- 2001 - 2002 : Vidage complet des cavités ;
- 2002 - 2003 : Suivi de la température de la saumure dans les cavités ;

- 2002 - 2003 : Bilan hydrogéologique du site, avec mesures piézométriques et analyses des eaux afin de vérifier l'absence d'écoulement de saumure dans l'environnement ;
- 2003 - 2004 : Elimination du propane resté piégé dans les cavités (opérations de dépiégeage) ;
- 2002 – 2004 : Essais et étude pour vérifier la stabilité et l'étanchéité à long terme des cavités après abandon [Brouard et al., 2004] ;
- 2004 : Validation des résultats des essais et des calculs par un essai longue durée de mise en pression d'une cavité de propane avec suivi des pressions ;
- 2005 : Mesure de la forme des cavités par sonar ;
- 2005 : Mesure de l'état des cuvelages des puits ;
- 2005-2006 : Démantèlement complet des installations de surface : canalisations, câbles, bâtiment, bassin de saumure. Remise en état des terrains pour les rendre propres à un usage agricole ;
- 2005 : Mise en place des bouchons de ciment dans les puits.

A l'heure actuelle, une période d'observation est en cours durant laquelle un suivi des mouvements de surface et des écoulements est réalisé. L'administration devrait se prononcer en 2008 sur la demande de renonciation au stockage.

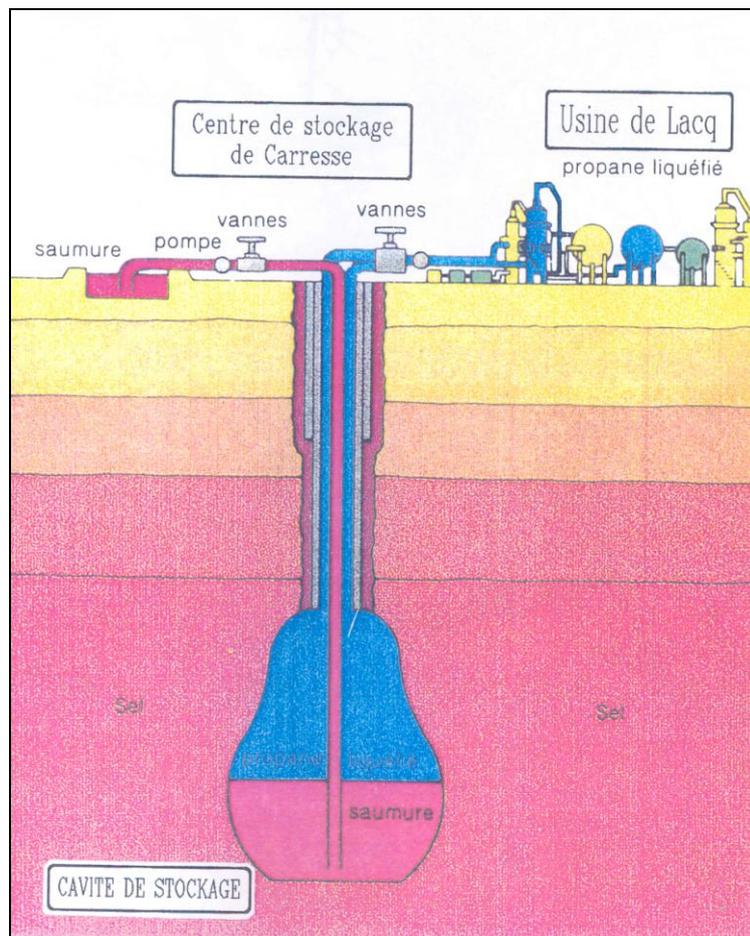


Figure 4 : Schéma de fonctionnement du stockage de Caresse-Cassaber

3.2 LE STOCKAGE EN CAVITE MINEE DE MAY-SUR-ORNE

L'autre cas d'abandon de stockage souterrain recensé en France est le stockage d'hydrocarbures de May-sur-Orne (Calvados). Notons que ce cas n'est pas représentatif des stockages en cavités minées actuellement exploités en France. Il se singularise par plusieurs aspects : tout d'abord, les cavités utilisées pour ce stockage n'ont pas été excavées à cet effet (il s'agit d'une ancienne mine de fer) et n'ont donc pas profité des mêmes règles de conception et de dimensionnement que celles qui s'appliquent aux cavités créées spécialement pour le stockage. De plus, le produit stocké, du gasoil, ne fait pas partie des hydrocarbures habituellement stockés en cavité minées en France. Par conséquent, le retour d'expérience de ce cas d'abandon vis-à-vis des stockages actuels en cavités minées ne pourra être que limité.

Le stockage a été réalisé dans une ancienne mine de fer. L'exploitation du minerai a débuté au XIX^{ème} siècle et a cessé en 1968. Une couche de minerai de fer de 5 à 6 m d'épaisseur a été exploitée sur les deux flancs d'un synclinal par la méthode des chambres magasins (Figure 5).

L'exploitation du stockage d'hydrocarbures par la société Geomines Caen a débuté en 1971 et s'est prolongée jusqu'en 1983. A cette date, pour des raisons économiques et suite à une perturbation du stockage par une activité microbienne productrice de méthane, la décision d'abandonner le stockage et de vidanger totalement les cavités a été prise. Cette vidange a été réalisée de 1984 à 1988 [Geostock, 1988] et la surveillance poursuivie jusqu'en 1994.

Le mode d'exploitation choisi a été le soutirage par compensation hydraulique (similaire à la technique de compensation par balancement de saumure dans les cavités salines, voir Annexe D), bien adapté à la configuration structurale du site. Le stockage a été réalisé à la fois sur le flanc Nord du synclinal, d'une capacité de stockage de $1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et sur le flanc Sud de celui-ci, d'une capacité de stockage de $3,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Figure 5).

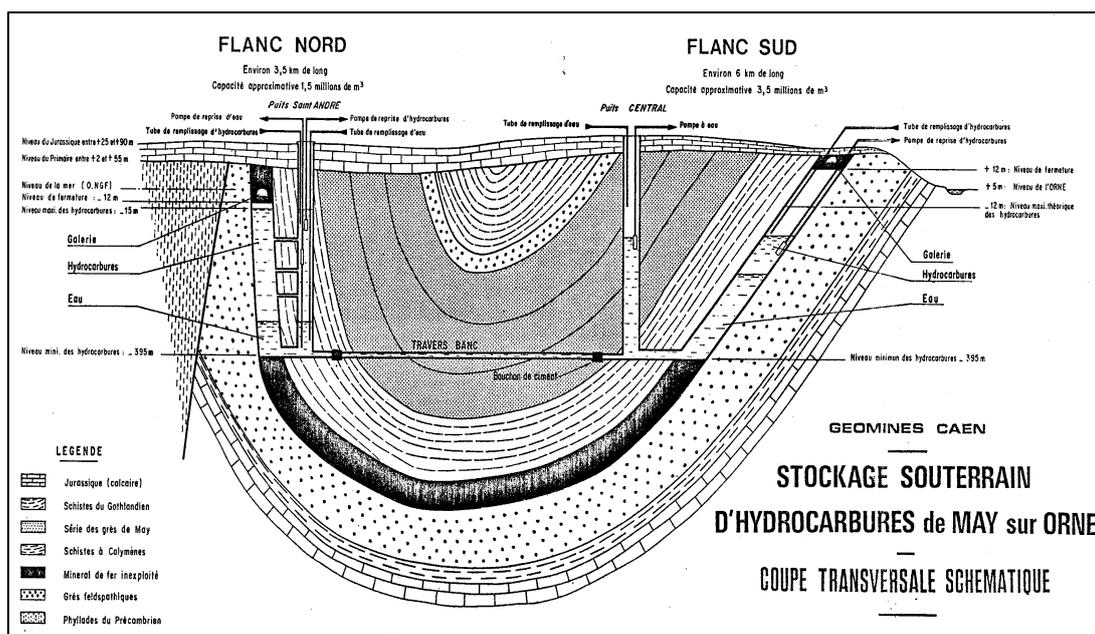


Figure 5 : Le stockage souterrain de May-sur-Orne

Peu de temps avant son abandon, le stockage a été l'objet d'un dégagement de méthane qui a atteint 700m³/j, résultant d'une activité bactérienne qui s'est développée à l'interface eau/hydrocarbure. La cause première de l'abandon n'a toutefois pas été cette « méthanisation » (pour laquelle une solution technique avait été mise en œuvre par la société GEOSTOCK pour assainir le site et traiter le phénomène) mais surtout la viabilité du stockage dans le contexte économique de l'époque. Une « demande en renonciation d'autorisation d'exploitation » (terminologie d'usage à l'époque) des cavités de stockage souterrain de May-sur-Orne a été adressée par l'exploitant au préfet en décembre 1987. Un dossier technique présentant le principe des différents traitements envisagés concernant les risques afférents au produit stocké, à l'eau, aux vides, aux accès et aux ouvrages de surface a été soumis pour avis à l'administration en juin 1988. Il a permis le démarrage des travaux d'abandon, notamment le remplissage des cavités par des eaux de surface en provenance de l'Orne. Avant injection, ces eaux ont été traitées au bisulfite de sodium, afin d'éviter toute contamination du milieu souterrain. Au fur et à mesure du remplissage des vides les surnageants, composés de restes d'hydrocarbure, ont été écrémés. Cette opération s'est déroulée de 1989 à 1990. Ceci a permis de récupérer les hydrocarbures piégés dans la géométrie de la mine⁴. Par la suite, durant les deux années de surveillance qui ont validé le modèle de remontée des eaux, il n'est pas apparu de pollutions significatives au niveau des forages à proximité du stockage. Le stockage a été rétrocédé à l'Etat par la société Geomines en 1994.

Depuis cette date, l'Etat (DRIRE) réalise un suivi des propriétés physico-chimiques des eaux de surface, en particulier des eaux de l'Orne. Les eaux d'exhaure drainant les vides miniers (rejetées dans l'Orne) ont également fait l'objet d'une surveillance régulière jusqu'en 1997. Des analyses d'eau complémentaires ont été réalisées en 2004 par l'INERIS dans le cadre de la réalisation de la phase d'aléa du Plan de Prévention des Risques Miniers.

3.3 LES AUTRES CAS D'ABANDON EN FRANCE ET DANS LE MONDE

De manière inattendue, les recherches bibliographiques⁵ menées par les auteurs de ce rapport n'ont pas permis d'identifier, au niveau mondial, de cas d'abandon de stockages souterrains autres que ceux de Caresse-Cassaber et de May-sur-Orne en France ; d'Anvers, de Peronnes et d'Anderlues en Belgique et de Weeks Island⁶ au Etats-Unis.

Notons, en ce qui concerne la France, qu'un autre stockage, celui de Gargenville (exploité par la société Géovexin) a fait récemment l'objet d'un dossier d'arrêt. Cependant, la procédure n'en étant qu'à sa phase initiale, nous n'avons pas pu

⁴ Notons que dans le cas de cavités minées créées spécialement pour le stockage d'hydrocarbures, la géométrie des cavités est pensée pour éviter d'éventuels pièges géométriques.

⁵ Celles-ci se sont basées sur la consultation de sites web, dont en particulier celui du SMRI (Solution Mining Research Institute), de revues internationales et de rapports disponibles sur cette thématique. L'annexe C (pour les liens web) et la liste des références consultées (voir § 8) attestent de l'ampleur des recherches effectuées.

⁶ Le stockage fédéral de pétrole en mine de sel de Weeks Island aux USA a été abandonné suite à la survenue de fontis. Ce cas est évoqué en annexe F.

disposer ou utiliser de documents à ce sujet. Par ailleurs, notons également qu'une expérimentation d'abandon, à vocation interne pour l'instant, est actuellement menée par Gaz de France sur une des cavités du stockage de Tersanne.

Par ailleurs, il existe à notre connaissance trois cas d'abandon de stockage en Belgique :

- le cas du stockage de GPL (propane et butane) d'Anvers [Huber, 1964]. La réalisation de ce stockage fut confiée par la société DISTRIGAZ à la société FORAKY en 1960. Il s'agissait de réaliser des cavités dans l'argile de Boom (en partie sous l'Escaut). Une première tranche d'une capacité d'environ 10000 m³ fut exécutée manuellement à une profondeur d'environ 80 m. Une seconde tranche d'une capacité d'environ 20000 m³ fut creusée mécaniquement à une profondeur de 45 m. Ces cavités furent vidées et démantelées au cours des années 1990, puis remblayées en 2007 ;
- les cas des stockages de gaz naturel dans les mines de charbons abandonnés de Péronnes-Lez-Binche et d'Anderlues [Nulens et al., 2003]. L'exploitation du charbon cessa en 1969 et fut suivi d'une exploitation du grisou entre 1970 et 1978. La société DISTRIGAZ valorisa ensuite les anciens vides miniers à partir de 1982 en réalisant un stockage de gaz naturel d'une capacité maximale de 141,6 millions de m³ (pour une pression maximale de 0,35 MPa). L'exploitation commerciale se termina en 1991 pour des raisons économiques. Les cavités de stockage furent vidées après plusieurs cycles de désorption ; les fermetures des puits d'accès furent réalisées à partir de 2000 (ces actions étaient en cours d'achèvement en 2009).

Dans ces 3 cas, la décision de fermeture du stockage fut motivée par le coût trop élevé d'une modernisation des dispositifs de sécurité et de l'instrumentation des cavités (notamment les mesures nécessaires au contrôle des niveaux en cavité).

Ce faible nombre de cas recensés par les auteurs peut s'expliquer, d'une part, par la relative jeunesse de la pratique du stockage souterrain (la plupart des stockages ont été construits il y a moins de cinquante ans alors que leur durée de vie théorique est typiquement de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'années) et d'autre part, par la confidentialité des informations qui entourent l'abandon de certains stockages, notamment militaires.

3.4 L'EXPERIENCE ACQUISE AU COURS DE LA PHASE D'EXPLOITATION

Le savoir-faire accumulé par l'exploitant, ainsi que les exigences réglementaires qui s'imposent à lui à tous les stades de la vie d'un stockage (recherche, conception, construction, exploitation, restitution) peuvent bénéficier également à la définition des règles qui doivent s'appliquer lors de l'abandon.

On peut trouver, dans la littérature, de nombreuses informations sur le dimensionnement des cavités minées. Celles-ci peuvent s'avérer extrêmement utiles pour l'analyse des risques, notamment de types « mouvements de terrain », qui pourraient subsister après abandon. Citons en particulier les travaux relatifs au dimensionnement de stockages en cavités minées menés en Corée du Sud, en Australie, au Zimbabwe ou en Chine (des détails sont donnés en annexe E). Ceux-ci traitent de la stabilité des cavités et leur impact sur le milieu environnant.

Par ailleurs, la déclaration d'arrêt des travaux (Figure 2), puis la demande d'acceptation de renonciation au titre (Figure 3), imposent à l'exploitant une description de l'impact du stockage sur le contexte géologique, géotechnique et hydrogéologique. Cette description s'appuie sur des mesures (geophysiques, géomécanique, hydrogéologiques, hydrochimiques) et des modèles (analytiques, numériques) réalisés aux cours de l'exploitation et pendant la phase de restitution.

Ces éléments sont particulièrement utiles dans le cas des stockages en cavités minées, où l'analyse des risques résiduels après abandon ne peut pas tirer profit du retour d'expérience de cas d'abandon précédents (ceux-ci sont en effet aujourd'hui relativement limités).

3.5 L'EXPERIENCE ACQUISE DANS DES DOMAINES CONNEXES

Heureusement, une expérience abondante en matière d'abandon a été acquise dans des domaines assez proches de celui des stockages souterrains. Cette expérience pourra être largement mise à profit dans le cadre des réflexions sur l'abandon des stockages souterrains. Nous déclinons ci-après ces principaux domaines.

3.5.1 LES EXPLOITATIONS DE GISEMENTS DE GAZ ET D'HYDROCARBURES

Les exploitants de gaz et de pétrole ont accumulé, depuis plusieurs dizaines d'années, un savoir-faire important dans le domaine de la fermeture des puits d'exploitation. Ce savoir-faire a d'ailleurs permis la définition de règles précises au niveau national, rassemblées dans le Titre « Recherche par forage, exploitation de fluides par puits et traitement de ces fluides » du règlement général des industries extractives (décret n° 2000-278 du 22 mars 2000) dont nous donnons quelques extraits en annexe C. Il conviendra d'examiner comment ces règles peuvent être transposées aux stockages souterrains.

3.5.2 LES EXPLOITATIONS DE SEL PAR DISSOLUTION

Une expérience intéressante concernant l'abandon des stockages en cavités salines peut également être tirée de l'étude du comportement des cavités laissées par les anciennes exploitations de sel aujourd'hui abandonnées. Même si ces cavités n'ont pas été créées à des fins de stockage et ne répondent pas aux mêmes critères de conception et de dimensionnement qu'une cavité de stockage, l'étude de leur évolution après leur abandon peut apporter des informations utiles sur les phénomènes qui peuvent survenir à long terme dans et au voisinage d'une cavité saline.

Parmi les travaux menés sur cette problématique en France, on peut citer les nombreuses publications de P. Berest (à titre d'exemple la synthèse sur l'exploitation du sel en France : [Berest et al., 2004]) et celle de Feuga [2003] sur la mine de Dieuze. D'autres études seront mentionnées au § 6.

A l'étranger, la problématique de l'abandon des cavités salines suscite également de nombreuses études. Citons par exemple les expérimentations menées dans la région d'Etzel, au Nord-Ouest de l'Allemagne [Thoms et al., 2000 ; Schweinsberg et al., 2004, Staudmeister et al., 1998 ; Rokahr et al., 2000 ; Hauck et al., 2001]. Certains résultats issus de ces travaux seront exploités au § 6.3.

3.5.3 LES ANCIENNES MINES ET CARRIERES SOUTERRAINES

On dispose en France, en particulier à l'INERIS, d'un fort retour d'expérience sur le comportement à long terme et l'impact sur la sécurité et l'environnement d'anciennes exploitations minières⁷ ou carrières souterraines. Cette expérience peut également nous éclairer sur les risques d'instabilités et de pollutions à long terme qui peuvent potentiellement affecter un stockage en cavité minée après abandon, notamment au niveau des ouvrages d'accès. Ce dernier point sera examiné au § 6.4.1.

⁷ En ce qui concerne la fermeture et la post-fermeture d'exploitations minières, un important retour d'expérience est disponible au sein de GEODERIS et de ses membres fondateurs, INERIS et BRGM.

4. DESCRIPTION DES OPERATIONS TECHNIQUES D'ABANDON

Ce chapitre vise à donner un aperçu de la manière dont les opérations techniques d'abandon se déroulent pour les différents types de stockages souterrains. Il s'agit ici de décrire les pratiques existantes et non de proposer, d'ores et déjà, des recommandations.

Cette synthèse est basée notamment sur ce qui a été fait lors de la fermeture des sites de stockage français de May sur Orne [Geostock, 1988] et de Caresse-Cassaber [Total E&P France, 2004], ainsi que sur un certain nombre de documents généraux [Nova Scotia Department of Energy, 2002 ; Kansas Department of Health and Environment, E.U., 2002 ; Mark Jennings, 2006 ; Jug Manocha & Onorio Cicchini, 2002 ; Joe L. Ratigan, 2003 ; Fritz Crotogino & Jürgen Kepplinger, 2006].

4.1 LES OPERATIONS DE DESTOCKAGE

Le déstockage consiste à procéder au soutirage définitif du produit stocké, à son évacuation et à son traitement éventuel ou élimination.

4.1.1 DANS LE CAS DES STOCKAGES EN MILIEU POREUX

Dans le cas d'un stockage en milieu poreux (que ce soit en nappe aquifère ou en gisement déplété), le déstockage n'est que partiel. En effet, une partie du gaz injecté (de l'ordre de la moitié) n'est pas récupérée : il s'agit du gaz coussin. Celui-ci reste piégé dans les pores les plus petits et est donc difficilement mobilisable.

Toutefois, les pétroliers ont mis au point des techniques efficaces de récupération assistée qui permettent de laisser de moins en moins d'hydrocarbures dans les formations productrices. Il pourrait être intéressant d'étudier l'applicabilité de ces techniques à la réduction de la quantité de gaz piégé lors de l'abandon d'un stockage.

Dans le cas d'un stockage en gisement déplété, la récupération assistée du gaz stocké par injection de CO₂ (dans la mesure où les volumes et opportunités locales s'avéreraient favorables) est une opportunité qui pourrait être envisagée pour restituer les conditions de pression initiale dans le gisement⁸. Cela reviendrait finalement dans ce cas à transformer le stockage de gaz et d'hydrocarbures en stockage de CO₂.

4.1.2 DANS LE CAS DES STOCKAGES EN CAVITES SALINES

La procédure classique consiste à réaliser successivement les opérations suivantes :

⁸ Cette injection serait moins nécessaire dans le cadre d'un stockage en aquifère dans la mesure où le « water-drive » naturel (« poussée » de l'eau présente initialement dans l'aquifère hôte confinant le gaz stocké) permet de maintenir .davantage le gaz en pression.

- *Vidage complet des cavités du produit stocké* : au fur et à mesure de son évacuation, le produit est remplacé par de la saumure⁹ de telle sorte que la cavité reste sous pression. Le bon déroulement de cette phase peut être contrôlé par le suivi du niveau de l'interface entre le produit stocké et la saumure : soit à partir de la connaissance du volume de saumure injecté, soit par mesure directe (« log Gamma-Gamma », encore appelé « log de densité »), soit à partir de la mesure de pression en tête de puits. Lorsque l'interface se rapproche du dernier sabot de tubage (« casing shoe »), il est parfois recommandé [Crotogino et al., 2006] d'interrompre les opérations pour permettre à la saumure de se saturer et, ainsi, de réduire les risques de dissolution de sel à proximité du sabot de tubage. En pratique, cette interruption n'est généralement pas nécessaire ;
- *Elimination du produit resté piégé dans la paroi des cavités (opération dite de « dépiégeage »)* : dans le cas des stockages d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés (GPL, pétrole brut) ou de produits chimiques à destination industrielle, une des méthodes utilisées pour récupérer le produit piégé consiste à injecter dans la cavité de l'azote sous pression, l'excès de saumure étant récupéré au fur et à mesure de l'injection d'azote. Lorsqu'une quantité suffisante de saumure est évacuée, on procède à la décompression de l'azote jusqu'à atteindre une pression en cavité inférieure à la tension de vapeur du produit piégé. Celui-ci commence alors à se vaporiser et s'évacue progressivement des pièges en remontant au toit de la cavité, puis jusqu'en surface où il est brûlé à la torche. Il convient de vérifier toutefois que la cavité ainsi décomprimée reste stable. C'est cette méthode qui a été utilisée pour les cavités salines de Caresse-Cassaber [Total E&P France, 2004]. Un autre procédé, proposé par Crotogino et al. [2006], consisterait à lessiver lentement la paroi de la cavité pour la lisser en dissolvant les aspérités susceptibles de piéger le produit. Compte tenu de son coût, cette deuxième option n'a d'intérêt que s'il y a une grande quantité de produit piégé. De plus, le contrôle du lessivage peut être très délicat à réaliser en pratique.

4.1.3 DANS LE CAS DES STOCKAGES EN CAVITES MINEES NON REVETUES

Dans le cas d'un stockage en cavités non revêtues¹⁰, nous avons vu que le maintien du produit stocké dans la cavité est assuré, pendant l'exploitation, par confinement hydraulique, que celui-ci soit entièrement naturel ou assuré/renforcé par la méthode du rideau d'eau.

D'une manière générale la récupération du produit stocké s'effectue en 4 phases successives :

1) par soutirage, les phases liquide et vapeur éventuelle du produit sont évacuées à l'aide des équipements d'exploitation qui pourront être aménagés de manière à conserver un suivi adaptés des niveaux et pressions en cavité,

⁹ L'injection d'eau douce, en remplacement de la saumure, est également envisageable. Toutefois, celle-ci mènera à un agrandissement de la cavité par dissolution du sel (il faut alors s'assurer que le dimensionnement mécanique de la cavité le permette) et nécessitera d'attendre que la saturation soit atteinte avant de fermer la cavité.

¹⁰ Compte tenu de l'inexistence de cavités revêtues en France à l'heure actuelle, nous n'aborderons pas, dans la suite de ce document, la problématique de leur abandon. Signalons toutefois que, dans ce cas, en principe, il n'y a pas d'échange de fluide au niveau des parois de la cavité. Par conséquent, les opérations de nettoyage s'en trouvent facilitées.

- 2) par balayage à l'eau de la cavité de stockage,
- 3) par inertage éventuel de la phase gaz résiduel et
- 4) par remplissage complet de la cavité jusqu'au retour à l'équilibre hydrostatique.

Au cours des 3 premières phases le stockage restera sous conditions de confinement hydrodynamique semblable à celles appliquées en phase courante d'exploitation.

Avant d'enclencher la dernière phase de retour à l'hydrostatique, les teneurs résiduelles ou traces de produits dissoutes dans l'eau de remplissage seront considérées comme acceptables : La cavité sera considérée comme « nettoyée », c'est-à-dire vidée et purgée des phases « facilement » mobilisables du produit stocké.

Pour les opérations de « nettoyage », on pourrait imaginer que les cavités soient entièrement vidées. Afin de ne pas compromettre la stabilité mécanique ainsi détériorée, les cavités devraient alors être remblayées ou re-confortées après cette opération avant remplissage en eau.

Dans le cas des cavités minées, il est également nécessaire de nettoyer et de démanteler le réseau de canalisations souterraines. Le nettoyage des cuves et des canalisations peut être réalisé par de l'eau à haute pression pour les hydrocarbures légers et de l'eau chaude avec un agent détergent dégraissant pour les hydrocarbures lourds. Un démontage et un découpage partiel des canalisations peut être réalisé afin de faciliter les opérations de nettoyage.

Avant de réaliser ces différentes opérations, il convient de préciser les conditions d'inflammabilité des produits stockés pour éviter les risques d'explosion au cours des opérations de démantèlement. On se base pour cela sur des diagrammes indiquant la variation des limites d'inflammabilité d'une vapeur combustible en fonction de la température. Ces canalisations peuvent contenir des résidus d'hydrocarbures et une atmosphère inflammable peut y être présente localement. C'est pourquoi certains procédés de découpage au chalumeau (oxycoupage) ou à la tronçonneuse à disque, par exemple, sont proscrits, de même qu'un certain nombre de précautions sont prises pour éviter la formation d'atmosphères inflammables tout au long de ces opérations.

4.2 L'ETABLISSEMENT D'UN ETAT DU STOCKAGE AVANT FERMETURE DES OUVRAGE D'ACCES

Une connaissance précise de l'état du site au moment de l'arrêt des travaux est un préalable indispensable à une prédiction réaliste de son évolution à long terme et par conséquent, à une évaluation convenable des risques associés. C'est aussi l'occasion d'établir un « point zéro » pour les paramètres susceptibles d'être soumis à une surveillance pendant la phase de restitution¹¹ ou après l'abandon.

Un diagnostic précis de l'état du stockage au moment de l'arrêt des travaux passe tout d'abord par une bonne connaissance de l'historique de sa construction et de son exploitation. Il peut être également nécessaire, pour affiner le diagnostic, de

¹¹ On rappelle que la phase de restitution se déroule entre l'arrêt des travaux et l'abandon du stockage. Elle inclut la phase de réalisation des opérations techniques d'abandon, mais peut se prolonger au delà de sorte à laisser le stockage évoluer vers un nouvel état proche de l'équilibre.

prévoir un complément de caractérisation des cavités de stockage (à l'aide de mesures sonar ou de logs de densité) et de l'état des puits (à l'aide de diagraphies soniques ou ultrasoniques).

Quel que soit le type de stockage concerné, un point essentiel est l'évaluation de l'état des puits avant fermeture. Il s'agit en particulier :

- de rassembler l'ensemble des données relatives à la description des différents cuvelages ;
- d'évaluer¹² l'état des cuvelages¹³ et de la cimentation¹⁴ des puits au moment de l'abandon.

Si un endommagement du puits est constaté, un traitement est alors mis en œuvre. Certains de ces traitements sont présentés dans Merritt [2002]. En particulier, il existe des moyens de traitement des cuvelages contre la corrosion interne et la prolifération bactérienne.

Après avoir discuté de l'évaluation de l'état des puits, nous présentons ci-après des opérations spécifiques à chaque type de stockage.

4.2.1 DANS LE CAS DES STOCKAGES EN MILIEUX POREUX

Le devenir à long terme d'un stockage en milieu poreux et des produits laissés en place (notamment du gaz coussin) dépend essentiellement de l'importance des déséquilibres (thermiques, hydrauliques) existant au sein du réservoir au moment de l'abandon.

Ces déséquilibres peuvent être importants [Mainguy et al., 2007] et peuvent être évalués de deux manières, soit par une mesure directe des températures et des pressions en différents points du stockage, soit indirectement par une modélisation numérique du type « modèle réservoir », classiquement utilisée par les exploitants. Ce type de modèle nécessite un calage préalable et une représentation précise de la géométrie du stockage.

Il est également important de pouvoir préciser la quantité de gaz restante (gaz coussin) ainsi que sa localisation.

¹² Joe L. Ratigan [2003] recommande notamment de vérifier l'intégrité des sabots de tubage (« Casing shoe ») avant le scellement du puits. Un essai mécanique standard (« mechanical integrity test » MIT) peut-être réalisé pour confirmer l'étanchéité de la cimentation autour du dernier sabot de cuvelage (le plus profond).

¹³ L'acier du cuvelage tend à se corroder au cours du temps. La cinétique de corrosion de l'acier dépend à la fois des caractéristiques propres de l'acier et des agressions extérieures (mécaniques, chimiques, biologiques) auxquelles il est soumis pendant l'exploitation du stockage et après l'abandon.

¹⁴ L'anneau de ciment mis en place pour « isoler » hydrauliquement le puits peut se détériorer de différentes manières : du fait des variations des contraintes effectives liées à la surpression imposée pendant l'exploitation du stockage ; par lixiviation lente par l'eau présente dans le ciment ou encore par la dégradation progressive des propriétés du ciment. La cinétique de ces réactions mécaniques, hydriques ou chimiques est fortement liée à l'environnement et aux conditions de température et de contrainte. Elles a pour effet d'augmenter la porosité et la perméabilité du ciment et de diminuer sa résistance à la compression, à la traction et au cisaillement.

4.2.2 DANS LE CAS DES STOCKAGES EN CAVITES SALINES

Dans le cas des stockages en cavités salines, comme on le verra au chapitre 5, l'évaluation des aléas ou impacts à long terme liés à l'abandon d'une cavité nécessite de déterminer avec précision avant fermeture des ouvrages d'accès :

- la forme de la cavité. Celle-ci peut être déterminée par mesure sonar ;
- la position du toit de la cavité. Celui-ci peut être déterminé par la réalisation d'un log de type « log de densité » ou par mesure sonique ;
- l'évaluation des volumes de fluides dans la cavité ;
- la température de la roche et de la saumure.

De plus, la calibration des modèles permettant de prédire le comportement à long terme des cavités nécessite de déterminer (si cela n'a pas déjà été fait au cours de l'exploitation) les paramètres caractérisant le comportement thermomécanique et notamment le fluage du sel, ainsi que la compressibilité de la cavité.

Enfin, il convient de préciser la vulnérabilité des enjeux dans l'environnement du stockage (présence de ressources en eau potable par exemple) [Berest et al., 2005].

4.2.3 DANS LE CAS DES STOCKAGES EN CAVITES MINEES NON REVETUES

Dans le cas où l'accès direct aux cavités est rendu possible lors de l'abandon (comme ce fut le cas, très partiellement, à May-sur-Orne), un examen approfondi de l'état et de la géométrie des galeries, ainsi que de l'état des parois, peut être extrêmement instructif. Dans tous les cas, il peut être également intéressant d'entreprendre une caractérisation de la perméabilité et de la résistance des terrains. La comparaison de ces données avec celles obtenues avant exploitation (quand elles sont disponibles) peut permettre de comprendre et de quantifier les mécanismes de dégradation éventuels et par suite, de mieux prédire le comportement à long terme (notamment la stabilité et les écoulements) autour des cavités après leur abandon.

A l'issue de la phase de réalisation des opérations techniques d'abandon, les écoulements d'eau vers la cavité tendent à s'annuler (du fait de l'annulation des gradients hydrauliques qui avaient été nécessaires au confinement hydrodynamique du produit). Cela pourrait induire une remontée des pressions interstitielles, une modification du niveau des nappes, une évolution des équilibres géochimiques locaux qu'il conviendra donc de contrôler pendant la phase transitoire.

Il faut noter qu'en pratique les exploitants prolongent en général la phase de restitution, au delà de la phase technique d'abandon, de sorte qu'au moment de l'abandon, le site soit proche d'un nouvel état d'équilibre. Ainsi les évolutions résiduelles susceptibles d'apparaître dans le long terme sont a priori relativement faibles.

4.3 LE BOUCHAGE DES PUIITS ET DES OUVRAGES D'ACCES

Les puits et les ouvrages d'accès sont des voies de communication privilégiées entre le réservoir et les niveaux sus-jacents (aquifères, surface). Le bon

scellement de ces ouvrages est donc une étape essentielle de la procédure d'abandon. En effet, c'est le bon déroulement de ces opérations qui doit garantir l'étanchéité et la stabilité à long terme du stockage.

Quels que soient le type de stockage et le type d'ouvrage considéré (forage, puits, galerie), le bouchon mis en place est conçu pour assurer la stabilité de celui-ci et l'isoler hydrauliquement de son environnement de manière pérenne. Dans le cas d'un forage (ou d'un puits), le principe de réalisation d'un bouchon est le suivant : on commence par mettre en place un obturateur (packer) gonflable à la profondeur exigée. Un « pont » en ciment de plusieurs mètres d'épaisseur est alors réalisé au toit du packer. Ce pont forme la butée sur laquelle va s'appuyer le bouchon de ciment. La réalisation de ce bouchon consiste en un remplissage du forage, en plusieurs étapes successives, de la butée jusqu'à la surface.

Notons que le Titre « Recherche par forage, exploitation de fluides par puits et traitement de ces fluides » du RGIE donne des consignes concernant le diamètre et la longueur des bouchons. Ceux-ci doivent occuper, à l'exception de l'épaisseur des cuvelages, la totalité de la section, initialement forée, du puits et constituer des tranches de 50 à 100 m de longueur (2 fois plus pour la tranche de surface) suivant l'état du puits et la position des niveaux perméables (voir détails en annexe C).

Il peut être également préconisé de retirer le cuvelage du puits sur une certaine hauteur. Cette solution, récemment étudiée par Crotigno et Kepplinger [2006], permettrait d'améliorer l'efficacité du bouchon.

Dans le cas d'un stockage en cavité saline, il convient, préalablement à la réalisation du bouchon, d'effectuer un nettoyage approfondi de la partie haute de la cavité pour éviter que le ciment soit en contact avec des résidus d'hydrocarbures, ce qui pourrait affecter la qualité du scellement. Par ailleurs, dans le cas des cavités salines, certains préconisent [Joe L. Ratigan, 2003] de différer la fermeture de la cavité pour laisser s'équilibrer au maximum les températures du sel et de la saumure et éviter (ou en tout cas limiter) la mise en place de surpressions dans la cavité¹⁵. Dans la pratique cet équilibre est d'autant plus long à obtenir que la cavité est grande et que l'écart entre la température du fluide stocké et le massif rocheux est important.

Enfin, une attention particulière est accordée aux propriétés d'adhérence du ciment, surtout lorsque celui-ci est en contact direct avec le sel environnant [F. Crotogino, 2006]. Les boues de ciment doivent dans ce cas avoir une densité importante, de sorte que le ciment durci soit aussi compact que possible. Les boues doivent également être mélangées à de la saumure saturée pour empêcher toute lixiviation des murs de forage ou toute dissolution du sel. Le ciment ne doit également souffrir pratiquement d'aucun retrait pendant sa déshydratation¹⁶ de sorte qu'aucune fissuration ne soit créée dans le ciment et à l'interface avec la roche.

¹⁵ Après fermeture d'une cavité saline, la pression de saumure tend à augmenter du fait notamment du fluage du sel et de la dilatation thermique de la saumure. Nous reviendrons sur la quantification de cette surpression au § 6.3.1.

¹⁶ Le ciment dit " de haut fourneau " est généralement recommandé [Crotogino et al, 2006] dans ce cas parce qu'il ne contient qu'un faible pourcentage de ciment dit " de Portland ", de sorte que son retrait est déjà inférieur au ciment conventionnel.

Signalons que le comportement et l'étanchéité à long terme des puits bouchés n'ont pas fait, à notre connaissance, l'objet d'études expérimentales approfondies. On ne dispose pas à l'heure actuelle, d'un retour d'expérience suffisant pour préciser pour combien de temps un traitement peut être efficace. Il s'agit certainement d'un axe de recherche important qui devra mettre à profit les travaux réalisés dans le domaine des stockages de déchets radioactifs (problématique d'étanchéité à long terme des forages et des puits).

4.4 LE DEMANTELEMENT DES INSTALLATIONS DE SURFACE

Les pratiques en matière de démantèlement des têtes de puits varient selon les exploitants et les organes de régulation des pays (ou régions) concernés. Certains organismes [Nova Scotia Department of Energy 2002] recommandent que le cuvelage du puits soit sectionné au moins 1 mètre en dessous de la surface et couverte avec une plaque en acier soudée ou une dalle en béton. D'autres réglementations (par exemple celle du Kansas, E.U.) demandent à ce que les cuvelages restent visibles en surface pour identification et suivi futur des affaissements de surface.

En ce qui concerne les autres installations de surface (station centrale, collectes, plate-formes de puits), celles-ci sont mises progressivement hors gaz (ou « hors produit ») afin de pouvoir désactiver les dispositifs de sécurité et les équipements incendie associés. Dans le cas du gaz naturel, les tuyauteries sont généralement dégazées à l'azote.

Les installations sont alors démantelées (intégralement ou partiellement) selon des pratiques non spécifiques aux stockages souterrains.

5. IDENTIFICATION DES ALEAS LIES AUX STOCKAGES SOUTERRAINS ABANDONNES

5.1 ANALYSE DE L'ACCIDENTOLOGIE

La première démarche permettant d'appréhender la nature et l'importance des aléas¹⁷ qui peuvent survenir à long terme sur un stockage souterrain consiste à étudier l'accidentologie recensée dans ce domaine ou dans des domaines proches.

Nous avons rassemblé, dans ce chapitre, uniquement les cas d'accidents documentés dans la littérature qui nous ont semblé constituer un retour d'expérience intéressant pour l'analyse des aléas liés à l'abandon des stockages souterrains¹⁸. L'annexe F propose une description sommaire de chacun de ces accidents et de leur origine supposée. Le Tableau 1 en reprend les principaux éléments. La plupart de ces cas sont tirés des synthèses de Brouard [2002] et Berest et Brouard [2003]. L'ensemble des sources est cité en annexe F¹⁹.

Notons que pour des raisons d'homogénéité de rédaction, nous utilisons dans tous les cas le terme « d'accident », même si pour certains d'entre eux, il vaudrait mieux parler « d'incident » dans le sens où les événements concernés n'étaient pas prévus mais n'ont pas posé de problème immédiat ou critique pour la sécurité des personnes ou la protection de l'environnement. C'est le cas, par exemple, des affaissements de Tersanne ou d'Eminence.

Sans prétendre à une analyse précise de chaque cas, qui dépasse l'objectif de ce document, on peut souligner que la typologie des 14 cas accidents ainsi relevés consiste essentiellement en :

- des éruptions de gaz en surface (6 cas), qui peuvent conduire à des explosions ou incendies (4 cas). Dans certains cas le gaz est rejeté de façon directe dans l'atmosphère, dans d'autres il s'accumule dans des caves ou fondations de bâtiments jusqu'à explosion (Mont Belvieu 1, Hutchinson). De telles éruptions ne sont susceptibles de concerner, bien entendu, que les stockages souterrains pour lesquels une certaine quantité de produit reste en place après l'abandon, c'est-à-dire essentiellement les stockages en milieux poreux. Dans une moindre mesure, ce phénomène pourrait aussi concerner les stockages en cavités (salines ou minées) dès lors que les opérations de déstockage n'aboutiraient pas, pour des raisons diverses, à un retrait quasi-total du produit ;

¹⁷ Nous utilisons ici le terme d'« aléa » plutôt que celui de « risque ». En effet, dans le cadre du présent document, nous nous intéressons uniquement aux phénomènes dangereux susceptibles de survenir, sans considération des enjeux potentiellement exposés.

¹⁸ Autrement dit, tous les cas d'accidents qui ne sont susceptibles de concerner que les stockages en cours d'exploitation ont été retirés de l'analyse.

¹⁹ Notons qu'Evans et West [2008] ont fait récemment, pour le compte du département anglais d'Hygiène et de Sécurité (HSE, Health and Safety Executive), un inventaire des cas d'accidents recensés au niveau mondial dans le domaine du stockage de gaz et d'hydrocarbures. Faute de temps, ces données n'ont pas pu être intégrées dans le présent document.

	Site	Localisation	Type d'exploitation	Produit exploité	Prof. (m)	Date de l'accident	Type d'accident	Origine supposée
Cas d'accidents/incidents relatifs à des stockages	Leroy	Wyoming E.U.	Stockage en aquifère	Gaz naturel	900	1973 et 1978	Eruption de gaz en surface	Corrosion du cuvelage d'un ancien puits Fracturation de la couverture (« caprock ») due à une surpression
	Mont Belvieu 1	Texas E.U.	Stockage en cavité saline	GPL	400	1980	Eruption de gaz en surface Accumulation dans fondations puis explosion	Corrosion du cuvelage et du ciment du puits d'exploitation
	Mont Belvieu 2	Texas E.U.	Stockage en cavité saline	GPL	400	1993	Effondrement ($\phi=12$ m ; H=6 m)	Agrandissement et remontée de la cavité
	Hutchinson	Kansas E.U.	Stockage en cavité saline	Gaz naturel	150	2001	Eruption de gaz en surface Accumulation dans fondations puis explosions et incendies	Malfaçon lors de la foration d'un ancien puits bouchonné Mise en communication de puits par l'intermédiaire d'une couche très poreuse et perméable
	Eminence	Mississippi E.U.	Stockage en cavité saline	Gaz naturel	1800	1970-72	Affaissement en surface	Fluage important des parois de la cavité (induisant une perte de volume de 40% en 2 ans) dû aux caractéristiques particulières du sel
	Tersanne	Drôme France	Stockage en cavité saline	Gaz naturel	1450	1968-80	Affaissement en surface	Fluage important des parois de la cavité (induisant une perte de volume de 35% en 12 ans) dû aux caractéristiques particulières du sel
	Weeks Island	Louisiane E.U.	Stockage en ancienne mine de sel par chambres & piliers	Pétrole brut	-	1992 et 1995	2 effondrements ($\phi=11$ m ; H=9 m et $\phi=4,3$ m ; H=3 m)	Présence de discontinuités naturelles favorisant les infiltrations d'eau dans la mine de sel \Rightarrow Formation d'une cavité dans le sel par dissolution, puis effondrement
	Brenham	Texas E.U.	Stockage en cavité saline	GPL	800	1992	Eruption de gaz en surface	Sur-remplissage de la cavité Défaillance des systèmes de sécurité
	Moss Bluff	Texas E.U.	Stockage en cavité saline	Gaz naturel	800 à 1200 m	2004	Incendie et explosion	Fuite de gaz par la colonne d'extraction de saumure
	May sur Orne	Calvados France	Stockage en ancienne mine de fer	Gasol	480	1982 et 2006	Emanation de méthane en surface Emanation de radon en surface	Introduction d'une flore bactérienne par l'eau utilisée pour la compensation hydraulique Présence de vides souterrains
Autres retours d'expérience relatifs à des exploitations de gisements de gaz, d'hydrocarbures ou de sel	Pannink Sink	Kansas E.U.	Stockage en gisement déplété	Saumure	1000	1959	Effondrement	Utilisation de boue non saturée pendant le forage du puits + corrosion du cuvelage non cimenté au niveau d'une couche de sel sus-jacente (localisée entre 300 et 400 m de profondeur) + Injection saumure sous-saturée \Rightarrow Formation d'une cavité dans le sel
	Haoud Berkaoui	Algérie	Gisement d'hydrocarbures	Pétrole	couche de sel : 400 à 700	1986	Effondrement ($\phi = 300$ m ; H = 75 m)	Absence de cuvelage dans un puits (niveau évaporitique non protégé) \Rightarrow Formation d'une cavité par lessivage dû à la mise en communication entre deux aquifères
	Wink Sink	Texas E.U.	Gisement d'hydrocarbures abandonné	Pétrole	couche de sel : 390 à 630	1980	Effondrement ($\phi = 110$ m ; H = 34 m)	Dégradation d'un puits abandonné \Rightarrow Formation d'une cavité par lessivage dû à la mise en communication entre deux aquifères
	Cavités SG4 et SG5 de Gellenoncourt	Lorraine France	Exploitation de sel par dissolution	Saumure	couche de sel : 210 à 300	1998	Effondrement provoqué ($\phi=50$ m ; H=120 m)	Dissolution incontrôlée du toit des cavités puis remontée de celles-ci jusqu'au mur d'un banc raide Effondrement provoqué par une reprise de la dissolution
	Twenthe-Rijn	Pays-Bas	Exploitation de sel par dissolution	Saumure	350 et 400 m	1980-95	Affaissement en surface	Fluage important des parois de la cavité
	Heiligrelee brine field	Pays-Bas	Exploitation de sel par dissolution	Saumure	700 et 1400 m	2002	Affaissement en surface	Fluage important des parois de la cavité

(ϕ , H : respectivement diamètre et profondeur de la cuvette d'effondrement en surface)

Tableau 1 : Cas d'accidents/incidents constituant un retour d'expérience pour les stockages souterrains abandonnés

- des mouvements de la surface du sol, qu'il s'agisse d'effondrements brutaux²⁰ (7 cas) ou d'affaissements souples (4 cas). Les mouvements importants proviennent, dans tous les cas recensés ici²¹, d'une dissolution incontrôlée d'une formation évaporitique (sel en général), menant au développement (ou à l'extension) instable d'une cavité, qui remonte ensuite jusqu'à la surface pour provoquer l'effondrement. La cavité à l'origine à l'effondrement peut soit être une cavité existante qui, par reprise de lessivage, devient instable, soit une cavité néo-formée ayant pour origine une mise en communication accidentelle (bouchon ou cimentation de puits défailante, cuvelage absent ou fortement corrodé, etc.) entre deux aquifères. Notons que parmi les 7 cas d'effondrements recensés, seul le cas de Mont Belvieu 2 concerne une cavité de stockage par dissolution, les autres cas recensés concernant soit des cavités salines exploitées pour la production de saumure (Gellenoncourt), soit des mines de sel en chambres et piliers réutilisées à des fins de stockage (Weeks Island), soit des cavités néo-formées par lessivage accidentel d'une couche de sel (Haoud Berkaoui, Wink Sink et Pannink Sink). Ce constat n'est pas étonnant, étant donné que les cavités de stockage sont conçues avant tout avec le souci d'assurer la stabilité (ne serait-ce que pour des raisons de rentabilité économique du stockage), alors que les exploitants miniers, par exemple, sont d'avantage tentés de réaliser des cavités de plus grande dimension et donc parfois moins propices à la stabilité. Notons également que pour tous les cas d'effondrements recensés ici, les cavités qui en sont à l'origine étaient situées à des profondeurs relativement faibles. Aucun cas d'effondrement connu n'a pour origine une cavité située au delà de 700 m. Les affaissements, quant à eux, proviennent dans les 4 cas identifiés (Tersanne, Eminence, Twenthe-Rijn, Heiligrelee brine field) d'un phénomène de fluage d'ampleur importante, ayant abouti à une convergence de la cavité saline susceptible de générer des problèmes en surface ;

- des pollutions d'eaux souterraines ou superficielles (2 cas), soit par du produit résiduel non retiré au déstockage, soit par de la saumure provenant de la dissolution accidentelle d'un niveau évaporitique (cas de Berkaoui) ;

- des émissions de radon (1 cas), provenant de la subsistance de vides souterrains dans lesquels le radon peut s'accumuler et éventuellement, migrer jusqu'à la surface. Ce phénomène n'est susceptible de concerner que les stockages en cavités minées dans un contexte géologique très particulier.

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

²⁰ On appelle « effondrement brutal » l'apparition soudaine en surface d'un cratère, dont l'extension horizontale et la profondeur dépendent du diamètre et de la profondeur des vides souterrains qui en sont à l'origine, ainsi que de la nature des terrains de recouvrement. On appelle « affaissement souple » l'apparition progressive en surface d'une dépression topographique, sans rupture cassante importante, présentant une allure de cuvette.

²¹ Notons que, par souci de limitation, nous n'avons pas inclus dans notre synthèse tous les cas d'effondrements/affaissements documentés dans le contexte des mines et carrières souterraines de natures diverses (hors contexte salin). Certains de ces accidents pourraient aussi constituer un retour d'expérience intéressant pour l'analyse des risques liés aux stockages souterrains, abandonnés, notamment en cavités minées.

- une dégradation (voire une absence) du cuvelage et/ou de la cimentation des puits, que celles-ci soient liées à la corrosion ou à une malfaçon : 7 cas ;
- une absence ou une dégradation de la couverture²² (« caprock ») : 2 cas ;
- l'injection dans une cavité de saumure non saturée ou l'utilisation de boues non saturées pendant les opérations de foration : 2 cas ;
- la mise en contact du produit stocké avec une eau non filtrée, conduisant au développement de bactéries et au dégagement de méthane (cas particulier) : 1 cas ;
- une perte de volume importante de cavité par fluage sous l'effet d'une pression trop faible en cavité relativement aux caractéristiques particulières du sel : 2 cas ;
- la subsistance de vides souterrains après l'abandon, pouvant engendrer la concentration de radon : 1 cas.

Il faut noter que la plupart de ces accidents ont conduit à un renforcement de la réglementation concernant les stockages souterrains dans les différents pays concernés. C'est particulièrement vrai pour la législation américaine suite aux accidents mettant en cause l'état des puits ou un manque de rigueur dans les opérations de contrôle et de surveillance. A titre d'exemple :

- les accidents de Mont Belvieu (1980) et de Brenham (1992) ont conduit à une évolution de la réglementation au Texas en 1993. Ces évolutions concernent : les puits d'exploitation traversant des couches de sel, qui doivent aujourd'hui être équipés d'un double cuvelage²³ ; les systèmes de contrôle et de surveillance pendant et après l'exploitation ;
- les accidents de Hutchinson (2001) et, dans une moindre mesure, celui de Pannink Sink (1959), ont contribué au développement de la réglementation du Kansas. Parmi les nombreuses évolutions apportées, citons notamment que la réglementation impose désormais un meilleur contrôle de l'état de saturation des fluides (saumure, boue de forage) injectées dans des sous-sols comprenant des formations salifères ou évaporitiques, ainsi que du ciment utilisé entre les cuvelages et la formation saline²⁴.

Ainsi, compte-tenu des législations et des pratiques actuelles des exploitants, bon nombre de ces accidents ne se produiraient vraisemblablement plus aujourd'hui.

²² Dans ce document, on appelle « couverture » (ou « caprock ») la couche géologique imperméable qui surplombe immédiatement le réservoir et assure son étanchéité. On distingue la « couverture » du « recouvrement », qui désigne l'ensemble des formations géologiques situées entre le réservoir et la surface.

²³ La réglementation du Texas relative aux stockages souterrains de gaz dans les formations salines précise que : « Tous les puits d'accès à un stockage de gaz foré dans le sel [...] devront avoir au moins deux cuvelages cimentés au niveau de la couche de sel. Le ciment devra remplir l'espace entre le cuvelage et le milieu extérieur, du sabot de tubage à la surface [...] » ([http://info.sos.state.tx.us/pls/pub/readtac\\$ext.TacPage?sl=T&app=9&p_dir=F&p_rloc=128972&p_tloc=29797&p_ploc=14930&pg=26&p_tac=&ti=16&pt=1&ch=3&rl=61](http://info.sos.state.tx.us/pls/pub/readtac$ext.TacPage?sl=T&app=9&p_dir=F&p_rloc=128972&p_tloc=29797&p_ploc=14930&pg=26&p_tac=&ti=16&pt=1&ch=3&rl=61)).

²⁴ Extrait de la réglementation du Kansas (<http://www.kdheks.gov/pdf/regs/28-45.pdf>) : « Le ciment à utiliser pour garnir le cuvelage dans la formation de sel doit être saturé en sel [...] conformément aux normes imposées par la réglementation ».

5.2 LES PRINCIPAUX PHENOMENES REDOUTES ET LEURS MECANISMES INITIATEURS

Cette section a pour objectif d'identifier, dans chaque type de contexte (milieu poreux, cavités salines, cavités minées), les principaux phénomènes susceptibles de constituer un aléa ou un impact à long terme après l'abandon du stockage²⁵, ainsi que les mécanismes qui peuvent conduire à ces phénomènes²⁶. Ces mécanismes (ou scénarii) sont représentés sous forme d'arbres en annexe G. La présente synthèse se base à la fois sur l'accidentologie vue au chapitre précédent (§ 2.1) et sur l'état des connaissances que nous avons pu établir à partir de la littérature.

5.2.1 DANS LE CAS DES STOCKAGES EN MILIEUX POREUX

Les aléas à long terme soulevés par l'abandon des stockages en milieux poreux tiennent essentiellement à la gestion des puits anciennement utilisés pour l'injection et le soutirage du produit stocké. En effet, une altération de la cimentation des puits, de leur cuvelage ou du bouchon de scellement mis en place au moment de l'abandon, peut conduire à une migration, sous forme dissoute ou gazeuse, du gaz laissé en place dans le réservoir vers la surface ou vers des aquifères superficiels susceptibles d'être utilisés pour l'alimentation en eau potable ou participant à l'alimentation de cours d'eau en surface.

Nous listons ci-après l'ensemble des phénomènes dont la réalisation est jugée plausible, au vu des connaissances et de la littérature existante, dans le contexte d'un stockage en milieu poreux.

5.2.1.1 POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES PAR LES GAZ RESIDUELS

Deux types de masses d'eaux souterraines sont potentiellement exposées, à plus ou moins long terme, à une pollution par les gaz résiduels (gaz coussin) laissés en place dans le réservoir après l'abandon du stockage : d'une part l'aquifère hôte (c'est-à-dire celui dans lequel le stockage a été réalisé) et d'autre part les aquifères éventuellement présents dans le recouvrement du stockage.

La pollution de l'aquifère hôte ne dépend que de la capacité du gaz (et de ses impuretés ou additifs) à se dissoudre dans l'eau de cet aquifère. Les conditions de dissolution des produits concernés seront examinées au § 6.2.2.

La pollution des aquifères surplombant le stockage dépend, en revanche, de deux facteurs :

- la migration des produits stockés vers l'aquifère concerné ;
- la dissolution des produits dans l'eau de cet aquifère.

²⁵ Nous identifions ici, de manière générique, tous les phénomènes qui nous apparaissent comme physiquement plausibles dans le contexte d'un stockage souterrain abandonné. Ceci ne préjuge pas qu'ils soient à redouter sur un site particulier. C'est l'analyse de risques propre à ce site qui doit établir si le risque concerné est avéré ou non dans le contexte du site.

²⁶ Nous avons écarté de notre analyse toutes les causes d'accidents qui pourraient être liées à un événement sismique naturel. A noter toutefois que le stockage en souterrain est déjà une disposition parasismique par rapport aux stockages de surface. Des recommandations relatives à ce risque sont données dans You et al. [1994].

La migration des produits vers l'aquifère sus-jacent peut s'opérer de plusieurs manières :

- par l'intermédiaire d'un ancien puits d'exploitation (ou de surveillance), suite à un défaut d'étanchéité de son cuvelage (voir § 6.1.1), de sa cimentation (voir § 6.1.2) ou de son bouchon de scellement (voir § 6.1.3) ;
- par l'intermédiaire de la couverture du stockage (§ 6.2.1), suite à un endommagement mécanique de celle-ci (§ 6.2.3) ou de la mobilisation d'une discontinuité (faille ou fracture) pré-existante (§ 6.2.4) ;
- par l'intermédiaire d'un forage effectué par des tiers postérieurement à l'abandon et ayant accidentellement atteint le stockage.

Notons que le risque d'une sortie latérale du gaz (liée à une mauvaise fermeture structurale du stockage) peut être considéré comme faible après l'abandon du stockage. En effet, la quantité de gaz résidant dans le stockage après l'abandon est très inférieure à celle présente au moment de l'exploitation. Il est donc peu vraisemblable que du gaz s'échappe latéralement du stockage (sous forme gazeuse) après l'abandon sans que ce problème ait préalablement été mis en évidence au cours de la phase d'exploitation²⁷.

En revanche, il existe un autre mécanisme de migration latérale du gaz, sous forme dissoute, qui mérite d'être mentionné. Au cours de l'exploitation, la bulle de gaz s'étend horizontalement chaque année, en moyenne. Mais comme le stockage est vidé partiellement en hiver, l'eau périphérique revient vers des zones où du gaz est resté piégé. L'eau se charge alors en gaz dissous pendant cette phase puis, lorsque l'on injecte pendant l'été, celle-ci est repoussée à la périphérie avec le gaz dissous qu'elle contient. On a ainsi un mécanisme potentiel de transport de gaz dissous bien au-delà des limites de la bulle de gaz.

5.2.1.2 EMISSION LOCALISEE DE GAZ RESIDUELS EN SURFACE

De la même façon que le gaz résiduel peut s'échapper du réservoir (par les puits, la couverture ou des forages tiers) et aboutir, après dissolution, à une pollution de nappes d'eaux souterraines, il peut également migrer jusqu'à la surface et s'échapper sous forme gazeuse. Ceci peut conduire, en fonction de la composition du gaz, de sa concentration et des conditions de pression et de température, à des effets thermiques (inflammation du gaz), des effets de surpression (explosion du gaz) ou à des effets toxiques (inhalation du gaz).

5.2.1.3 LESSIVAGE ACCIDENTEL D'UN NIVEAU EVAPORITIQUE (GYPSEUX)

Le recouvrement d'un stockage en milieu poreux est constitué d'un ensemble de formations variées, parmi lesquelles certaines peuvent être de nature évaporitique (essentiellement du gypse) et donc sujettes à une dissolution plus ou moins rapide en cas de mise en contact avec de l'eau douce. Si deux aquifères, séparés par un niveau évaporitique, viennent à être mis en communication de manière accidentelle (suite à un défaut d'étanchéité d'un ancien puits traversant les deux aquifères ou la réalisation d'un forage tiers), un lessivage de ce niveau

²⁷ Un pompage d'eau intense hors de la structure contenant le gaz peut théoriquement provoquer un basculement de l'interface gaz-eau et une sortie latérale de gaz. Il faut toutefois souligner que le gaz résiduel est, par définition, peu mobilisable.

évaporitique très soluble peut intervenir. Les conséquences potentielles sont de deux ordres :

- le développement, au sein de la formation évaporitique, d'une cavité qui peut éventuellement devenir instable et mener, en fonction des dimensions de la cavité, de sa profondeur et de la nature du recouvrement, soit à un affaissement souple en surface, soit à un effondrement brutal du même type que celui qui s'est produit à Haoud Berkaoui (Annexe F) ;
- une pollution par salinisation des nappes aquifères mises en communication.

5.2.1.4 AUTRES ALEAS, IMPACTS OU NUISANCES

Au cours de la phase d'exploitation, un stockage en milieu poreux peut induire, du fait des opérations d'injection et de pompage, des mouvements de la surface du sol (respiration). Les déplacements engendrés, généralement faibles (d'ordre millimétrique) peuvent éventuellement être significatifs (d'ordre centimétrique). Toutefois, ils s'opèrent sur de grandes surfaces et s'accompagnent donc de déformations très faibles. De fait, ils ne sont pas de nature à constituer un risque pour des enjeux humains situés en surface. En revanche, des impacts sur les bâtis ou sur le réseau hydrographique peuvent éventuellement en résulter.

Après l'arrêt du stockage, le gaz non récupéré n'est pas forcément à l'équilibre, en pression et en température, avec l'environnement du stockage. On peut donc s'attendre, pendant un certain temps encore, à des déplacements de ce gaz et à des modifications des pressions et des températures, donc des contraintes effectives, au sein du stockage. Les mouvements de la surface du sol qui vont en résulter seront a priori moins importants que ceux qui s'opèrent au cours de la phase d'exploitation. Toutefois, il peut apparaître légitime d'étudier si ces modifications à plus ou moins long terme sont susceptibles (ou non) d'engendrer des impacts ou nuisances en surface.

5.2.2 DANS LE CAS DES STOCKAGES EN CAVITES SALINES

L'analyse des aléas liés à l'abandon des cavités salines (qu'elles aient ou non été utilisées à des fins de stockage) a fait l'objet de nombreuses études et publications. Citons en particulier les travaux de Ghoreychi et Cozensa [1993], Berest et Brouard [1997, 2003], Joe L. Ratigan [2003] et Fritz Crotofino & Jürgen Kepplinger [2006]. Ces travaux montrent que dans certaines conditions, des surpressions peuvent se développer au sein d'une cavité saline après fermeture. Ces surpressions peuvent mener à une instabilité de la cavité et avoir des conséquences aussi bien en terme de pollution des eaux souterraines par la saumure qu'en terme de mouvements de la surface du sol. L'évaluation des pressions qui vont s'exercer au sein de la cavité à la suite de sa fermeture est donc un aspect majeur, autant que délicat²⁸, de l'analyse des aléas. Des éléments permettant de réaliser cette évaluation seront fournis un peu plus tard dans le document (§ 6.3.1). Dans la présente section, nous en restons à une description des phénomènes qui peuvent survenir dans le contexte d'un stockage en cavités salines abandonné et des mécanismes (scénarii) qui peuvent mener à ces phénomènes. L'arbre fourni en annexe G permet d'accompagner la lecture.

²⁸ La pression de la cavité est en effet contrôlée par un ensemble de mécanismes interdépendants, comme nous le verrons ci-après.

5.2.2.1 MOUVEMENTS DE LA SURFACE DU SOL

Du fait du fluage du sel, une cavité de stockage, à très long terme, est appelée à se refermer²⁹. Cette fermeture progressive de la cavité au cours du temps peut avoir des répercussions en terme de subsidence en surface, comme le montrent les exemples d'Eminence aux Etats-Unis ou de Tersanne en France (voir Tableau 1 et annexe F). Du fait du caractère souple et progressif de ces mouvements, de leur faible amplitude (centimétrique) et de leur grande surface d'application (plusieurs kilomètres carrés), ces mouvements ne présentent pas de risques directs pour des enjeux humains. En revanche, ils peuvent avoir des impacts sur les infrastructures (bâties) ou sur l'environnement (perturbation du système hydrographique, inondations, etc.) qu'il convient d'évaluer. Des éléments d'évaluation seront apportés au § 6.3.2.

D'autre part, l'augmentation de la pression de saumure peut conduire, si elle est importante, à une hydrofracturation³⁰ de la paroi de la cavité, notamment dans le cas des cavités de grandes hauteurs [Berest, De Marsilly, Ledoux 1981, Langer et al., 1984 ; Wallner, 1984] cités par Bérest et al. [1997]. Ce phénomène apparaît lorsque la pression interne de la cavité atteint et dépasse la pression lithostatique. Du fait des contrastes de densité entre la saumure et le sel³¹ (qui induisent des gradients de pression différents), ces ruptures interviennent préférentiellement dans la partie haute (toit) de la cavité.

Des ruptures peuvent également être provoquées par un déséquilibre chimique entre la saumure et le sel constituant les parois de la cavité. En effet, la saturation étant fonction de la pression et de la température, la saumure peut ne plus être totalement saturée en sel au moment et après l'abandon, ce qui peut conduire à une dissolution supplémentaire du sel et à un élargissement de la cavité. Cet élargissement augmente le risque de rupture au toit de la cavité. On a pu voir, à travers le cas de l'effondrement de Pannink Sink (voir Tableau 1 et annexe F), les conséquences potentielles d'une injection de saumure sous-saturée dans une cavité saline.

Si une fracturation de la partie haute de la cavité s'opère (que celle-ci soit due à une surpression de la saumure ou à une reprise de dissolution), il va en résulter un éboulement du toit et une remontée consécutive de la cavité dans le massif de sel³². Après avoir atteint le toit de la couche de sel, la cavité peut éventuellement poursuivre sa migration très lente vers la surface à travers les formations

²⁹ Ce mouvement est inéluctable même si, à moyen terme, des surpressions peuvent apparaître au sein de la cavité et venir contrarier ce phénomène. Ces surpressions ont pour origine, d'une part, la dilatation thermique de la saumure (la température de la saumure introduite dans la cavité est généralement plus faible que celle du sel environnant et se réchauffe donc à son contact, contribuant ainsi à une augmentation de pression) et d'autre part, le fluage du sel lui-même (en effet, la réduction du volume de la cavité lié au fluage du sel contribue également à augmenter la pression au sein de la cavité).

³⁰ ou de fracturation hydraulique.

³¹ La densité du sel est d'environ 2,2 et celle d'une saumure saturée d'environ 1,2.

³² Notons que du fait de la différence de densité entre la saumure et le milieu environnant et, d'autre part, l'absence d'un seuil de fluage pour le sel (le sel peut être considéré comme un fluide très visqueux), la cavité est de toute manière susceptible de remonter lentement à travers le massif de sel sans qu'il y ait nécessité d'une hydrofracturation.. Toutefois, l'hydrofracturation, si elle s'opère, va accélérer et amplifier ce phénomène de remontée.

« tendres » du recouvrement. Selon le volume et la profondeur initiale de la cavité, ainsi que la nature du recouvrement (notamment la présence ou non d'un « banc raide »³³), les conséquences en surface peuvent être de deux types : soit un affaissement souple de la surface du sol (cuvette d'affaissement), soit un effondrement brutal (formation d'un cratère dont les dimensions sont en rapport avec la taille de la cavité).

On peut envisager, dans le contexte d'un stockage abandonné en cavités salines, d'autres mécanismes d'instabilités qui peuvent avoir des répercussions en terme de mouvements de surface :

- dans le cas de stockages constitués de plusieurs cavités proches l'une de l'autre, il est possible d'imaginer une rupture à long terme du pilier de sel laissé en place entre deux cavités. Cette dégradation (partielle ou totale) du pilier peut être due, par exemple, à la modification géométrique des cavités avoisinantes. Elle est aggravée si une circulation de saumure non saturée se met en place entre les deux cavités. Pour pallier ce phénomène, un espacement suffisant entre les cavités est en principe pris en compte lors du dimensionnement du stockage [voir par ex. Staudtmeister et al., 1997, Figure 6] ;

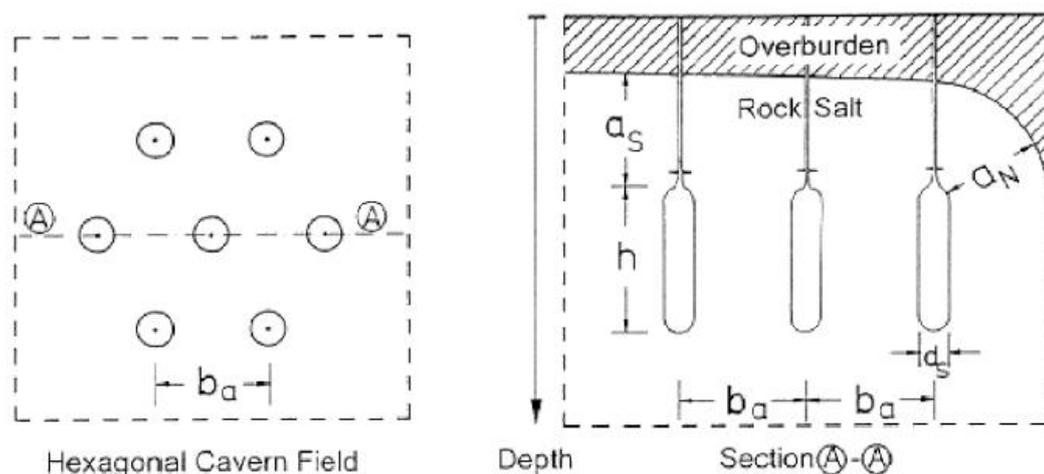


Figure 6 : Dimensionnement de cavités de stockage de gaz dans le sel (d'après K. Staudtmeister et al. [1997])

- dans le cas de stockages effectués dans d'anciennes mines de sel exploitées par chambres et piliers, différents mécanismes d'instabilité peuvent également survenir suivant le taux de défructement de la mine de sel considérée et la nature des terrains situés au toit ou au mur de la couche de sel exploitée (on peut observer, selon le contexte, des ruptures ou des poinçonnements de

³³ Le phénomène d'effondrement brutal est favorisé s'il existe dans le recouvrement une formation plus résistante dite « banc raide ». En effet, celle-ci stoppe la progression de la cavité jusqu'au moment où, la cavité s'élargissant, le banc finit par fléchir et se rompre. On observe alors une descente brutale des terrains générant un cratère en surface. Une illustration de ce mécanisme est donnée par Buffet [1998] dans le cadre de l'effondrement provoqué des cavités SG4 et SG5 à Gellenoncourt en Lorraine (voir Tableau 1 et annexe F).

piliers). Aucun stockage de ce type n'existant actuellement en France³⁴, nous ne décrivons pas davantage ce cas dans la suite du document.

Enfin, comme dans le contexte d'un stockage en milieu poreux, il est envisageable qu'un niveau évaporitique présent dans le recouvrement soit lessivé de manière accidentelle (formant ainsi une cavité) suite à la mise en communication (via un puits défaillant ou un forage tiers) de deux aquifères (cf. § 5.2.1.3). Là encore, cela peut avoir des répercussions en terme de mouvements de surface.

5.2.2.2 POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES PAR LA SAUMURE

Le risque d'une remontée de cavité remplie de saumure dans le recouvrement (voir § 5.2.2.1) entraîne nécessairement et conjointement un risque de pollution des nappes aquifères sus-jacentes. En effet, dès lors qu'une cavité remonte au delà du toit de la couche de sel, la saumure est mise en contact direct avec des formations généralement moins imperméables que le sel, permettant une migration facilitée de la saumure vers les aquifères avoisinants. D'autre part, ces couches du recouvrement, au contact de la saumure, peuvent se déliter progressivement, accélérant encore davantage le processus de remontée de la cavité.

Mais la pollution d'une nappe d'eau souterraine surplombant la cavité de stockage peut aussi s'opérer sans qu'il y ait une remontée de la cavité. En effet, il existe au moins trois manières différentes, pour la saumure, de s'échapper de la cavité et d'atteindre la nappe d'eau concernée :

- par l'intermédiaire de l'ancien puits d'exploitation : du fait de la lixiviation du ciment et de la corrosion des aciers³⁵, les cuvelages cimentés du puits et le bouchon de scellement mis en place au moment de l'abandon peuvent devenir des chemins d'écoulement préférentiel de la saumure après quelques dizaines d'années. Nous avons vu dans le chapitre dédié à l'accidentologie (Tableau 1 et annexe F) que les fuites par les cuvelages ou les scellements des puits sont parmi les causes principales des accidents recensés, notamment en ce qui concerne les problèmes de pollution ;
- par l'intermédiaire du massif : bien que très faible, la perméabilité intrinsèque du sel n'est pas nulle³⁶ (en particulier dans la zone décomprimée en paroi des cavités) et permet une migration très lente de la saumure vers l'extérieur de la cavité. Le débit sortant de saumure est proportionnel à la perméabilité du sel et au gradient de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la cavité. Le gradient hydraulique nécessaire à l'écoulement est maintenu au cours du temps par les processus de fermeture de la cavité liée au fluage du sel et de dilatation thermique de la saumure (qui tendent à maintenir une pression élevée dans la cavité) et d'autre part, par le « re-larguage » vers la cavité des gaz d'origine

³⁴ Le seul stockage d'hydrocarbures dans une ancienne mine de sel dont nous ayons connaissance est le stockage de pétrole de Weeks Island (USA). Celui-ci a dû être abandonné à la suite d'apparition de fontis à la surface. Une explication mécanique intéressante à cet accident a été donnée par Bauer et al. [2000] (voir détails en annexe F).

³⁵ Problème particulièrement aigu dans le contexte salin.

³⁶ Une valeur typique pour un sel intact est 10^{-21} m² soit 10^{-14} m/s ou encore 10^{-6} millidarcy. La perméabilité intrinsèque peut être nettement plus grande, de plusieurs ordres de grandeur, pour un sel microfissuré.

géologique jusque là piégés dans le massif de sel. Ces gaz, en remplaçant la saumure dans la cavité, participent également à maintenir un gradient hydraulique suffisamment fort pour que l'écoulement de saumure dans le massif se poursuive³⁷ ;

- par l'intermédiaire d'un forage tiers : si un forage effectué postérieurement à l'abandon du stockage (quelques années ou quelques dizaines d'années plus tard) venait accidentellement à atteindre la cavité (du fait d'une mauvaise traçabilité des archives sur la position de la cavité ou d'une négligence de l'entrepreneur des travaux de foration), une fuite de la saumure par l'intermédiaire de ce forage et une pollution résultante des nappes aquifères sus-jacents serait à craindre. Il resterait à apprécier l'importance de cette pollution en regard de la salinité initiale naturelle de ces nappes.

Enfin, une dernière forme de pollution d'eaux souterraines envisageable (non spécifique aux stockages en cavités salines cette fois) est celle, déjà évoquée au § 5.2.1.3, où une formation évaporitique située dans le recouvrement et prise entre deux niveaux aquifères vient à être lessivée suite à la mise en communication accidentelle de ces deux aquifères.

Notons que nous n'avons pas évoqué dans cette section le risque de pollution par des produits autres que la saumure, notamment les produits anciennement stockés dans la cavité et qui pourraient rester piégés dans les parois de la cavité dans le cas où celle-ci serait mal nettoyée. En effet, compte-tenu du faible volume de produit éventuellement concerné par rapport au volume de saumure présent dans la cavité, nous faisons l'hypothèse que ce risque est négligeable devant celui de pollution par la saumure.

5.2.3 DANS LE CAS DES STOCKAGES EN CAVITES MINEES

Comme il a déjà été précisé dans ce rapport, les retours d'expérience disponibles sur l'abandon des stockages en cavités minées en France et à l'étranger sont rares. Notre travail d'identification des aléas ou impacts liés à ce type de stockage après abandon s'est donc basé sur quatre types d'éléments :

- l'état des connaissances des aléas liés à ce type de stockage au cours de la phase d'exploitation ;
- l'expérience de l'abandon du stockage de May-sur-Orne (même si, nous l'avons dit précédemment, ce stockage est particulier puisqu'il réutilise les cavités d'une ancienne mine et qu'il n'a donc pas bénéficié des règles de conception et de dimensionnement qui s'appliquent aux cavités créées spécifiquement pour le stockage) ;
- les travaux relatifs au dimensionnement des stockages en cavités minées, dont un rappel succinct est donné en annexe E ;
- l'expérience acquise dans l'analyse des aléas post-miniers.

³⁷ D'après Bérest [communication personnelle], l'arrivée de gaz du massif vers une cavité de stockage est un phénomène connu et assez bien documenté ; celui-ci affecte environ la moitié des cavités de stockage fédéral stratégique aux Etats-Unis. En France, il y a un peu de gaz dans certaines formations salines utilisées pour le stockage (à Etrez par exemple) mais c'est sans comparaison avec les niveaux atteints dans certains dômes du Golfe du Mexique.

Les principaux phénomènes identifiés comme plausibles à plus ou moins long terme dans le cas d'un stockage abandonné en cavités minées sont :

- une perturbation du régime hydraulique ;
- une contamination des aquifères environnant le stockage ;
- l'émission localisée de radon en surface pour des cavités vides (bien que ce phénomène ne soit pas lié au stockage proprement dit) ;
- une instabilité des anciennes cavités (ou ouvrages d'accès) susceptible d'induire des mouvements en surface.

Nous reprenons ci-après chacun de ces phénomènes et leurs scénarii d'occurrence. Il est important de noter que certains de ces phénomènes se produisent essentiellement pendant la phase de restitution (comme par exemple la perturbation du régime hydraulique) et non pendant la phase de post-abandon (Figure 1). Les arbres fournis en annexe G permettent d'accompagner la lecture.

5.2.3.1 PERTURBATION DU REGIME HYDRAULIQUE ENVIRONNANT LE STOCKAGE

Il est bien connu que la construction d'un ouvrage souterrain, quel qu'il soit (tunnel, mine, fondations profondes), est susceptible de modifier les structures d'écoulement hydrogéologiques et hydrologiques situées dans son environnement. C'est vrai, en particulier, dans le cas d'un stockage souterrain en cavité minée. En effet, les stockages en cavités minées peuvent être réalisés dans des formations relativement fracturées, où l'écoulement est très localisé dans des zones (fracturées) d'une extension limitée à l'échelle de l'aquifère. Un « court-circuit » hydraulique de ces zones d'écoulement préférentielles par les structures de stockage peut avoir des conséquences directes en surface, comme l'assèchement ou la diminution de débit de certaines sources et forages. Ces effets peuvent être limités en phase d'exploitation, étant donné que le plus souvent, un rideau d'eau est mis en place pour maintenir une charge hydraulique constante au-dessus des cavités de stockage.

Après l'arrêt des travaux, la mise en eau des cavités et /ou l'arrêt de l'alimentation du rideau d'eau (dans la mesure où le rideau d'eau était alimenté artificiellement pendant l'exploitation) peut conduire à un réajustement des structures d'écoulement. La durée de ce réajustement doit être inférieure à la durée de la phase de restitution si l'on veut pouvoir considérer que le milieu a atteint un nouvel état d'équilibre au début de la phase post-abandon. L'estimation de cette durée pourra être réalisée sur la base des données acquises au cours de la phase d'exploitation.

Un autre type de phénomène peut également avoir un impact sur les écoulements : il s'agit du colmatage³⁸ de l'espace poreux de l'aquifère résultant de l'activité bactérienne susceptible de se développer si une eau non traitée est mise en contact avec des hydrocarbures. Lors des opérations d'abandon (réalisées pendant la phase de restitution), il est possible que des eaux souterraines naturelles s'infiltrerent dans les vides de stockage alors que les cavités ne sont pas encore entièrement vidées. Ceci peut conduire à la production de bactéries. Ce phénomène peut perdurer au-delà de l'abandon du stockage en cas de nettoyage

³⁸ C'est pour éviter ce colmatage que la qualité de l'eau destinée à l'alimentation du rideau d'eau est généralement strictement contrôlée.

incomplet des cavités. Ce type de développement bactérien peut avoir deux impacts : une réduction de la perméabilité de l'aquifère par colmatage [Yeager et al., 1997 ; Han C., 2003] ; une production de méthane. Ce fut le cas au niveau du stockage souterrain de May-sur-orne où la production de méthane d'origine microbiologique a atteint 700 m³/j. Notons toutefois que ces phénomènes de colmatage et de production bactérienne peuvent-être évités (ou en tout cas limités) si les cavités ne sont pas vidées de leur eau après arrêt des travaux.

5.2.3.2 POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES OU SUPERFICIELLES

L'impact sur la qualité des eaux (souterraines ou superficielles) d'un stockage en cavité minée abandonné est a priori moindre que celui induit par une ancienne exploitation minière. Dans le cas d'une exploitation minière, c'est la présence simultanée de vides résiduels (induisant des circulations d'air), d'eau et de matériaux géologiques (notamment ceux exploités) qui explique un certain nombre de réactions physico-chimiques conduisant à la mise en solution d'éléments polluants (métaux lourds, minéraux sulfurés).

Dans le cas d'un stockage d'hydrocarbures, les matériaux géologiques tel que le minerai exploité (dans le cas d'une exploitation minière) sont a priori absents³⁹. De plus, en dehors de la phase de construction (et éventuellement durant les opérations de nettoyage/récupération précédant l'abandon), l'air n'est pas présent dans la cavité. Il semble donc que l'on puisse exclure pratiquement le risque de drainages acides ou de pollutions des eaux par les métaux lourds tel qu'il est observé dans le cas d'exploitations minières.

Cependant, l'introduction d'hydrocarbures dans le sous-sol n'est pas sans risque en terme de pollution, notamment durant la phase d'abandon. D'une part, nous avons vu qu'un dégagement de méthane résultant d'une activité bactérienne pouvait apparaître, lors des opérations d'abandon, en cas de mise en contact d'eaux souterraines naturelles avec des hydrocarbures temporairement en place dans les cavités (ou qui auraient involontairement été laissés suite à des opérations de nettoyage incomplètes). Ce type de pollution organique diffère de la pollution métallique par l'absence de phénomènes de sorption, ainsi que par sa capacité plus importante à se volatiliser et à migrer dans l'aquifère en phase dissoute ou multi-phasique.

Un autre risque tient dans l'imprégnation du produit stocké dans les parois de la cavité et dans sa migration⁴⁰ possible vers les terrains environnants⁴¹. C'est pourquoi il est nécessaire, avant l'abandon, de procéder à un « nettoyage » des parois de la cavité, selon une méthodologie adaptée au produit stocké (dans le cas du stockage de May-sur-Orne, les parois du stockage ont été balayées à l'eau). Ce nettoyage peut être favorisé en maintenant, pendant la période qui précède l'abandon du stockage, un gradient hydraulique suffisant pour permettre

³⁹ Nous excluons de notre analyse le cas particulier du stockage de May-sur-Orne réalisé dans une ancienne mine de fer et non représentatif des stockages en cavités minées actuellement exploités en France. Rappelons que dans ce cas, un impact de l'abandon du vide souterrain sur la qualité des eaux d'exhaure a été relevé, avec des teneurs élevées en fer et en magnésium (voir § 3.2).

⁴⁰ Bien sûr, la propension du produit à migrer vers l'intérieur du massif dépend du type de produit.

⁴¹ Les phénomènes de rétro-diffusion et désorption ont été étudiés dans le cas de l'abandon du stockage de Geovexin. D'après une communication personnelle, ils auraient été jugés non significatifs par l'ensemble des experts consultés.

un écoulement de l'eau vers l'intérieur de la cavité de manière à drainer l'encaissant à proximité des parois.

5.2.3.3 EMISSION DE RADON EN SURFACE

L'expérience minière peut nous renseigner sur les composés gazeux susceptibles d'être rencontrés lors de l'abandon d'un stockage souterrain en cavité minée (du fait de la présence de vides en souterrain). Toutefois, mis à part le radon⁴² qui est présent dans la plupart des roches du sous-sol, l'émanation de gaz endogènes ou exogènes liés habituellement à l'exploitation minière (CH₄, CO, CO₂) peut a priori être exclue, sauf cas particulier.

En revanche, la présence de vides souterrains non totalement remplis d'eau⁴³ est susceptible de modifier les concentrations, les localisations ou les flux de radon en surface. En effet, le radon présent à de faibles teneurs dans les roches peut dans ce cas, migrer vers les vides souterrains et remonter à la surface par toutes voies de communication possibles (forages, discontinuités, terrains perméables). Ainsi il peut se localiser à de fortes concentrations dans les lieux insuffisamment ventilés conduisant progressivement à une exposition des personnes à ce gaz radioactif.

Notons que cette situation n'est pas spécifique aux stockages souterrains ; elle est en effet rencontrée dans toute cavité souterraine abandonnée laissée vide dans certains milieux géologiques.

5.2.3.4 MOUVEMENTS DE LA SURFACE DU SOL

Tout en soulignant le souci de pérennité avec lequel les cavités minées spécifiquement prévues pour le stockage sont conçues et réalisées (voir quelques exemples de dimensionnement de ces cavités en annexe E), une instabilité au toit d'une ancienne cavité de stockage ou d'une ancienne infrastructure d'accès (puits ou galerie) est un aléa qui, dans le long terme, ne peut pas être occulté.

Les conséquences potentielles en surface peuvent être de types « effondrement brutal » ou « affaissement souple » selon la dimension et la profondeur de l'ouvrage concerné ainsi que la nature des terrains sus-jacents. Une attention particulière doit être portée sur les structures les plus superficielles du stockage, notamment les galeries d'accès (descenderies). D'autre part, il convient de s'assurer que le dimensionnement prenne en compte la perte de résistance du matériau au cours du temps et la perte d'efficacité du soutènement éventuellement mis en place lors de la construction des ouvrages.

⁴² Le radon est un descendant radioactif de l'Uranium.

⁴³ Ce qui peut être le cas transitoirement pendant les opérations d'abandon, voire après l'abandon en cas de modification du niveau de la nappe et d'assèchement des cavités.

6. ELEMENTS D'EVALUATION DES ALEAS LIES AUX STOCKAGES SOUTERRAINS ABANDONNES

Nous avons effectué, au chapitre précédent, une identification des principaux aléas ou impacts qui peuvent apparaître à plus ou moins long terme lors de l'abandon d'un stockage souterrain. Nous proposons à présent de fournir un certain nombre d'éléments d'évaluation (démarches, méthodes, outils, références bibliographiques), extraits de la littérature, qui nous ont semblé pouvoir être utiles à l'exploitant (ou à l'expert) dans la réalisation de l'étude des aléas propre à un site particulier.

Pour chaque méthode ou démarche présentée, nous essaierons de préciser, autant que possible, les données d'entrée nécessaires à son application. D'autre part, nous préciserons les mesures de prévention susceptibles d'être mises en place par l'exploitant, avant l'abandon, pour réduire au maximum l'aléa concerné.

Afin d'éviter les redites, nous avons regroupé dans le § 6.1 tous les éléments qui concernent les fuites par les puits, cet aléa étant commun à l'ensemble des stockages. Les § 6.2 à 6.4 traitent ensuite, respectivement, des aléas spécifiques aux stockages en milieux poreux, en cavités salines et en cavités minées.

6.1 EVALUATION DES ALEAS LIES AUX FUITES PAR LES PUIITS

Nous nous intéressons, dans cette première section, à l'évaluation des aléas liés à d'éventuelles fuites le long d'un puits abandonné.

Nous avons vu au chapitre 4 qu'un puits est typiquement constitué d'une succession de forages dont le diamètre va en diminuant. Chaque forage est recouvert d'un cuvelage en acier, lequel est cimenté au terrain pour assurer la stabilité des parois et contribuer à l'étanchéité. Lors de l'abandon, les éléments de complétion sont retirés et le puits est scellé (par la mise en place d'un bouchon de ciment) afin d'éviter toute circulation de fluide entre le réservoir et les niveaux sus-jacents⁴⁴.

Le risque de fuite le long d'un puits abandonné dépend de plusieurs facteurs :

- l'adéquation globale de l'architecture du puits à l'environnement géologique, c'est-à-dire son adaptation en terme de protection des horizons les plus " vulnérables " (nappes aquifères, niveaux évaporitiques) ;
- l'étanchéité à long terme de chaque élément constitutif du puits. La Figure 7 schématise les différentes possibilités de fuites le long d'un puits abandonné, en distinguant celles qui apparaissent dans le ciment, dans le cuvelage (casing), dans le bouchon, dans la roche ainsi qu'aux interfaces entre ces éléments⁴⁵.

⁴⁴ Au-delà du retrait des éléments de complétion, il peut également être envisagé de retirer le cuvelage sur une certaine hauteur. Cette solution, étudiée par Crotigno et Kepplinger [2006], permettrait d'améliorer l'efficacité du bouchon et pourrait être encouragée.

⁴⁵ 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

Dans la suite de cette section, on s'intéresse plus précisément à l'évaluation des risques de fuites à travers le cuvelage (§ 6.1.1), la cimentation du puits (§ 6.1.2) et le bouchon de ciment mis en place au moment de l'abandon (§ 6.1.3). On peut resituer, sur les Figures G1 et G2 de l'annexe G, ces différents types de défaillances dans l'arbre des causes des principaux phénomènes redoutés propres aux stockages abandonnés en milieu poreux et en cavités salines.

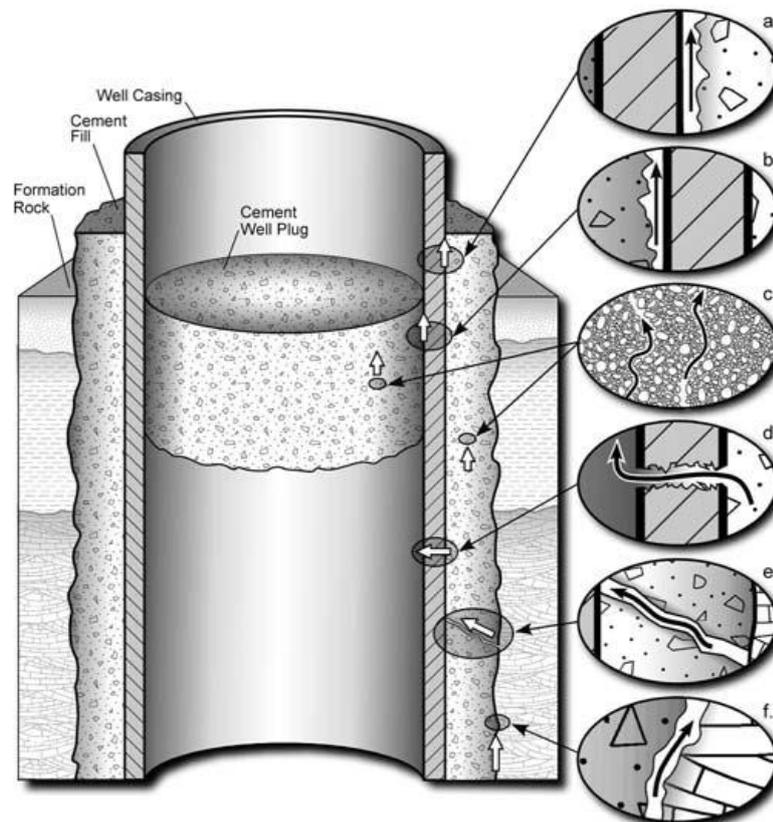


Figure 7 : Schématisation des différentes potentialités de fuites le long d'un puits abandonné : entre le ciment et le casing en acier (a et b), à travers le ciment (c et e), à travers le casing (d), entre le ciment et la roche (f), à travers la roche le long du puits (c) (d'après M.A. Celia et al., 2004)

6.1.1 DEF AUT D'ETANCHEITE DU CUVELAGE

Principes et méthodes d'évaluation :

Pour évaluer le risque de fuite liée à un défaut d'étanchéité (perçement) du cuvelage d'un puits abandonné, il est nécessaire de connaître, d'une part, l'état initial du cuvelage avant abandon et d'autre part, la nature et la cinétique des processus de dégradation susceptibles d'agir sur l'acier du cuvelage après l'abandon du stockage, dans le contexte du site.

température) qui s'appliquent au puits au cours de la phase d'exploitation [Roegiers, 2002, Heffer, 2002 ; Oldenburg, 2007].

a) *Evaluation de l'état du cuvelage avant abandon*

Nous avons mentionné, au § 4.2, qu'il existait un certain nombre de techniques permettant de contrôler l'état initial des puits avant abandon. Une des techniques appliquée pour vérifier l'état des cuvelages est la technique dite ultrasonique d'attente (« ultrasonic stand-off technique »). Cette technique (Figure 8) permet d'estimer l'épaisseur de la corrosion en différenciant la corrosion interne et la corrosion externe. Le lecteur pourra se référer à Van Agthoven [2006] pour obtenir des précisions sur ce type de technique.

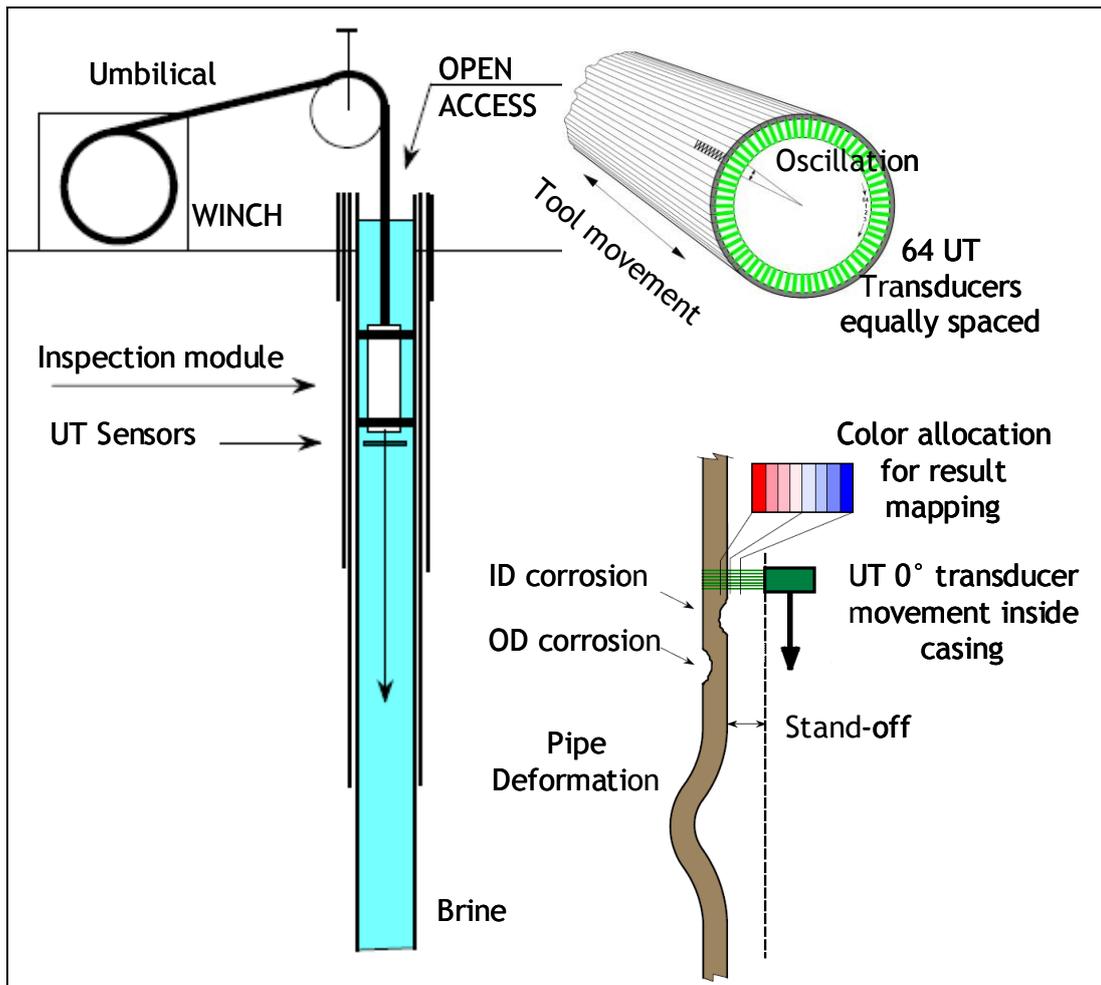


Figure 8 : *Inspection de l'état du cuvelage d'un puits par une technique ultrasonique (d'après van Agthoven [2006]).*

b) *Analyse des processus de dégradation du cuvelage et évaluation de leur cinétique*

Le processus principal de dégradation de l'acier du cuvelage au cours du temps est la corrosion. L'impact de ce phénomène sur la dégradation des puits (exploités ou abandonnés) a été mis largement en évidence dans la littérature. Citons par exemple l'étude de Yeager et al. [1994], menée sur 33 puits rattachés à 12 stockages en aquifère localisés aux E.U. et d'âges variant entre 20 et 100 ans. Citons également l'étude de Jackson et al. [2005] sur la corrosion des puits

d'injection dans la mine de potasse de Belle Plaine, Canada (exploitation de sel par dissolution).

La cinétique de corrosion dépend à la fois des caractéristiques propres de l'acier et des facteurs extérieurs (thermiques, chimiques, biologiques⁴⁶) auxquels il est soumis. Plusieurs auteurs ont tenté de déterminer des lois (empiriques ou théoriques) exprimant la vitesse de corrosion en fonction du temps dans différents types de conditions.

A titre d'exemple, une étude coordonnée par Gaz de France, citée par Patroni [2007], propose d'exprimer la perte d'épaisseur P du cuvelage au cours du temps sous la forme d'une loi de puissance du type $P = k t^n$, où k et n sont des paramètres déduits de l'expérience. Cette loi empirique implique une vitesse de corrosion très importante durant les premières années, qui tend ensuite à se stabiliser vers des valeurs significativement plus faibles (Figure 9). Patroni [2007] propose des valeurs de 50 à 100 $\mu\text{m}/\text{an}$ pour une corrosion uniforme et de 100 à 150 $\mu\text{m}/\text{an}$ pour une corrosion localisée. Ces valeurs, déterminées expérimentalement dans le cas d'un cuvelage non traité (sans protection cathodique⁴⁷) mis en contact avec un sol corrosif, sont vraisemblablement majorantes (et d'ailleurs considérées comme telles par l'auteur), mais possibles dans des circonstances particulièrement défavorables.

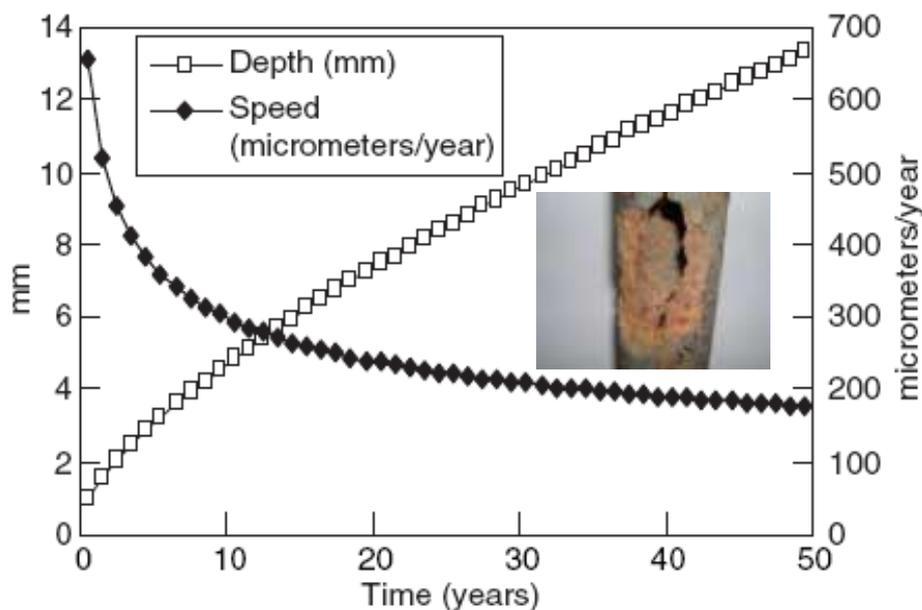


Figure 9 : Variation de l'épaisseur du cuvelage en acier et de la vitesse de corrosion au cours du temps [Patroni, 2007]

On trouve d'autres travaux sur la corrosion des cuvelages dans la littérature liée au stockage du CO_2 [Hesjevik et al., 2003 ; Cailly et al., 2005]. Bien que les conditions soient différentes (le CO_2 dissous dans l'eau est très corrosif), ces

⁴⁶ En l'absence d'oxygène, la corrosion de l'acier peut être favorisée par la présence de bactéries. C'est ce qu'on appelle la " Microbiologically Influenced Corrosion - MIC " [Yeager et al, 1994].

⁴⁷ La protection cathodique est utilisée pour protéger les structures métalliques de la corrosion, notamment l'acier. Le principe de base est de porter le potentiel d'un métal à un niveau dit de passivation.

travaux conduisent à des recommandations concernant le choix ou le traitement des aciers utilisés pour les cuvelages, qui peuvent éventuellement être utilisées comme références dans le contexte des stockages de gaz et d'hydrocarbures.

Données préalables nécessaires :

Les données typiquement nécessaires pour mener à bien l'évaluation de ce type d'aléa sont :

- données sur les caractéristiques des cuvelages (géométrie, âge, caractéristiques des aciers utilisés, traitements éventuels réalisés) ;
- données sur les conditions initiales THMCB (thermiques, hydriques, mécaniques, chimiques et biologiques) dans l'environnement du puits au moment de l'abandon ;
- évaluation des sollicitations THMCB à long terme auxquelles seront soumis les cuvelages après l'abandon.

Mesures de prévention :

- remise en état [Merritt, 2002] et traitement préventif du puits au moment de l'abandon ;
- très en amont : amélioration des caractéristiques de résistance à long terme des cuvelages lors de la conception.

6.1.2 DEF AUT D'ETANCHEITE DE LA CIMENTATION DU CUV ELAGE

Principes et méthodes d'évaluation :

De même que pour le cuvelage, l'évaluation du risque de fuite par la cimentation du cuvelage repose d'une part, sur la connaissance de l'état de la cimentation avant l'abandon et d'autre part, sur la connaissance de la nature et de la cinétique des processus susceptibles de mener à une dégradation de cette cimentation après la phase d'abandon.

Après que les conditions initiales et les processus de dégradations aient été caractérisés, des outils de type « modélisation numérique » peuvent être utilisés pour évaluer de manière globale le risque de fuite dans les conditions particulières du site étudié. Nous détaillons ci-après chacune de ces étapes.

a) Mesure de l'état de la cimentation avant abandon

Les techniques typiquement utilisées pour évaluer l'état de la cimentation entre le cuvelage et le milieu environnant sont des techniques de diagraphies soniques et ultrasoniques en sondage. Ces techniques sont basées sur la mesure des variations d'amplitude d'une onde de pression (dont la fréquence est typiquement de l'ordre de la dizaine à la centaine de kHz), circulant le long des parois du puits entre un émetteur et un récepteur. L'atténuation du signal peut être reliée à la quantité et la qualité de la cimentation à l'extérieur du cuvelage.

Les techniques les plus récentes permettent, à l'aide d'un logiciel de traitement approprié, de donner une représentation à 360° de l'état de la cimentation. Des exemples de logs interprétés obtenus avec ce type d'outil sont présentés sur la

Figure 10. Sur cette figure, l'état de la cimentation est qualifié de « mauvais » (beige) à « excellent » (vert).

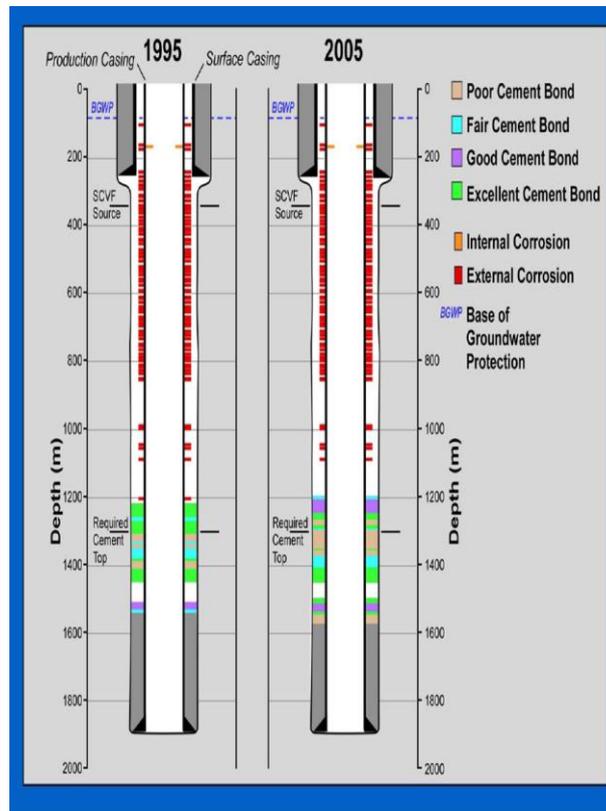


Figure 10 : Evolution de la qualité du ciment dans un puits du champ pétrolifère de Zama, Alberta, Canada entre 1995 et 2005 (source : Alberta Energy and Utilities Board [Bachu et al., 2007])

b) Analyse des processus de dégradation du ciment et évaluation de leur cinétique

Au stade actuel du retour d'expérience, on connaît encore peu de choses de façon certaine sur les processus qui mènent à la dégradation du ciment au cours du temps. Celui-ci peut se détériorer sous l'effet de plusieurs facteurs :

- les variations de contraintes effectives à proximité du puits induites par les variations de pression de pore ou de température ;
- la lixiviation du ciment par les fluides percolant à travers les pores.

Ces détériorations ont pour effet d'augmenter la porosité et la perméabilité du ciment et de diminuer sa résistance à la compression, à la traction et au cisaillement.

Des travaux ont permis de mettre en évidence in situ la dégradation de la qualité de la cimentation des cuvelages au cours du temps. Un exemple est donné sur la Figure 10, dans le cas d'un puits pétrolier. Une comparaison des logs obtenus en 1995 et en 2005 met clairement en évidence une perte de la qualité du ciment sur 10 ans.

Les essais d'étanchéité réalisés en cavité saline⁴⁸ ont également apporté un retour d'expérience très intéressant sur l'ordre de grandeur des fuites qui peuvent être attendues à travers les cimentations. Une valeur maximale assez communément admise est de 1000 bbls/an⁴⁹ [Thieland Russel, 2004] (soit 160 m³/an), mais les valeurs effectivement mesurées sont le plus souvent bien plus faibles [Bérest, communication personnelle].

On trouve d'autres travaux concernant la détérioration des ciments dans la bibliographie sur le stockage du CO₂ [Taku Ide et al., 2005 ; C. M. Oldenburg, 2007 ; Barlet-Gouédard et al., 2007 ; Cailly et al., 2005]. Toutefois, il convient de veiller à s'assurer que ces travaux sont extrapolables au contexte des stockages de gaz et d'hydrocarbures (qui sont des produits généralement moins agressifs que le CO₂ vis-à-vis des ciments).

Il est vraisemblable que, comme pour les cuvelages, des lois (théoriques ou empiriques) ont été proposées dans la littérature pour caractériser de manière quantitative la cinétique de dégradation des propriétés du ciment au cours du temps. Toutefois, il ne nous a pas été possible, dans le cadre de ce rapport, d'affiner nos recherches sur cet aspect.

c) Modélisation numérique des fuites par la cimentation

La dégradation de la cimentation d'un puits et plus généralement, les processus de fuite à travers les différents éléments constitutifs d'un puits, peuvent être étudiés à l'aide d'une modélisation numérique restituant la géométrie du puits, les lois de comportement des différents matériaux le constituant ainsi que l'historique des sollicitations (thermiques, hydriques, mécaniques et chimiques) s'appliquant au puits au cours de la période d'intérêt.

A titre d'exemple, la Figure 11 montre un modèle réalisé par Brouard et al. [2006] pour évaluer le risque de rupture de la cimentation dans le cas d'une géométrie de puits typique d'un stockage de gaz en cavités salines en phase d'exploitation.

⁴⁸ Il s'agit d'un test d'intégrité mécanique (« mechanical integrity test » ou MIT) visant à déterminer l'étanchéité du dernier cuvelage cimenté autour du sabot de tubage (« casing shoe ») [Crotigno et al, 2006].

⁴⁹ La valeur de 1000 bbls/an (160 m³/an) a l'avantage de fournir un chiffre rond mais est un peu arbitraire. On peut regretter qu'elle soit appliquée de manière un peu indifférenciée dans les cas de l'essai à l'azote et de l'essai en liquide, alors qu'il y a un écart de viscosité très important entre les deux types de fluides. Crotogino [1996] a fait une étude pour le SMRI dans laquelle il recommande dans le cas de l'essai à l'azote (a) 270 m³/an de fuite maximale dans des conditions spécifiées de pression et température pour le cas de l'azote et (b) une résolution au moins égale au tiers de cette valeur. Il peut également paraître un peu curieux de donner une valeur sans référence très précise aux conditions du stockage (surface de la zone cimentée, longueur cimentée du puits). La raison en est que personne n'est très certain du mécanisme de fuite, même si beaucoup pensent que la fuite se fait principalement au niveau de la cimentation autour du sabot du dernier cuvelage (autrement dit que les cuvelages eux-mêmes sont implicitement supposés étanches, ce qui n'est évidemment pas toujours certain, voir les accidents de Hutchinson et Mont Belvieu).

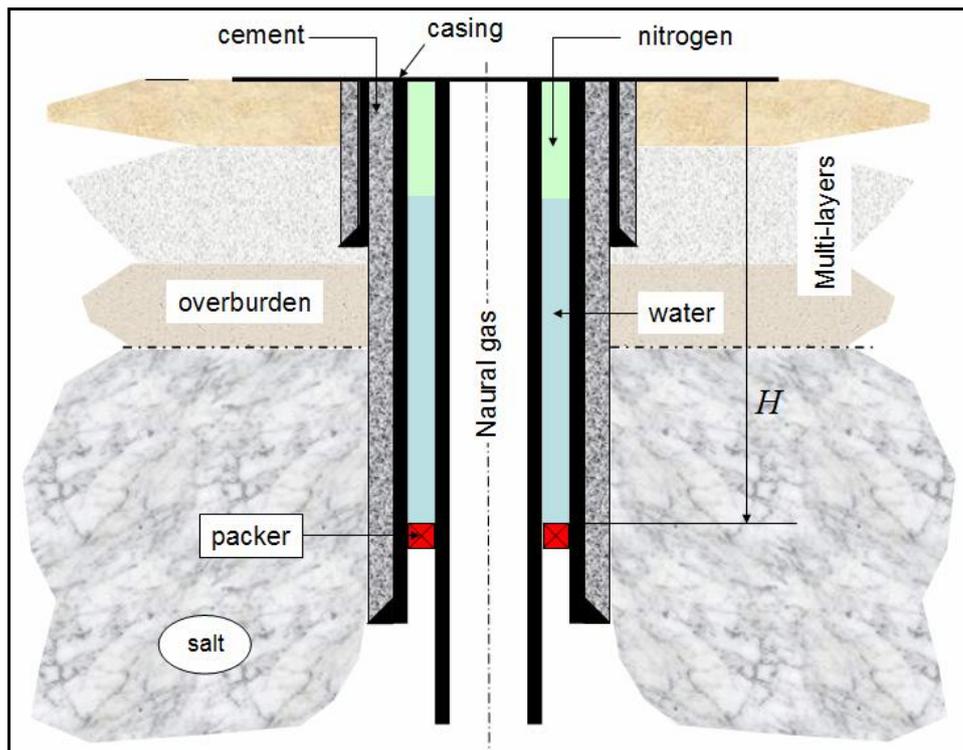


Figure 11 : Evaluation par Brouard et al. [2006] des ruptures susceptibles d'apparaître dans la cimentation d'un puits de stockage soumis à de brusques variations de pression

Données préalables nécessaires :

Les données typiquement nécessaires pour l'évaluation de ce type d'aléa sont :

- données sur les caractéristiques des cimentations de puits (épaisseur, localisation, âge des différents anneaux de ciment mis en place, caractéristiques du ciment utilisé, traitements éventuels réalisés) ;
- données sur les conditions initiales THMCB (thermiques, hydriques, mécaniques, chimiques et biologiques) dans l'environnement du puits au moment de l'abandon ;
- évaluation des sollicitations THMCB à long terme auxquelles seront soumises les cimentations après l'abandon.

Mesures de prévention :

- traitement préventif du puits au moment de l'abandon ;
- tests hydrauliques avant abandon ;
- très en amont : amélioration des caractéristiques des ciments⁵⁰ à la conception.

⁵⁰ De nombreux travaux ont porté sur le contrôle des processus de cimentation [Bücker et al, 2005] ou sur l'amélioration des caractéristiques du ciment [Lécolier et al, 2007].

6.1.3 DEFAT D'ETANCHEITE DU BOUCHON DE CIMENT

Principes et méthodes d'évaluation :

De même que précédemment, l'évaluation du risque de fuite par le bouchon de ciment repose d'une part, sur la connaissance de l'état initial de ce bouchon avant abandon et d'autre part, sur la connaissance, et si possible la quantification, des processus de dégradation du bouchon après l'abandon. On peut ensuite avoir recours à des outils de modélisation numérique pour évaluer de manière plus globale le risque de fuites le long d'un puits ou d'une section de puits particulière dans un contexte donné. Nous détaillons ci-après chacune de ces étapes.

a) Détermination de la qualité initiale du bouchon

A la différence des cas précédents (cuvelage ou cimentation du cuvelage), il n'est pas possible d'inspecter la qualité du bouchon de scellement une fois que celui-ci est mis en place dans le puits. L'évaluation de la qualité initiale du bouchon repose donc sur la connaissance de sa composition, de ses propriétés théoriques (déterminées par exemple en laboratoire) et sur l'enregistrement précis de ses conditions de mise en place.

b) Analyse des processus de dégradation du bouchon et évaluation de leur cinétique

Dans la mesure où la composition du ciment utilisé pour la réalisation d'un bouchon de scellement est essentiellement la même que celle utilisée pour la cimentation du cuvelage, les processus de dégradation potentiels sont les mêmes que ceux évoqués précédemment (voir § 6.1.2.b).

Un des points les plus sensibles et donc, les plus étudiés, en matière d'étanchéité du bouchon (et du puits en général) est la partie située à la base de celui-ci, c'est-à-dire au niveau du sabot du dernier cuvelage cimenté (« casing shoe »). En effet, c'est cette partie qui est directement en contact avec le fluide laissé en place dans le réservoir (saumure pour une cavité saline, gaz pour un aquifère) et qui est soumise directement aux sollicitations thermiques, mécaniques ou chimiques imposées par ce fluide au cours du temps.

Plus spécifiquement, une étude a été menée, dans le contexte salin, sur l'impact d'une augmentation de la pression de saumure sur le comportement du dernier sabot de cuvelage cimenté, à l'aide d'une expérimentation en laboratoire [Pfeifle et al., 2000]. Ces travaux ont consisté tout d'abord à mettre au point le dispositif expérimental schématisé sur la Figure 12. Un des objectifs de cette expérimentation était de déterminer la pression maximale de saumure compatible avec l'intégrité du sabot et du bouchon de scellement.

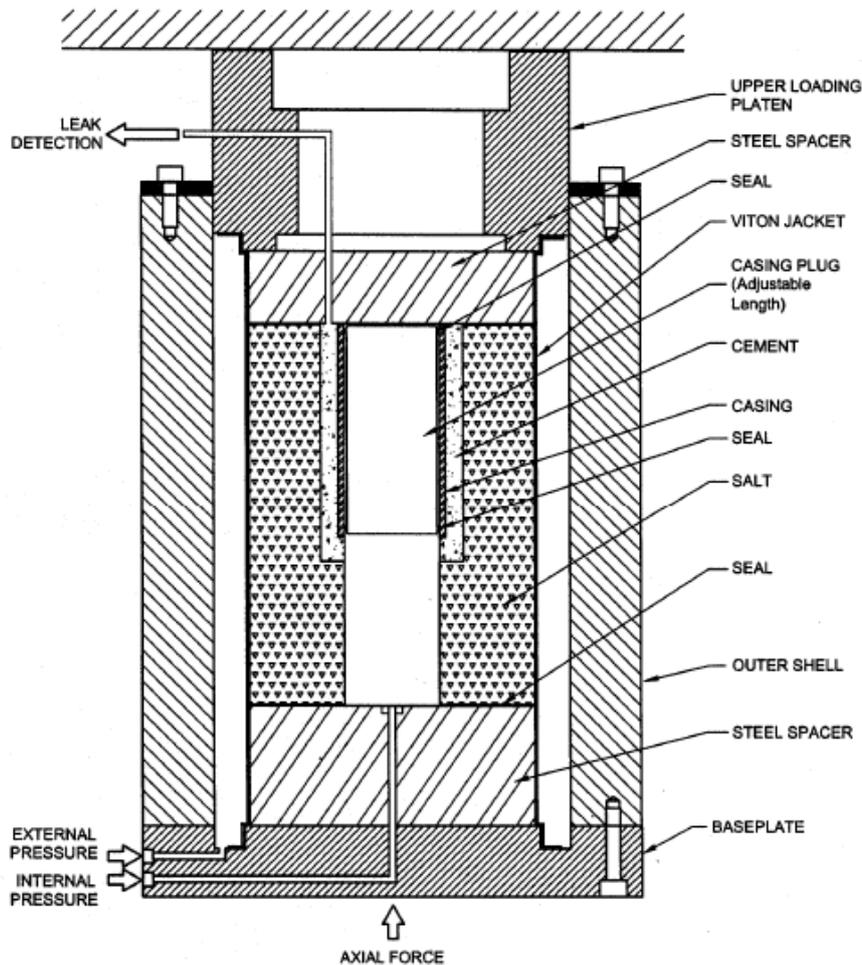


Figure 12 : Schématisation d'un dispositif expérimental destiné à évaluer l'impact de surpressions sur le scellement du puits (d'après Pfeifle et al. [2000])

Les résultats ont montré que des fuites de la saumure à travers la cimentation peuvent se produire même pour des pressions faibles (inférieures à la pression hydrostatique). D'autre part, l'étude a montré que la pression de saumure peut dépasser de 10 % la valeur de la contrainte de confinement (qui vaut 7 à 15 MPa dans le cas de l'expérience) sans que le ciment du cuvelage soit endommagé (des ruptures pouvant toutefois apparaître dans le sel).

c) Modélisation numérique de l'évolution du bouchon au cours du temps

Différents travaux ont été publiés sur la détermination de l'évolution à long terme des bouchons de scellement des puits, notamment dans un but de dimensionnement. On peut par exemple citer ceux de Akgün et Daemen [1999], qui fournissent des recommandations sur le ratio nécessaire entre la longueur du bouchon et le rayon du puits afin de réduire les contraintes de traction susceptibles d'apparaître lorsque le bouchon est soumis à des efforts axiaux. D'autres travaux plus récents [Mainguy et al., 2007], basés sur la modélisation numérique, ont pris en compte les déséquilibres thermo-hydro-mécaniques du stockage au moment de son abandon pour déterminer les sollicitations qui s'exercent à long terme sur le bouchon de scellement (Figure 13).

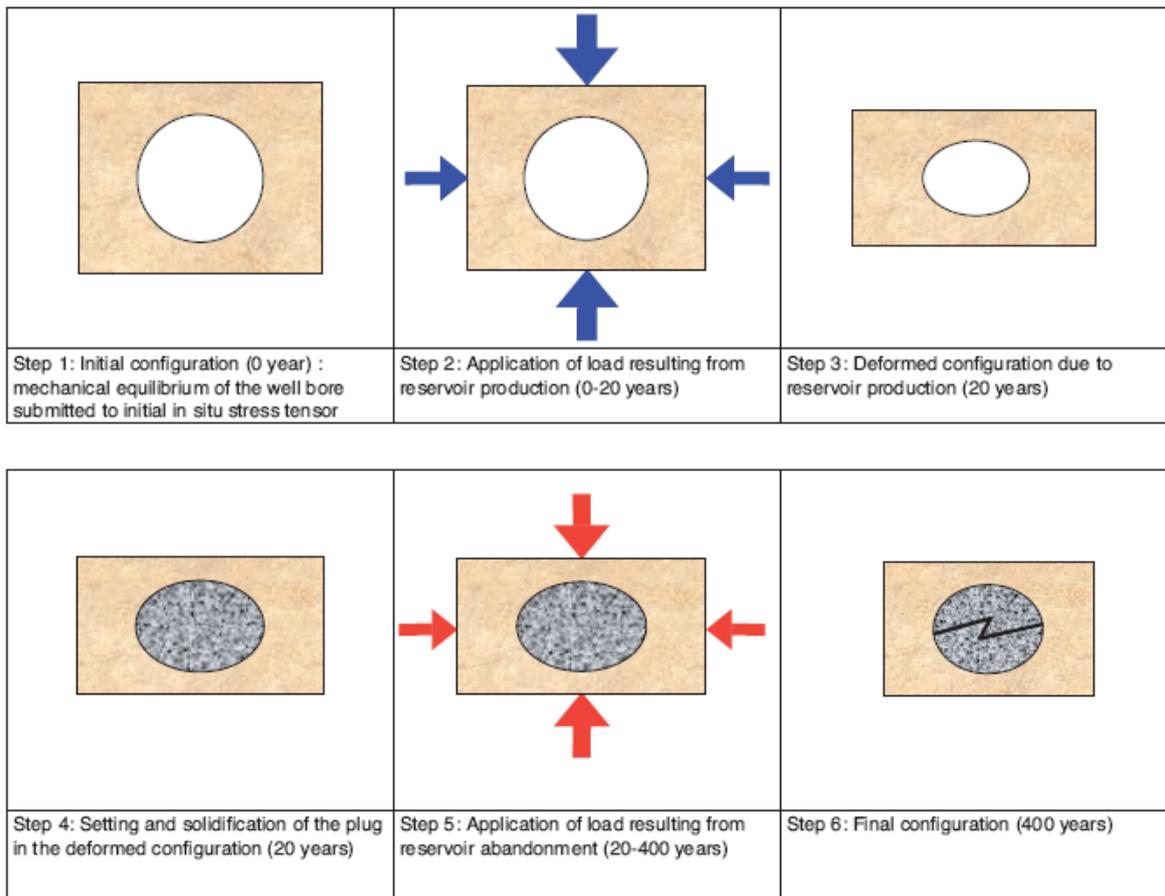


Figure 13 : Analyse du risque de rupture d'un bouchon de ciment après abandon à l'aide d'un modèle tenant compte de l'historique complet des sollicitations s'exerçant sur le puits [Mainguy, 2007]

Données préalables nécessaires :

Les données typiquement nécessaires pour mener à bien l'évaluation de ce type d'aléa sont :

- données concernant les bouchons de scellement (épaisseur, localisation, âge, caractéristiques du ciment utilisé, traitements éventuels réalisés) ;
- données sur les conditions initiales THMCB (thermiques, hydriques, mécaniques, chimiques et biologiques) dans l'environnement du puits au moment de l'abandon ;
- évaluation des sollicitations THMCB à long terme auxquelles seront soumis les bouchons après abandon.

Mesures de prévention :

- Test hydraulique des bouchons avant abandon ;
- Très en amont : amélioration de la qualité des bouchons à la conception.

6.2 EVALUATION DES ALEAS PROPRES AUX STOCKAGES EN MILIEUX POREUX

Après une première section (commune à l'ensemble des stockages) dédiée à l'évaluation des aléas liés aux puits, nous allons à présent nous intéresser à l'évaluation des aléas plus spécifiques à chaque type de stockage, en commençant par les stockages en milieux poreux (présente section).

Pour ce type de stockage, nous allons apporter successivement des éléments d'évaluation relatifs aux aléas suivants : fuite de gaz à travers la couverture (§ 6.2.1), transport du gaz et de ses composés par dissolution dans l'eau (§ 6.2.2), endommagement de la couverture (§ 6.2.3), cisaillement le long de discontinuités existantes (§ 6.2.4) et mouvements de surface (§ 6.2.5). On peut resituer, sur la Figure G1 de l'annexe G, ces différents types d'événements indésirables dans l'arbre global des causes des principaux phénomènes redoutés propres aux stockages abandonnés en milieu poreux.

6.2.1 FUITE DE GAZ A TRAVERS LA COUVERTURE

Comme l'illustrent certains cas de fuites déjà observées par le passé (voir le cas de l'aquifère Leroy en annexe F), on ne peut jamais garantir totalement et de manière pérenne l'étanchéité de la couverture d'un stockage. Celle-ci peut être compromise, par exemple, suite à des sollicitations excessives liées à l'exploitation (pression de stockage trop élevée), qui peuvent mener à une fracturation de la couverture. Ceci est la cause de la fuite observée en 1978 dans le cas de l'aquifère Leroy.

Après l'abandon, le risque de fuites par la couverture apparaît beaucoup plus faible du fait que la pression du stockage est, en principe, inférieure à celle qui existait en cours d'exploitation. Toutefois, la remise à l'équilibre des pressions interstitielles et des températures au sein du réservoir ne s'opère pas de façon immédiate après l'abandon. Celle-ci peut prendre plusieurs dizaines d'années (comme nous le verrons au § 6.2.3) au cours desquelles les contraintes effectives au sein du réservoir et dans la couverture évoluent. Il apparaît légitime d'étudier si ces variations de pression et de température ultérieures à l'abandon sont susceptibles de mener à un endommagement de la couverture ou à une mobilisation (par cisaillement) de discontinuités pré-existantes ce qui reviendrait, dans les deux cas, à compromettre l'étanchéité du stockage.

Nous n'aborderons pas dès à présent l'évaluation des risques d'endommagement ou de cisaillement au sein de la couverture. Ceux-ci seront examinés un peu plus loin, aux § 6.2.3 et 6.2.4. Nous nous intéressons uniquement, pour l'heure, à l'évaluation du risque de fuite à travers une couverture de caractéristiques supposées connues : porosité, perméabilité, présence de failles ou non, conductivité des failles si elles existent, etc.

Principes et méthodes d'évaluation :

L'évaluation du risque de fuite de gaz à travers la couverture d'un stockage repose sur deux démarches complémentaires :

- une analyse de l'historique d'exploitation et des éventuelles fuites détectées au niveau des puits de contrôle des aquifères supérieurs⁵¹ au cours de la vie du stockage. Cette analyse permet, d'ores et déjà, de renseigner sur la prédisposition du stockage à ce type de problème ;
- une prédiction à long terme de l'évolution des pressions, température et flux d'écoulements au sein du réservoir et du recouvrement après abandon ; cette prédiction peut s'appuyer sur des calculs analytiques simples ou sur des modèles numériques plus ou moins complexes (écoulements mono ou multi-phases, intégrant ou non les couplages hydromécaniques) prenant en compte la géométrie et les caractéristiques du réservoir, celles du recouvrement, la présence éventuelle de failles, etc.

Notons que des raisonnements simples, basés par exemple sur la notion de pression capillaire⁵², peuvent fournir des indications de premier ordre qui, dans certains cas, peuvent s'avérer suffisantes pour déterminer si la couverture est sujette (ou non) à des fuites de gaz après l'abandon du stockage. Ces calculs sont d'ailleurs généralement réalisés dès la phase de conception.

Données préalables nécessaires :

Les données typiquement nécessaires pour mener à bien l'évaluation de ce type d'aléa par la modélisation numérique sont :

- une caractérisation géométrique précise du site (forme du réservoir, stratification de la couverture, présence de failles ou de fractures) [Cerepi A., Barde J.P., Labat N., 2003] ;
- une bonne connaissance des propriétés des roches du réservoir et de la couverture, soit déterminées in situ par diagraphie⁵³, soit déterminées en laboratoire. Il s'agit notamment de préciser les porosités, les perméabilités relatives, les pressions capillaires ;
- l'historique complet de l'exploitation et des données de puits.

⁵¹ Plusieurs méthodes permettent de détecter une fuite de gaz dans un aquifère supérieur, des méthodes directes (diagraphies neutron, mesures géochimiques) et des méthodes indirectes (recherche de corrélations entre la pression de stockage et la pression mesurée dans l'aquifère supérieur).

⁵² L'étanchéité au gaz des terrains de couverture est liée à la présence d'eau entre les grains solides qui la constituent. L'eau ne peut être déplacée par le gaz si la différence de pression entre l'eau et le gaz est supérieure à la pression capillaire. La pression capillaire en jeu est celle qui se manifeste pour un milieu très proche de la saturation en eau, c'est-à-dire la pression d'entrée du fluide non-mouillant (gaz ou hydrocarbure liquide) dans le milieu saturé. Cette pression capillaire est d'autant plus forte que les pores de roche sont petits [Dana et al., 1999]. L'évaluation de la pression capillaire doit donc tenir compte de l'ensemble du champ de porosité de la couverture imperméable, de manière à ce que les différentes tailles de pores soient prises en compte.

⁵³ La détermination des propriétés physiques de la roche (par exemple la porosité) à partir des mesures effectuées par diagraphie (par exemple la vitesse des ondes P) s'opère à l'aide d'un certain nombre de lois (théoriques ou empiriques) proposées dans la littérature [Bemer et al., 2004 ; Han, 1986 ; Mavko et al., 1998 ; Raymer et al., 1980, Gardner et al., 1974 ; Castagna et al., 1993].

Mesures de prévention :

- retrait d'un maximum de gaz stocké avant abandon : les pétroliers ont mis au point des techniques efficaces de récupération assistée. Une discussion pourrait porter sur l'intensité des efforts à consentir pour récupérer au moyen de ces techniques une partie du gaz piégé. Doit-on se limiter à la récupération rentable dans les conditions économiques du moment ou tenter d'aller plus loin dans une démarche de réduction des aléas après l'abandon ?

6.2.2 TRANSPORT DU GAZ ET DE SES COMPOSES PAR DISSOLUTION DANS L'EAU

Le gaz naturel est constitué de différents composés⁵⁴. Cette composition est légèrement variable suivant l'origine du gaz (gisement naturel, gaz de houille ou encore gaz craqué⁵⁵). Avant l'abandon d'un site, il convient de connaître en détail l'historique des différents gaz ayant été injectés, de manière à identifier les constituants susceptibles d'altérer la qualité des aquifères environnants et de représenter une gêne ou un risque (suivant le composé concerné) pour l'exploitation de ces aquifères en tant que ressources en eau potable. Bien entendu, seuls les constituants solubles dans l'eau sont susceptibles de modifier la composition chimique de ces aquifères. Il s'agit principalement du méthane, du benzène, du THT et des alcanes présents en quantité moindre.

Au-delà de l'altération possible des aquifères environnants par certains composés du gaz naturel, ces aquifères peuvent aussi constituer un milieu de transfert de ces composés vers la surface. Par exemple, du méthane véhiculé sous forme dissoute dans l'aquifère peut s'accumuler dans les eaux de surface et les sols et constituer un risque si celui-ci est amené à passer de la phase dissoute à la phase gazeuse dans le champ proche de la surface.

Principes et méthodes d'évaluation :

La principale approche permettant d'évaluer le risque de pollution d'un aquifère (aquifère hôte ou aquifère supérieur) par les produits laissés en place lors de l'abandon est la modélisation numérique des aquifères concernés, tant du point de vue de l'écoulement que du transport.

⁵⁴ Le gaz naturel est composé principalement de méthane (82 à 98 %), d'environ 10 % d'autres alcanes (hydrocarbures majeurs possédant de 1 à 5 atomes de carbone), le reste étant constitué d'hydrocarbures mineurs (6 atomes de carbones), d'autres gaz et de métaux lourds sous forme de traces. Un certain nombre de composés sont également ajoutés au gaz naturel. Il s'agit du tétrahydrothiophène (THT) et du méthanol. Le premier est ajouté pour donner une odeur caractéristique au gaz, de manière à faciliter la détection des fuites. Le second est destiné à protéger les conduites de la formation d'hydrates. Ces deux composés sont présents en très faible quantité dans le gaz naturel.

⁵⁵ Les processus de craquage font partie des opérations de raffinage des hydrocarbures lourds. Le but est de transformer, en présence d'un catalyseur, les longues chaînes hydrocarbonées lourdes en chaînes hydrocarbonées courtes, légères, pour être utilisées dans la fabrication du carburant. Le gaz craqué est un sous-produit de ces processus de raffinage. Il est souvent utilisé comme matière première pour la fabrication de produits chimiques.

La modélisation peut se baser, par exemple, sur un scénario critique (fuite par une faille reliant le réservoir à l'aquifère supérieur, dissolution à long terme au sein de l'aquifère hôte). Les scénarii choisis doivent bien entendu être vraisemblables tant du point de vue du contexte géologique qu'hydrogéologique local. Un calcul différent peut être réalisé pour chaque composé dissous, les propriétés physico-chimiques des composés constituant le gaz naturel étant très variables.

Ces modélisations permettent de prédire l'évolution à long terme du front de migration des hydrocarbures dissous. Il en résulte des prévisions de concentrations maximales à un instant donné et à différentes distances du stockage initial. Ces concentrations peuvent alors être comparées aux valeurs réglementaires.

Il va de soi que cette modélisation nécessite d'une part, un code de calcul numérique adapté et préalablement validé et d'autre part, l'accès aux valeurs précises des paramètres intervenant dans les calculs.

Données préalables nécessaires :

Les données typiquement nécessaires à ce type de modélisation numérique sont :

- une évaluation du coefficient de solubilité de la substance considérée dans l'eau. A titre d'exemple, la solubilité du méthane est de 34 l/m³ à une température de 25°C et à une pression de 1 atmosphère. Cependant la capacité à se dissoudre du méthane augmente avec la pression et la température. L'évaluation de la solubilité des gaz considérés doit donc tenir compte des conditions de pression, de température et de minéralisation de l'eau présente dans l'aquifère concerné ;
- une connaissance des paramètres hydrauliques et de la géométrie de l'aquifère.

Mesures de prévention :

Il n'existe, à notre connaissance, aucune mesure permettant de prévenir ou de limiter le risque de dissolution des gaz résiduels dans les aquifères concernés. Ce risque peut toutefois être surveillé (à l'aide notamment de puits de contrôle) comme nous le verrons dans le chapitre 7 de ce rapport.

6.2.3 ENDOMMAGEMENT DE LA COUVERTURE

Comme nous l'avons dit précédemment, il est pertinent de se demander si la lente remise à l'équilibre des pressions et températures au sein du réservoir après l'abandon ne serait pas susceptible de mener à un endommagement de la couverture du stockage (présente section) ou à une mobilisation de discontinuités pré-existantes (section 6.2.4).

Sur ce point, l'étude de Mainguy et al. [2007] apporte un éclairage intéressant. Même si le contexte de l'étude (ancien gisement pétrolier soumis à une « récupération assistée » en fin d'exploitation) n'est pas tout à fait le même que celui d'un stockage souterrain (les déséquilibres des champs de pression et de température au moment de l'abandon y sont beaucoup plus forts), elle permet d'illustrer, sur le plan phénoménologique, ce qui pourrait advenir à long terme dans le cas d'un stockage souterrain.

Les auteurs prédisent, dans le contexte de leur étude, que les valeurs de pressions et températures vont continuer d'évoluer pendant environ 200 ans après l'abandon du gisement (Figure 14). Les variations de température attendues peuvent localement atteindre 50°C (réchauffement) dans le réservoir et 20°C dans la couverture. Le réchauffement est dû au fait que le réservoir a été refroidi pendant l'exploitation suite à des injections d'eau (dans un but de la « récupération assistée » d'hydrocarbures) plus froide que la température du milieu. Ce réchauffement induit l'apparition de contraintes thermiques dont l'intensité reste toutefois modérée devant celle des contraintes en place⁵⁶. Dans le cas d'un stockage, ces contraintes thermiques peuvent être encore beaucoup plus faibles si on prend le soin d'injecter le produit stocké à une température proche de la température d'équilibre à la profondeur du stockage.

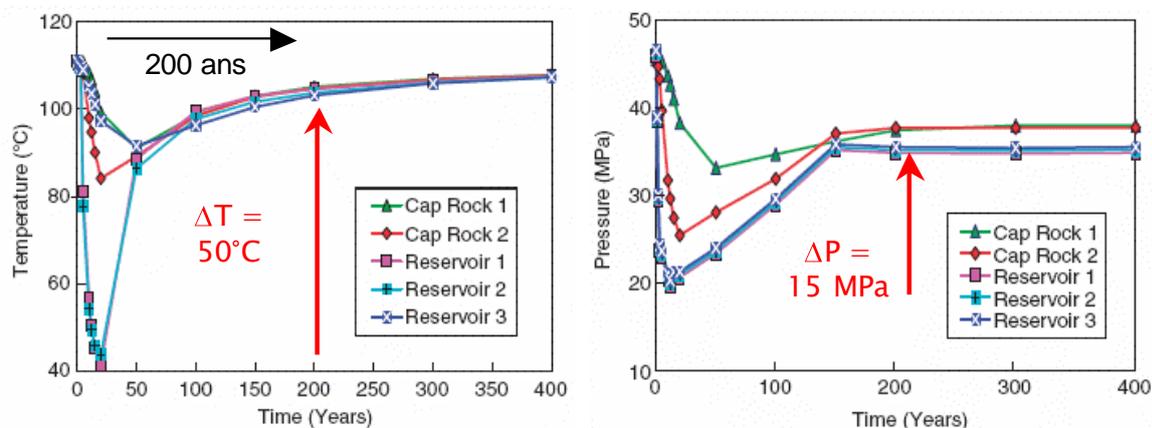


Figure 14 : Evaluation des variations de température et de pression interstitielle dans le réservoir et le caprock d'une exploitation de pétrole pendant et après l'arrêt de l'exploitation (d'après Mainguy et al. [2007]). Le temps initial correspond au début de l'exploitation.

En ce qui concerne les variations de pressions interstitielles attendues après l'abandon du gisement, la figure 15 montre que celles-ci peuvent localement atteindre des valeurs élevées, soit 15 MPa dans le réservoir et 10 MPa dans la couverture (il s'agit d'une ré-augmentation dans l'étude de Mainguy et al., l'exploitation du pétrole ayant conduit à une diminution globale des pressions interstitielles). Ces variations de pressions interstitielles peuvent conduire, par une modification des contraintes effectives dans le milieu, à une fissuration, voire à une fracturation de la roche en traction ou en cisaillement (Figure 15). Dans le cas d'un stockage, on peut toutefois anticiper que le déséquilibre des pressions interstitielles au moment de l'abandon sera beaucoup plus faible et plutôt favorable à la stabilité.

⁵⁶ La variation de contrainte d'origine thermique (thermoélastique) est $\Delta\sigma_{th} = 3 K \alpha \Delta T$ où K est le module de compressibilité du milieu, α est le coefficient de dilatation thermique et ΔT est la variation de température. Pour fixer les idées prenons $K = 5000$ MPa et $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{°C}^{-1}$. On obtient alors $\Delta\sigma_{th} = 0,1$ MPa/°C, soit 1 MPa pour $\Delta T = 10$ °C, ce qui est assez faible.

T = rock tensile strength; C = rock cohesion, ϕ = friction angle;
 S'_1 = maximum principal effective stress; S'_3 = minimum effective stress.

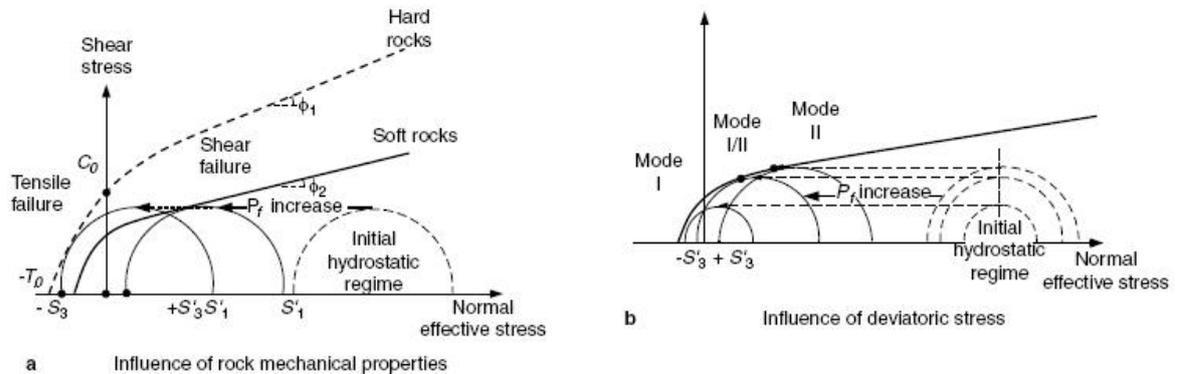


Figure 15 : Evaluation des risques et du type de rupture (en traction « mode I », en cisaillement « mode II » ou mixte « mode I-II ») induit par l'augmentation des pressions interstitielles selon la déformabilité de la roche et l'importance de déviateur de contrainte initial (d'après Grauls [1999])

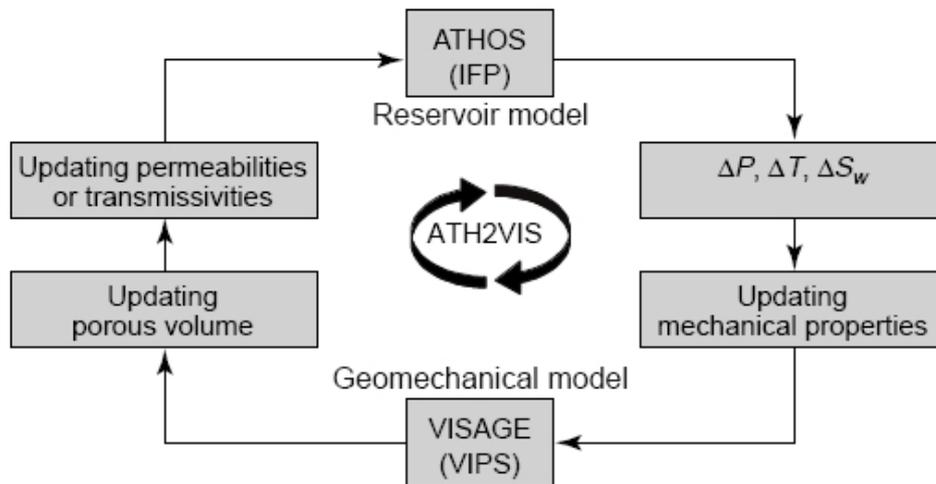
Principes et méthodes d'évaluation :

L'évaluation du risque de rupture de la couverture sous l'effet des variations de pression et de température après l'abandon du stockage peut reposer, selon le degré de finesse souhaité, sur des calculs analytiques simples ou bien des modèles numériques plus élaborés.

Dans ce dernier cas, l'approche la plus courante sera de coupler un modèle hydraulique pour la prédiction des circulations de fluides (du type de celui évoqué au § 6.2.1) à un modèle mécanique permettant de quantifier les modifications du champ de contraintes et de déformation dans le réservoir et la couverture induites par les variations de pressions de pore et les variations de température. Ce type de modèle, dont des exemples sont fournis en Figure 16, permet ainsi de localiser les ruptures éventuelles.

Signalons qu'une modélisation précise d'un stockage souterrain tenant compte de la géométrie réelle en 3D et des interactions thermiques, hydrauliques, mécaniques et géochimiques n'est pas chose facile. Peu de codes de calculs disponibles sur le marché sont adaptés à ce contexte et les données nécessaires ne sont pas toujours disponibles. Cela soulève la nécessité d'une validation préalable du modèle tout en soulignant l'intérêt d'une vérification in situ.

a - couplage entre ATHOS et VISAGE (d'après Longuemare [2002])



b - couplage entre TOUGH2 et FLAC3D (d'après Rutqvist [2002])

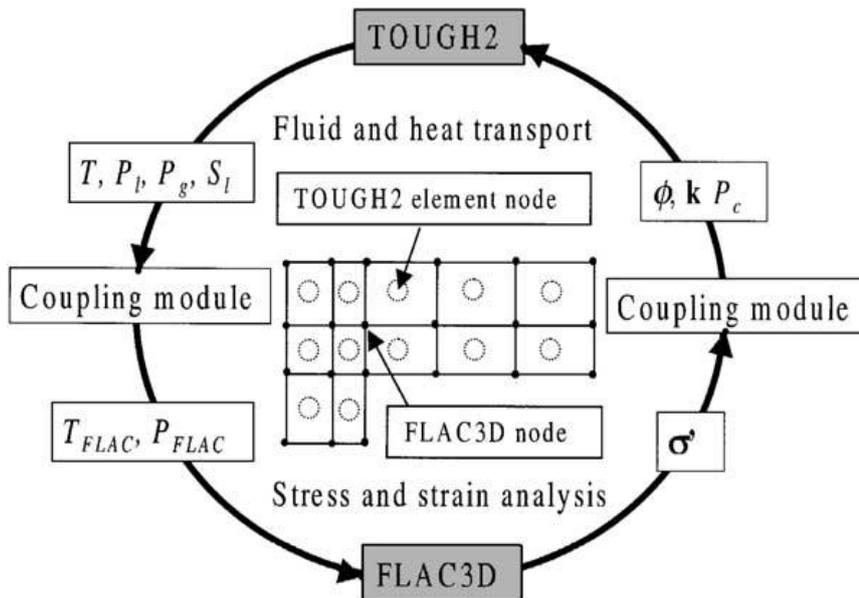


Figure 16 : Exemples de couplage entre un modèle de réservoir (calcul des variations de pression et de saturation) et un modèle mécanique (calcul des variations de contrainte et de déformation)

Données préalables nécessaires :

Les données typiquement nécessaires pour mener à bien ce type de modélisation numérique couplée sont :

Les propriétés mécaniques des différentes formations de la couverture et du réservoir (principalement les modules de déformation et les résistances). En l'absence de caractérisation de laboratoire, les valeurs des modules élastiques peuvent être estimées à partir des mesures de vitesses de propagation des ondes V_p (obtenues par diagraphie) et de relations (théoriques ou empiriques) entre vitesses et modules proposées dans la littérature⁵⁷ (Figure 17) ;

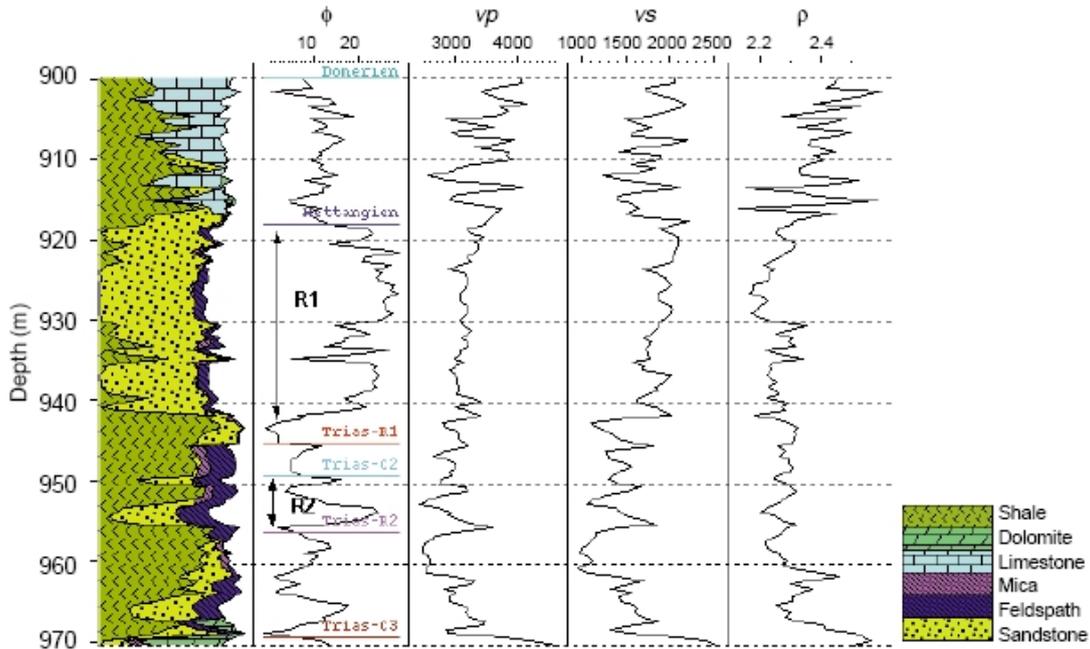


Figure 17 : Détermination par diagraphie de la porosité, des vitesses de propagation V_p et V_s , de la densité ρ des formations rencontrées entre 900 et 1000 m dans le stockage de gaz de Céret la Ronde, Indre-et-Loire (d'après Vidal et al. [2002])

- l'estimation des valeurs des contraintes initiales. La contrainte verticale peut souvent être estimée à partir de la profondeur ($\sigma_v = \rho gh$, où ρ est la masse volumique des roches du recouvrement, g l'accélération de la pesanteur et h la profondeur). Les contraintes horizontales σ_H et σ_h sont généralement moins faciles à estimer si l'on ne dispose pas de mesures de contraintes proches du stockage. On se réfère alors à des valeurs plus ou moins acceptées dans la littérature. Dans le bassin parisien par exemple, on estime que le ratio σ_H / σ_v (contrainte totale) est de l'ordre de 0,7 [Cornet, F.H. et Burlet, D., 1992] ;
- les données d'entrée nécessaires au modèle d'écoulement (voir § 6.2.1), c'est-à-dire les porosités, perméabilités relatives, pressions capillaires.

⁵⁷ On peut citer à titre d'exemple les approches proposées par Mavko et al. [1998] et Vidal-Gilbert et al. [2005]. La démarche consiste à déterminer successivement les vitesses V_s à partir des vitesses V_p [Han, 1986 ; Castagna et al., 1985], les modules dynamiques non-drainés à partir de V_p et V_s , les modules drainés à partir des modules non-drainés (relation de Biot-Gassmann [1951]) et enfin, les modules statiques à partir des modules dynamiques [Wang, 2000].

Mesures de prévention :

- il n'existe pas, à notre connaissance, de mesure de prévention permettant de réduire le risque d'endommagement de la couverture après l'abandon du stockage. Ce risque peut toutefois être surveillé (à l'aide notamment de mesures piézométriques dans des puits de contrôle ou par le suivi de l'activité microsismique) comme nous le verrons dans le chapitre 7 de ce rapport.

6.2.4 CISAILLEMENT LE LONG DE DISCONTINUITES EXISTANTES

De même que l'on peut examiner si la remise à l'équilibre thermique et hydraulique du stockage après son abandon ne peut pas endommager la couverture, on peut également examiner si la modification de la valeur des contraintes normales et tangentielles s'exerçant sur les épontes d'une faille préexistante dans le milieu n'est pas susceptible de mobiliser cette faille en cisaillement et par suite, d'induire une modification de sa conductivité hydraulique.

Principes et méthodes d'évaluation :

L'évaluation du risque de cisaillement le long d'une discontinuité sous l'effet des variations de pression et de température après l'abandon du stockage peut, là encore, s'effectuer, selon le degré de finesse souhaité, par des calculs analytiques simples ou bien des modèles numériques plus élaborés.

Dans ce dernier cas, l'analyse pourra s'appuyer sur le même type de modèle (couplé hydromécanique) que celui présenté à la section précédente (6.2.3) [Orlic, 2001 et 2005 ; K. Heffer, 2002 ; Streit, 2004 ; Chiaramonte et al., 2006].

A titre d'exemple, on montre en Figure 18 le résultat d'une simulation du comportement d'une faille suite à des opérations d'injection et de pompage de gaz [Orlic, 2005]. Si le contexte de l'étude est différent (stockage de CO₂), celle-ci est illustrative de la manière dont on peut évaluer le risque de glissement le long d'une faille dans le contexte d'un stockage souterrain de gaz. On peut citer également les travaux de K. Heffer et al. [2002] et de Longuemare et al. [2002].

Notons qu'il n'est pas forcément nécessaire d'introduire explicitement les discontinuités dans le modèle pour évaluer si celles-ci risquent d'être remobilisées. Une analyse a posteriori du type de celle proposée par Thoraval et al. [2006]⁵⁸ peut suffire.

⁵⁸ Cette approche revient à estimer les contraintes normales et tangentielles s'exerçant sur les plans de faille en fonction de l'orientation du plan et des valeurs de contrainte dans la matrice rocheuse.

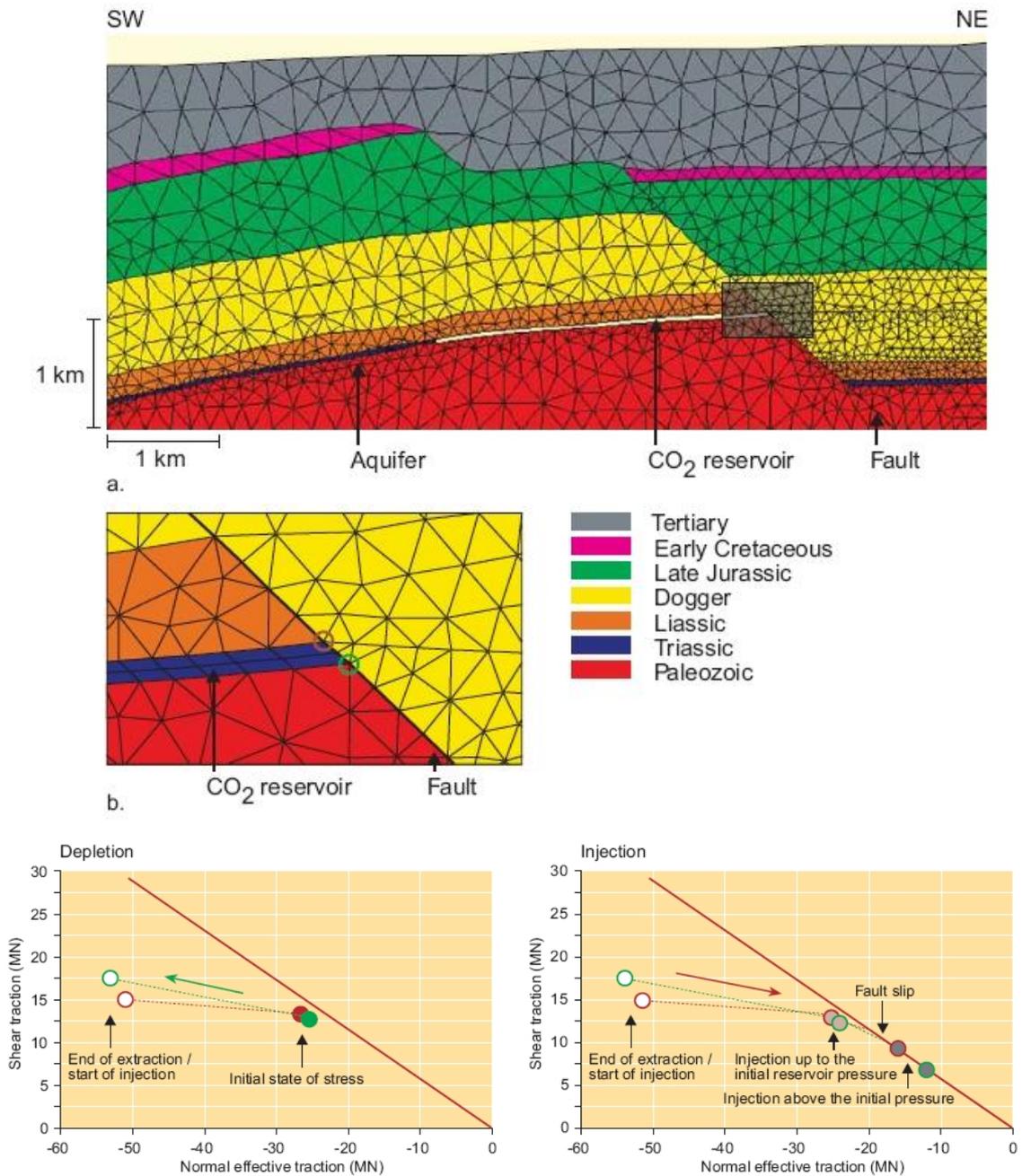


Figure 18 : Evaluation du risque de cisaillement d'une faille située à proximité du réservoir de Montmiral suite au pompage puis à l'injection de CO₂ dans ce réservoir (d'après Orlic et al. [2005])

Données préalables nécessaires :

- idem § 6.2.3 ;
- caractéristiques géométriques (localisation, orientation) et mécaniques (raideur, cohésion, angle de frottement) des discontinuités étudiées.

Mesures de prévention :

- il n'existe pas, à notre connaissance, de mesure de prévention permettant de réduire le risque de mobilisation d'une faille préexistante après l'abandon du stockage. Ce risque peut toutefois être surveillé par le suivi de l'activité microsismique (voir § 7).

6.2.5 MOUVEMENTS DE SURFACE LIES A LA REMISE EN EQUILIBRE DU STOCKAGE APRES ABANDON

Nous avons évoqué précédemment que les opérations de stockage et de déstockage (en cours d'exploitation) puis le processus de retour à l'équilibre des pressions et températures après l'abandon, étaient susceptibles d'engendrer des mouvements de la surface du sol de faible amplitude (millimétriques ou au plus centimétriques) mais qui, dans certains contextes, peuvent nécessiter d'être évalués du fait des impacts qu'ils pourraient avoir sur les bâtis ou sur le réseau hydrographique.

Principes et méthodes d'évaluation :

Différentes approches peuvent être utilisées pour estimer les mouvements de la surface du sol liés à la remise en équilibre du stockage après l'abandon : des modèles analytiques simples, des modèles empiriques calibrés sur des mesures réalisées pendant l'exploitation du stockage ou bien des modèles numériques plus élaborés du type deux évoqués dans les sections précédentes (6.2.3 et 6.2.4).

Chin et al. [2002] montrent que lorsque le recouvrement est constitué de roches compétentes, les mouvements de surface peuvent être convenablement estimés de façon analytique à l'aide des équations de la poroélasticité. Pour des formations plus déformables, ainsi que pour des mécanismes de compaction de roche plus complexes, il faut faire appel, selon les auteurs, à un couplage de modèles géomécaniques et d'écoulements de fluides.

J.M. Piau [1995], A. Onaisi [1995] et Dusseault et al. [2002] ont développé quant-à-eux des modèles empiriques de prédiction des mouvements de la surface du sol calibrés sur les mesures effectuées pendant la phase d'exploitation. Cette approche, développée dans le contexte de l'exploitation de gisements d'hydrocarbures, peut tout à fait s'appliquer aux stockages souterrains en milieux poreux dès lors que des mesures sont disponibles sur les mouvements de la surface du sol au cours de la phase d'exploitation du stockage.

Données préalables nécessaires :

- idem § 6.2.4 (pour les modèles numériques) ;
- mesures de topométrie au cours de la phase d'exploitation (pour les modèles empiriques).

Mesures de prévention :

- il n'existe pas de mesure de prévention permettant de réduire le risque de mouvement de surface après l'abandon d'un stockage. Ce risque peut toutefois être surveillé par différentes techniques décrites au chapitre 7.

6.3 EVALUATION DES ALEAS PROPRES AUX STOCKAGES EN CAVITES SALINES

Nous abordons à présent l'évaluation des aléas propres aux stockages en cavités salines. Pour ce type de stockage, nous allons apporter successivement des éléments d'évaluation relatifs aux aléas suivants : surpression de saumure dans la cavité (§ 6.3.1), mouvement de surface (§ 6.3.2), pollution de nappes aquifères par la saumure (§ 6.3.3). On peut resituer, sur la Figure G2 de l'annexe G, ces différents types d'événements indésirables dans l'arbre global des causes des principaux phénomènes redoutés propres aux stockages abandonnés en cavités salines.

6.3.1 SURPRESSION DE SAUMURE DANS LA CAVITE

Depuis le début des années 80, la problématique de l'évolution à long terme de la pression de saumure dans une cavité de stockage après sa fermeture a été étudiée par plusieurs auteurs, notamment dans le cadre des travaux du SMRI⁵⁹ sur la fermeture des cavités d'exploitation de sel [Ghoreychi et al., 1993 ; Berest et al., 1997]. Cette section rassemble un certain nombre d'éléments permettant d'évaluer l'évolution de cette pression à long terme. Ces éléments sont en grande partie inspirés de la synthèse de Bérest et al. [1997].

Principes et méthodes d'évaluation :

L'évolution de la pression de saumure dans une cavité abandonnée est contrôlée par plusieurs processus : le réchauffement de la saumure, le fluage du sel, la percolation de la saumure à travers le massif de sel et la dissolution éventuelle du sel par la saumure. Dans un premier temps, nous allons donner les équations constitutives qui permettent de décrire chacun de ces processus. Dans un deuxième temps, nous étudierons différents scénarii, selon la prédominance de l'un ou l'autre de ces processus.

a) *Equations constitutives de chaque processus*

- *Evaluation de la durée du processus de réchauffement de la saumure* [Bérest et al., 1997]. Le temps caractéristique t_c après lequel environ 75 % de l'écart de température entre la saumure et le massif est résorbé peut être estimé par : $t_c = V^{2/3} / 4k$, où k est la diffusivité thermique du sel et V le volume de la cavité. Notons que ce temps peut être relativement long : il est de l'ordre de 1 an pour des cavités de très petite dimension (10 000 m³) à plus de 15 ans pour des cavités de grande dimension (500 000 m³). Pour une cavité très élancée, ce temps peut toutefois être réduit d'un facteur 2 à 3 ;
- *Evaluation du débit de saumure sortant du puits du fait du réchauffement de la saumure dans le cas d'une cavité restant ouverte* [Bérest et al., 1997]. On estime que ce débit varie comme la puissance 1/3 du volume de la caverne et en proportion de la différence de température entre la saumure T_s et la roche environnante T_R (autrement dit : $Q_{th} \sim V^{1/3} (T_R - T_s)$;

⁵⁹ Le SMRI (Solution Mining Research Institute), qui regroupe la quasi-totalité des entreprises, bureaux d'études et universités intéressés par l'exploitation de sel par dissolution dans le monde, a mis le thème de l'abandon au centre de son programme de recherche depuis plus d'une dizaine d'années. Le SMRI a, entre autres, financé partiellement sept essais in situ (3 en France, 2 en Allemagne, 1 au Texas). Des entreprises françaises (GDF, Geostock, Total) et l'Ecole Polytechnique avec Brouard Consulting ont largement contribué à cet effort de recherche.

- *Evaluation du débit de saumure percolant dans le massif.* Durup [1994] cité par Bérest et al. [1997] a montré, à partir de mesures réalisées sur le site d'Étrez, que l'on peut globalement décrire ce processus de percolation par la loi de Darcy. Ainsi, le débit de saumure sortant de la cavité est proportionnel à la variation de pression ΔP entre la saumure et le sel : $Q \sim k \Delta P$, où k est la perméabilité intrinsèque du sel (estimée à $6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ dans le cas d'Étrez). La valeur de cette perméabilité peut varier de plusieurs ordres de grandeur ($10^{-22} \text{ m}^2 < k < 10^{-19} \text{ m}^2$) [Cosenza et al., 1999] suivant la quantité d'impuretés (argiles, anhydrites) présentes dans le massif de sel et suivant l'historique des contraintes auxquelles le sel a été soumis ;
- *Evaluation de la diminution de pression induite par un débit de saumure Q percolant (pendant Δt) vers la couche de sel, la cavité étant supposée fermée de volume V :* $\Delta P = Q \Delta t / \beta V$, où β est la somme de la compressibilité de la saumure ($\beta_s = 2,7 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$) et de la cavité saline ($\beta_R = 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$). La valeur de cette compressibilité peut être affectée par la présence de poches de gaz ;
- *Evaluation de la vitesse de déformation du fluage du sel.* Cette vitesse dépend de la température du sel à proximité de la cavité, ainsi que des différences de pression entre la saumure et le sel :

$$d/dt(\varepsilon_{\text{fluage}}) = -B [(P_R - P_s)/P_0]^m, \text{ avec } B = A e^{[C (1/T_0 - 1/T_R)]}$$

Bérest et al. [1997] proposent le jeu de paramètres moyen suivant : $C = 5360 \text{ K}^{-1}$ (T_R et T_0 étant exprimé en kelvin, T_R étant la température de la roche à proximité de la cavité, T_0 étant la température de la roche en l'absence de cavité) ; $m = 3$; $A = 2,5 \cdot 10^{-7} (\text{année})^{-1}$; $P_0 = 10^6 \text{ Pa}$ (si P_R et P_s sont également exprimés en Pa).

On note que la vitesse de fluage du sel augmente significativement avec la différence entre la pression lithostatique P_R ($\sim 0,022 z$) à la profondeur de la cavité et la pression halmostatique⁶⁰ P_s ($\sim 0,012 z$) dans la cavité. Cette vitesse augmente également très notablement avec la température⁶¹.

b) Etude de scenarii

Suivant l'état de la cavité avant sa fermeture, différentes hypothèses peuvent être faites conduisant à négliger tel ou tel facteur.

Tout d'abord, considérons qu'avant de fermer la cavité, on a laissé la saumure se réchauffer pendant un temps suffisamment long devant le temps caractéristique ($t > t_c$), de sorte que l'on puisse considérer qu'au moment de l'abandon, la température de la saumure n'est pas très différente de celle du milieu rocheux environnant ($T_R \sim T_s$). Dans ce cas :

⁶⁰ Pression de saumure.

⁶¹ A 2000 m de profondeur, où la température T_R est d'environ 100°C , le fluage est 100 fois plus important qu'à une profondeur de 1000 m, où la température est d'environ 45°C . L'accroissement de l'écart de pression est responsable d'une multiplication par 8 de la vitesse de fluage ; l'effet de l'accroissement de température est responsable d'une multiplication par 12.

- si on néglige également la percolation (ce qui est valable si la perméabilité k du sel est faible ou si le volume V de la cavité est grand) en ne considérant que le fluage, la différence de pression *moyenne* entre la saumure et le sel ($P_R - P_S$) évolue au cours du temps et suivant la profondeur de la cavité comme une fonction (exponentielle inverse) de la compressibilité β et du paramètre m défini précédemment. Typiquement, on obtient (pour $\beta = 4 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ et $m=3$) :
 - cas d'une cavité peu profonde (1000m) : $t = 0$: 10 MPa ; $t = 8$ ans : 5 MPa ; $t = 800$ ans : 1 MPa ;
 - cas d'une cavité profonde (2000m) : $t = 0$: 20 MPa ; $t = 2$ mois : 10 MPa ; $t = 16$ ans : 2 MPa.

Du fait de la différence de densité entre la saumure et le sel, la différence de pression ($P_R - P_S$) au toit de la cavité est inférieure à la différence de pression moyenne. Elle peut devenir négative au bout d'un certain temps, induisant ainsi un risque de rupture en traction du sel (sous réserve, bien sûr, que les hypothèses restent justes) ;

- si on considère à la fois le fluage et la percolation de la saumure à travers le massif (ce qui est pertinent dans le cas de petites cavités ou dans le cas d'un massif de sel relativement perméable), la pression finale de la saumure reste en général très au-dessous de la pression lithostatique ($P_R - P_S \gg 0$), de sorte que le risque de fracturation disparaît ou est considérablement diminué. Notons que cette conclusion est remise en cause si la saumure n'est pas en équilibre thermique avec le sel lors de la fermeture ($T_S < T_R$).

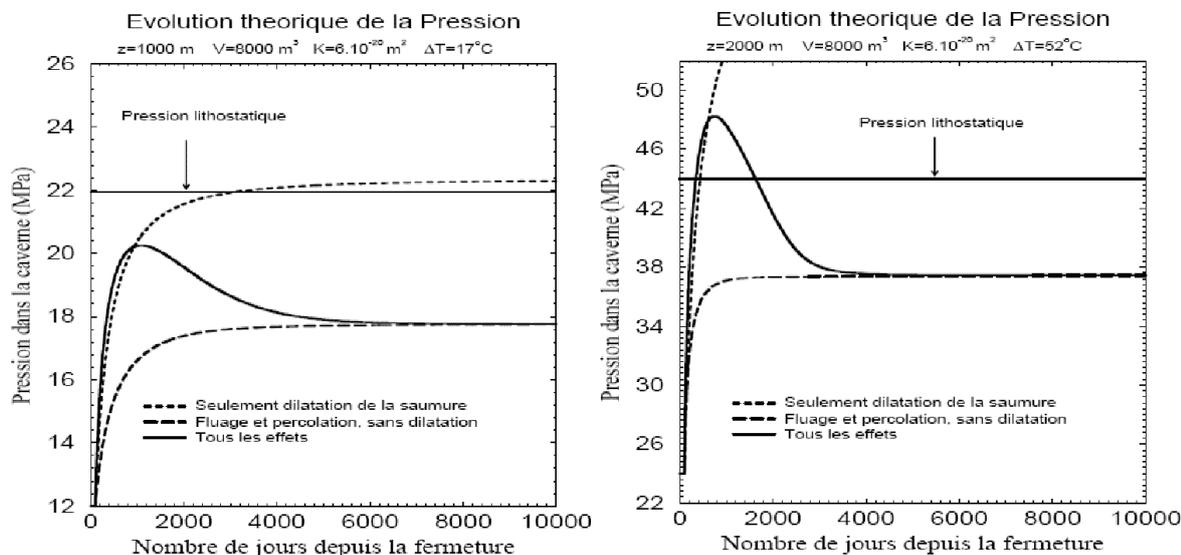
Considérons maintenant que l'on n'a pas attendu que la saumure s'équilibre thermiquement avec le massif avant de fermer la cavité. On prend alors en compte à la fois le fluage, la percolation et la dilatation thermique de la saumure. La variation de la pression de saumure au cours du temps présente alors une allure plus complexe que précédemment, comme on peut le voir sur la Figure 19. Deux cas peuvent être distingués :

- cas d'une cavité peu profonde (1000m) : l'évolution de la pression de saumure P_S passe par un maximum (prépondérance initiale de l'effet thermique), puis se stabilise à la valeur que l'on obtenait précédemment en négligeant les effets thermiques (prépondérance finale du fluage et de la percolation). Notons que plus la caverne est grande, moins la percolation est efficace ; plus la perméabilité est faible plus le risque de fracturation pendant la phase transitoire est grand ;
- cas d'une cavité profonde (2000m) : la pression maximale de saumure tend à dépasser la pression lithostatique du fait de l'augmentation des effets du fluage et des effets thermiques, et de leur prépondérance, initialement, devant les effets liés à la percolation. Le risque de fracturation augmente donc dans ce cas pendant la phase transitoire. Notons que la durée de la phase transitoire est réduite dans le cas d'une cavité de petite dimension.

a - Impact des différents effets (fluage du sel, dilatation de la saumure, percolation de la saumure dans le sel)

profondeur : 1000 m

profondeur : 2000 m



b - Impact du volume de la cavité

profondeur : 1000 m

profondeur : 2000 m

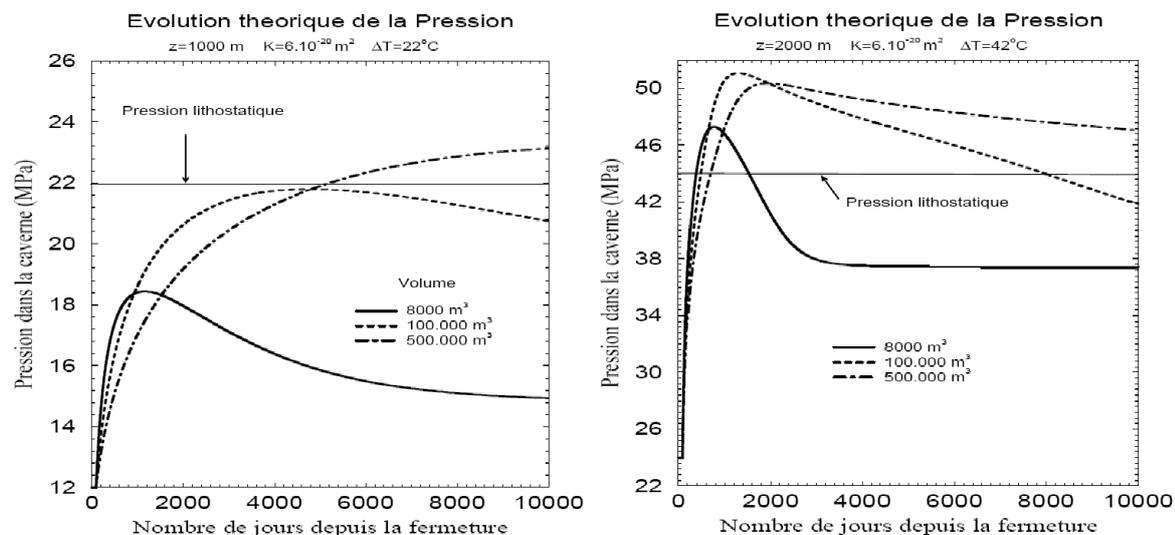


Figure 19 : Evolution théorique de la pression moyenne de saumure P_S dans une cavité (d'après [Berest, 1997])

L'analyse se complique encore un peu plus si l'on prend en compte le processus de dissolution du sel, qui dépend à la fois de la température et de la saturation en sel de la saumure :

- *impact de la température sur le processus de dissolution* : en phase de lessivage, la vitesse de dissolution du sel est accélérée avec la température. Pour donner un ordre de grandeur, le taux de dissolution du sel est multiplié par deux lorsque la température passe de 15°C à 30°C [Charnavel et al. 2006].

Toutefois, en phase d'abandon où aucun apport fluide n'est attendu, les variations de température intervenant dans une cavité n'auront qu'un impact très faible sur la cinétique du processus de dissolution ;

- *impact du degré de saturation de la saumure sur le processus de dissolution* : l'hétérogénéité thermique décrite ci-avant pourrait théoriquement être le moteur de processus convectifs qui vont déplacer des volumes de saumure à un certain degré d'équilibre (une température donnée et un degré de saturation donné) vers des zones de la cavité moins saturées. Dans ce cas des processus de dissolution seraient susceptibles de modifier, à très long terme, la géométrie de la cavité.

Données préalables nécessaires :

Les données nécessaires pour mener à bien ce type d'évaluation sont :

- la température et les caractéristiques thermiques et chimiques de la saumure et du sel ;
- la compressibilité de la saumure ;
- les paramètres de la loi de fluage du sel ;
- la perméabilité du sel [Cosenza et al., 1999].

Mesures de prévention :

- *accélérer le fluage* : l'opération consiste à diminuer la pression de saumure dans la cavité. Cela permet, en principe, de réduire significativement le volume de la cavité avant sa fermeture définitive. L'augmentation de la vitesse de fluage ne conduit à une réduction substantielle du volume en un temps raisonnable que lorsque les cavités sont très profondes. Il est nécessaire dans ce cas de bien contrôler la diminution de la pression de saumure car une diminution trop rapide peut créer des désordres (par exemple, effondrement du toit de la cavité dans le cas de la cavité de Kiel en Allemagne ; augmentation de la subsidence en surface). Cette prévention a été rarement mise en œuvre du fait de la difficulté de réaliser ce contrôle ;
- *différer la fermeture de la cavité* : il s'agit, avant de fermer la cavité, de laisser le sel réchauffer la saumure jusqu'à atteindre un équilibre thermique et chimique entre le massif et la saumure. L'inconvénient est qu'il peut être nécessaire, en particulier si le volume de la cavité est important, d'attendre un temps relativement long (quelques dizaines d'années). Ceci peut poser des problèmes de responsabilités. Il est possible d'accélérer le processus en réchauffant la saumure avant de l'injecter [Bérest et al., 2006] ;
- *injecter du gaz dans la cavité* : ceci aurait pour effet d'augmenter le facteur de compressibilité de la cavité, et du coup de réduire significativement les effets de la dilatation thermique [Bérest et al., 2006]. Bien entendu, cette solution ne serait pleinement efficace que si le gaz injecté ne s'échappe pas trop vite de la cavité. Cette solution n'a pas encore été testée in situ.

6.3.2 MOUVEMENTS DE LA SURFACE DU SOL

Dans le contexte des stockages abandonnés en cavités salines existants à l'étranger (voir Figure G2 en annexe G), des mouvements de la surface du sol peuvent survenir suite à la fermeture progressive d'une cavité par fluage (ceci générant typiquement des mouvements de type « affaissement souple ») ou bien à des phénomènes de fracturation au toit d'une cavité, de rupture de pilier entre deux cavités ou de lessivage d'une couche de sel dans le recouvrement, qui peuvent avoir en surface soit des conséquences de type « affaissement souple » soit de type « effondrement brutal » selon la profondeur et la géométrie des cavités concernées ainsi que la nature des terrains de recouvrement.

Principes et méthodes d'évaluation :

L'évaluation des risques de mouvements de surface à long terme liés à la présence de vides souterrains a fait l'objet d'une littérature importante, notamment dans le domaine de l'étude des risques liés aux anciennes exploitations minières abandonnées. Ces références, ainsi que les principes et méthodes qui y ont été développées, peuvent être largement mises à profit dans le contexte des anciennes cavités salines de stockage.

L'évaluation de l'aléa dans ce domaine repose sur trois questions essentielles : quelle est la prédisposition d'une cavité donnée à devenir instable, (ii) s'il y a instabilité de la cavité, celle-ci peut-elle donner lieu à des conséquences en surface et (iii) s'il y a conséquences en surface, quelles vont en être leur intensité ? Sans aller dans le détail du développement de chacune de ces questions (qui sortirait du cadre de ce document), nous fournissons ci-après quelques références intéressantes.

Daupley et al. [2004] ont analysé en détail les typologies des mécanismes et des phénomènes de mouvements de terrain liés aux exploitations de sel par dissolution. En fonction de la largeur de la cavité (inférieure ou non à une largeur critique), de sa profondeur (la distinction est faite entre cavités de « faible profondeur » : < 300 m et celles de grande profondeur : > 500 m) et de la nature des terrains de recouvrement (présence ou non d'un banc raide), plusieurs types de phénomènes sont attendus. Notons qu'en France, la profondeur des cavités salines de stockage dépasse généralement les 1000 m. Toutefois, certaines cavités de stockage de produits liquéfiés (à Manosque par exemple) ont leur toit situé à des profondeurs assez faibles, allant de 300 à 900 m.

L'impact de la nature du recouvrement et de la taille des cavités sur la cinétique des affaissements apparaissant en surface a été analysé par Wassmann [1980 et 1995] dans le cas des exploitations par dissolution de Twenthe-Rijn (Pays-Bas). Ce travail a été synthétisé dans l'annexe F.

L'amplitude des mouvements de surface tend à diminuer avec la profondeur des cavités. A grandes profondeurs (1000 m et plus), les affaissements sont en général de faible amplitude (millimétriques à centimétriques) et répartis sur de grandes surfaces. L'amplitude maximale peut toutefois atteindre des valeurs importantes dans le cas de cavités de grande taille :

- les mesures faites à l'aplomb de cavités de dissolution de la mine de « Heiligrelee brine field » et analysées par [Eckemeier et al. [2002] montrent que l'affaissement cumulé sur une centaine d'années pourrait atteindre 50 cm (voir annexe F) ;

- Durup [1991] a décrit les relations existant entre la convergence des cavités (liée au fluage) et les affaissements en surface dans le cas des cavités de stockage de Tersanne (Drôme). Il s'agit d'un réseau de 14 cavités espacées les unes des autres de 300 m, lessivées à 1500 m de profondeur dans le gisement de sel de l'Oligocène. L'auteur a comparé essentiellement la perte de volume des cavités au volume de la cuvette d'affaissement en surface, mesurée par nivellement. Il a été constaté que 60 % de la perte totale du volume des cavités était retrouvé en surface (voir Figure F.5 en annexe F). Sur 10 ans, la vitesse des affaissements était de l'ordre du cm/an. Si on limite la cuvette d'affaissement à l'isovaleur de 1 mm, il a été observé un angle d'influence des effets en surface des cavités de l'ordre ou légèrement supérieur à 35°.

Données préalables nécessaires :

Compte-tenu de la variété des mécanismes et phénomènes de mouvements de terrain pouvant avoir lieu dans le contexte des anciennes cavités salines de stockages, il n'est pas possible de faire ici un inventaire unique des données d'entrées nécessaires à l'évaluation de l'aléa correspondant. De manière générale, il faudra connaître au moins :

- la dimension et la géométrie de la (des) cavité(s) à l'origine de l'aléa ;
- la nature et les caractéristiques mécaniques de la couche de sel hôte et des terrains de recouvrement ;
- si disponibles, les mesures des mouvements de surface enregistrées au cours de l'exploitation du stockage (afin de calibrer le modèle).

Mesures de prévention :

Afin de minimiser les affaissements affectant l'exploitation de Twenthe-Rijn (Pays-Bas) [Wassmann, 1980], l'exploitant a mis en œuvre deux méthodes qui ont donné de bons résultats puisqu'aucun affaissement important n'a été relevé par la suite. Il a procédé d'une part à un remblayage des puits par les résidus de traitement de la saumure, notamment du gypse et de la craie, et d'autre part à l'injection d'huiles dans la cavité qui, du fait de leur faible densité par rapport à la saumure, surnagent et jouent le rôle de barrière protectrice vis-à-vis des dissolutions à long terme en empêchant un contact non désiré entre la saumure et les terrains de recouvrement.

Le maintien de pressions élevées dans la cavité diminue le fluage du sel et peut donc également être vu, en un sens, comme une mesure de prévention des risques de mouvements de la surface du sol [Breunessse et al., 2003]. Il s'agira toutefois d'éviter que par effet thermique la pression de saumure ne dépasse la pression lithostatique et n'induisse un risque de rupture de la cavité.

L'augmentation de la pression de saumure dans la cavité, en diminuant le fluage est, en un sens, favorables à la réduction des affaissements de surface [Breunessse et al., 2003]. Une augmentation trop importante qui conduirait à la rupture des parements de la cavité aurait l'effet inverse. Les mesures de prévention du risque de surpression après fermeture de la cavité (accélérer le fluage, différer au maximum la fermeture de la cavité, injecter du gaz dans la

cavité) ne sont donc pas forcément susceptible de réduire tous les risques de mouvement de la surface du sol.

On peut citer également, comme mesures de prévention des mouvements de terrain, le bon dimensionnement des cavités et des piliers de sel entre les cavités, ainsi que toutes les mesures qui visent à éviter (ou limiter) l'apparition de fuites le long des puits abandonnés (traitement préventif des puits, tests hydrauliques, amélioration des caractéristiques des ciments, etc.), ceci afin d'éviter d'éventuels mouvements de terrains liés au lessivage accidentel d'un niveau évaporitique dans le recouvrement.

6.3.3 POLLUTION DE NAPPES AQUIFERES PAR LA SAUMURE

Nous avons vu au § 5.2.2.2 que cinq mécanismes pouvaient être à l'origine de la pollution d'une nappe d'eau souterraine par de la saumure [voir aussi Tomasko et al., 1997] :

- un effondrement partiel ou total de la cavité abandonnée, affectant l'étanchéité des terrains de recouvrement ;
- une mise en communication accidentelle d'un aquifère avec un niveau évaporitique du recouvrement (suite à la perte d'étanchéité d'un puits abandonné ou à la réalisation d'un forage tiers) ;
- une fuite de la saumure en dehors de la cavité par l'intermédiaire du forage abandonné, liée aux mécanismes de vieillissement décrits précédemment (§ 6.1) ;
- un passage de la saumure à travers la couche de sel, soit par percolation [Ehgartner et al., 2000], soit par fracturation hydraulique, soit au niveau d'hétérogénéités de la couche de sel ou d'interlits plus perméables ;
- la perforation par accident de la cavité abandonnée, par exemple par un forage d'exploration.

Principes et méthodes d'évaluation :

L'évaluation des aléas liés aux cinq mécanismes précédents a, pour la plupart d'entre eux, été abordée au cours de chapitres précédents. On se reportera, par exemple, au § 6.1 pour tout ce qui concerne les problèmes de perte d'étanchéité au niveau des puits ou au § 6.3.1 pour tout ce qui concerne les problèmes de percolation de la saumure à travers le massif de sel ou de fracturation hydraulique de la cavité.

Seule l'évaluation des aléas liés à la réalisation de forages tiers n'a pas été abordée dans ce document. Ce risque n'est pas à négliger. En effet, le sous-sol français fait l'objet, et fera l'objet encore longtemps, de travaux d'exploration, que ce soit dans le cadre de la recherche pétrolière ou de nouveaux sites de stockages de gaz, d'hydrocarbures ou de CO₂. Il n'est pas inconcevable que du fait d'une mauvaise connaissance préalable du sous-sol, d'une perte ou d'une mauvaise gestion des archives, d'une malfaçon ou d'un problème technique lors de la réalisation d'un forage, que ce dernier vienne perforer une cavité de stockage abandonnée et aboutisse à une fuite de la saumure contenue dans la cavité. Un forage tiers peut également, suite à une malfaçon ou à une protection insuffisante de certains horizons géologiques, mettre en communication des niveaux géologiques initialement indépendants et aboutir à des désordres tels que, par exemple, la pollution d'un aquifère ou la création d'une cavité par lessivage accidentel d'une couche évaporitique. Notons toutefois que cet aléa n'est pas propre aux stockages souterrains mais est propre à tous les travaux de foration qui peuvent être réalisés dans le sous-sol quel que soit le contexte.

Données préalables nécessaires :

Pour ce qui concerne les aléas ci-dessus (hors forage tiers), voir § 6.1 ou 6.3.1.

Pour ce qui concerne les aléas associés à la réalisation de forages tiers, l'évaluation se basera à la fois sur le retour d'expérience tiré de l'accidentologie et sur une prospective du nombre de forages d'exploration, de leur localisation, ainsi que de la probabilité de perte de la mémoire du sous-sol à des échelles de temps de la dizaine, de la centaine ou du millier d'années.

Mesures de prévention :

Pour les aléas ci-dessus (hors forage tiers), voir § 6.1 ou 6.3.1.

Pour ce qui concerne les aléas associés à la réalisation de forages tiers, les mesures de prévention sont :

- une bonne caractérisation du sous-sol avant la réalisation de forages ;
- des précautions opératoires lors de la réalisation de forages ;
- des règles d'autorisation strictes avant la réalisation de forages ;
- une meilleure conservation possible des archives et de la mémoire collective du sous-sol, en particulier des périmètres de sécurité des anciens stockages abandonnés.

6.4 EVALUATION DES ALEAS PROPRES AUX STOCKAGES EN CAVITES MINEES

Nous abordons à présent l'évaluation des aléas propres aux stockages en cavités minées. Pour ce type de stockage, nous allons présenter successivement un certain nombre d'éléments pouvant aider à l'évaluation des aléas suivants : effondrement brutal par rupture du toit d'une galerie ou d'un puits d'accès (§ 6.4.1), affaissement induit par une modification progressive de la géométrie de la cavité minée (§ 6.4.2), effondrement brutal par rupture d'une cavité (§ 6.4.3), modification de la perméabilité du milieu (§ 6.4.4), émission de gaz type radon en surface (§ 6.4.5).

On peut resituer, sur la Figure G3 de l'annexe G, ces différents types d'événements dans l'arbre global des causes des principaux phénomènes redoutés propres aux stockages abandonnés en cavités minées.

6.4.1 EFFONDREMENT BRUTAL PAR RUPTURE DU TOIT D'UNE GALERIE OU D'UN Puits D'ACCES

La stabilité à long terme des infrastructures d'un stockage en cavités minées (schématisées sur la Figure D.5), à savoir les galeries d'accès, les descenderies, les puits, etc., doit être étudiée au même titre que celle des cavités de stockage proprement dites. On peut craindre par exemple :

- *un effondrement localisé de la surface du sol (fontis) suite à la rupture du toit d'une galerie d'accès et la remontée de l'instabilité au jour* : Il faut donc, pour que ce scénario se réalise, à la fois que le toit d'une galerie devienne instable et que la voûte initiée par la rupture du toit de l'excavation ne se stabilise pas mécaniquement, par exemple du fait de la présence de bancs massifs au sein du recouvrement. L'instabilité se propage alors progressivement vers la surface, à condition toutefois que l'espace disponible soit suffisant pour que les matériaux éboulés et foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le phénomène par auto-comblement ;
- *l'effondrement de la tête d'un puits d'accès* : un ancien puits mal scellé ou mal remblayé peut débou rer, c'est-à-dire voir son remblai s'écouler au sein des ouvrages souterrains auxquels il est raccordé, avec pour conséquence la formation d'un cratère présentant les mêmes dimensions que la colonne du puits. Ce débou rrage peut, dans certains cas, s'accompagner ou être suivi d'une rupture du revêtement du puits et d'un effondrement des terrains peu compétents environnants, comme le sont généralement les terrains superficiels.

Principes et méthodes d'évaluation :

- *l'effondrement localisé par rupture du toit d'une galerie et la remontée de l'instabilité au jour*

La prédisposition à la rupture d'un ouvrage souterrain dépend essentiellement de la largeur (ou portée) du toit de l'ouvrage concerné et de la nature et de l'épaisseur des premiers bancs rocheux.

Une fois la chute de toit initiée, deux mécanismes sont susceptibles de s'opposer à sa propagation vers la surface dans le long terme :

- *l'arrêt du phénomène par formation d'une voûte stable*. A largeur de galerie égale, c'est essentiellement la présence de bancs massifs, épais et résistants au sein du recouvrement qui contribuera à diminuer la prédisposition d'un site à voir se développer de tels fontis en surface ;
- *la stabilisation du phénomène par auto-comblement, du fait du foisonnement des éboulis*. Le volume des vides résiduels disponibles au sein des anciennes galeries (tenant compte de la dimension des galeries et de l'existence d'éventuels travaux de remblayage) ainsi que la nature (par le biais du coefficient de foisonnement) et l'épaisseur des terrains de recouvrement seront les facteurs qui permettront de se prononcer sur la stabilisation ou non des remontées de voûte par auto-comblement.

Le retour d'expérience minier montre qu'au-delà d'une profondeur d'une cinquantaine de mètres, les anciens travaux ne remontent pratiquement jamais jusqu'en surface, ce qui fait que la probabilité d'occurrence de fontis devient généralement négligeable pour des galeries de hauteur comparable à celles des mines.

- *l'effondrement de la tête d'un puits d'accès*

L'évaluation de cet aléa repose sur l'analyse des conditions d'apparition de ruptures, à savoir :

- l'effondrement de la structure mise en place en tête d'un puits vide (plancher en bois, voûte en briques, dalle, bouchon...). Dans ce cas, ce sont les caractéristiques de cette structure (résistance, dimensions), son altérabilité dans le long terme, la nature du revêtement ou cuvelage du puits ainsi que la nature et la résistance des terrains encaissants qui influenceront directement sur la prédisposition de l'ouvrage à la rupture ;
- le débouillage d'un puits remblayé. Dans ce cas de figure, les variations prévisibles du niveau hydrogéologique (remontée des eaux, battements de nappe), la présence de galeries connectées au puits et non obturées par des serrements, l'ancienneté du remblayage et l'existence de facteurs aggravants (vibrations, surcharges...) contribueront à augmenter la prédisposition du puits à subir un débouillage.

Données préalables nécessaires :

- géométrie et profondeur des galeries d'infrastructure et des puits d'accès ;
- propriétés (déformabilité et résistance) des terrains du recouvrement ;
- états des sollicitations mécaniques autour des galeries et des puits.

Mesures de prévention :

- remblayage des galeries et des puits d'accès ;
- utilisation de techniques de traitement et de renforcement des terrains du type géotextile.

6.4.2 AFFAISSEMENT INDUIT PAR UNE MODIFICATION PROGRESSIVE DE LA GEOMETRIE DES CAVITES DE STOCKAGE

Pour ce qui concerne le phénomène d'affaissement progressif, ce sont les déformations différentielles horizontales et les effets de mise en pente du sol qui sont généralement les plus dommageables pour les biens situés en surface. Les principaux facteurs susceptibles de jouer sur la valeur de ces deux paramètres sont : les dimensions de la cavité à l'origine de l'affaissement, sa profondeur, la nature des terrains de recouvrement, la topographie de surface, la présence de failles.

Les affaissements les plus importants sont obtenus en cas d'éboulement de la cavité, ce qui est très peu probable dans le cas des cavités minées de stockage vu les précautions prises au stade du dimensionnement et de l'exploitation du

stockage. Des affaissements bien plus faibles peuvent toutefois être observés suite à une déformation lente de cavités notamment par fluage. On notera que les stockages en cavité minée réalisés à ce jour en France n'ont pas été réalisés dans les roches considérées comme particulièrement fluantes (sel, gypse).

Principes et méthodes d'évaluation :

Détermination des affaissements, des pentes et des déformations horizontales en surface :

- à partir d'un modèle d'affaissement adapté ;
- à partir d'un modèle de foisonnement des terrains.

Données préalables nécessaires :

- évaluation de la convergence des cavités en fonction du temps (notamment par fluage) ;
- évaluation des paramètres du modèle d'affaissement (ces paramètres peuvent éventuellement être estimés par calibration du modèle sur les mesures d'affaissement déterminées pendant la phase d'exploitation du stockage).

Mesures de prévention :

- remblayage des cavités ;
- recommandations en ce qui concerne les constructions de surface.

6.4.3 EFFONDREMENT BRUTAL PAR RUPTURE D'UNE CAVITE

Nous n'avons pas trouvé de cas recensés d'effondrements brutaux associés à d'anciennes cavités minées de stockage. En fait, les cavités de stockage sont creusées, en principe, dans un environnement géologique où la stabilité de la cavité pourra être garantie à long terme. Dans la plupart des cas, il s'agit d'une roche résistante (compte tenu du niveau des sollicitations) mais qui peut être fracturée. La mise en place d'un soutènement permet d'éviter des éventuelles chutes de blocs dans la cavité.

Parmi les principaux facteurs qui vont, en cas de rupture de l'ouvrage souterrain, prédisposer un site à subir un effondrement dynamique (et non un affaissement progressif des terrains de surface), on citera :

- une extension latérale d'exploitation suffisante au regard de l'épaisseur de recouvrement ;
- la présence d'un (ou de) banc(s) raide(s) au sein du recouvrement susceptible de se rompre de manière brutale, entraînant dans sa ruine la rupture complète de l'ouvrage souterrain.

Principes et méthodes d'évaluation :

Sur la base des travaux de Tincelin & Sinou [1962], Maury [1979] et Kratzsch [1983] portant sur l'analyse de nombreux cas répertoriés sur des sites miniers français et étrangers (il s'agit donc ici d'une approche purement empirique), il apparaît que le risque d'effondrement brutal n'existe que si : (i) il existe au toit de

la cavité un banc épais de résistance mécanique très élevée ; (ii) la profondeur P de la cavité est inférieure à 200 m ; (ii) la dimension de la cavité est telle qu'on peut y inscrire un cercle de diamètre D tel que : $D > 1,3 P$.

Une approche plus élaborée doit être basée sur une modélisation numérique de la cavité. Le modèle doit être capable de restituer fidèlement les mécanismes suspectés. Un effondrement brutal se caractérise par une rupture rapide du recouvrement, suivant des plans subverticaux partant des bords de l'ensemble des cavités et remontant jusqu'à la surface. L'apparition de lignes de rupture continues entre la couche exploitée et la surface du sol peut donc être considérée comme un facteur de risque d'effondrement brutal. Si les lignes de rupture s'interrompent suffisamment loin de la surface, cela signifie qu'au dessus de cette limite, le recouvrement ne se casse plus, mais subit seulement une flexion à l'aplomb de la cavité. Dans ce cas, le mécanisme de propagation de l'instabilité s'apparente à celui d'un affaissement.

Données préalables nécessaires :

- géométrie et profondeur de la cavité ;
- propriétés (déformabilité et résistance) des terrains du recouvrement ;
- états des sollicitations mécaniques autour des cavités.

Mesures de prévention :

- remblayage des cavités.

6.4.4 MODIFICATION DE LA PERMEABILITE DU MILIEU

Les modifications de perméabilité se produisent essentiellement pendant les phases précédant l'abandon, à savoir les phases de creusement, d'exploitation et de restitution du stockage.

La modification de la perméabilité d'un aquifère liée à la présence d'un stockage souterrain résulte de deux mécanismes. Le premier correspond à l'introduction de vides dans le milieu souterrain (c'est-à-dire des zones extrêmement perméables), susceptibles de modifier la structure d'écoulement [Kim et al., 2000 ; Lee, 2000 ; Van Hasselt, 2003 ; Cha et al., 2006]. Le second correspond aux variations de perméabilité des réseaux de fracturation induites par le rééquilibrage des contraintes lié au creusement des cavités [Min et al., 2004 ; Amantini et al., 2005 ; Thoraval et al., 2005]. De plus, les réseaux de forages horizontaux constituant les « rideaux d'eau » mis en place pour assurer le confinement hydraulique des cavités affectent également la perméabilité de la couverture [Cha et al., 2006].

Ces modifications de perméabilité peuvent avoir les conséquences suivantes : abaissement général du niveau piézométrique ; modification de la distribution spatiale des émergences ; assèchement de sources et cours d'eau en surface ; drainage des aquifères voisins (Figure 20).

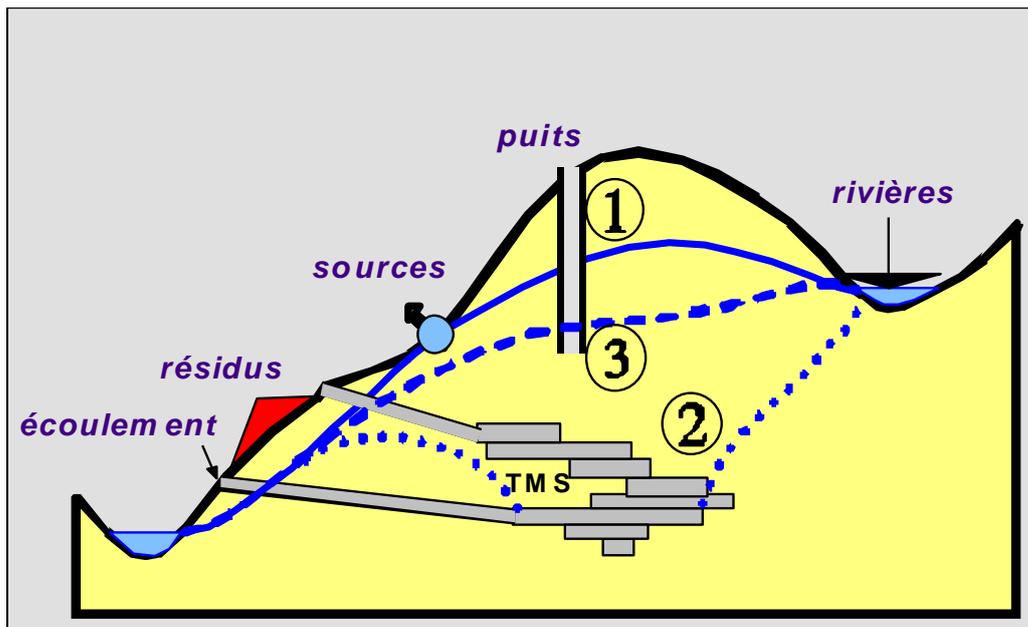


Figure 20 : Impact de travaux miniers sur l'hydrodynamique pendant et après l'exploitation. (1) niveau hydrostatique avant exploitation ; (2) pendant l'exploitation ; (3) après [Guide PPRM, 2006]

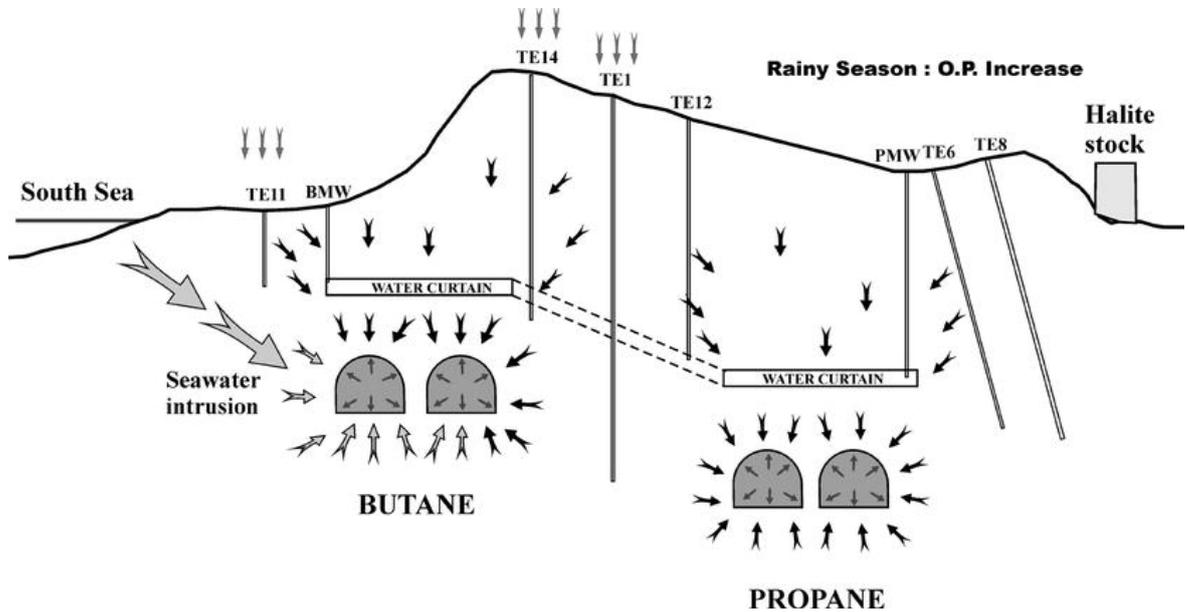
Dans la mesure où, à l'issue de la phase de restitution, on a atteint le nouvel état d'équilibre hydromécanique induit par l'arrêt de l'exploitation, on peut prévoir que les variations résiduelles de perméabilité pendant la phase post-abandon seront faibles. En effet, en l'absence d'une variation de l'état de contrainte ou d'un fort gradient hydraulique, la perméabilité des terrains autour de la cavité ne devrait pas varier d'une manière significative. Dans ces conditions, les circulations lentes de fluides autour de l'ancienne cavité de stockage pourraient conduire uniquement à des réactions chimiques de type dissolution/précipitation pendant la phase post-abandon et contribuer à une légère fluctuation de la perméabilité.

Principes et méthodes d'évaluation :

- *Modélisation* : les outils de modélisation hydromécanique donnent des indications sur la localisation et la quantification des changements de perméabilité liés à la création d'une excavation souterraine [Lee C., 2000 ; Thoraval et al., 2005]. Ils permettent également de prédire leur impact sur les circulations d'eaux souterraines ;
- *Hydrochimie* : des études hydrochimiques réalisées en Corée sur les terminaux côtiers de Yosu [Lee C., 2000] et Ulsan [Ko et al., 2002]⁶² ont montré que les écoulements au sein d'un aquifère peuvent être fortement perturbés par les variations de pression saisonnières d'un stockage. Dans le cas du stockage de Yosu, un drainage de l'aquifère voisin intervient en période de forte sollicitation du stockage. Le creusement de la cavité a également induit une intrusion du biseau salé d'eau de mer qui alimente

⁶² Une description des stockages de propane et de butane liquéfié de Yosu (capacité : 300 000 m³, roche hôte : andésite, calcaire) et de Ulsan (capacité : 500 000 m³, roche hôte : grès métamorphisé) est donnée dans l'annexe E (cas n°4).

maintenant le stockage tout au long de l'année [Lee et al., 2000] (Figure 21 et Figure 22). Ce type de perturbations hydrogéologiques risque de perdurer après l'arrêt de l'exploitation, pendant la phase de restitution.



•
 Figure 21 : Modèle conceptuel du processus de salinisation de l'eau du site étudié durant les périodes de haute pression du stockage pendant la saison pluvieuse [Lee et al., 2002].

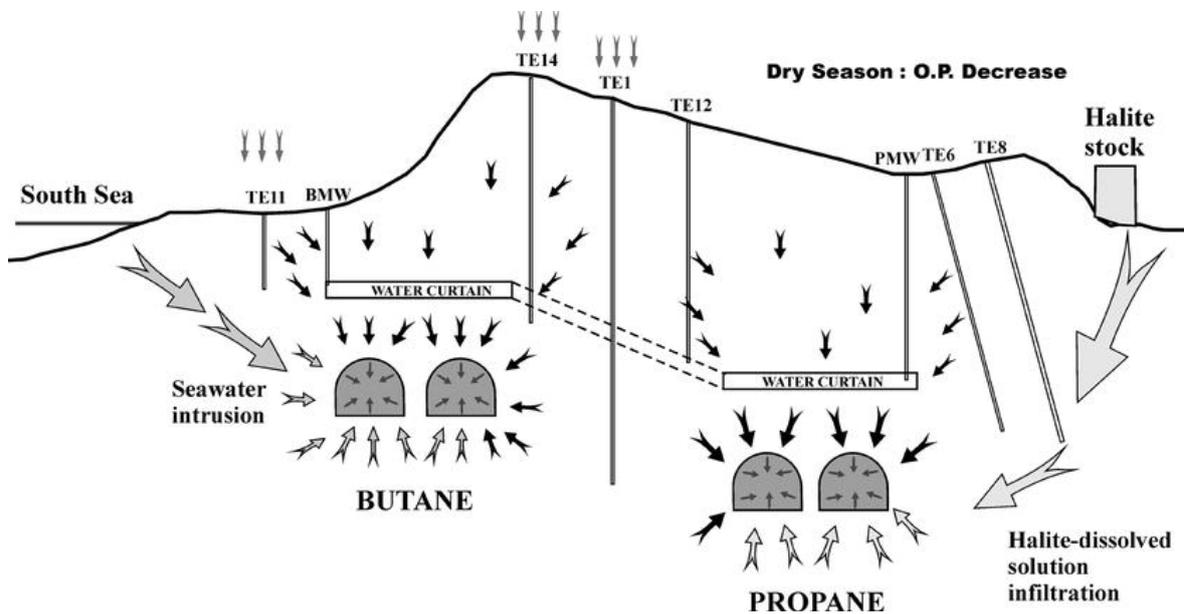


Figure 22 : Modèle conceptuel du processus de salinisation de l'eau de la zone étudiée durant les périodes de basse pression du stockage pendant la saison sèche [Lee et al., 2002].

Concernant le site de Ulsan, la zone d'influence hydraulique de la cavité de stockage et du rideau d'eau a été évaluée allant d'une dizaine de mètres à une centaine de mètres suivant les zones concernées de l'aquifère. Ceci est la

conséquence de la forte hétérogénéité du réseau de fracturation affectant l'aquifère contenant la cavité de stockage (Figure 23).

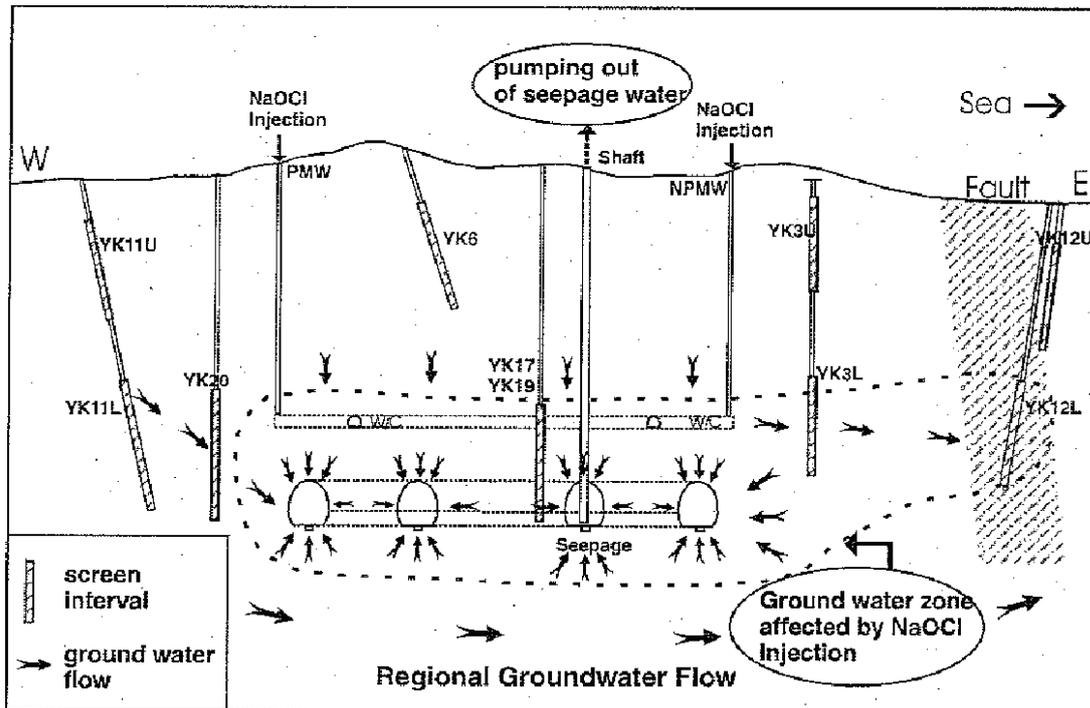


Figure 23 : Schéma conceptuel du champ d'écoulement des eaux souterraines autour du stockage de Ulsan à partir d'un suivi hydrochimique [Ko et al., 2002].

Données préalables nécessaires :

- données nécessaires pour évaluer les changements de perméabilité du milieu. Elles ont en principe été acquises lors de la construction du stockage afin de garantir son étanchéité. Ces données permettent de dimensionner le rideau d'eau et d'évaluer le débit d'alimentation de ce dernier ;
- données enregistrées par le système de surveillance et d'enregistrement hydrogéologique et hydrochimique mis en place pendant la vie du stockage. Ce type d'enregistrement est recommandé par Amantini et al. [2005] dans le but de comprendre l'organisation des écoulements autour du stockage et éventuellement, de prédire leur évolution dans le long terme.

Mesures de prévention :

- Il est envisageable de combler la cavité de telle sorte à essayer de se rapprocher des conditions hydrauliques existantes avant la réalisation du stockage. Il semble toutefois illusoire de vouloir gommer totalement l'impact du stockage sur la perméabilité hydraulique du milieu.

6.4.5 EMISSION DE RADON EN SURFACE

Des ouvrages abandonnés de type cavités minées, qui se traduisent par des espaces vides dans le sous-sol, sont susceptibles de faciliter les processus d'exhalation de gaz, c'est le cas du radon. Certaines études ont montré que le gaz naturel présent dans certains stockages pouvait être contaminé par de faibles

quantités de radon [Neznal et al., 1996]. Des concentrations en radon importantes ont également été mesurées en surface et à l'intérieur des vides de May-sur-Orne [Besnard, 2006]. Ces concentrations sont liées à la présence de vides dans le sous-sol et non à l'activité de stockage.

En dépit de sa faible période radioactive (3,8 jours), le radon est très mobile dans le milieu souterrain. Le radon est un gaz rare inerte, il n'a donc pas de mobilité propre. Sa migration est liée à la présence d'un gaz vecteur (CO₂, CH₄, O₂, etc ...) ou à sa dilution dans l'eau. Des concentrations importantes sont parfois mesurées dans des environnements géologiques éloignés de toutes sources de radon. Dans ce cas, le radon a donc migré soit à la faveur d'autres gaz soit sous forme dissoute dans l'eau. Les vides artificiels créés par l'homme sont des zones privilégiées de dégazage des eaux souterraines et sont donc susceptibles de constituer des zones d'accumulation du radon qu'il convient de surveiller. L'aléa étant le transfert de ce radon vers les habitations en surface.

Principes et méthodes d'évaluation :

La meilleure façon d'évaluer l'aléa lié à l'exposition au radon après l'abandon d'un vide souterrain est d'en mesurer les émissions en surface avant sa fermeture. Il existe plusieurs approches pour mesurer un rayonnement ionisant, on peut les classer en trois catégories. Les techniques mesurant l'intensité du rayonnement, celles mesurant l'énergie du rayonnement et celles mesurant la quantité d'énergie absorbée par le corps humain (que nous ne détaillerons pas ici).

Le plus souvent c'est l'intensité (activité volumique du radon) qui est mesurée. La mesure est exprimée en becquerels (Bq). Un becquerel correspond à une désintégration par seconde d'un atome de radon. L'énergie du rayonnement se mesure en électrons-volts (eV) et s'exprime en joules (J) dans le système international ($1 \text{ J} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ eV}$). L'intensité et l'énergie du rayonnement peuvent être mesurées de plusieurs manières :

- *mesures intégrées* : il s'agit de la mesure du cumul d'une grandeur physique liée à la désintégration du radon ou de ses descendants. Cette méthode permet le dépistage des bâtiments ou des personnes séjournant, de manière prolongée, dans des zones sensibles. Cette méthode ne permet pas de différencier le rayonnement issu du radon ou de ses descendants radioactifs. De plus, il n'est pas possible de mettre en évidence des variations liées aux modifications environnementales ou aux habitudes de vie ;
- *mesures en continu* : elles permettent d'observer les variations de concentration dans le temps en fonction des paramètres extérieurs telles que les conditions météorologiques ou les habitudes de vie de la population. Ce type de mesure est recommandé pour calculer l'exposition réelle au radon ;
- *mesures ponctuelles* : mesures réalisées de manière ponctuelle dans le temps et l'espace. Ces mesures permettent la cartographie de l'exposition au radon d'une habitation ou d'une entité géographique.

Données préalables nécessaires :

La principale donnée à connaître concerne la présence de vides résiduels non ennoyés liés au stockage, dans lesquels le radon pourra s'accumuler.

Une attention particulière doit être portée :

- à la composition minéralogique des formations rocheuses présentes à proximité du stockage qui déterminera leurs capacités à émettre ou non du radon ;
- à la densité de fracturation de la roche particulière dans lequel le stockage a été réalisé. En effet, il est possible que la roche excavée ne soit pas émettrice de radon mais que du radon s'y accumule malgré tout, son transport depuis des roches de socle plus profondes ayant été facilité par les différents réseaux de fracturation.

Mesures de prévention :

La principale mesure corrective au niveau du sous-sol est la réalisation de sondages de décompression destinés à évacuer le radon susceptible de s'accumuler dans les anciens vides de stockage.

Lorsque le radon est parvenu dans les habitations, on peut faire baisser la concentration en radon à l'intérieur des locaux de nombreuses façons, entre autres en scellant les fissures des planchers et des murs ou en renforçant l'aération des bâtiments. Il existe cinq moyens principaux de faire baisser les quantités de radon accumulées dans un bâtiment :

- améliorer l'aération et éviter d'amener le radon du sous-sol vers les pièces d'habitation ;
- améliorer la ventilation sous les planchers ;
- installer un système de puisard dans le sous-sol ;
- sceller les planchers et les murs ;
- mettre en place un système de ventilation à pression positive.

7. METHODES DE SURVEILLANCE APPLICABLES AUX STOCKAGES SOUTERRAINS ABANDONNES

Malgré l'ensemble des mesures de prévention des risques prises par l'exploitant, à sa propre initiative ou à la demande de l'Etat, préalablement à l'abandon d'un stockage souterrain, il est parfois difficile d'exclure des risques résiduels, qu'il convient alors de gérer de la meilleure façon possible. Un des outils de gestion des risques résiduels (outre par exemple l'éloignement des cibles potentielles) peut être la préconisation d'une surveillance du stockage pendant une période de temps définie. Cette surveillance peut être assurée dans un premier temps (c'est-à-dire avant la renonciation définitive du stockage) par l'exploitant, puis éventuellement prise en relai par l'Etat si un maintien de celle-ci s'avère nécessaire après l'abandon.

Le principe de la surveillance est de suivre au cours du temps l'évolution d'un certain nombre de variables représentatives du phénomène redouté (déplacement, signal sismique, concentration, débit) en les mesurant avec une certaine fréquence. Pour qu'une surveillance soit pertinente et efficace, il convient de s'assurer au minimum que :

- la cinétique des phénomènes redoutés est suffisamment lente pour permettre leur détection ainsi que la mise en œuvre de dispositions ou de dispositifs d'alerte et de protection des cibles concernées, avant que celles-ci ne soient atteintes ;
- les grandeurs physiques surveillées sont représentatives des phénomènes redoutés et si possible de leurs signes avant coureur ;
- la précision et la fréquence des mesures est adaptée à l'amplitude et à la vitesse d'évolution des grandeurs mesurées.

Il conviendra de veiller, lors du dimensionnement d'une stratégie de surveillance, à ce que les moyens à mettre en œuvre pour que celle-ci soit pertinente et efficace restent proportionnés aux enjeux.

La surveillance peut se baser en partie sur des inspections visuelles mais le plus souvent, elle fera appel à des dispositifs instrumentaux. En fonction du contexte du site et de critères technico-économiques variés, différentes architectures de dispositifs et différents principes de mesures pourront être retenus (Figure 24) :

1. lecture directe des mesures au niveau des capteurs à l'aide d'appareils portatifs ou de dataloggers ;
2. centralisation de toutes les mesures vers une unité d'acquisition sur site ; les mesures sont alors récupérées périodiquement par un opérateur ;
3. centralisation de toutes les mesures vers une unité d'acquisition sur site puis transfert des données (par liaison filaire ou radio) vers un site distant (PC de surveillance). On parle alors de télesurveillance. Ce choix se généralise largement à travers le monde dans tous les domaines du risque industriel et naturel.

Dans le cas d'une gestion automatique des données, des seuils d'alarmes peuvent être fixés et des alarmes déclenchées et transférées automatiquement vers des personnels formés pour réagir en conséquence.

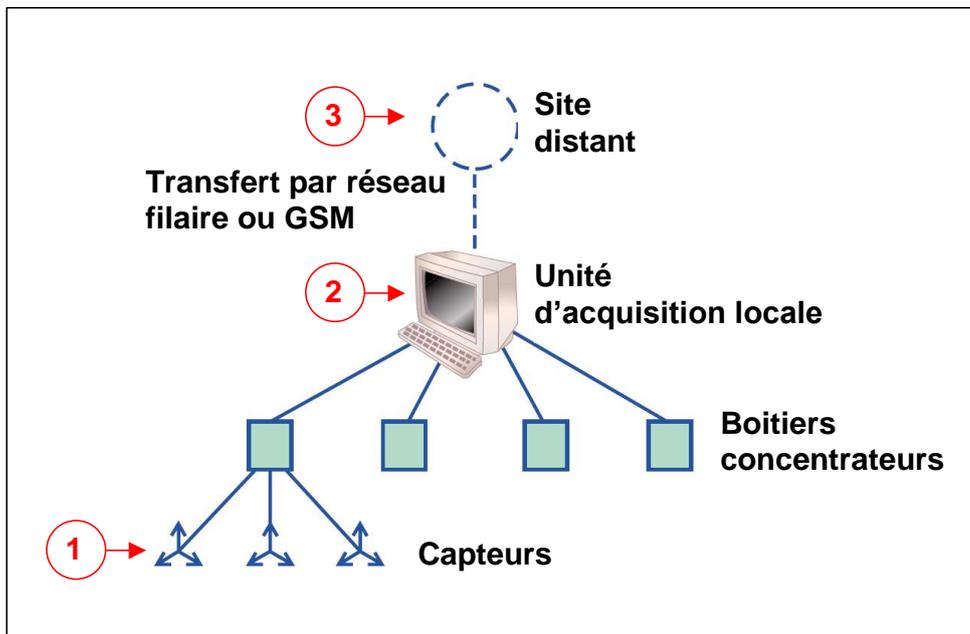


Figure 24 : Schéma de principe d'une surveillance instrumentale
 1-Surveillance in situ par lecture directe sur capteur
 2-Surveillance in situ centralisée vers une unité d'acquisition
 3- Surveillance distante (télésurveillance)

Nous présentons ci-après un certain nombre de techniques de surveillance que nous considérons être pertinentes et applicables, si cela s'avérait nécessaire, dans le contexte de stockages souterrains abandonnés. Ces techniques ont pour but de contrôler la stabilité des cavités, les mouvements de surface, la qualité des aquifères environnants ou les arrivées de gaz en surface.

7.1 SURVEILLANCE DE LA STABILITE DES CAVITES OU DES OUVRAGES D'ACCES

Nous abordons ici des techniques qui permettent de détecter l'initiation ou l'évolution d'une instabilité au toit d'un ouvrage souterrain, qu'il s'agisse d'une cavité de stockage (saline ou minée) ou d'une galerie d'accès. Dans le cas des stockages en cavités minées, ces techniques permettent donc de surveiller les aléas décrits dans les § 6.4.1, 6.4.2 et 6.4.3.

7.1.1 TECHNIQUES NECESSITANT UNE ACCESSIBILITE DES VIDES SURVEILLES

Plaçons-nous d'abord dans le cas où les ouvrages à surveiller seraient encore accessibles, au moins temporairement, pour la mise en place d'une instrumentation au sein de l'ouvrage proprement dit.

Dans ce cas, les techniques de mesure les plus courantes sont des techniques de mesures de déplacement. Elles sont essentiellement rattachées à 3 types

d'investigations géotechniques in situ : la convergence qui mesure le rapprochement des parois de la cavité ; l'expansion qui mesure le déplacement relatif des parois de la cavité par rapport au cœur du massif ; la fissurométrie qui mesure l'écartement (ou le rejeu) de fractures relevées en parois. Elles peuvent être complétées par des mesures de variations angulaires, réalisées à l'aide de clinomètres de paroi, ou par l'installation de dispositifs de détection de chutes de blocs ou de craquements acoustiques des roches : filets détecteurs, hydrophones, microphones.

Notons que ces deux dernières techniques, à savoir l'installation de microphones ou d'hydrophones au cœur des vides à surveiller, ont l'avantage d'offrir, à l'aide d'un nombre limité de capteurs, une surveillance volumétrique globale des infrastructures ou cavités de stockage. Les microphones étant à installer dans des ouvrages non ennoyés (c'est-à-dire qui seraient situés au dessus de la nappe d'eau) et les hydrophones dans des ouvrages remplis d'eau. Quant aux autres techniques, elles peuvent être mises en oeuvre soit en milieu sec soit en milieu ennoyé, à condition bien sûr de veiller à garantir, sur la période de surveillance définie, la fiabilité (ou la redondance) du dispositif de mesure.

Parmi les capteurs qui peuvent être envisagés, on trouve soit des capteurs électriques (résistifs ou inductifs), des capteurs à cordes vibrantes ou encore des capteurs à fibre optique (technique relativement récente).

Dans le cas des cavités salines encore ouvertes (c'est-à-dire avant la mise en place du bouchon de scellement) d'autres mesures peuvent être réalisées périodiquement pour évaluer la variation du volume ou de la position du toit de la cavité. Cette surveillance renvoie aux aléas identifiés au § 5.2.2.1. Ces mesures sont évoquées par Mark Jennings et al. [2006] qui recommandent la réalisation périodique de logs gamma-densité (permettant de déterminer la profondeur de la cavité) tous les 3 à 5 ans et de sonars (auscultation de la déformée de la paroi par mesure de vitesse sonique au sein d'un fluide) tous les 5 à 10 ans.

7.1.2 TECHNIQUES APPLICABLES A PARTIR DE LA SURFACE

Si l'on se place maintenant dans le cas où les vides à surveiller ne seraient pas (ou plus) accessibles pour la mise en place d'une instrumentation au sein même des vides ou dans le cas où cette stratégie de surveillance ne serait pas considérée comme la plus pertinente, il existe un certain nombre de techniques, applicables à partir de la surface, qui peuvent permettre de surveiller la stabilité des cavités ou des ouvrages d'accès d'un stockage souterrain.

Une première solution consiste à réaliser un forage au droit du vide à surveiller et à y installer une instrumentation (permanente ou périodique) qui permettra de détecter, de manière directe, d'éventuels mouvements indicateurs d'une remontée de la cavité dans le recouvrement (extensomètres multi-points, diagraphies, caméras, etc).

Une autre solution permettant de surveiller à partir de la surface l'évolution du volume et de la position du toit d'une cavité particulière est la mise en oeuvre de techniques de détection des vides. Parmi ces techniques, certaines sont basées sur la mesure d'un champ de potentiel (microgravimétrie, résistivité électrique), d'autres sont basées sur la propagation d'ondes (sismique réflexion haute résolution et géoradar). Notons toutefois que parmi ces techniques, seule la

sismique réflexion haute résolution [Driad et al., 2002 ; Piwakowski et al., 1998] est adaptée à la surveillance d'objets profonds, tels qu'une cavité de stockage par exemple. Les autres techniques ne sont applicables, au mieux, que pour la surveillance des ouvrages les plus proches de la surface, typiquement dans la gamme 0-15 m (entrée de descenderie par exemple).

Enfin, une des solutions les plus utilisées pour la surveillance d'ouvrages souterrains à partir de la surface est l'écoute microsismique. Le principe de cette méthode est l'enregistrement, par un réseau de capteurs positionnés en forages, des ondes émises lors de l'apparition de ruptures. L'enregistrement automatique, le traitement et l'analyse des signaux permettent, sous certaines conditions, de : localiser et caractériser les sources de rupture ; suivre le régime d'endommagement en grand de l'ouvrage ; contrôler son évolution dans le temps [Couffin et al., 2003 ; Bennani et al., 2004]. Cette solution a l'avantage d'être volumétrique, au sens où elle permet la surveillance non pas d'une seule cavité mais de zones entières qui peuvent comprendre plusieurs cavités ou infrastructures de stockage.

7.2 SURVEILLANCE DES MOUVEMENTS DE SURFACE

On s'intéresse ici aux techniques qui permettent non pas de surveiller à l'amont la stabilité des ouvrages souterrains mais plutôt les conséquences en surface d'éventuelles instabilités initiées en profondeur. Cette section concerne tous les types de stockages abandonnés⁶³ et renvoie aux aléas décrits dans les § 6.2.6, 6.3.2 et 6.4.2.

Le nivellement de précision est la méthode de mesure par topométrie sans doute la plus connue et la plus souvent recommandée. Le principe est de déterminer le dénivelé séparant les plans horizontaux passant par deux points. Le nivellement se fait par des mesures répétitives de proche en proche à partir d'un point, ou d'un ensemble de points, pris comme référence et dont l'altitude est connue et considérée comme parfaitement stable dans le temps. Cette méthode relativement simple à mettre en œuvre permet une bonne qualité de mesure (précision de l'ordre du mm pour un cheminement d'un kilomètre).

On a vu et on voit encore le développement de méthodes basées sur l'interférométrie radar qui sont : l'interférométrie différentielle radar ou DInSAR (Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar) et la technique interférométrique sur rétrodiffuseur permanent ou PSI (Permanent Scatterers Interferometry).

La méthode DInSAR [Carnec, 1996] permet de déterminer le champ de déplacement relatif des variations topographiques. C'est une technique qui permet de mesurer des déformations de l'ordre du centimètre dans la direction de visée du satellite, sur des bandes de sol d'une surface de 100 km x 100 km. L'information est fournie sous forme d'image avec une résolution spatiale d'une vingtaine de mètres. La répétitivité des mesures varie selon les passages des satellites.

⁶³ même si, on l'a dit, dans le cas des stockages en milieux poreux, les déplacements attendus en surface sont extrêmement faibles (millimétriques)

La technique PSI [Ferretti et al., 1999] permet de déterminer le champ absolu des déformations de la surface topographique. Toutefois, le calage et l'affinage de cette méthode sont délicats. Elle vise à déterminer de façon beaucoup plus précise les différentes contributions du mouvement. Une fois déterminées, celles qui ne sont pas liées aux mouvements de la surface sont éliminées. Plutôt que d'analyser tous les pixels de l'image comme un ensemble afin d'en dégager le gradient de déformation comme pour la méthode DINSAR, la PSI identifie des points stables (en termes de phase et d'amplitude) qui serviront ensuite à préciser les corrections à réaliser.

Enfin, le développement par l'armée américaine du système de localisation par satellite NAVSTAR (NAVigation System by Timing and Ranging), dès 1978, autorise de nos jours le positionnement GPS (Global Positioning System) en représentation planimétrique (en deux dimensions) que nous utilisons par exemple pour le guidage routier. L'altitude du récepteur GPS peut tout aussi bien être déterminée, avec une précision moindre cependant, de l'ordre de quelques centimètres [Baldi, 2000]. Une précision millimétrique peut être atteinte dans le cas de mouvements progressifs ou quasi-statiques permettant de moyenniser des mesures sur plusieurs heures. Grâce à un dispositif constitué d'un récepteur fixe de référence et d'un véhicule en mouvement équipé de récepteurs de précision, cette technique permet, par le passage répété du dispositif sur un même trajet, d'établir un cheminement de points s'apparentant à des points de nivellement. Les limites de cette méthode sont la nature ponctuelle de la mesure et la nécessité d'avoir une visibilité très dégagée autour de l'antenne GPS, ce qui peut être problématique en zone urbaine ou boisée.

Les déformations en surface peuvent également être mesurées par mesure d'inclinaison : un quadrillage d'instruments est mis en place dans la zone d'intérêt puis les déformations sont interpolées à partir des mesures d'inclinaisons obtenues. Le principal intérêt de cette méthode est l'extrême précision de certains inclinomètres, parfois inférieure à un millionième de degré. Il peut être également envisagé de coupler des mesures d'inclinaison avec des mesures de positionnement (GPS par exemple), afin de caler verticalement les déformations obtenues, d'optimiser le calcul de la surface de déformation et de corriger une dérive très probable dans le cas de mesures sur le long terme [Davis, 2008].

La tachéométrie permet de mesurer les variations de distance et d'angle entre un point supposé fixe - le tachéomètre - et des points de mesure mobiles - des cibles réfléchissantes placées au droit des points de mesure souhaités. La mesure de distance se faisant via un télémètre, la mesure peut être influencée par les conditions météorologiques. Utilisée en nivellement, sa précision est souvent moindre que la méthode de mesure par topométrie. De la même manière que les mesures par GPS ou par inclinomètres, la mesure par tachéomètre est ponctuelle et la déformation globale du terrain doit être interpolée.

7.3 SURVEILLANCE DE LA QUALITE DES AQUIFERES ENVIRONNANTS

Nous nous intéressons à présent aux techniques permettant de surveiller la qualité ou le comportement hydraulique d'une ressource souterraine en eau potable. Cette surveillance intéresse tous les types de stockage. Dans le cas d'un stockage en cavités salines, une fuite de saumure peut altérer la qualité de l'eau des aquifères superficiels (voir § 6.3.3). Dans le cas d'un stockage en milieux

poreux, les gaz résiduels laissés dans le réservoir peuvent également migrer vers des ressources en eau utilisables (voir § 6.2.1 et 6.2.3). Enfin, dans le cas des stockages en cavités minées, la modification de la structure d'écoulement peut induire des perturbations hydrochimiques dans l'aquifère concerné ou ceux en contact avec l'aquifère utilisé pour le stockage (voir § 6.3.2).

La méthodologie mise en œuvre sera la même pour tous les types de stockage, seul l'appareillage utilisé changera selon que la surveillance portera sur l'apparition de saumure (stockage en cavité saline) ou de gaz dissous (stockages en milieux poreux).

- *suivi hydrogéochimique (méthode éprouvée et validée)* : Ce type de suivi est déjà réalisé dans de nombreux autres contextes que celui des stockages d'hydrocarbures, dans les domaines de l'alimentation en eau potable notamment. Un suivi continu des paramètres physico-chimiques de l'aquifère peut être réalisé en forage et/ou au niveau des sources qui le drainent. Ces suivis peuvent être complétés par des prélèvements manuels ou automatiques destinés à des analyses chimiques en laboratoire. Leurs fréquences varieront en fonction du contexte hydrogéologique local et des informations recherchées ;
- *suivi par imagerie géophysique des migrations de fluides (méthode en cours de développement)* : des méthodes géophysiques sont en cours de développement permettant de suivre et détecter des migrations de fluides [Vouillamoz et al., 2007 ; Bowling et al., 2006 ; Jens et al., 2003].

Dans le cas des stockages en milieux poreux, il peut être pertinent lors de l'abandon, de laisser ouverts un ou plusieurs puits de contrôle des aquifères supérieurs. Ce suivi n'aurait de sens que si les variations attendues de pression dans le stockage après abandon sont suffisamment importantes. Dans ce cas, la comparaison entre les variations de la pression dans le stockage avec celles mesurées dans les puits de contrôle pourrait indiquer l'occurrence d'une perte d'étanchéité des cuvelages des puits ou de la couverture.

7.4 SURVEILLANCE DES ARRIVEES DE GAZ EN SURFACE

La surveillance d'arrivées de gaz en surface concerne essentiellement les stockages abandonnés en milieux poreux puisque dans ce contexte, une certaine quantité de gaz est laissée en place dans le réservoir après l'abandon. Elle renvoie donc aux aléas décrits dans les § 6.1 (fuite de gaz par les puits) et 6.2.1 (fuite de gaz par la couverture). Certaines des méthodes décrites ci-après peuvent également être utilisées pour détecter les émissions de radon dans le cas d'anciens stockages en cavités minées (§ 6.4.5).

La plupart des techniques qui vont être présentées ci-après ont été développées ou sont à l'étude pour la surveillance des futurs sites de stockage du CO₂. (<http://www.co2captureandstorage.info>). Un certain nombre de techniques sont également issues de l'expérience acquise par l'INERIS en la matière [Pokryszka et al., 2006].

Notons que ces méthodes de surveillance d'arrivées de gaz en surface ne peuvent pas constituer, à elles seules, une réponse unique à la problématique de la surveillance des stockages après abandon. Elles doivent plutôt être considérées comme un élément d'un dispositif de surveillance plus large. En effet, la migration

sous forme gazeuse n'est pas l'unique mode de migration du gaz naturel. D'autre part, la localisation des points de surveillance doit être mûrement réfléchi et adaptée au contexte géologique et hydrogéologique de chaque stockage. Il est également possible que, dans le contexte géologique de certains stockages, la mise en place d'une surveillance de ce type ne soit pas adaptée.

7.4.1 METHODES EPROUVEES ET OPERATIONNELLES

Prélèvements en forage [Pokryszka et al., 2007]

Le principe de cette méthode est de réaliser un prélèvement gazeux au fond d'un sondage à l'aide d'une pompe fonctionnant en continu. Le dispositif d'analyse gazeuse est situé en surface au sein d'une station de mesure spécifique. Le système de prélèvement est relativement simple et permet d'opérer à des profondeurs atteignant 200 m ou plus (Figure 25).

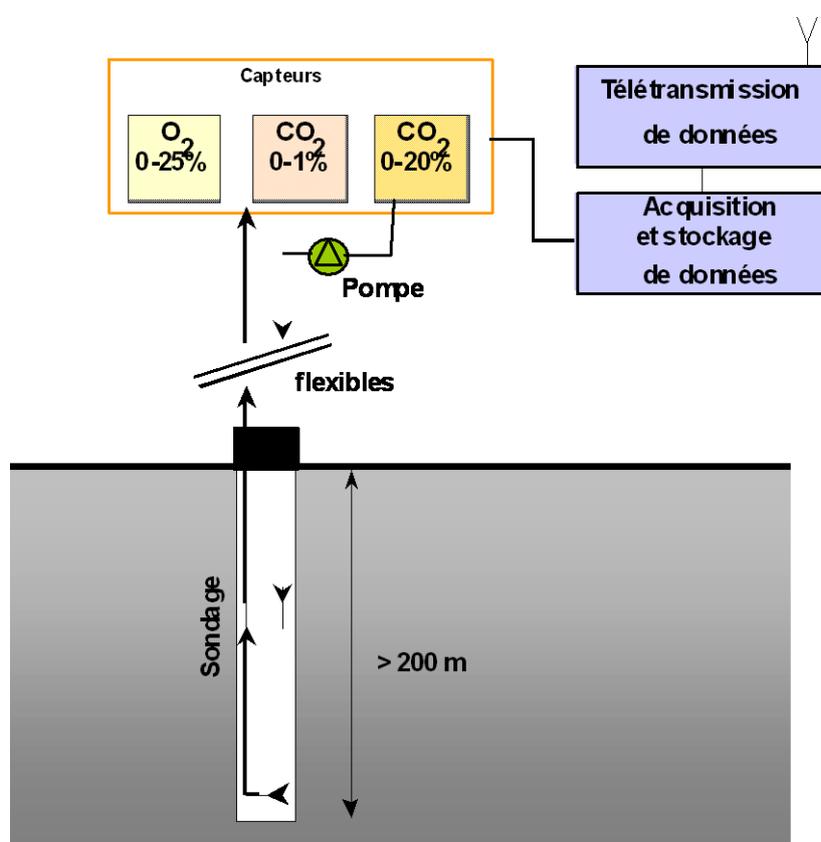


Figure 25 : Dispositif de surveillance des gaz en forage [Pokryszka et al., 2007]

Les premiers tests de ce dispositif in-situ ont confirmé que l'installation mise en œuvre permet de détecter et de mesurer des fuites de gaz arrivant vers un sondage profond avec un débit très variable, notamment des émissions extrêmement faibles (fuite de CO₂ de 1 cm³/min durant 3 minutes).

Un système de prélèvement gazeux à longue distance a été également mis en place dans une galerie de mine désaffectée dans le bassin ferrifère lorrain (galerie d'Algrange). Il permet de réaliser des prélèvements et des transferts gazeux,

depuis les vides miniers jusqu'à la surface, sur une distance allant jusqu'à 1000 m. Une station d'analyse de gaz et d'acquisition de données est disposée en tête de la ligne de prélèvement. Ces premiers essais montrent qu'il est possible de réaliser un transfert sur une distance de 1000 m et une analyse de mélanges très peu chargés en CO₂. Pour illustration, il a été possible de détecter une fuite singulière de CO₂ d'un débit inférieur à 1 cm³/min sur 1 min.

Ce type de dispositif de détection de fuites pourrait être adapté avec facilité à la surveillance d'un site de stockage d'hydrocarbures.

Concentration des gaz du sol

Un certain nombre de techniques abouties sont aujourd'hui disponibles pour la surveillance de la composition des gaz du sol. Ces techniques peuvent être appliquées à la détection de fuites de gaz s'échappant du sol. Un état initial est bien sûr nécessaire pour que ces méthodes soient efficaces.

Mesures de flux [Pokryszka et al., 2007]

La mesure directe du flux gazeux émanant du sol est une des méthodes les plus efficaces de contrôle et de suivi direct d'un site de stockage.

L'INERIS a développé et mis au point par le passé une méthode spécifique basée sur le principe de la chambre à accumulation (Figure 26). Une amélioration et une mise au point de cette méthode ont été réalisées pour détecter et quantifier de faibles flux gazeux de CO₂. Cette méthode est déjà opérationnelle pour les mesures de flux de méthane. Elle pourrait donc être facilement mise en œuvre sur des sites de stockage de gaz naturel et d'hydrocarbures.

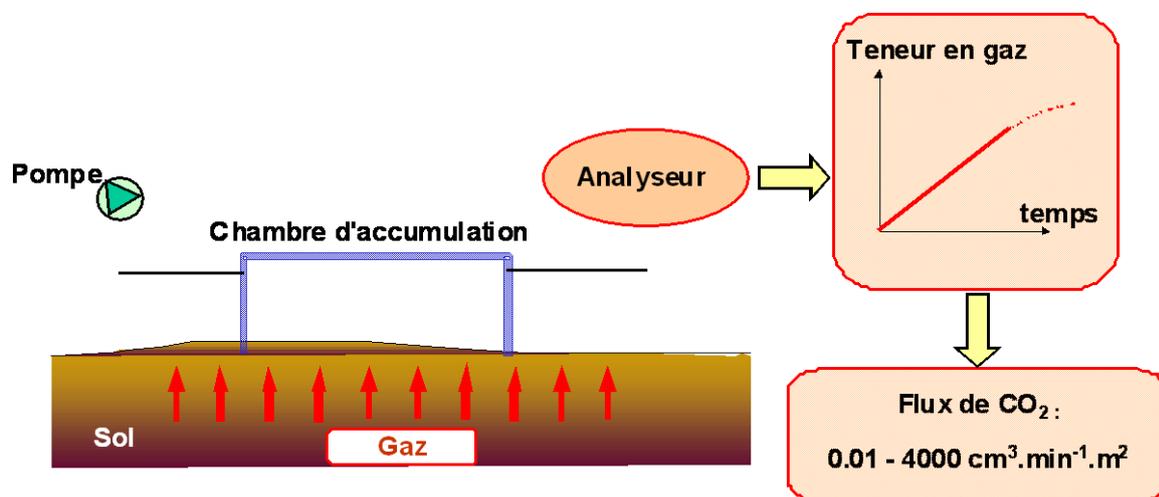


Figure 26 : Dispositif de mesure de flux surfacique développé par l'INERIS [Pokryszka et al., 2007]

Analyse chimique des flux de bulles de gaz

Il est possible de prélever des bulles de gaz circulant dans une colonne d'eau en utilisant un entonnoir inversé. Les gaz collectés peuvent ensuite être analysés. Cette technique permet de localiser et d'identifier rapidement une fuite de gaz en provenance du sol au niveau d'une étendue d'eau douce ou salée.

7.4.2 METHODES EN COURS DE DEVELOPPEMENT

Ces méthodes sont plus adaptées à une quantification globale des émissions de gaz plutôt qu'à la quantification d'une émission localisée.

Eddy covariance

La méthode d'Eddy covariance (ou corrélation) météorologique est une méthode de détection atmosphérique de gaz. Elle comprend un analyseur infrarouge de gaz couplé à un anémomètre mesurant la vitesse et la direction du vent. L'ensemble est monté sur une tige fixée au sol. A partir des mesures réalisées à quelques mètres du sol et d'un modèle de dispersion utilisant les données météorologiques enregistrées, le système recalcule le flux de gaz se dégageant du sol.

Mesures électro-magnétiques aéroportées

Cette méthode permet de détecter des variations de conductivité électrique de sub-surface. Elle offrirait notamment la possibilité de détecter des variations de composition chimique des aquifères superficiels.

Surveillance à la diode laser infrarouge

Cette méthode permet de mesurer des concentrations de gaz dans l'atmosphère. Les mesures sont réalisées sur une tranche d'atmosphère pouvant s'étendre de quelques mètres à une centaine de mètres. Couplé à un dispositif de mesure des gaz du sol, ce système est un moyen efficace de détecter des fuites de gaz.

Ces 3 dernières méthodes sont décrites plus en détail sur la page web <http://www.co2captureandstorage.info>.

8. BILAN/CONCLUSION

L'objet du présent rapport est d'établir, à destination de l'Administration centrale et des services instructeurs concernés par la problématique, une synthèse des connaissances et des pratiques en matière d'abandon des stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés et de produits chimiques à destination industrielle. Ce document pourra éventuellement servir de base à l'élaboration ultérieure de règles de bonne pratique destinées à assurer dans les meilleures conditions, lors de l'abandon d'un stockage souterrain, la sécurité à long terme des personnes et des biens, ainsi que la préservation de l'environnement, autour du site concerné.

Le document traite de la problématique de l'abandon dans son ensemble, couvrant à la fois les aspects réglementaires (en France et à l'étranger), la description des opérations techniques d'abandon, l'analyse des cas d'accidents les plus intéressants du point de vue de l'abandon, l'identification des principaux aléas ou impacts liés à l'abandon d'un stockage souterrain, le recensement de méthodes et éléments bibliographiques pouvant aider à l'évaluation des aléas et enfin, la présentation de techniques qui pourraient être envisagées pour la surveillance des stockages souterrains après ou au cours de leur abandon. Le document s'attache à couvrir les différents types de stockages, que ce soit en milieux poreux, en cavités salines ou en cavités minées. Il en ressort principalement les points suivants.

D'un point de vue réglementaire, le code minier, assorti des décrets n°2006-248 et 2006-249 relatifs aux titres et à la police des mines et stockages souterrains, encadre relativement bien l'abandon des stockages souterrains. Il semblerait judicieux, toutefois, de transposer aux stockages souterrains les règles relatives à la fermeture des puits qui s'appliquent actuellement dans le domaine de l'industrie pétrolière (décret n° 2000-278 du 22 mars 2000).

D'autre part, si le cadre réglementaire est globalement bien posé, il apparaîtrait nettement utile de disposer d'un guide de bonnes pratiques déclinant de façon plus précise les règles à respecter lors des opérations de déstockage, les principes à adopter pour la fermeture des puits, ou encore les règles de surveillance à appliquer dans tel ou tel contexte d'abandon. Le présent document pourra, nous l'espérons, servir de base à l'élaboration d'un tel guide, par les acteurs de la profession. D'autres sources pourraient également être utilisées à cette fin, notamment le code canadien de bonnes pratiques relatif aux stockages souterrains d'hydrocarbures⁶⁴.

⁶⁴ Téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.gov.ns.ca/energy/files/drm/d6dfe73c-03e5-43ce-8bd4-75d5292caafc.pdf>).

Enfin, toujours sur le plan réglementaire, les stockages souterrains ne sont pas soumis, à l'heure actuelle, à l'établissement de Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM). Il conviendra donc, pour assurer la prévention des risques résiduels qui pourraient se manifester après l'abandon des stockages souterrains, de mener une réflexion sur la possibilité d'étendre les PPRM, au moins pour partie ou pour certains concepts, aux stockages souterrains. Une autre piste consisterait à étendre l'outil PPRT au-delà de la phase d'exploitation. Dans les deux cas, cela suppose un certain nombre de modifications des textes réglementaires, auxquelles l'INERIS est prêt à contribuer, en appui à l'administration.

En ce qui concerne le recensement des cas d'abandon de stockages souterrains à travers le monde et en dépit des nombreuses sources consultées par les auteurs de ce rapport, une grande rareté des cas documentés a été constatée. Ceci peut s'expliquer, d'une part, par la relative jeunesse des stockages souterrains (la plupart ont moins de 50 ans et ne sont pas encore rentrés dans la phase d'abandon), mais aussi par le caractère souvent confidentiel des dossiers d'abandon, qui rendent difficiles les recherches auprès des organismes concernés. Par conséquent, le présent rapport sur l'abandon des stockages souterrains s'est basé en grande partie sur les retours d'expérience des cas français de Carresse-Cassaber et de May-sur-Orne, ainsi que sur les études menées dans des domaines relativement connexes comme par exemple, l'abandon des cavités salines exploitées par dissolution, l'abandon des puits d'exploitation dans le domaine pétrolier ou encore l'abandon des mines et carrières souterraines.

Ces retours d'expérience, ainsi qu'une analyse précise des accidents recensés dans le domaine des stockages souterrains et de leurs circonstances ont permis d'identifier les principaux phénomènes redoutés susceptibles de survenir à plus ou moins long terme sur un site de stockage souterrain abandonné. Cette identification des phénomènes redoutés, et de leurs mécanismes initiateurs, a abouti à la construction d'arbres de causes, présentés en annexe G.

Dans le contexte d'un stockage en milieux poreux, les principaux phénomènes susceptibles de survenir sont : une pollution des nappes d'eau souterraines, une émanation de gaz résiduel en surface ou des mouvements de la surface du sol. Dans le contexte d'un stockage en cavités salines, on peut envisager : une pollution (par la saumure) des nappes d'eau souterraines et des mouvements de la surface du sol. Enfin, dans le contexte d'un stockage en cavités minées, les phénomènes à redouter sont principalement : une perturbation du régime hydraulique local, une pollution de l'aquifère hôte du stockage, des mouvements de la surface du sol et des émissions de radon pour certains milieux géologiques.

En ce qui concerne les mécanismes initiateurs, il ressort que c'est la perte d'étanchéité d'un puits abandonné qui est le plus souvent à l'origine (ou qui est le plus souvent impliquée) dans le développement de phénomènes indésirables. Cette perte d'étanchéité peut apparaître au cours du temps, sous l'effet de phénomènes physico-chimiques variés (corrosion, lixiviation du ciment) qui viennent à rendre une partie du puits défailante (cuvelage, cimentation du cuvelage, bouchon de scellement). Le puits peut alors servir de chemin d'écoulement préférentiel et mener à des transferts de fluides incontrôlés à travers le recouvrement (fuite de saumure à partir d'une cavité saline, fuite de gaz résiduel à partir d'un réservoir en milieu poreux, lessivage accidentel d'un niveau évaporitique du recouvrement par de l'eau douce) dont les conséquences peuvent être préjudiciables pour les personnes, les biens ou l'environnement. Une attention particulière doit donc être portée, dans le cadre d'une procédure d'abandon, sur les opérations de fermeture des puits.

Les phénomènes ci-dessus peuvent également résulter, non pas de la défaillance d'un puits abandonné mais de la réalisation d'un forage tiers, quelques dizaines ou quelques centaines d'années après l'abandon, qui viendrait accidentellement percer la couverture (d'un stockage en milieu poreux) ou le toit (d'une cavité saline) ou mettre en communication, au sein du recouvrement, un niveau évaporitique avec une nappe d'eau douce. Ce risque justifie la mise en place d'un « périmètre de stockage » au cours de la phase d'exploitation, qu'il conviendra probablement de conserver en partie au-delà de l'abandon (par exemple dans le cadre du PPRM).

Outre les problèmes liés aux forages et aux puits, d'autres mécanismes, plus spécifiques à chaque type de stockage, méritent également d'être examinés. Dans le cas d'un stockage en milieu poreux, par exemple, la possibilité à long terme d'une sortie latérale (en phase dissoute dans l'eau) du gaz résiduel et de ses composés au-delà de la limite géologique du stockage, nous semble devoir être étudiée. Par ailleurs, bien que peu probable a priori, des études ont également porté sur la possibilité de fuites de gaz à travers la couverture, suite à un endommagement mécanique de celle-ci ou à la mobilisation de discontinuités pré-existantes (jusqu'alors étanches). Les conséquences potentielles sont, dans les deux cas, une pollution par le gaz (et ses composés) des nappes aquifères sus-jacentes ou bien la résurgence de celui-ci en surface. Cet aléa peut être évalué à partir de méthodes et outils provenant essentiellement de l'industrie pétrolière.

Dans le cas d'un stockage en cavité saline, le principal risque à long terme réside, outre les problèmes liés au puits, dans l'éventuelle instabilité mécanique de la cavité. En effet, au cours du temps, celle-ci peut soit se refermer sur elle-même (du fait du fluage du sel), soit se fracturer au toit (si la pression de la saumure vient, sous l'effet de sa dilatation thermique et de la réduction volumétrique de la cavité, à dépasser la pression lithostatique), soit s'élargir par reprise de dissolution (si la saumure n'est pas totalement saturée suite à l'abandon). Ces mouvements peuvent avoir deux types de conséquences (qui tendent à s'entretenir mutuellement). D'une part, la cavité peut remonter jusqu'au toit du sel et mettre ainsi en contact la saumure avec des terrains de recouvrement plus perméables, menant à une éventuelle pollution des nappes aquifères sus-jacentes. D'autre part, la cavité peut continuer sa progression à travers le recouvrement jusqu'à mener en surface à un affaissement, voire un effondrement brutal de la surface du sol.

Un des enjeux majeurs de l'évaluation de l'aléa réside alors dans la prédiction de la pression à long terme que va atteindre la saumure dans la cavité. Cette évaluation est délicate car elle doit prendre en compte un grand nombre de phénomènes, souvent couplés. Les nombreuses études réalisées sur l'abandon des cavités de sel exploitées par dissolution, notamment dans le cadre du SMRI, constituent dans ce domaine un retour d'expérience extrêmement profitable.

Dans le cas des stockages en cavités minées, les principaux aléas ou impacts que l'on peut redouter sont d'une part, une perturbation du régime hydraulique environnant le stockage et d'autre part, une instabilité mécanique à long terme des vides souterrains constitués par les anciennes cavités de stockage, les galeries d'accès (descenderies) ou les puits d'exploitation, susceptible de mener à des problèmes d'affaissement ou d'effondrement en surface. Les risques de pollution des eaux ou d'émission de gaz en surface méritent également d'être examinés. Les retours d'expérience issus du domaine minier, ainsi que les travaux réalisés notamment en Corée, dans le domaine de la conception et de l'exploitation des stockages en cavités minées, peuvent être des apports très utiles, dans ce contexte, pour l'évaluation de l'aléa.

Enfin, un des outils de gestion des risques résiduels dont peuvent faire usage les pouvoirs publics au moment de l'abandon des stockages souterrains est la préconisation d'une surveillance du stockage pendant une période de temps définie. Nous avons effectué, à la fin de ce rapport, un inventaire des techniques qui nous semblent les plus pertinentes et les plus à même de pouvoir être appliquées dans le contexte d'un stockage souterrain abandonné. Celles-ci ont été classées en quatre catégories : celles qui visent à surveiller la stabilité des anciennes cavités ou infrastructures de stockage (galeries d'accès, puits), celles qui visent à surveiller d'éventuels mouvements de la surface du sol, celles qui visent à vérifier la qualité des aquifères environnants et enfin, celles qui visent à détecter d'éventuelles arrivées de gaz en surface.

En conclusion, si l'on excepte le contexte salin où le SMRI a contribué de manière active aux recherches sur l'abandon depuis une dizaine d'années, il apparaît clairement que l'abandon des stockages souterrains reste une thématique encore jeune, globalement peu développée, sur laquelle on ne dispose guère de données et de retours d'expérience à l'heure actuelle. Dans ce sens, même si des recommandations et règles de bonnes pratiques doivent être rapidement fixées par l'Administration du fait du dépôt actuel des premiers dossiers d'arrêt, il semble dans le même temps nécessaire de poursuivre les efforts de recherche et de conduire de nouvelles études (non seulement dans le contexte salin mais aussi dans celui des stockages en aquifères et en cavités minées) permettant de renforcer notre capacité d'évaluation des risques liés à l'abandon des stockages souterrains. En particulier, il semblerait utile de mener des expérimentations d'abandon in situ (effort déjà entrepris au sein du SMRI mais qui mériterait d'être poursuivi et étendu à d'autres contextes de stockages) permettant aux exploitants et aux experts de disposer de davantage de données auprès desquelles ils pourraient confronter leurs modèles, outils et méthodes. Ces expérimentations seraient également l'occasion, pour l'Administration française d'évaluer la pertinence des règles de bonnes pratiques qu'elle serait susceptible d'émettre dans les prochaines années.

9. RÉFÉRENCES

Allison M.L., 2001 : « Hutchinson, Kansas; A geological detective story », *Geotimes*, Web site, www.agiweb.org.

Amantini E., Cabon F., Moretto A., 2005 : « Groundwater management during the construction of underground hydrocarbon storage in rock caverns », 10 pages.

Amantini E., E. Chanfreau and H.Y. Kim, 2005 : « The LNG Storage in Lined Rock Cavern: Pilot Cavern Project in Dajeon, South Korea », *Proceedings, GASTECH 2005: 21st International Conference & Exhibition for the LNG, LPG and Natural Gas Industries*, Bilbao, Spain, pp. 1-16.

Atekwana Eliot A., Estrella. A. Atekwana, R. S. Rowe, D. D. Werkema, Jr. and F. D. Legall, 2004 : « The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon », *Journal of Applied Geophysics* Volume 56, 4, 281-294.

Bachu and Watson, 2007 : « Possible Indicators for CO₂ Leakage along Wells », *GHGT-8, 2006 Watson and Bachu - Factors Affecting or Indicating Potential Wellbore Leakage*; SPE Paper 106817.

Baldi P., Bonvalot S., Briole P., Marsella M., 2000 : « Digital photogrammetry and kinematic GPS applied to the monitoring of Vulcano Island », *Aeolian Arc, Italy. Geophysical Journal International*, 2000, 142 (3), p. 801-811.

Barlet-Gouédard V., G. Rimmelé, B. Goffé and O. Porcherie, 2007: « Well Technologies for CO₂ Geological Storage: CO₂-Resistant Cement », *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, Vol. 62 (2007), No. 3, pp. 325-334.

Bauer S.J., B.L. Ehgartner, J.T. Dale, 2000 : « Geotechnical studies associated with decommissioning the Strategic Petroleum Reserve facility at Weeks Island, Louisiana: a case history », In *Proc. S.M.R.I. Fall Meeting Technical Session*, San Antonio, pages 146-156, 2000.

Baumgardner R.W. Jr., A.D. Hoadley, and A.G. Goldstein, 1982 : « Formation of the Wink Sink, a salt dissolution and collapse feature, Winkler County, Texas », *Technical Report 114, Report of investigations, Bureau of Economic Geology*, Austin, Texas, 1982.

Bennani M., Josien J.P., Bigarre P., 2004 : « Surveillance des risques d'effondrement dans l'après-mine, besoin, méthode : apport de la microsismique », *Revue Française de Géotechnique*, N° 106-107, 1er et 2ème trimestre 2004, pp. 5-14, *Les techniques de l'Industrie Minérale* n° 21 /mars 2004, pp.15-22.

Bérest P., Ledoux E., Tillie B., 1982 : « Etanchéité des stockages d'hydrocarbures liquéfiés en galeries non revêtues dans un milieu aquifère », *Rev. I.F.P.*, vol.37, n°3, Mai-juin 1982.

Bérest P., B. Brouard, G. Durup, 1997 : « Abandon des cavités salines », *Revue Française de Géotechnique*, n° 82, 16 pages, 26 mai.

Bérest P., J. Bergues, B. Brouard, J.G. Durup and B. Guerber, 2001 : « A salt cavern abandonment test », *Int J Rock Mech Min Sci*, Vol. 38, n° 3, pp. 357–368.

Bérest P. et Brouard B., 2003 : « Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage Blow Out; Mechanical Instability; Seepage; Cavern Abandonment », Oil & Gas Science and Technology Rev IFP, 58, 3 361-384.

Bérest P., Diamond B., Duquesnoy A., Durup G., Feuga B., Lohff L., 2004 : « Salt and brine production methods in France: Main conclusions of the international group (IEG) commissioned by the French regulatory authorities », Fall 2004 Conference 3 - 6 October, Berlin, Germany.

Bérest P., Diamond B., Duquesnoy A., Durup G., Feuga B., Lhoff L., 2005 : « Salt and brine production methods in France : Main conclusions of the International Group of Experts (IEG) commissioned by the French regulatory authorities », Post-Mining 2005, Nancy, France.

Bérest P., M. Karimi-Jafari, Benoit Brouard, Gérard DurupBrine, 2006 : « Warming in a Sealed Cavern: What can be done? », SMRI Fall 2006 Conference, 1-4 October, Rapid City, South Dakota, USA.

Besnard K., 2006 : « Mesures de radon à l'aplomb des anciens travaux miniers de Soumont », Rapport référencé INERIS DRS-06-78783R01, 12 juin.

Bowling J. C., C. Zheng, A. B. Rodriguez and D. L. Harry, 2006 : « Geophysical constraints on contaminant transport modeling in a heterogeneous fluvial aquifer, », Journal of Contaminant Hydrology 85, 1-2, 5, 72-88.

Brandshaug T., M. Christianson and B. Damjanac, 2001 : « Technical Review of the Lined Rock Cavern (LRC) Concept and Design Methodology: Mechanical Response of Rock Mass », Prime Contract No. DE-AM26-99FT40463, Subcontract No. 735937-30000 for U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory Morgantown, West Virginia.

Breunese J.N., R.M.H.E van Eijs, S.deMeer, I.C. Kroon, 2003 : « Observation and prediction of the relation between salt creep and land subsidence in solution-mining-The Barradeel case », SMRI Fall 2003 Conference, Chester, England.

Brocard H., 1983 : « Présence de méthane dans le stockage souterrain d'hydrocarbure liquide de la société GEOMINES à May-sur-Orne ».

Brouard B., 2002 : « Etude bibliographique sur les accidents dans les bassins salifères résultants d'une dissolution volontaire ou non », rapport GEODERIS, 18 mars 2002.

Brouard B., P. Bérest, C. Caligaris, A. Frangi, G. Hévin, Thierry Pichery, 2006 : « Numerical Computations Of The Mechanical Behavior Of Cemented Casings Submitted To Large And Fast Pressure Variations », Fall 2006 Conference 1-4 October Rapid City, South Dakota, USA.

Brouard B., Bérest P., Héas J.-Y., Fourmaintraux D., de Laguérie P., You T., 2004 : « An in situ creep test in advance of abandoning a salt cavern », SMRI Fall 2004 Conference, 3 - 6 October, Berlin, Germany.

Brückner, D.; Popp, T.; Schreiner, W., 2005 : « Geotechnical Experiences in Flooding Underground Openings in Salt Formations », SMRI Fall 2005 Conference, 2-5 October, Nancy, France.

Brückner D. and H. H. Wekenborg, 2006: « Abandonment of the caverns at the brine field Stade - Süd (Germany) Geomechanical concept - geotechnical procedures and the proof of long-term safety by numerical modelling », Paper to SMRI Fall Meeting Rapid City (USA) - Oct. 2006.

Bücker C., Kitscha R., Großwig S., Hurtig E., Lundershausen S., 2005 : « Surveying of the Cementation Process in Wells Using Fiber Optic Temperature Measurements », SMRI Fall 2005 Conference 2-5 October Nancy, France.

Buffet A., 1998 : « The collapse of Compagnie des Salins SG4 and SG5 drillings », In Proc. S.M.R.I. Fall Meeting, Rome, pages 79-105, 1998.

Cailly B., P. Le Thiez, P. Egermann, A. Audibert, S. Vidal-Gilbert, X. Longaygue, 2005 : « Geological storage of CO₂: A state-of-the-art of injection processes and technologies », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 60 (2005), No. 3, pp. 517-525.

Carnec, C., 1996 : « Interférométrie SAR Différentielle : Application à la détection et au suivi de mouvements de terrain », Thèse de doctorat. Université Denis Diderot (PARIS VII), Paris.173 p.

Cartwright M., M. McLaughlin, J. Ratigan, and D. Blankenship, 2000 : « A sinkhole at the EGP Fuels Company LPG storage terminal Mont Belvieu Texas », In Proc. S.M.R.I. Fall Meeting Technical Session, San Antonio, pages 128-143, 2000.

Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Eastwood, R. L., 1985 : « Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks », Geophysics, 50, 571-581.

Celia M.A., Bachu S., Nordbotten J.M. Gasda S.E. and Dahle H.K., 2004 : « Quantitative estimation of CO₂ leakage from geological storage-analytical models numerical models, and data needs », Princeton Environmental Institute, The Princeton papers at Vancouver GHGT-7, Paper ID #228, <http://www.princeton.edu/%7Ecmi/research/Vancouver04/pprlist.shtml>.

Charnavel Y., Buissard H., Hertz E., 2006 : « Variation of Salt Dissolution Rate with Temperature - Experimental Procedure and First Results », Spring 2006 Conference, 30 April- 3 May, Brussels, Belgium.

Chiaromonte L., Mark Zoback, Julio Friedmann and Vicki Stamp, 2006 : « CO₂ sequestration, fault stability and seal integrity at Teapot Dome, Wyoming », Fifth Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration, May 8 -11, 2006.

Cha S.-S., J.-Y. Lee, D.-H. Lee, E. Amantini, K.-K. Lee, 2006 : « Engineering characterization of hydraulic properties in a pilot rock cavern for underground LNG storage », Engineering Geology 84 (2006) 229-243.

Cha S.-S., K.-K. Lee, G.-O. Bae, D.-H. Lee and N. Gatelier, 2007 : « Analysis of rock drainage and cooling experiments for underground cryogenic LNG storage », Engineering Geology, Volume 93, Issues 3-4, Pages 117-129, 30 August.

Chin L. Y., L. K. Thomas, J. E. Sylte and R. G. Pierson, 2002 : « Iterative Coupled Analysis of Geomechanics and Fluid Flow for Rock Compaction in Reservoir Simulation », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 57 (2002), No. 5, pp. 485-497.

Code Minier, modifié par Ordonnance n°2006-407 du 6 avril 2006 art. 1 (JORF 7 avril 2006).

Cornet F.H. et Burlet D., 1992 : « Stress field determinations in France by hydraulic test in borehole », journal of geophysics research, Vol 97, no B8.

Cosenza Ph., M. Ghoreychi, 1996 : « Coupling between mechanical behavior and transfer phenomena in salt », 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, France, Trans Tech Publications, 14-16 Septembre 1993, Trans Tech Publications, Ghoreychi et al. (eds), pp.285-307, 1996.

Cosenza Ph., M. Ghoreychi, B. Bazargan, G. de Marsily, 1999 : « In situ rock salt permeability for long term safety assessment of storage », International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, N° 36, 1999, pp 509-526

Cosenza Ph., M. Ghoreychi, 1999 : « Effect of very low permeability on the long term evolution of a storage cavern in rock salt », International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, N° 36, 1999, pp 527-533.

Couffin S., Bigarre P., Bennani M., Josien J.P., 2003 : « Permanent real time microseismic monitoring of abandoned mines for public safety », FMGM 2003. 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 15-18 September 2003, Oslo, Norway, pp 437-444, Ed. Balkema.

Crotogino F., 1996 : « SMRI references for external well mechanical integrity testing/performance, data evaluation and assessment, Summary of the final project report SMRI 94-0001 », SMRI Spring Meeting, Houston, Texas, 1996.

Crotogino F. & J. Kepplinger, 2006 : « Cavern Well Abandonment Techniques - Guidelines Manual », KBB Underground Technologies GmbH, Hannover, Germany, September.

Daim F., R. Eymard, D. Hilhorst, M. Mainguy, R. Masson, 2002 : « Un algorithme de gradient conjugué préconditionné pour le couplage de codes géomécanique et réservoir », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 57 (2002), No. 5, pp. 515-523.

Danielsen J. E., E. Auken, F. Jorgensen, V. Sondergaard and K. I. Sorensen, 2003 : « The application of the transient electromagnetic method in hydrogeophysical surveys », Journal of Applied Geophysics Volume 53, 4, 181-198.

Daupley X., Al Heib M., Diop A., 2004 : « Typologie des mécanismes et des phénomènes de mouvement de terrain liés aux exploitations de sel », rapport INERIS référencé INERIS-DRS-04-56179/R01, 7 mai.

Davis, 2008 : « Integrating InSAR, tilt and GPS measurements for improved deformation monitoring », Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-05424.

De Beer E.E., Buttiens E., 1966 : « Construction de réservoir pour hydrocarbures liquéfiés dans l'argile de Boom à Anvers. Etude des mouvements de sol provoqués par cette réalisation », revue « Travaux » n°379-380, Sept-Oct.

Décret no 2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain, NOR : ECOX0500233D, Journal officiel de la république française, 3 juin 2006.

Décret no 2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains, NOR : INDI0607508D, Journal officiel de la république française, 3 juin 2006.

- de Laguérie P., Héas J.-Y., Fourmaintraux D., You T., Brouard B., Bérest P., 2004 : « Decommissioning and abandonment procedure of LPG caverns at Carresse (France) », SMRI Fall 2004 Conference, 3 - 6 October, Berlin, Germany.
- Driad L., Piwakowski B., 2002 : « Detection and characterisation of underground cavities using high resolution seismic reflection (HRSR) », Environment Engineering Geophysics, Aveiro (Portugal), Septembre 2002.
- Durup J.G., 1991 : « Relationship between subsidence and cavern convergence at Tersanne (France) », S.M.R.I., spring meeting, Atlanta, USA.
- Durup J. G., F. Vidal and C. Rolin, 2007 : « Pilot Abandonment Test of a Very Deep Gas Storage Salt Cavern », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 62 (2007), No. 3, pp. 287-296.
- Dusseault M.B. and L. Rothenburg, 2002 : « Analysis of Deformation Measurements for Reservoir Management », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 57 (2002), No. 5, pp. 539-554.
- Ehgartner B.L., 1993 : « Weeks Island stress prediction and relationship to sinkhole formation », Technical Report internal memorandum, Sandia National Laboratories, Department 613, 1993.
- Eickemeier R., W. A. Paar and M. Wallner, 2002 : « Assessment of subsidence and cavern convergence with respect to brine fiels enlargement », SMRI, Spring 2002 Technical Meeting, Banff, Alberta, Canada, 28 April -1 May.
- Evans et West, 2008 : « An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology », Research rapport RR605, prepared by the British Geological Survey for the Health and Safety Executive.
- Fenix & Scisson Inc, 1983 : « Eminence storage facility station 77 operating summary, November 1979 through April 1980 », Unpublished report prepared for Transcontinental Gas Pipe Line Corporation, Report No. 4, 23, quoted in Coates et al., 1983.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 1999 : « Permanent scatterers in SAR interferometry », IGARSS'99, Hambourg, Germany. IEEE International. 1528-1530.
- Feuga B., 2003 : « Old salt mine at Dieuze (France) revisited 150 years after being abandoned », SMRI Fall 2003 Conference 5 - 8 October Chester, United Kingdom.
- Fokker, P.A, Steeneken, P.V. & Kruse, G.A.M., 2000 : « Predictable and Manageable Subsidence above Deep Salt Mining », Fall Meeting of Solution Mining Research Institute (San Antonio), 8 pp.
- Fredrich J. T., A. F. Fossum, 2002 : « Modélisation géomécanique 3D à grande échelle de réservoirs : exemples en Californie et dans les eaux profondes du golfe du Mexique », Vol. 57, n°05, p. 423-431
- Gassmann, F., 1951 : « Uber die elastizitat poroser medien », Vier. Der Natur Gesellschaft: 96, 1-23.
- Gendzwill D.J. and F.F. Prugger, 1990 : « Seismic activity in a flooded Saskatchewan potash mine », In C. Fairhurst, editor, Proc. 2nd Int. Symp. on

Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, 8-10 June 1988, pages 115-120. Balkema, Rotterdam, 1990.

GEOMINES-CAEN, 1994 : « Rapport général de réalisation des fermetures des orifices, du renforcement de zones à stabilité douteuse et de l'évacuation des eaux de surverse vers l'Orne », rapport référencé GK/GMC-94/026 Mge/TT, janvier 1994.

GEOSTOCK, 1988 : « May-sur-Orne - Arrêt du stockage souterrain », Rapport référencé TT/3708A (GK/DT-88/401 - PC/AG/TY/EA), 16 pages + 6 annexes, juin 1988.

Ghoreychi M., P. Berest, M. Fauveau et P. Lebitoux, 1986 : « Mechanisms of Creep in Gas Storage Caverns-Effect of Gravity Forces », 27th US Symp. on Rock Mechanics, Alabama, (USA), pp.789-794, June 1986.

Ghoreychi M., P. Berest, 1987 : « Influence du poids propre sur les mécanismes de fluage d'une cavité de stockage de gaz », Journée d'études sur l'utilisation et la méthode des éléments finis dans les projets géotechniques, ENPC, Mars 1987.

Ghoreychi M., Ph. Cosenza, 1993 : « Quelques aspects de la sûreté à long terme des stockages dans le sel », 4ème Colloque Franco-Polonais de Géotechnique, Nancy, pp.209-217, 16-17 Novembre 1993.

Ghoreychi M., X. Daupley, 2004 : « Devenir à long terme d'exploitations abandonnées de sel », Revue Française de Géotechnique, N° 106-107, 1er et 2ème semestre 2004.

Glamheden R., P. Curtis, 2006 : « Excavation of a cavern for high-pressure storage of natural gas », Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 21, Issue 1, Pages 56-67, January.

Guide PPRM, 2006 : « L'élaboration de Plans de Prévention des Risques Miniers – Guide Methodologique – Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa – Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mines », rapport INERIS référencé DRS-06-51198/R01, 140 pages, 4 mai.

Han C. ; Kang J. M. ; Choe J., 2003 : « Modeling for the effect of in-situ bacteria growth on permeability reduction of a fractured medium », Energy sources 25, 3, 203-215.

Hauck R., K. Staudtmeister & D. Zander-Schiebenhöfer, 2001 : « The Results of the Numerical Simulation of the Etzel Test », SMRI Spring 2001 Meeting, 23 - 25 April 2001, Orlando, Florida, USA.

Heffer K., 2002 : « Geomechanical influences in water injection projects: an overview », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 57 (2002), No. 5, pp. 415-422.

Heffer K., 2002 : « Présentation générale des effets géomécaniques induits par l'injection d'eau dans les réservoirs », Vol. 57, n°05, p. 415-422.

Hettema M., E. Papamichos and P. Schutjens, 2002 : « Subsidence Delay: Field Observations and Analysis », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 57 (2002), No. 5, pp. 443-458.

Hoffman E.L., 1994 : « Preliminary results of a three-dimensional structural evaluation of the SPR Weeks Island oil storage facility », Technical Report internal memorandum, Sandia National Laboratories, Department 1517, 1994.

Hopper J. M., 2004 : « Gas Storage and single-point failure risk », Energy Market, October. (http://www.falcongastorage.com/filelib/FileCabinet/Articles/article_singlepointhailureisk.pdf?FileName=article_singlepointfailureisk.pdf).

Hovorka, S. D., 2000 : « Understanding the processes of salt dissolution and subsidence, in Sinkholes and unusual subsidence over solution mined caverns and salt and potash mines », Technical Session: Solution Mining Research Institute, SMRI Fall Meeting, San Antonio, Texas, USA.

Huber J., 1964 : « Construction du complexe de stockage GLP Distrigaz à Anvers », 4DE Internationaal havenkongres, pp. 474-478.

International Energy Agency, 2007 : « 3rd well bore integrity workshop », Report n° 2007/6, July 2007.

International Energy Agency, 2007 : « 2nd well bore integrity workshop », Report n° 2003/12, September 2007.

Jackson P., Liebe H., 2005 : « Microbially Influenced Corrosion Issues in a Potash Solution Mine », Fall 2005 Conference 2-5 October Nancy, France.

Jennings M., 2006 : « Kansas Storage Regulations: and Update », Fall 2006 Conference, 1-4 October, Rapid City, South Dakota, USA.

Johansson J., 2004 : « High Pressure Storage of Gas in Lined Rock Caverns - Cavern wall design principles », Licentiate Thesis Division of Soil & Rock Mechanics Royal Institute of Technology, TRITA-JOB LIC 2004, ISSN 1650-951X.

Johnson K.S., 1987 : « Development of the Wink Sink in west Texas due to salt dissolution and collapse », In Beck and Wilson, editors, Proc. 2nd Multidisciplinary Conference on Sinkholes, pages 81-92, 1987.

Johnson K.S., 2001 : « Sinkholes associated with petroleum boreholes drilled through salt deposits in the USA », In Proc. S.M.R.I. Fall Meeting , Albuquerque, pages 8-17, 2001.

Kansas Geological Survey Web Site, 2001 : Hutchinson Response Project", [www.kgs.ukans.edu/Hydro/Hutch/General Geology/index.html](http://www.kgs.ukans.edu/Hydro/Hutch/General_Geology/index.html) and www.kgs.ukans.edu/Hydro/Hutch/references.html.

Kansas Department of Health and Environment, USA, 2002 : « Regulations 28-45 about hydrocarbon storage wells and systems ».

Kim T., K.-K. Lee, K. S. Ko, H. W. Chang, 2000 : « Groundwater flow system inferred from hydraulic stresses and heads at an underground LPG storage cavern site », Journal of Hydrology 236 (2000) 165-184.

Kimmel M. 2004 : « Exploitation de fer et stockage souterrain d'hydrocarbures de May-sur-Orne(Calvados). Tâche 1:Collecte et synthèse des données disponibles, et analyses préliminaires en vue de la réalisation de la phase informative d'un Plan de Prévention des Risques Miniers-Volet Environnement », rapport référencé INERIS-DRC-04-59017/DESP-R01.

Ko K.S., Chang H.W., Kim T. and Lee K.-K., 2002 : « Factors affecting the groundwater system around an underground LPG storage cavern », Q. J. Engng Geol. Hydrol.

Krilov Z., Loncaric B., and Miksa Z., 2000 : « Investigation of a Long-Term Cement Deterioration under a High-Temperature, Sour Gas Downhole Environment », SPE International Symposium on Formation Damage Control no. 58771, Lafayette, Louisiana, USA, 23-24 Feb.

Kunstman A., Urbanczyk K. M., 2003 : « Catastrophic flooding of Wapno Salt Mine (1977) and controlled flooding of Solno Mine (1986- 1991) - reasons, circumstances, consequences », Fall 2003 Conference 5 - 8 October Chester, United Kingdom (SMRI).

Lécolier E., A. Rivereau, G. Le Saoût, A. Audibert-Hayet, 2007 : « Durability of Hardened Portland Cement Paste used for Oilwell Cementing », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 62 (2007), No. 3, pp. 335-345.

Lee J.-Y., K.-K. Lee, 2000 : « Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system », Journal of Hydrology 229 (2000) 190-201.

Lee C. I. & Song J. J., 2003 : « Tunneling and Underground Space Technology », Rock engineering in underground energy storage in Korea, 18, (2003), 467 - 483.

Levinsson, Goran Ajling, Gunnar Nord, 2004 : « Design and construction of the Ningbo underground LPG storage project in China », Tunnelling and Underground Space Technology 19 (2004) 374-375.

Lewis R., W. PAO, 2002 : « Modélisation numérique d'écoulements de fluides triphasiques et de la déformation de la roche pour les réservoirs fracturés », Vol. 57, n°05, p. 499-514.

Li L., R. M. Holt, 2002 : « Mécanique du réservoir à l'échelle des grains », Vol. 57, n°05, p. 525-538.

Loi no 2003-8 du 3 janvier 2003 relative aux marchés du gaz et de l'électricité et au service public de l'énergie, NOR:ECOX0200139L, version consolidée au 8 décembre 2006.

Longuemare P., M. Mainguy, P. Lemonnier, A. Onaisi, Ch. Gérard and N. Koutsabeloulis, 2002 : « Geomechanics in Reservoir Simulation: Overview of Coupling Methods and Field Case Study », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 57 (2002), No. 5, pp. 471-483.

Lopes de Castro D., Branco R. M. G. C., 2003 : « 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history », Journal of Applied Geophysics 54, 1-2 , 127-144.

Lux K.-H. and R. Wolters, 2006 : « Long-term Behaviour of Sealed Brine-filled Cavities in Rock Salt Mass - A new Approach for Physical Modelling and Numerical Simulation », SMRI Fall 2006 Conference, 1-4 October, Rapid City, South Dakota, USA.

Mainguy M., P. Longuemare, A. Audibert and E. Lécolier, 2007 : « Analyzing the Risk of Well Plug Failure after Abandonment », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 62 (2007), No. 3, pp. 311-324.

- Mainguy M., Onaisi A., 2006 : « Mechanical impacts of acid gas leakage in caprocks », Eurock 2006, 9-11 mai.
- Manocha J. & O. Cicchini, 2002 : « Storage of Hydrocarbons in Underground Formations, Canadian Standards Association Code Z341, 3rd Edition », Meeting 28 April - 1 May 2002, Banff, Alberta, Canada.
- McCrae, R., Raybould, Garth, 2003: « The hazard due to abandoned salt mine cavities in the U.K. », SMRI Fall 2003 Conference, 5 - 8 October, Chester, United Kingdom.
- Merritt R., 2002 : « Casing Remediation - Extending Well Life through the use of Solid Expandable Casing Systems », SMRI Spring 2002 Meeting 28 April - 1 May 2002, Banff, Alberta, Canada.
- Min. K.-B., J Rutqvist, C.-F. Tsang, and L. Jing, 2004 : « Stress-Dependent Permeability of Fractured Rock Masses: A Numerical Study », International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41(7): pp. 1191-1210.
- Morisseau J.M., 2000 : « Uncontrolled leaching of salt layer in an oil field in Algeria », In Proc. S.M.R.I. Fall Meeting Technical Session, San Antonio, pages 330-333, 2000.
- National Transportation Safety Board (NTSB), 1993 : « Highly Volatile Liquids Release from Underground Storage Cavern and Explosion », Mapco Natural Gas Liquids Inc., Brenham Texas, April 7, 1992, NTSB/PAR-93/01, PB93-916502.
- Nova Scotia Department of Energy, 2002 : « Code of Practice Respecting the Underground Storage of Hydrocarbons », December 2002.
- Nezmal M., A. Sokol, J. Thomas, 1996 : « Radon contamination of natural gas in a storage cavern », Environment International, Vol. 22, Suppl. I, pp. S425-S427, 1996.
- Nulens K., van Cotthem A., Gregoire N., Wergifosse J., 2003 : « Emblayage de puits de mines : Puits Ste Marguerite I – Perennes-Lez-Binche », Tunnels et Ouvrages souterrains 2003, n°180, pp.368-372.
- Oldenburg C. M., 2007 : « Joule-Thomson cooling due to CO₂ injection into natural gas reservoirs », Energy Conversion and Management 48 (2007) 1808-1815.
- Olsson W. A., D. J. Holcomb, 2002 : « Zones de compaction localisée dans les grès poreux : conséquence sur l'écoulement dans les gisements », Vol. 57, n°05, p. 591-599.
- Onaisi A., 1995 : « Poromechanics for reservoir engineering », in Mechanics of porous media, Charlez (ed.)© 1995 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 628 X.
- Orlic B., R. v. Eijs, B. Scheffers, 2001: « Geomechanical modelling of the induced seismicity for a gas field », EAGE 63th Conference & Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 11-15 June 2001.
- Orlic B., B. Scroot, 2005 : « The mechanical impact of CO₂ injection », EAGE 67th Conference & Exhibition, Madrid, Spain, 13-16 June 2005.
- Paar W. A., 2000 : « Review of publications 1960 - 2000 on subsidence and sinkhole formation over solution-mined caverns - Results of a literature search, identification of fields for new research », SMRI Fall Meeting, San Antonio, Texas, USA.

Park J J, Seokwon Jeon, Young Shik Chung, 2005 : « Design of Pyongtaek LPG storage terminal underneath Lake Namyang: A case study », Tunnelling and Underground Space Technology 20 (2005) 463-478.Linus

Patroni J.M., 2007 : « Lifetime of a Natural Gas Storage Well Assessment of Well-Field Maintenance Cost », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 62 (2007), No. 3, pp. 297-309.

Pfeiffer T. W., K. D. Mellegard, N.T. Skaug & M.S. Bruno, 2000 : « An investigation of the integrity of cemented casing seals with application to salt cavern sealing and abandonment », SMRI report No. 2000-2-SMRI, October.

Piau J.M., 1995 : « Compaction and subsidence of petroleum reservoirs », in Mechanics of porous media, Charlez (ed.)© 1995 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 628 X.

Piwakowski B., Sharhour I.,1998 : « Imagerie du proche sous sol par sismique haute résolution : Application à la détection des cavités », Bull. lab. Ponts et Chaussées, vol 214, Mars-Avril 1998.

Powers D.W., 2000 : « Evaporites, casing requirements, water-floods, and out-of-formation waters: potential for sinkhole developments », In Proc. S.M.R.I. Fall Meeting Technical Session, San Antonio, pages 186-195, 2000.

Pokryska, Z., Charmoille, A., Bentivegna, G., 2007 : « Développement des méthodes du suivi géochimique en phase gazeuse à la surface et dans la couverture intermédiaire des sites de stockage géologique du CO₂ », Séminaire ANR Captage et stockage du CO₂, date et lieu.

Ratigan J.L., 1991 : « Ground subsidence at Mount Belvieu, Texas (panel discussion - surface subsidence) », In Proc. S.M.R.I. Spring Meeting, Atlanta, 1991.

Ratigan J.L., 1996 : « Pipelines and sinkholes: when is there a problem », In Proc. S.M.R.I. Spring Meeting, Houston, 1996.

Roegiers J.C., 2002 : « Well modelling: an overview », Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 57 (2002), No. 5, pp. 569-577.

Ratigan J. L., 2003 : « Summary Report - The Solution Mining Research Institute Cavern Sealing and Abandonment Program 1996 Through 2002 », SMRI Project 2002-3.

Sagefors I. and Per-Anders Daerga, 1996 : « An excavation method for large vertical cylindrical caverns », Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 3, pp. 279-285, 1996.

Seni S. J. & Johnson D. O., 2005 : « Regulatory Response to Recent Events Effecting Three Gas Storage Facilities in Texas », AGA Annual Meeting 2005.

Staudtmeister, K., Rokahr, R.B., 1997: "Rock mechanical design of storage caverns for natural gas in rock salt mass", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34:3-4, paper No. 300, Apr 1997.

Staudmeister K. and R. B. Rokahr, 1998 : « Pressure Build-Up Test in the Etzel K 102 Cavern », SMRI Project No. 98-0005, Institut für Unterirdisches Bauen University of Hannover, Germany, for the Solution Mining Research Institute, pp. 176.

Streit J. E., R. R. Hillis, 2004 : « Estimating fault stability and sustainable fluid pressures for underground storage of CO₂ in porous rock », *Energy* 29 (2004) 1445-1456.

Sturk R. and Hakan Stille, 1995 : « Design and Excavation of Rock Caverns for Fuel Storage - a Case Study from Zimbabwe », *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 193-201, 1995.

Reinhard B. Rokahr, R. Hauck, K. Staudtmeister, D. Zander-Schiebenhöfer, F. Crotogino, O. Rolfs, 2002 : « High Pressure Cavern Analysis », Research Project Report No. 2002-2-SMRI.

Rokahr R., R. Hauck, K. Staudtmeister, and D. Zander-Schiebenhöfer, 2000 : « The Results of the Pressure Build-up Test in the Brine Filled Cavern Etzel K 102 », *Solution Mining*, Research Institute Fall Meeting, San Antonio, TX.

Schweinsberg, H. J., Foltas F., Wilke F., 2004 : « Efficient and tailor-made cavern construction in domal salt for long term oil storage », *Solution Mining Research Institute*, SMRI Fall 2004 Technical Meeting, Berlin, Germany, 3 - 6 October 2004.

Taku Ide S., S. J. Friedmann, and H. J. Herzog, 2005 : « CO₂ leakage through existing wells: current technology and regulations », presented at the 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Trondheim, Norway, June (2006).

Thoms R.L. and Gehle R.M., 2000 : « A brief history of salt cavern use (keynote paper) », *Proc. 8th World Salt Symp.*, R.M. Geertman ed., Elsevier, I, 207-214.

Thoraval A., N. Gatelier, T. You, 2005 : « De certains effets hydromécaniques lors du creusement et de l'exploitation de galeries de stockage en milieu fracturé », *Revue Française de Géotechnique*, n°113, 4e trimestre 2005.

Thoraval A. & Vidal-Gilbert S., 2006 : « Impact mécanique d'un stockage de CO₂ dans un ancien gisement d'hydrocarbure du bassin parisien - Contribution au programme PICOREF ».

Thiel W.R. and Russel J.M., 2004 : « Pressure observation testing solution mined underground storage caverns in Kansas », In *Proceedings SMRI Spring Meeting*, Wichita, Kansas, 2004:186-198.

Tomasko D., D. Elcock, J. Veil, and D. Caudle, 1997 : « Risk analyses for disposing nonhazardous oil field wastes in salt caverns », Prepared for: U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy Under Contract W-31-109-ENG-38, December.

van Agthoven R., 2006 : « How to Determine the Integrity of Cavern Casings, a New Solution Found », *SMRI Spring 2006 Conference* 30 April- 3 May Brussels, Belgium.

van Hasselt B., E. Amantini, F. Cabon, J.-L. Bodin, 2003 : « Hydrogeological monitoring during construction and operation of underground LPG storage facilities in mined caverns », *Groundwater in Fractured Rocks (2003)* - Prague, Czech Republic; Krásný-Hrkal-Bruthans (eds.).

Vidal-Gilbert S., Huguet F., Assouline L. and Longuemare P., 2005 : « Hydromechanical modelling of reservoir behaviour during underground gas storage exploitation », *EAGE 67th Conference & Exhibition*, Madrid, Spain, 13-16 June 2005.

- Vidal S. Longuemare P., Huguet F., Mechler P., 2002 : « Reservoir parameters quantification from seismic monitoring integrating geomechanics », *Oil & Gas Science and technology - Rev. IFP*, Vol. 57 (2002), n°5, pp.555-568.
- Vouillamoz J.M., B. Chatenoux, F. Mathieu, J.M. Baltassat and A. Legchenko, 2007 : « Efficiency of joint use of MRS and VES to characterize coastal aquifer in Myanmar », *Journal of Applied Geophysics* 61, 142-154.
- Vouille G., Tijani S. M. and de Grenier F., 1984 : « Experimental determination of the rheological behavior of Tersanne rock salt », *Proc. 1st Conf. Mech. Beh. of Salt*, Pennsylvania, November 1981, Trans. Tech. Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany, 407-420.
- Walters R.F., 1978 : « Land subsidence in central Kansas related to salt dissolution », *Kansas Geological Survey Bulletin*, 214:82, 1978.
- Walters R.F., 1991 : « Gorham oil field, Russell County, Kansas », *Kansas Geological Survey Bulletin*, 228:111, 1991.
- Wassmann T.H., 1995 : « Subsidence phenomena over solution cavities in bedded salt », S.M.R.I., fall meeting, San Antonio, Texas, USA.
- Wassmann T.H., 1980 : « Mining subsidence in Twente, East Netherlands », *Geologie en Mijnbouw*, volume 59, pp 225-231.
- Wang, Z., 2000 : « Dynamic versus Static Elastic Properties, in *Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir Rocks* », SEG Geophysics Reprint Series. No. 19.
- Yamamoto H. and K. Pruess, 2004 : « Numerical Simulations of Leakage from Underground LPG Storage Caverns », LBNL-56175, contract no. DE-AC03-76SF00098.
- Yeager V., M. Blauch, S. Foh, 1994 : « Investigation of Storage Well Damage Mechanisms », GRI Request For Proposal No.: 95-270-0487, November 1, 1994.
- Yi M.-J., J.-H. Kim, S.-G. Park, J.-S. Son, 2005 : « Investigation of ground condition changes due to cryogenic conditions in an underground LNG storage plant », *Exploration Geophysics* (2005) 36, 67-72.
- You T., J. C. Kandel, N. Gatelier, 2003 : « Underground storage in Sydney, some uncommon rock mechanics features of an uncommon project in Australia », *ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003.
- You T. et A. Pecker, 1994 : « Consequences of a seismic diagnostic on an underground storage facility in Manosque (France) », 2ème Symposium Franco-Italien de Génie Parasismique "Strengthening and repair of structures in seismic areas" Davidovici & Benedetti Eds., pp361-371, Ouest Edition, 1994.
- Zhao J., V. Choa and B. B. Broms, 1996 : « Construction and Utilization of Rock Caverns in Singapore - Part B: Development Costs and Utilization », *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 73--79, 1996.
- Zhao J. and J. Bergh-Christensen, 1996 : « Construction and Utilization of Rock Caverns in Singapore - Part D: Two Proposed Cavern Schemes », *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 85-91, 1996.

10. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe A	Principaux textes législatifs et réglementaires relatifs à l'abandon des stockages souterrains	8 A4
Annexe B	Recueil d'éléments bibliographiques concernant la réglementation des stockages souterrains à l'étranger	7 A4
Annexe C	Dispositions définies par le Règlement général des industries extractives (RGIE) concernant la fermeture des puits ou sondages	4 A4
Annexe D	Rappel de quelques principes sur les stockages souterrains et sur la configuration d'un stockage en phase d'exploitation	13 A4
Annexe E	Description succincte de travaux de dimensionnement de stockages en cavités minées	5 A4
Annexe F	Accidentologie pertinente pour l'abandon des stockages souterrains	19 A4
Annexe G	Arbres des causes des principaux phénomènes redoutés dans le contexte des stockages souterrains abandonnés	4 A4

ANNEXE A

PRINCIPAUX TEXTES LEGISLATIFS ET
REGLEMENTAIRES RELATIFS A L'ABANDON DES
STOCKAGES SOUTERRAINS

Dispositions relatives à l'arrêt des travaux d'un stockage souterrain

Code minier

TITRE IV

DE L'EXECUTION DES TRAVAUX DE RECHERCHE ET D'EXPLOITATION DE MINES

CHAPITRE III

DE L'ARRET DES TRAVAUX MINIER ET DE LA PREVENTION DES RISQUES

(Loi n°99-245 du 30 mars 1999, art. 5)

Section I

De l'arrêt des travaux miniers

Article 91

La procédure d'arrêt des travaux miniers s'applique à une installation particulière lorsqu'elle cesse d'être utilisée pour l'exploitation, à l'ensemble des installations et des travaux concernés, lors de la fin d'une tranche de travaux et en tout état de cause à l'ensemble des installations et des travaux n'ayant pas fait l'objet de la procédure d'arrêt lors de la fin de l'exploitation. Les déclarations prévues par cette procédure doivent être faites au plus tard au terme de la validité du titre minier. A défaut, l'autorité administrative reste habilitée au-delà de ce terme à prescrire les mesures nécessaires.

Lors de la cessation d'utilisation d'installations mentionnées à l'article 77, ou lors de la fin de chaque tranche de travaux ou, au plus tard, lors de la fin de l'exploitation et de l'arrêt des travaux, l'explorateur ou l'exploitant fait connaître les mesures qu'il envisage de mettre en œuvre pour préserver les intérêts mentionnés à l'article 79, pour faire cesser de façon générale les désordres et nuisances de toute nature engendrés par ses activités, pour prévenir les risques de survenance de tels désordres, et pour ménager le cas échéant les possibilités de reprise de l'exploitation.

Dans le cas où il n'existe pas de mesures techniques raisonnablement envisageables permettant de prévenir ou faire cesser tout désordre, il incombe à l'explorateur ou à l'exploitant de rechercher si des risques importants susceptibles de mettre en cause la sécurité des biens ou des personnes subsisteront après l'arrêt des travaux. Si de tels risques subsistent, il étudie et présente les mesures, en particulier de surveillance, qu'il estime devoir être poursuivies après la formalité mentionnée au neuvième alinéa du présent article.

Dans tous les cas, l'explorateur ou l'exploitant dresse le bilan des effets des travaux sur la présence, l'accumulation, l'émergence, le volume, l'écoulement et la qualité des eaux de toute nature, évalue les conséquences de l'arrêt des travaux ou de l'exploitation sur la situation ainsi créée et sur les usages de l'eau et indique les mesures envisagées pour y remédier en tant que de besoin.

Au vu de la déclaration d'arrêt des travaux, après avoir consulté les conseils municipaux des communes intéressées et après avoir entendu l'explorateur ou l'exploitant, l'autorité administrative prescrit, en tant que de besoin, les mesures à exécuter et les modalités de réalisation qui n'auraient pas été suffisamment précisées ou qui auraient été omises par le déclarant. L'autorité administrative indique le délai dans lequel les mesures devront être exécutées.

Le défaut d'exécution des mesures prescrites entraîne leur exécution d'office par les soins de l'administration, aux frais de l'explorateur ou de l'exploitant.

La consignation entre les mains d'un comptable public des sommes nécessaires à leur réalisation peut être exigée et, le cas échéant, ces sommes peuvent être recouvrées comme en matière de créance étrangère à l'impôt et au domaine.

L'autorité administrative peut accorder à l'explorateur ou l'exploitant le bénéfice des dispositions des articles 71 à 73 pour réaliser les mesures prescrites jusqu'à leur complète réalisation.

Lorsque les mesures envisagées par l'explorateur ou l'exploitant, ou prescrites par l'autorité administrative en application du présent article, ont été exécutées, cette dernière en donne acte à l'explorateur ou à l'exploitant.

Cette formalité met fin à l'exercice de la police des mines telle qu'elle est prévue à l'article 77. Toutefois, s'agissant des activités régies par le présent code, et lorsque des risques importants susceptibles de mettre en cause la sécurité des biens ou des personnes apparaissent après la formalité prévue à l'alinéa

précédent, l'autorité administrative peut intervenir dans le cadre des dispositions de l'article 79 jusqu'à l'expiration du titre minier et, dans les cas prévus au premier alinéa de l'article 93, jusqu'au transfert à l'Etat de la surveillance et de la prévention des risques miniers.

Article 92

L'explorateur ou l'exploitant est tenu de remettre aux collectivités intéressées ou aux établissements publics de coopération intercommunale compétents les installations hydrauliques que ces personnes publiques estiment nécessaires ou utiles à l'assainissement, à la distribution de l'eau ou à la maîtrise des eaux pluviales, de ruissellement et souterraines. Les droits et obligations afférents à ces installations sont transférés avec elles.

Les installations hydrauliques nécessaires à la sécurité sont transférées à leur demande dans les mêmes conditions. Ce transfert est approuvé par le représentant de l'Etat ; il est assorti du versement par l'exploitant d'une somme correspondant au coût estimé des dix premières années de fonctionnement de ces installations, et dont le montant est arrêté par le représentant de l'Etat.

Les litiges auxquels donne lieu l'application du présent article sont réglés comme en matière de travaux publics.

Section 2

De la prévention et de la surveillance des risques miniers

Article 93

Lorsque des risques importants d'affaissement de terrain ou d'accumulation de gaz dangereux, susceptibles de mettre en cause la sécurité des biens ou des personnes, ont été identifiés lors de l'arrêt des travaux, l'exploitant met en place les équipements nécessaires à leur surveillance et à leur prévention et les exploite.

La fin de la validité du titre minier emporte transfert à l'Etat de la surveillance et de la prévention de ces risques, sous réserve que les déclarations prévues à l'article 91 aient été faites et qu'il ait été donné acte des mesures réalisées.

Ce transfert n'intervient toutefois qu'après que l'explorateur ou l'exploitant a transmis à l'Etat les équipements, les études et toutes les données nécessaires à l'accomplissement des missions de surveillance et de prévention et qu'après le versement par l'exploitant d'une somme correspondant au coût estimé des dix premières années de la surveillance et de la prévention des risques et du fonctionnement des équipements.

L'autorité administrative peut recourir aux dispositions des articles 71 et 72 pour permettre l'accomplissement par ses services des mesures de surveillance et de prévention des risques miniers, ou pour exécuter des travaux en vue d'assurer la sécurité des personnes et des biens.

L'autorité administrative informe annuellement les élus locaux réunis au sein d'un comité départemental ou interdépartemental de suivi des risques miniers du déroulement et des résultats de la surveillance de ces risques.

Décret n° 2006-649 du 2 juin 2006

TITRE III

SURVEILLANCE ADMINISTRATIVE ET POLICE DES MINES ET DES STOCKAGES SOUTERRAINS

Chapitre V

Arrêt définitif des travaux et d'utilisation d'installations minières et de stockage

Article 43. — La déclaration d'arrêt des travaux prévue par l'article 91 du code minier est adressée au préfet par l'exploitant, par lettre recommandée avec avis de réception.

Cette déclaration est adressée six mois au moins avant la fin des travaux d'exploration ou d'exploitation et de l'utilisation des installations mentionnées par ladite déclaration. Elle est accompagnée des documents et informations suivants selon la nature des travaux :

1° Des plans géoréférencés des travaux et installations faisant l'objet de la procédure d'arrêt, à des échelles adaptées, et de la surface correspondante ainsi que, notamment, s'il y a persistance de risques mentionnés au troisième alinéa de l'article 91 du code minier, les plans, coupes et documents relatifs à la description du gisement ou du stockage souterrain et des travaux réalisés ;

2° Un mémoire, accompagné de plans, exposant les mesures déjà prises et celles envisagées pour l'application des dispositions du deuxième alinéa de l'article 91 du code minier ; ce mémoire expose également, pour les mines, les méthodes d'exploitation utilisées et, pour les stockages souterrains, les méthodes de création, d'aménagement et d'exploitation des cavités ou des formations souterraines ;

3° Le bilan, prévu par le quatrième alinéa de l'article 91 du code minier, relatif aux effets, sur les eaux de toute nature, des travaux et de leur arrêt ;

4° Pour les mines, une étude ayant pour objet de déterminer si des risques importants, notamment ceux mentionnés à l'article 93 du code minier, subsisteront après la décision mentionnée au neuvième alinéa de l'article 91 du code minier, mettant fin à l'exercice de la police des mines dans les conditions prévues à l'alinéa suivant ; cette étude doit préciser la nature et l'ampleur des risques, les secteurs géographiques affectés ainsi que les raisons techniques et financières pour lesquelles ces risques ne peuvent être supprimés ;

5° Pour les mines, dans le cas où l'étude mentionnée au 4° ci-dessus a révélé la persistance de tels risques, l'indication des mesures de surveillance ou de prévention mentionnées au troisième alinéa de l'article 91 et au premier alinéa de l'article 93 du code minier, accompagnée d'un document descriptif et estimatif des moyens humains et matériels correspondants ainsi que, s'il y a lieu, de la liste des servitudes nécessaires à leur mise en oeuvre ;

6° Un récapitulatif, d'une part, des installations dont l'exploitation a cessé avant que leur arrêt ne soit soumis à procédure, d'autre part, des travaux et installations ayant précédemment fait l'objet de la procédure d'arrêt prévue par le code minier ;

7° Pour les mines, le cas échéant, les lettres d'information mentionnées aux articles 44 et 45 du présent décret, avec les documents qui y sont joints ;

8° Pour les stockages souterrains, le plan des terrains d'emprise du stockage précisant l'implantation, à la date de la déclaration, de tous les ouvrages débouchant au jour utilisés ou non pendant l'exploitation, ainsi qu'un mémoire comprenant les incidents et accidents d'exploitation du stockage et l'état final du site. Ce mémoire précise les mesures prises ou prévues pour assurer la protection des intérêts visés à l'article 79 du code minier. Il comporte notamment :

- sauf pour les stockages en nappe aquifère ou gisement déplété, les dispositions prises pour s'assurer du soutirage complet du produit stocké ainsi que les modalités de son évacuation, de son traitement éventuel ou élimination ;

- les conditions et les modalités de dégazage et/ou d'ennoyage des cavités exploitées en gaz ;

- une étude de dangers destinée à évaluer les risques engendrés par les opérations mentionnées à l'alinéa précédent ;

- une évaluation des autres risques susceptibles d'intervenir et la définition des mesures aptes à en assurer la maîtrise.

La déclaration indique si une partie ou la totalité des travaux et des installations a été utilisée pour des activités non couvertes par les dispositions du code minier ou si une telle utilisation est envisagée.

Lorsqu'elle ne concerne qu'une ou plusieurs des installations particulières mentionnées au premier alinéa de l'article 91 du code minier, la déclaration peut être présentée à tout moment. Dans ce cas, elle n'est accompagnée que de certains des documents ou informations énumérés ci-dessus dont la liste est fixée par l'arrêté prévu par l'alinéa ci-dessous.

Un arrêté du ministre chargé des mines précise les modalités techniques d'application du présent article.

Article 44. — Lorsque l'exploitant a présenté dans les délais réglementaires une demande de prolongation de son titre minier ou de son titre de stockage souterrain ou d'octroi d'un autre titre, il peut, au cas où cette demande est rejetée, reporter l'envoi de la déclaration prévue à l'article précédent à l'expiration d'un délai de six mois courant du jour de la notification de ce rejet.

Article 45. — Lorsque le préfet a constaté l'arrêt des travaux de recherche ou d'exploitation sans qu'aucune déclaration ait été faite, il enjoint à l'exploitant de faire cette déclaration dans le délai qu'il lui impartit, lequel ne peut excéder la limite de validité du titre minier.

Article 46. — La déclaration, complétée s'il y a lieu, à la demande du préfet, dans les conditions mentionnées à l'article 11 du présent décret, est adressée aux services intéressés et aux maires. Ces

services et les conseils municipaux des communes intéressées disposent respectivement de deux mois et de trois mois pour faire connaître leurs observations.

Au vu de ces observations, le préfet donne acte par arrêté de la déclaration ou communique à l'exploitant les autres mesures qu'il envisage de prescrire. L'exploitant dispose d'un délai d'un mois pour présenter ses éventuelles observations par écrit, directement ou par un mandataire. Après avoir recueilli, le cas échéant, ces observations, le préfet peut prescrire tout ou partie desdites mesures.

A défaut de prescription, dans le délai de six mois, si la déclaration concerne une ou plusieurs installations particulières ou des travaux de recherches de mines d'hydrocarbures liquides ou gazeux, ou de huit mois, dans les autres cas, l'exploitant procède à l'arrêt des travaux dans les conditions prévues par sa déclaration.

En cas d'impossibilité de statuer dans le délai, le préfet peut fixer, par arrêté motivé, un nouveau délai dont la durée ne peut excéder celle du délai initial.

L'exploitant adresse au préfet, en deux exemplaires, un mémoire descriptif des mesures prises. Après avoir fait établir un procès-verbal de récolement de ces mesures et constaté s'il y a lieu leur conformité aux prescriptions supplémentaires, le préfet donne acte par arrêté de l'exécution desdites mesures. Cette formalité met fin à l'application de la police des mines, sous réserve des cas mentionnés au dernier alinéa de l'article 91 du code minier.

Le cas échéant, le préfet est habilité à faire procéder au récolement partiel des mesures prises, pour une zone donnée, et à en donner acte à l'exploitant.

Les arrêtés préfectoraux sont, par extrait, publiés au recueil des actes administratifs de la préfecture et affichés dans les communes intéressées.

Article 47. — Dans le cas de défaut de déclaration après l'expiration du délai fixé par l'injonction prévue par l'article 45, le préfet fait d'office lever les plans et exécuter les travaux nécessaires. Ces mesures, prises aux frais de l'exploitant, peuvent excéder la durée de validité du titre minier ou du titre de stockage souterrain.

Article 48. — Pour l'application des dispositions du premier alinéa de l'article 92 du code minier, l'exploitant informe le ou les préfets intéressés, au plus tard lors de la présentation de la déclaration d'arrêt des travaux, de l'existence d'installations hydrauliques servant en tout ou en partie, et, dans ce dernier cas, en précisant dans quelle proportion, à l'assainissement, à la distribution de l'eau ou à la maîtrise des eaux pluviales, de ruissellement et souterraines, ainsi que des droits et obligations afférents à ces installations. Il en donne, pour chacune d'elles, la description, la localisation, le plan ainsi que le coût de la dernière année de fonctionnement effectif.

Le préfet fait publier au recueil des actes administratifs de la préfecture la mention que ces informations ont été transmises par l'exploitant et qu'il peut en être pris connaissance à la préfecture.

Les collectivités intéressées ou les établissements publics de coopération intercommunale compétents mentionnés à l'article 92 du code minier disposent d'un délai de six mois à compter de la publication prévue au précédent alinéa pour faire savoir s'ils demandent le transfert de tout ou partie des installations. A défaut de réponse dans le délai imparti, ils sont réputés avoir renoncé à demander le transfert. Dans ce cas, l'exploitant confirme au préfet son intention de cesser l'exploitation desdites installations.

Article 49. — Pour l'application des dispositions du deuxième alinéa de l'article 92 du code minier, l'exploitant informe, dans les mêmes conditions qu'à l'article précédent, le ou les préfets intéressés de l'existence d'installations hydrauliques servant à assurer la sécurité. Il donne, pour chacune d'elles, la description, la localisation, le plan ainsi que, d'une part, le coût de la dernière année de fonctionnement effectif et, d'autre part, l'estimation du coût des dix années de fonctionnement à venir.

Le préfet fait publier au recueil des actes administratifs de la préfecture la mention que ces informations ont été transmises par l'exploitant, et qu'il peut en être pris connaissance à la préfecture.

Les collectivités intéressées ou les établissements publics de coopération intercommunale compétents mentionnés à l'article 92 du code minier disposent d'un délai de six mois à compter de la publication prévue au précédent alinéa pour faire savoir s'ils demandent le transfert de tout ou partie des installations. Le transfert s'effectue moyennant le versement de la somme mentionnée au deuxième alinéa de l'article 92 du code minier. Un arrêté du ministre chargé du budget et du ministre chargé des mines fixe les modalités de calcul de cette somme.

Il prévoit notamment, d'une part, la nature des coûts à prendre en compte, d'autre part, le recours à une expertise contradictoire en cas de désaccord entre l'estimation faite par le préfet et celle faite par l'exploitant. Cet arrêté fixe, en outre, le mode de calcul de la somme au cas où le transfert porte sur des installations n'ayant pas comme seule fonction d'assurer la sécurité.

Les installations objet du transfert doivent être en état normal de fonctionnement. Le transfert est approuvé par arrêté préfectoral.

A défaut de réponse dans le délai imparti des collectivités ou des établissements publics de coopération intercommunale, ceux-ci sont réputés avoir renoncé à demander le transfert. Dans ce cas, l'exploitant continue à assurer le fonctionnement des installations, sous le contrôle des autorités administratives dans le cadre des pouvoirs que celles-ci détiennent au titre de la police des mines, jusqu'à l'intervention de la formalité prévue à l'avant-dernier alinéa de l'article 91 du code minier et, au-delà, au titre de la police générale définie par les articles L. 2212-1 à L. 2212-5 du code général des collectivités territoriales.

L'exploitant peut se décharger de son obligation en demandant le transfert à l'Etat des installations en cause, dans les mêmes conditions que celles prévues par les troisième et quatrième alinéas du présent article. Toutefois, pour le calcul de la somme mentionnée au deuxième alinéa de l'article 92 du code minier, il est tenu compte de la durée pendant laquelle l'exploitant a fait fonctionner lui-même les installations en cause depuis la formalité prévue par l'avant-dernier alinéa de l'article 91 du code minier.

Article 50. — Le transfert à l'Etat des équipements, des études et des données nécessaires à l'accomplissement des missions de surveillance et de prévention, prévu par le deuxième alinéa de l'article 93 du code minier, est effectué par l'exploitant à titre gratuit. Les équipements objet du transfert doivent être en état normal de fonctionnement.

La somme mentionnée au troisième alinéa de l'article 93 du code minier est calculée selon des modalités fixées par arrêté conjoint du ministre chargé du budget et du ministre chargé des mines qui prévoit notamment, d'une part, la nature des coûts à prendre en compte, d'autre part, le recours à une expertise contradictoire, en cas de désaccord entre l'estimation faite par le préfet et celle faite par l'exploitant.

Article 51. — Les règles relatives à l'arrêt définitif des travaux conduits dans le cadre d'une autorisation d'exploitation mentionnée à l'article 21 du code minier sont fixées conformément aux dispositions des articles 68-2 et 68-20 du code minier. Elles se substituent à celles prévues par les articles 43 à 50 du présent décret.

Intérêts à préserver lors de l'abandon d'un stockage souterrain

Code minier

TITRE IV

DE L'EXECUTION DES TRAVAUX DE RECHERCHE ET D'EXPLOITATION DE MINES

CHAPITRE II

DE L'EXERCICE DE LA SURVEILLANCE ADMINISTRATIVE ET DES MESURES A PRENDRE EN CAS D'ACCIDENT

Article 79

(Loi n°94-588 du 15 juillet 1994, art. 19)

Les travaux de recherches ou d'exploitation d'une mine doivent respecter les contraintes et les obligations afférentes à la sécurité et la santé du personnel, à la sécurité et la salubrité publiques, aux caractéristiques essentielles du milieu environnant, terrestre ou maritime, à la solidité des édifices publics et privés, à la conservation des voies de communication, de la mine et des autres mines, et plus généralement aux intérêts de l'archéologie et aux intérêts énumérés par les dispositions de l'article 1er de la loi du 31 décembre 1913 sur les monuments historiques, de l'article 4 de la loi du 2 mai 1930 ayant pour objet de réorganiser la protection des monuments naturels et des sites de caractère artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque, de l'article 1er de la loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature, et de l'article 2 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau ainsi qu'aux intérêts agricoles des sites et des lieux affectés par les travaux et par les installations afférents à l'exploitation.

Lorsque les intérêts mentionnés à l'alinéa précédent sont menacés par ces travaux, l'autorité administrative peut prescrire à l'explorateur ou à l'exploitant de mines toute mesure destinée à assurer la protection de ces intérêts, dans un délai déterminé.

En cas de manquement à ces obligations à l'expiration du délai imparti, l'autorité administrative fait procéder en tant que de besoin d'office à l'exécution des mesures prescrites, aux frais de l'explorateur ou de l'exploitant.

Dispositions relatives au retrait d'un titre de stockage souterrain

Décret n° 2006-648 du 2 juin 2006

TITRE VII

LES ACTES METTANT FIN AUX TITRES

Chapitre Ier

Le retrait des titres

Article 54. – La demande d'acceptation de renonciation à un titre est adressée au ministre chargé des mines. Elle est accompagnée du ou des arrêtés préfectoraux donnant acte de l'exécution des mesures envisagées ou prescrites dans le cadre de la procédure d'arrêt des travaux prévue à l'article 91 du code minier, ou de la justification que les installations et travaux ont fait l'objet d'une procédure d'arrêt lors de la fin de l'exploitation ainsi que, le cas échéant, de la justification de l'accomplissement des formalités prévues au « premier alinéa de l'article 93 » du même code. Le ministre en accuse réception selon les modalités prévues par le décret du 6 juin 2001 susvisé.

Elle est instruite, selon les cas, suivant la procédure décrite aux articles 47 et 48.

L'acceptation d'une renonciation est prononcée par arrêté du ministre chargé des mines.

Le silence gardé pendant plus de dix-huit mois par le ministre chargé des mines sur la demande d'acceptation de renonciation à une concession ou à un permis d'exploitation dans un département d'outre-mer vaut décision de rejet. Il en va de même pour le silence gardé pendant plus de quinze mois sur une demande d'acceptation de renonciation à un permis exclusif de recherches

Code minier

TITRE VI bis

DU RETRAIT DES TITRES DE RECHERCHE ET D'EXPLOITATION ET DE LA RENONCIATION A CES DROITS

Article 119-1

(Loi n° 94-588 du 15 juillet 1994, art. 11)

Tout titulaire d'un permis exclusif de recherches, d'une concession de mines, ou d'une des autorisations prévues aux articles 98 et 99, tout titulaire d'une autorisation d'amodiation de titre minier peut, après mise en demeure, se voir retirer son titre ou autorisation dans l'un des cas suivants :

- a) Défaut de paiement, pendant plus de deux ans, des redevances minières dues à l'Etat, aux départements et aux communes ;
- b) Cession ou amodiation non conforme aux règles du code ;
- c) Infractions graves aux prescriptions de police, de sécurité ou d'hygiène ; inobservation des mesures imposées en application de l'article 79 ;
- d) *(Loi du 3 janvier 2003)* Pour les permis de mines ou les autorisations de recherches de mines : inactivité persistante ou activité manifestement sans rapport avec l'effort financier souscrit et, plus généralement, inobservation des engagements souscrits visés dans l'acte institutif ; pour les permis exclusifs de recherches de stockages souterrains : inactivité persistante ;
- e) *(Loi du 3 janvier 2003)* Pour les titres ou les autorisations d'exploitation : absence ou insuffisance prolongée d'exploitation manifestement contraire aux possibilités du gisement ou à l'intérêt des consommateurs et non justifiée par l'état du marché, exploitation effectuée dans des conditions telles qu'elle est de nature à compromettre sérieusement l'intérêt économique, la conservation et l'utilisation ultérieure du gisement et, en matière de stockage souterrain du gaz naturel, l'accomplissement des missions de service public relatives à la sécurité d'approvisionnement, au maintien de l'équilibre des réseaux raccordés et à la continuité de fourniture de gaz naturel ;
- f) Inobservation des dispositions de l'article 81 ;
- g) Inobservation des conditions fixées dans l'acte institutif ; non respect des engagements mentionnés à l'article 25 ;
- h) Pour les concessions de mines : inexploitation depuis plus de dix ans.(1)

La décision de retrait est prononcée par arrêté préfectoral en ce qui concerne les autorisations ou permis prévus aux articles 98 et 99, par arrêté ministériel dans les autres cas, selon les modalités fixées par décret en Conseil d'Etat.

(1) Ne s'applique aux concessions existantes que si un délai de 30 ans s'est écoulé depuis leur institution (loi n° 77-620 du 16 juin 1977, article 37).

ANNEXE B

RECUEIL D'ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES
CONCERNANT LA REGLEMENTATION DES STOCKAGES
SOUTERRAINS A L'ETRANGER

B1 - ELEMENTS RELATIFS A LA REGLEMENTATION DES ETATS-UNIS

Au niveau fédéral, les E.U. disposent d'un certain nombre d'organismes qui contribuent à encadrer les activités de stockage souterrain. Il s'agit notamment de :

- L'EIA (Energy Information Administration) : agence rattachée au Ministère de l'Energie dont la vocation est de rassembler une information objective relative aux stockages souterrains et de la mettre à disposition du congrès et du public (<http://www.eia.doe.gov/>) ;
- La FERC (Federal Energy Regulatory Commission) : commission dont la vocation est de réguler le transport de l'électricité, du gaz naturel et du pétrole d'un état des E.U. à un autre (<http://www.ferc.gov/about/ferc-does.asp>). Cette commission doit en particulier approuver la mise en place et l'abandon des infrastructures (incluant le stockage) de gaz naturel, liquéfié ou non. Si l'infrastructure ne concerne que l'Etat où elle est implantée, elle est soumise à sa juridiction propre ;
- Le Conseil de Protection des Eaux Souterraines (Ground Water Protection Council - GWPC - http://www.gwpc.org/about_us/about_us.htm) : celui-ci a pour mission de favoriser la protection et la conservation des ressources d'eaux souterraines. Ce conseil préconise en particulier des recommandations concernant toute injection de fluide associée à l'exploitation ou au stockage de gaz ou d'hydrocarbure (http://www.gwpc.org/e-library/e-library_documents/e-library_documents_uic/classii.htm). Le GWPC a également produit un document intitulé « Injection Wells : An introduction to their use, operation, and regulation » classant les différents types de puits suivant leur usage et précisant la réglementation à laquelle ils sont soumis dans chaque cas.

Par ailleurs chaque état dispose de sa propre législation :

- l'Etat de New-York met en ligne une législation concernant les stockages de gaz sur le site : <http://public.leginfo.state.ny.us/menuf.cgi>, choisir « Laws of New York », puis « ENV « Environmental Conservation », article 23 « Mineral resources », titre 13 « Underground storage of gas »)⁶⁵ ;
- la division « pétrole et gaz » de l'Etat du Texas précise sa législation sur le site (<http://www.rrc.state.tx.us/divisions/oq/uic/manual/HTML/index.html>).

⁶⁵ Nous proposons ci-après un extrait d'un texte de loi de l'Etat de New-York traduit en français : « En liaison avec l'abandon de tout réservoir souterrain de stockage pour lequel on a accordé une autorisation [...], l'administration exigera, sous réserve que cela soit réalisable, que le site soit remis dans un état proche de l'état initial avant stockage et ne constituant pas une menace actuelle ou future pour la santé et la sûreté des personnes et des biens. Au cas où l'opérateur ne remettrait pas les lieux dans un état satisfaisant, le DHE (« Department of Health and Environment ») se chargera de réaliser les opérations nécessaires en facturant les frais à l'opérateur du stockage ».

- l'Etat du Kansas dispose également d'une procédure détaillée décrivant la fermeture et l'abandon des stockages d'hydrocarbures en cavités salines. Celle-ci a également été élaborée par le « Department of Health & Environment » de l'Etat du Kansas (<http://www.kdheks.gov/pdf/regs/28-45.pdf>). L'article 28-45-8⁶⁶ décrit en particulier les opérations d'abandon et de fermeture des puits (incluant la réalisation des bouchons de ciment).

B.2 - ELEMENTS RELATIFS A LA REGLEMENTATION DU CANADA

Au niveau fédéral, nous avons consulté les sites de l'office national de l'énergie (<http://www.neb-one.gc.ca>) et de l'agence canadienne d'évaluation environnementale (<http://www.acee.gc.ca/>). Un contact (jmurray@neb-one.gc.ca) avec l'ONÉ (« Office National de l'Energie ») nous a permis d'apprendre que le Canada ne possède pas de réglementation au niveau fédéral pour le stockage de gaz naturel ou d'hydrocarbures et que ces activités sont réglementées au niveau provincial. Les trois agences provinciales qui réglementent les infrastructures de stockage les plus importantes au Canada sont la Commission de l'énergie de l'Ontario (www.oeb.gov.on.ca), l'Alberta Energy and Utilities Board (www.eub.ca) et « The Nova-Scotia (Nouvelle-Ecosse) Department of Energy » (<http://www.gov.ns.ca/>).

Dans la province de l'Ontario, les puits de stockage et l'exploitation du gaz naturel sont assujettis à la Loi sur les ressources en pétrole, en gaz et en sel

⁶⁶ Nous proposons ci-après un extrait du texte dans sa traduction française : « **28-45-8. Procédure d'abandon et de scellement des puits.** *Un puits de stockage d'hydrocarbure qui aurait été inactif pendant 3 ans ou plus doit être considéré comme étant abandonné et doit être scellé sauf dérogation du DHE (« Department of Health & Environment »). Un descriptif des opérations de scellement du puits doit être envoyé aux autorités selon le formulaire K.A.R. 28-45-9. Le scellement des tous les puits de stockage d'hydrocarbure doit suivre la procédure suivante :*

- La cavité creusée dans le sel ou dans d'autres formations doit être remplie avec de la saumure ou toute autre substance approuvée par le DHE. Les stockages d'hydrocarbures qui n'aurait pas été utilisés pour stocker des hydrocarbures depuis 2 ans ou plus doivent être contrôlés pour s'assurer que le niveau de saumure atteint le toit de la couche de sel ;*
- Si la position de la cavité a évolué dans la couche de sel et si une reconnaissance n'a pas été faite depuis 2 ans, un log de densité de type « gamma-ray » ou un log sonique « sonic survey ») devra être réalisé avant le scellement du puits pour déterminer la position du toit de la cavité ;*
- Un bouchon sera mis en place à la base du cuvelage de production, ce cuvelage étant rempli de ciment jusqu'à la surface. Au-delà de la surface, le cuvelage doit être coupé et retiré à moins qu'une autre méthode ne soit approuvée par le DHE. En cas d'obstruction du cuvelage, et d'impossibilité de mis en place du bouchon à la base du cuvelage, le DHE sera immédiatement avisée et une méthode de scellement alternative sera indiquée ou approuvée par DHE avant de démarrer toutes autres opérations relatives au scellement du puits ;*
- La conversion d'un puits de stockage d'hydrocarbure abandonné en puits d'observation sera approuvée par le DHE si un packer, connecté à la surface, est placé au fond du cuvelage de production et qu'un annulaire est inclus de manière à mettre à l'air libre le puits pour contrôler la présence d'hydrocarbure ou de saumure ;*
- Un rapport détaillé des opérations de scellement devra être transmis au DHE dans les 30 jours après la fin des opérations selon un formulaire fourni par le DHE ;*
- Un plan, montrant la localisation 3D et l'élévation par rapport au niveau de la mer des têtes de puits doit être préparé par un professionnel habilité. Le plan doit être soumis à la division de l'environnement dans les 30 jours suivant la fin des opérations de scellement »*

(<http://www.mnr.gov.on.ca/MRN/rpgs/rules.htm>). La norme Z341⁶⁷ de la CSA (« Canadian Standards Association ») intitulée « Storage of Hydrocarbons in Underground Formations », fixe les exigences particulières relatives à l'exploitation des installations de stockage souterrain.

La Nouvelle Ecosse fournit des directives en ce qui concerne la construction, l'exploitation et la fermeture des stockages de gaz et d'hydrocarbure (<http://www.gov.ns.ca/just/regulations/regs/uhstorag.htm>). Un guide de bonne pratique relatif aux stockages souterrains d'hydrocarbures a également été rédigé par « The Nova Scotia Department of Energy » avec l'aide de la « Canadian Standards Association » (<http://www.gov.ns.ca/energy/files/drm/d6dfe73c-03e5-43ce-8bd4-75d5292caafc.pdf>). L'objectif de ce guide est de proposer des règles pour la conception, la construction, l'exploitation et l'abandon des équipements souterrains de stockage d'hydrocarbures. Un chapitre spécifique est consacré à la fermeture et l'abandon des stockages incluant une liste d'informations à fournir aux autorités pour leur permettre d'évaluer l'efficacité des opérations de fermeture⁶⁸.

B.3 - ELEMENTS RELATIFS A LA REGLEMENTATION EUROPEENNE

Les principaux pays réalisant des stockages souterrains en Europe sont l'Allemagne (41), la France (28), l'Italie (10), la République Tchèque (8), la

⁶⁷ Cette norme établit les conditions minimales à respecter pour la conception, la construction, l'exploitation, l'entretien, l'abandon, et la sécurité d'un stockage d'hydrocarbure en milieu poreux ou en cavité saline. Les équipements concernés incluent le matériel de tête de puits, les équipements de surface (y compris les équipements de surveillance), les équipements de sécurité (y compris les systèmes d'arrêt de secours). Les produits concernés par cette norme incluent le pétrole brut, le diesel, le gaz naturel, le méthane, l'éthane, le propane, le butane, et d'autres hydrocarbures ou mélanges d'hydrocarbures.

⁶⁸ Extrait du "Code de bonne pratique relatif au stockage souterrain d'hydrocarbures" (§ 3.13.20 Soumission des informations pour la fermeture et l'abandon) : « L'agrément du programme d'abandon doit être obtenu auprès de la Commission. Des informations suffisantes doivent être soumises à la Commission pour permettre l'évaluation de l'efficacité du programme d'abandon proposé.

Pour faire candidature à un agrément d'abandon d'un site de stockage, les opérateurs soumettront, dans un format autorisé par la Commission, les informations suivantes : a) le programme de fermeture de la caverne ; b) le programme de remise en état du site ; c) les dispositions liées à la sécurité publique ; d) la confirmation par le Ministre de l'Environnement et du Travail de l'achèvement de remise en état du site ; et e) le consentement du propriétaire du terrain pour l'abandon du site.

Dans le cadre des termes et conditions d'un agrément, les opérateurs peuvent se voir demander de soumettre, dans un format autorisé par la Commission, les types suivants d'informations après fermeture et abandon d'un aménagement de stockage : a) les résultats de mesure au sonar faite dans la caverne ; b) les résultats d'essai d'intégrité mécanique ; c) les copies de toutes les diagraphies réalisées ; d) les documents relatifs aux bouchons de ciment mis en place pour l'abandon ; e) les documents relatifs aux traitements de surface des puits ; f) les documents relatifs à la remise en état de la surface du site ; et g) toute autre exigence des termes et conditions d'agrément.

La confirmation de l'achèvement de la remise en état du site doit être soumise à la Commission après la remise en état de la surface de tout puits ou aménagement de stockage abandonné. La confirmation doit comprendre une preuve de la remise en état conformément aux termes et conditions fournis dans l'agrément pour abandon du puits ou de l'aménagement de stockage ».

Pologne (6), la Roumanie (5), la Hongrie (5), le Royaume-Unis (4), les Pays Bas (3), l'Espagne (2) et la Belgique⁶⁹.

La législation européenne en matière de stockages souterrains de gaz ou d'hydrocarbures consiste essentiellement en la Directive 96/82/CE relative à la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses (dite « Seveso II »), modifiée par la directive 2003/105/CE. Ces directives ont conduit la plupart des pays de la communauté européenne à actualiser leur législation.

Nous avons rassemblé ci-après, pour chacun des pays européens listés ci-dessus, les principaux textes législatifs et réglementaires en rapport avec le stockage souterrain.

- Allemagne

- Federal Water Act (19 August 2002) last modified 8 September 2004.
- Federal Mining Law dated 13 August 1980
- Mineral Oil Tax Act (as Amended 11 October 1978).
- Act on Stockpiling of Petroleum And Petroleum Products Of 25 July 1978

- Italie (<http://www.autorita.energia.it/>)

- Environmental Code of 2006
- Annex of the Environmental Code of 2006
- Legislative Decree No. 275 Of 1992 on Concessions for Water.

- République Tchèque

- Décrets relatifs au stockage souterrain de gaz :
<http://download.mpo.cz/get/27616/28953/315377/priloha001.doc>
<http://download.mpo.cz/get/27616/28953/315378/priloha002.doc>
<http://download.mpo.cz/get/27616/28953/315379/priloha003.doc>
- Mining Act No. 61 of 1988 (As Amended By Act No. 313 Of 2006).
- Mining Act No. 44 of 1988 (As Amended By Act No. 186 Of 2006)

- Pologne

- Directive 94/22/EC dated 30 May 1994 on Conditions for Granting And Using Authorizations for the Prospection, Exploration and Production of Hydrocarbons and Competent Authorities Specified Pursuant to Article 10 of Directive 94/22/EC dated 26 April 2006.
- Geological and Mining law and Regulations dated 1 January 2006

⁶⁹ D'après Nulens et al. [2003], la législation belge préconise la démarche suivante (l'article traite de la fermeture d'un stockage de gaz naturel dans d'anciennes mines de charbon – voir § 3.3) : « Le site est fermé ou abandonné lorsque l'exploitant termine ses actions sur ce stockage, après accord des autorités compétentes. Le site abandonné doit répondre à un certain nombre de critères d'acceptabilité tels que : assurer la déplétion du site (le stockage volumétrique zéro doit être atteint) ; assurer la fermeture des accès aux vides et leur pérennité à long terme ; installer et maintenir des dispositifs de contrôle temporaires sur une période à convenir ; étudier l'impact de l'abandon du stockage sur l'environnement du site ».

- Regulation of the Minister of the Environment dated 27 June 2005 on the Detailed Requirements for Deposit Development Plans.
- Roumanie
 - Mining Law No. 61 of 1998 as amended by law No. 284 Of 2005
 - Mining Law No. 85/18.03.2003 dated 27 March 2003
 - Norms for Applying the Mining Law No. 85/2004 Dated 14 October 2004.
 - The Mining Law No. 61/1998.
 - Water Law No. 107 of 25 September 1996.
 - Norms (Regulations) for Applying the Mining Law, 1995.
- Hongrie
(<http://www.eh.gov.hu/home/html/index.asp?msid=1&sid=0&HKL=1&lng=1>)
 - Act XII (12) of 11 March 1997 on Amendment of Act XLVIII (48) of 1993 on Mining.
 - Governmental Decree No. 132/1993 dated 29 September 1993 Re: the Hungarian Geological Survey.
 - Governmental Decree No. 115/1993/VIII.12. of 1993 Amending Mining Law of 1993 (Act No. XLVIII).
 - Mining Law of 1993 (Act XLVIII).
 - Act XVI of 1991 Establishing Rules to Grant Concessions for Mining Research, Exploitation, and Related Secondary Activities.
- Grande Bretagne⁷⁰ (<http://ofreg.nics.gov.uk/>)
 - Mines & Quarries Act, 1954
 - Un point sur la législation courante applicable au stockage de gaz « onshore » et « offshore » est proposé par le cabinet Denton Wilde Sapte LLP (www.dentonwildesapte.com & <http://www.dentonwildesapte.com/assets/g/gasstorage.pdf>)
 - Législation spécifique à l'Ecosse :
 - <http://www.scotland.gov.uk/Resource/Doc/1057/0029448.pdf>
 - <http://www.sepa.org.uk/pdf/guidance/ppg/ppg27.pdf>
 - Code of Practice for the owners and operators of Underground Storage Tanks (& Pipelines) (<http://www.scotland.gov.uk/Resource/Doc/47063/0014625.pdf>)

⁷⁰ Un contact (Donald.Dobson@hse.gsi.gov.uk) avec le HSE « Health & Safety Executive » (<http://www.hse.gov.uk/>) nous a permis d'apprendre qu'il n'y avait aucun cas d'abandon de stockage de gaz ou d'hydrocarbures actuellement enregistré en Grande Bretagne. Le contact précise que dans le cas d'un abandon, l'ensemble des forages devra être scellé en respectant les mêmes standards que ceux utilisés pour les puits de production de gaz et d'hydrocarbure rassemblés dans le document "Guidelines for the Suspension and Abandonment of Wells" (Issue 2 - July 2005) » fourni par the UK Offshore Operators Association (à présent « Oil & Gas UK »). Une copie de ce guide peut être obtenue sur le site www.ukooa.co.uk.

- Consultation Paper on the Implementation of Regulatory Requirements of Council Directive 1999/31/EC on the Landfill of Waste (<http://www.scotland.gov.uk/consultations/environment/cplw-03.asp>)
- Pays Bas (<http://energie.geld-gids.nl/dte.html>)
 - Mining Act of the Netherlands Effective 1 January 2003.
 - Act of 18 March 1996, amending certain Mining Acts in connection with the Implementation of Directive 94/22/EC of the European Parliament and of the Council of 30 May 1994 on the Conditions for Granting and Using Authorizations for the Prospection, Exploration and Production of Hydrocarbons (OJ No L 164).
 - Commission Report to the Council on Directive 94/22/EC Of 30 May 1994 on the Conditions for Granting and Using Authorizations for the Prospection, Exploration and Production of Hydrocarbons.
- Espagne (<http://www.cne.es/cne/Home>)
 - Law 7/1994 dated 18 May 1994, Modifying Law 19/1991, dated 7 November 1991, on Water Treatment Agency Reform.
 - the Mining Law of 21 July 1973.

ANNEXE C

DISPOSITIONS DEFINIES PAR LE REGLEMENT GENERAL
DES INDUSTRIES EXTRACTIVES (RGIE) CONCERNANT LA
FERMETURE DES PUIITS OU SONDAGES

Un certain nombre de dispositions relatives à la fermeture de puits ou de sondages a été introduit dans le Règlement Général des Industries Extractives par le décret n° 2000-278 du 22 mars 2000 et sa circulaire d'application du 22 mars 2000.

Nous reportons ci-après le texte intégral des articles 49 à 51 du décret n° 2000-278. Nous illustrons également, à travers la Figure C.1, les principales étapes réglementaires de la procédure de fermeture définitive d'un puits.

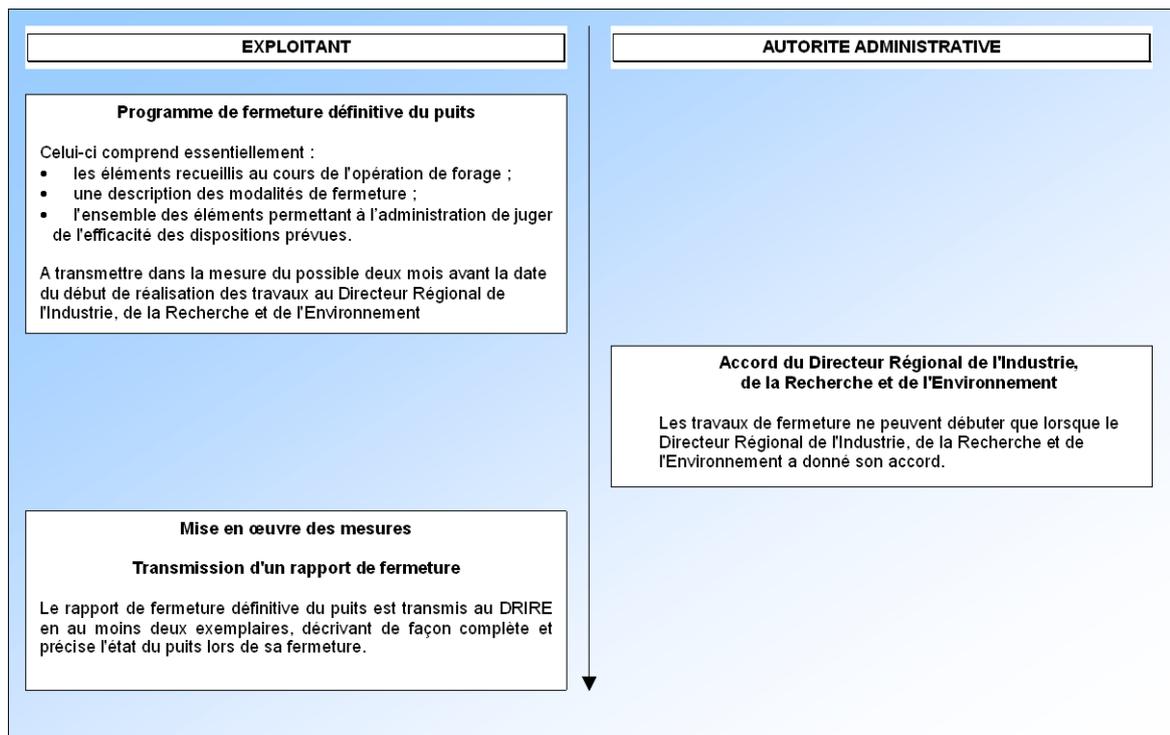


Figure C.1 : Procédure de fermeture définitive d'un puits définie dans le règlement général des Industries extractives

**Décret no 2000-278 du 22 mars 2000
complétant le règlement général des industries extractives
institué par le décret no 80-331 du 7 mai 1980 modifié**

Art. 1er. — Il est introduit dans le règlement général des industries extractives institué par le décret no 80-331 du 7 mai 1980 un titre intitulé : Recherche par forage, exploitation de fluides par puits et traitement de ces fluides (FO-1P-2-R), dont les dispositions sont annexées au présent décret et qui se substitue au titre Forages (FO-1-R).

...

**ANNEXE : RECHERCHE PAR FORAGE, EXPLOITATION DE FLUIDES
PAR PUIITS ET TRAITEMENT DE CES FLUIDES
PROTECTION DU PERSONNEL
FO-1P-2-R**

...

Section 4 : Dispositions relatives à la fermeture des puits ou sondages

Article 49. — Fermeture définitive du puits

Les dispositions à mettre en oeuvre au moment de la fermeture d'un sondage ou d'un puits, ainsi que le schéma de fermeture, sont définies dans le dossier d'ouverture de travaux et le programme de forage.

Néanmoins, le programme définitif de fermeture est porté par l'exploitant, dans la mesure du possible deux mois avant la date du début de réalisation des travaux, à la connaissance du directeur régional de l'industrie, de la recherche et de l'environnement, avec tous les éléments recueillis au cours de l'opération de forage et ceux lui permettant de juger de l'efficacité des dispositions prévues.

Lorsque le forage s'est révélé improductif ou pour toute autre raison, l'exploitant peut décider de mettre à profit la présence de l'appareil de forage sur le site pour procéder à la fermeture de l'ouvrage. Dans ce cas, l'exploitant fait parvenir, suffisamment à l'avance, au directeur régional de l'industrie, de la recherche et de l'environnement le programme définitif de fermeture avec l'ensemble des éléments lui permettant de juger de l'efficacité des dispositions prévues.

Dans les deux cas précédemment cités, les travaux de fermeture ne peuvent débiter que lorsque le directeur régional de l'industrie, de la recherche et de l'environnement a donné son accord.

Toutes dispositions sont prises pour séparer, par des moyens dont l'efficacité n'est pas remise en cause avec le temps, d'une part les niveaux perméables à débits potentiels entre eux et, d'autre part, les séries de niveaux entre lesquels un débit incontrôlé est acceptable, des autres niveaux à isoler. Les mêmes dispositions sont prises pour isoler le puits ou le sondage de la surface du sol ou du fond de la mer.

Les produits destinés à réaliser l'isolation des niveaux perméables doivent, à l'exception de l'épaisseur des cuvelages, et une fois la complétion enlevée, occuper la totalité de la section, initialement forée, du puits.

En cas d'impossibilité, dûment justifiée par l'exploitant, d'enlever l'ensemble de la complétion, la partie restante de celle-ci, lorsqu'elle se trouve dans la zone où doit s'effectuer une isolation, est considérée comme un cuvelage pour l'application de la règle mentionnée à l'alinéa précédent.

Les produits destinés à réaliser les isolations constituent, une fois mis en place, une barrière solide efficace en vue de s'opposer à la circulation des divers fluides.

Les produits d'obturation intervenant dans la constitution d'une barrière occupent les longueurs minimales suivantes : 50 mètres dans un cuvelage ou dans un découvert n'étant pas affecté par des cavages, 100 mètres dans : les annulaires, l'espace existant entre le cuvelage et le terrain, les découverts cavés, les puits fortement déviés et les zones à pertes.

Ces longueurs sont comptées, vers le haut, à partir du toit et, vers le bas, à partir du mur, du niveau perméable à isoler lorsque les barrières sont réalisées à cheval sur ce niveau ou, lorsque les espacements entre des niveaux voisins à isoler sont insuffisants pour l'application de cette règle, vers le haut, à partir du toit du niveau supérieur et, vers le bas, à partir du mur du niveau inférieur, à isoler.

L'isolation du puits, de la surface du sol ou du fond de la mer, au-dessus du niveau perméable le plus proche du sol ou du fond de la mer, est constituée soit par une barrière pour laquelle les longueurs précisées précédemment sont doublées, soit par deux barrières respectant les règles dimensionnelles des barrières d'isolation des niveaux perméables entre eux. La barrière sommitale est le plus proche possible de la surface du sol ou du fond de la mer.

Chaque barrière est disposée dans l'ouvrage à une cote telle que la pression, qui en cas de mise en défaut de la barrière immédiatement inférieure régnerait à sa base, soit inférieure à la pression de craquage des terrains à ce niveau.

La conception des barrières d'isolation, les modes opératoires et le contrôle de la mise en place des divers éléments constitutifs d'une barrière d'isolation, et notamment le bouchon situé dans le cuvelage interne, prennent notamment en compte les risques de déplacements de ces éléments.

Tous les éléments posés au fond de la mer pour la réalisation du forage doivent être enlevés et les cuvelages, coupés ou dévissés au niveau du fond de la mer ; l'ensemble de ces éléments doivent être récupérés.

Article 50. – Fermeture provisoire d'un puits ou d'un sondage

Sauf autorisation du préfet compétent et aux conditions qu'il fixe, la durée de fermeture provisoire du puits ne doit pas dépasser vingt-quatre mois pour les puits en mer et quarante-huit mois pour les puits à terre.

La fermeture provisoire ne peut être réalisée que dans la mesure où :

- les cuvelages sont dans un état correct ;
- les cimentations entre cuvelage et terrain assurent l'isolation des niveaux perméables.

L'exploitant fait parvenir, suffisamment à l'avance, au directeur régional de l'industrie, de la recherche et de l'environnement le programme de fermeture provisoire avec l'ensemble des éléments lui permettant de juger de l'efficacité des dispositions prévues ; les travaux de fermeture provisoire ne peuvent débuter que lorsque le directeur régional de l'industrie, de la recherche et de l'environnement a donné son accord.

Par rapport aux dispositions applicables pour une fermeture définitive, ne sont mises en place que la barrière destinée à isoler les niveaux perforés ou ouverts et une barrière d'isolation en tête de puits ou de sondage.

Les longueurs de ces deux barrières pourront être inférieures à celles imposées pour les fermetures définitives, sous réserve qu'elles assurent une efficacité suffisante ; par ailleurs, les espaces annulaires entre cuvelages, vides ou remplis de liquide, peuvent être laissés en l'état.

Dans tous les cas, le bouchon de fond est surmonté d'un fluide capable d'équilibrer la pression du réservoir.

Entre la fermeture provisoire et la fermeture définitive, l'utilisation ou la réutilisation du puits, l'exploitant exerce une surveillance de l'ouvrage dont la nature et les modalités sont soumises aux dispositions de l'article 31, cinquième alinéa.

Article 51. – Rapport de fermeture

L'exploitant transmet au directeur régional de l'industrie, de la recherche et de l'environnement le rapport de fermeture provisoire ou définitive du puits, en au moins deux exemplaires, décrivant de façon complète et précise l'état du puits lors de sa fermeture.

ANNEXE D

RAPPEL DE QUELQUES PRINCIPES SUR LES
STOCKAGES SOUTERRAINS ET SUR LA
CONFIGURATION D'UN STOCKAGE EN PHASE
D'EXPLOITATION

D1 - INTRODUCTION

Le stockage souterrain de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés ou de produits chimiques à destination industrielle a vu un développement croissant au cours de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. Cette pratique constitue aujourd'hui, avec d'autres outils (modulation des contrats d'approvisionnement, interruptibilité, "swing de production", achat-vente sur les marchés spot), un moyen essentiel pour les pays industrialisés de pallier les écarts entre l'offre et la demande d'énergie et de garantir en toutes circonstances la sécurité d'approvisionnement.

On distingue 3 types de stockages : les stockages en milieu poreux (c'est-à-dire en aquifères ou en gisements déplétés), les stockages en cavités salines et les stockages en cavités minées (revêtues ou non). Ces différents types de stockages sont utilisés dans des proportions différentes suivant les propriétés du sous-sol propres à chaque région et la stratégie des pays concernés en matière de sécurité des approvisionnements énergétiques.

A l'échelle mondiale, les données indiquent une forte prédominance des stockages en milieux poreux. La Figure D.1 montre cette répartition en 2001 pour les stockages de gaz naturel. Il apparaît que ceux-ci sont principalement de types « gisements déplétés » (460 sur les 614 stockages recensés) et dans une moindre mesure, de types « aquifères » (80). On trouve également un certain nombre de stockages en cavités salines (67).

Les cavités minées sont très rarement utilisées pour stocker le gaz naturel. On les utilise de préférence pour le stockage de GPL. Elles sont principalement situées dans les pays dont le sous-sol ne présente pas les caractéristiques autorisant les autres types de stockage (pays scandinaves, Corée du Sud) ou dans les pays présentant un savoir-faire historique en la matière (France, voir Figure D.2).

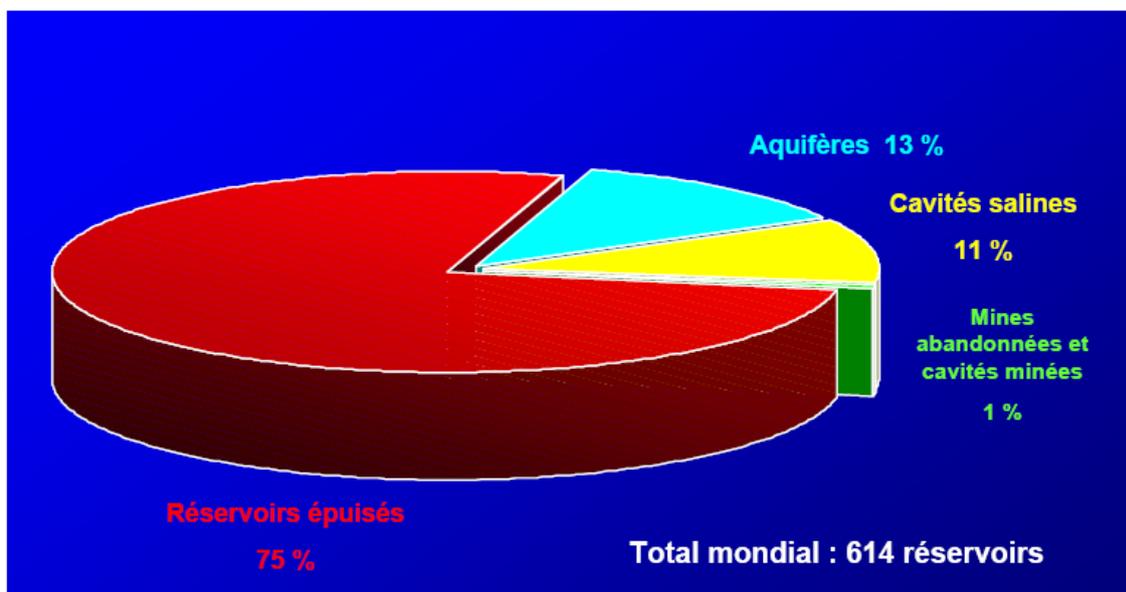


Figure D.1 : Répartition des stockages de gaz naturel dans le monde en 2001
[Lecarpentier et Chabrelie, 2006]

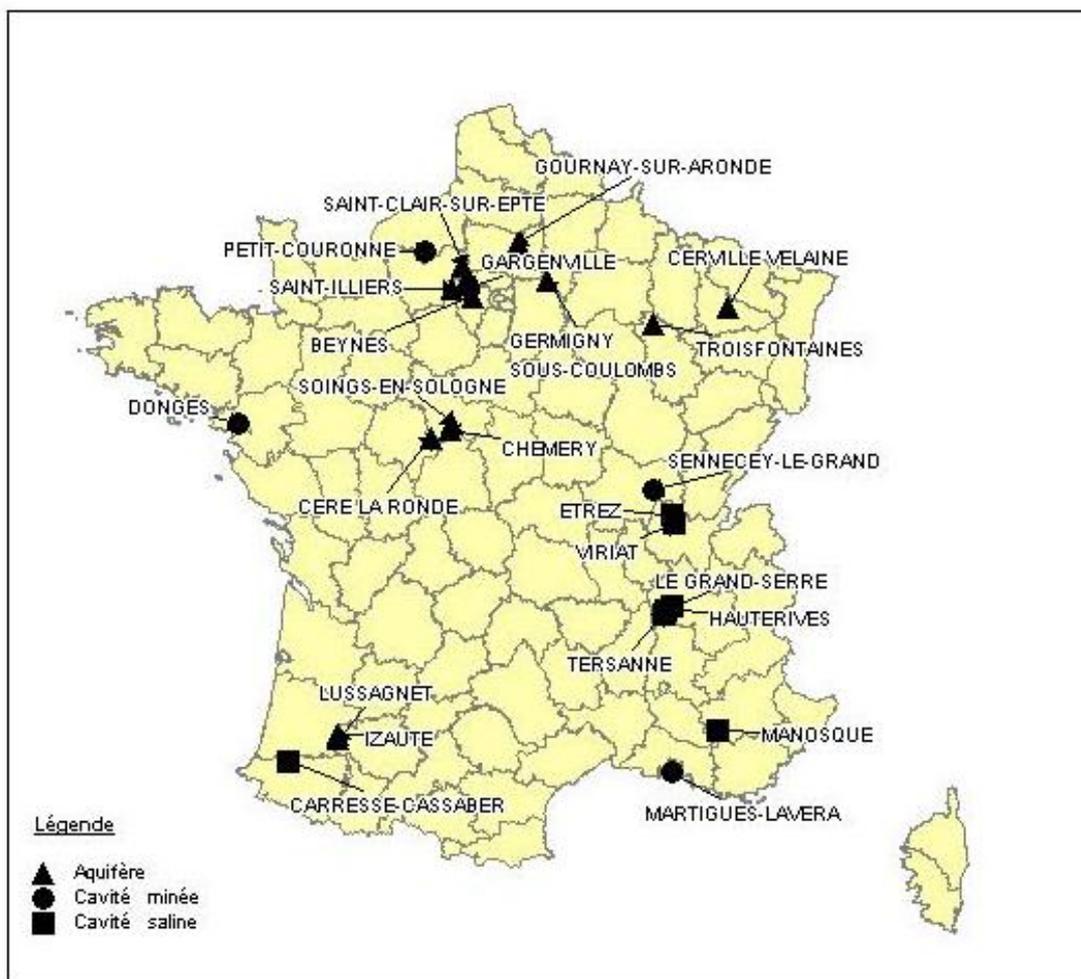


Figure D.2 : Localisation des sites de stockage souterrain en France (2006)

Les substances stockées peuvent être classées en trois grandes catégories :

- le gaz naturel ;
- les hydrocarbures liquides, c'est-à-dire à l'état liquide lorsqu'ils sont à pression atmosphérique : le pétrole brut appartient à cette catégorie, tout comme le fuel, l'essence ou le naphta ;
- les hydrocarbures ou produits chimiques liquéfiés, c'est-à-dire rendus à l'état liquide après avoir été mis sous pression. Appartiennent à cette catégorie les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) tels que le butane ou le propane ainsi que le propylène et l'éthylène.

Nous fournissons ci-après un descriptif plus détaillé de chaque type de stockage.

D2 - STOCKAGE EN MILIEUX POREUX

Utilisée exclusivement pour le gaz naturel, la technique du stockage en milieu poreux consiste à utiliser les vides présents dans une couche géologique poreuse et perméable, et surmontée d'une couche imperméable (appelée « couverture ») qui interdit toute migration du gaz vers la surface (voir Figure D.3).

Il existe deux grands types de stockages en milieux poreux : les stockages « en aquifères », c'est-à-dire dans des couches n'ayant jamais piégé d'hydrocarbures et les stockages « en gisements déplétés », c'est-à-dire dans des gisements de gaz ou de pétrole déplétés et réutilisés à des fins de stockage.

Dans le cas d'un stockage en gisement déplété, l'étanchéité de la couverture est a priori garantie (à condition que celle-ci n'ait pas été compromise par des sollicitations excessives lors de l'exploitation) puisqu'elle a conditionné l'existence et la stabilité du réservoir d'hydrocarbures pendant plusieurs millions d'années. Un stockage en aquifère dit « fermé », c'est-à-dire dont la couverture (généralement en forme d'anticlinal) constitue un scellement à la fois vertical et latéral, a une configuration proche d'un gisement d'hydrocarbures et offre a priori de bonnes garanties de confinement. Il existe d'autres types de stockages dits « ouverts » (sans confinement latéral), qui peuvent éventuellement générer un risque un peu plus important de migration latérale du gaz. Toutefois, ce type de configuration n'est pas utilisé en France.

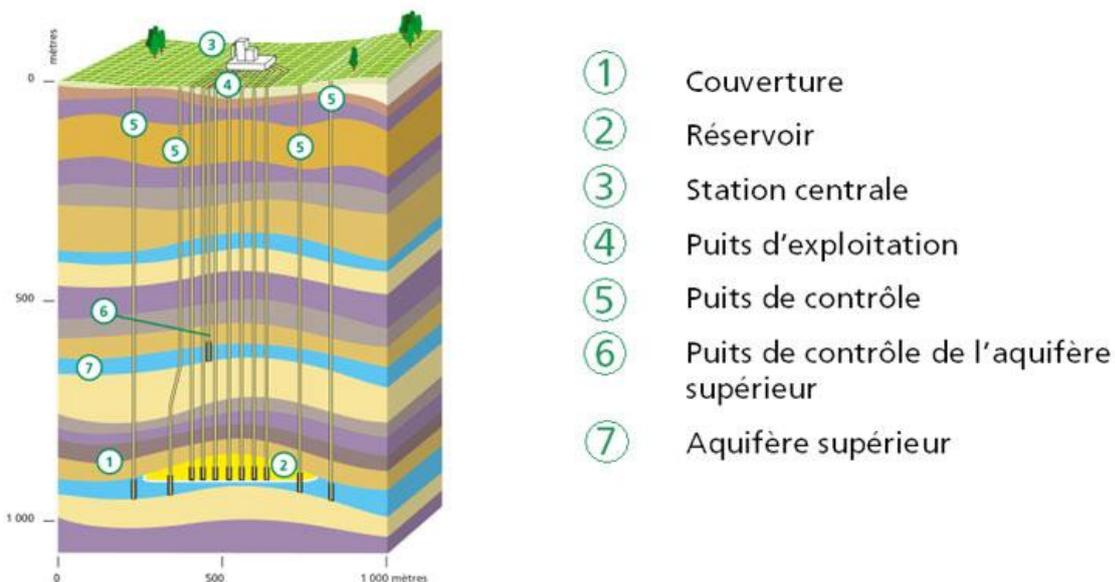


Figure D.3 : Coupe schématique d'un stockage en milieu poreux
(source : <http://www.gdf.fr/>)

En phase de stockage, le gaz est comprimé et injecté à l'état gazeux dans le réservoir à une pression supérieure à la pression hydrostatique⁷¹ : il repousse le

⁷¹ soit, pour un stockage localisé à une profondeur $P = 1000$ m, une pression supérieure à $\rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot P = 10$ MPa.

fluide occupant initialement les interstices de la roche (eau et/ou hydrocarbure selon le type de stockage) de sorte à être maintenu prisonnier entre la couche supérieure étanche et la nappe de fluide sous-jacent. Au déstockage, le gaz est soutiré sous l'effet de sa propre pression et le fluide d'origine peut reprendre sa place. Pour des raisons de perméabilité des terrains et de conditions d'exploitation, une quantité de l'ordre de la moitié du gaz stocké reste à demeure dans le stockage : il s'agit du gaz coussin.

L'avantage principal de ce type de réservoir est qu'il permet de stocker de très grandes quantités de gaz, c'est-à-dire plusieurs milliards de mètres cubes (voir tableau D.1). Son inconvénient majeur est sa faible réactivité, liée à l'inertie importante des mouvements du gaz lors des opérations d'injection ou de soutirage. D'autre part, il nécessite une configuration géologique particulière.

Le stockage en milieu poreux est le mode de stockage le plus répandu en France (13 sites sur 28 soit 46% des stockages souterrains). Néanmoins, sa proportion est moins importante en France qu'à l'échelle mondiale. La localisation géographique des sites de stockage en milieu poreux en France est indiquée sur la Figure D.2. Tous les stockages en milieux poreux actuellement exploités en France sont de type « aquifère ». Il existe néanmoins un projet de transformer le gisement dépleted de Trois-Fontaines (Meuse et Haute-Marne) en stockage.

Exploitant	Nom du stockage (département)	Type de stockage	Année de mise en service	Profondeur du toit (en m/sol)	Stockage total (en m ³)	Surface du périmètre de stockage (en km ²)
GDF	BEYNES profond (78)	Aquifère	1975	740	800 000 000	17.4
GDF	BEYNES supérieur (78)	Aquifère	1956	405	475 000 000	17.4
GDF	CERE LA RONDE (37)	Aquifère	1993	905	1 200 000 000	61.8
GDF	CERVILLE VELAINE (54)	Aquifère	1970	470	1 500 000 000	28.4
GDF	CHEMERY (41)	Aquifère	1968	1120	7 000 000 000	52.5
GDF	GERMIGNY SOUS COULOMBS (77)	Aquifère	1982	892	2 600 000 000	252.2
GDF	GOURNAY SUR ARRONDE (60)	Aquifère	1976	750	2 200 000 000	116.0
TIGF	IZAUTE (32)	Aquifère	1981	510	3 000 000 000	19.9
TIGF	LUSSAGNET (40)	Aquifère	1957	545	2 400 000 000	15.5
GDF	SAINT CLAIR SUR EPTE (95)	Aquifère	1979	742	2 200 000 000	84.0
GDF	SAINT ILLIERS (78)	Aquifère	1965	470	1 500 000 000	17.1
GDF	SOINGS EN SOLOGNE (41)	Aquifère	1981	1135	760 000 000	32.0
GDF	TROIS FONTAINES (51)	Gisement dépleted	PROJET	1634	1 500 000 000	180

Tableau D.1 : Les stockages souterrains en milieux poreux en France (2006)

D3 - STOCKAGE EN CAVITES SALINES

D.3.1 - Principe du stockage

La technique du stockage en cavité saline consiste à créer par dissolution à l'eau douce (lessivage) une « caverne » souterraine artificielle de grande taille dans une roche sédimentaire constituée uniquement ou pour partie de cristaux de chlorure de sodium (sel gemme ou halite). Les propriétés physiques et chimiques de cette roche, sa très faible porosité (de l'ordre du %), sa faible perméabilité (inférieure à 10^{-17} m^2 soit 10^{-10} m/s ou encore 10^{-2} milliDarcy sous confinement), sa neutralité chimique et sa bonne tenue mécanique (en particulier résistance à la compression), y permettent le stockage de différents types d'hydrocarbures liquides ou gazeux tels que le gaz naturel, le pétrole brut, les gaz de pétrole liquéfiés (butane, propane) ou certains produits chimiques à destination industrielle (éthylène, propylène).

Les stockages en cavités salines (Figure D.4) sont constitués généralement de plusieurs cavités creusées dans des formations salifères de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur (en couches ou en dômes). La profondeur moyenne du toit de ces cavités en France est d'environ 1000 m (voir Tableau D.2) mais celle-ci peut varier entre 300 m (Manosque) et 1400 m (Tersanne). Les dimensions de ces cavités sont de plusieurs centaines de mètres de hauteur et de plusieurs dizaines de mètres de diamètre, soit un volume géométrique allant de 50 000 à 500 000 m^3 environ. Les hydrocarbures y sont introduits par des puits à des pressions variant de 4 à 22 MPa environ, selon la profondeur des cavités et le type de produit stocké.

Le stockage en cavité saline présente l'avantage de permettre des extractions de produit très rapides, ce qui en fait un stockage particulièrement adapté à la couverture des besoins d'extrême pointe. En revanche, sa capacité de stockage est beaucoup plus faible que celle d'un stockage en milieu poreux.

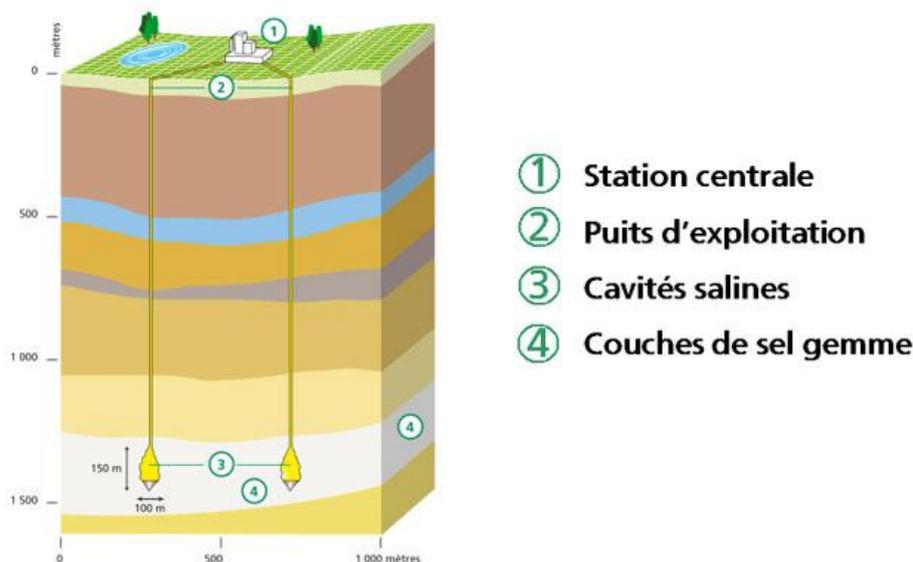


Figure D.4 : Coupe schématique d'un stockage en cavités salines
(source : <http://www.gdf.fr/>)

D.3.2 – Les méthodes d'exploitation

L'exploitation consiste en l'alternance de phases d'injection (stockage) et de soutirage (déstockage) à un rythme plus ou moins rapide selon les fluctuations de la demande et la fonction du stockage concerné (couverture des besoins d'extrême pointe ou de la demande saisonnière). Deux principes d'exploitation sont utilisés. Ceux-ci sont décrits ci-après :

- L'exploitation par balancement de saumure : Le premier principe d'exploitation consiste à compenser toute quantité de produit injectée ou soutirée par l'annulaire par une quantité équivalente en volume de saumure soutirée ou injectée par la colonne centrale. Cette méthode par compensation ou balancement de saumure est employée pour l'exploitation des fluides peu compressibles (hydrocarbures liquides et gaz de pétrole liquéfié). Bien que tout-à-fait envisageable pour le gaz, elle n'est pas pratiquée dans les faits en raison d'inconvénients majeurs tels que (1) la nécessité de disposer d'une réserve de saumure pratiquement saturée de volume égal à celui des cavités, (2) problèmes de corrosion et de cristallisation inhérents à la saumure, (3) débits d'injection de saumure requis très importants pour un soutirage rapide du gaz. Et ce, malgré deux sérieux avantages : (a) la possibilité de récupérer la quasi-totalité du gaz donc pas de gaz irrécupérable ou « gaz coussin », et (b) le maintien d'une valeur élevée de la pression en cavité ce qui est favorable à la stabilité.

- L'exploitation par compression-détente : Le second principe d'exploitation, utilisé exclusivement dans le cas du gaz naturel, est basé sur la compressibilité élevée de celui-ci. La cavité est alors exploitée par compression-détente, à l'instar d'une bouteille de gaz comprimé. Ce type d'exploitation permet de s'affranchir de tout maniement de saumure et par-là même de tout lien avec l'industrie du sel dès que le premier remplissage avec évacuation de saumure est achevé. Il permet également d'utiliser la place occupée par la colonne centrale d'évacuation de saumure pour la production du gaz d'où des pertes de charge moindres autorisant des débits très importants. Dans cette configuration, dès lors que le premier remplissage avec évacuation de saumure est terminé, la colonne centrale devient inutile et est donc le plus souvent extraite sous pression (opération de « snubbing »). Une vanne de sécurité est alors ancrée par travail au câble (« wire-line ») dans un siège incorporé à cet effet dans la colonne de production à quelques dizaines de mètres de profondeur. Le puits est alors dans sa configuration d'exploitation.

Exploitant	Nom du stockage (département)	Mise en service	Profondeur du toit(en m/sol)	Nb de cavités actuelles	Nb de cavités en projet	Volume des cavités actuelles / en projet	Produit stocké	Périmètre de stockage (en km ²)
STORENGY	ETREZ (01)	1979	1400	21		3 771 000 m ³ (n)	Gaz naturel	28
STORENGY	HAUTERIVES (26)	2011	1160	1	4	500 000 m ³ / 2 250 000 m ³ (n)	Gaz naturel	9.5
GEO METHANE	MANOSQUE (04)	1993	1000	7	4	2 200 000 m ³ (n)	Gaz naturel	29.1
STORENGY	TERSANNE (26)	1970	1400	14		1 566 000 m ³ (n)	Gaz naturel	15.0
TOTAL	CARRESSE CASSABER (64)	1960 (arrêté)	300	3		43 350 m ³	GPL (propane)	-
GEOSEL	MANOSQUE (04)	1967	300 à 900	32		13 000 000 m ³	HC liquides, pétrole brut, GPL	-
TOTAL	VIRIAT (01)	1970	1000	2		150 000 m ³	Pdt chim liquéfiés (éthylène)	-
NOVAPEX	GRAND SERRE (26)	1972	1250	1		60 000 m ³	Pdt chim liquéfiés (propylène)	0.8

Tableau D.2 : Liste des stockages souterrains en cavités salines en France (2006)

D4 - STOCKAGE EN CAVITES MINEES

D4.1 - Cavités minées non revêtues

Il s'agit de la technique la plus répandue et la seule mise en oeuvre actuellement en France pour ce qui concerne les stockages en cavités minées (Tableau D.3). Ce type de stockage, utilisé pour stocker des produits liquides ou liquéfiés, est constitué d'un réseau de chambres creusées à une profondeur de 70 à 200 m dans une roche compétente le plus souvent fracturée : granite, gabbro, granodiorite, andésite, gneiss ou encore craie. Ces chambres prennent souvent la forme d'un réseau de tunnels placés dans un contexte hydrogéologique garantissant le confinement du produit.

En effet, l'étanchéité de ce type de stockage est basée sur le principe du confinement hydraulique. Ce sont donc les paramètres hydrauliques locaux qui conditionnent la profondeur de la zone de stockage. Pour éviter que les produits stockés ne s'échappent il faut que la cavité soit en dépression par rapport à la nappe⁷². On impose ainsi un écoulement continu de l'eau de l'aquifère vers la

⁷² Le niveau de dépression nécessaire pour assurer le confinement hydraulique du stockage a été étudié par de nombreux auteurs. [Berest et al, 1982] ont notamment mis en évidence, dans le cas d'un stockage d'hydrocarbure liquéfié (butane et propane) pour lequel coexistent une phase vapeur et une phase liquide, que le niveau de dépression nécessaire est influencé de manière sensible par la géométrie du stockage d'une part, et par la valeur de la pression capillaire (ou surpression d'entrée du gaz dans le milieu environnant) d'autre part.

cavité ce qui a pour effet de maintenir les hydrocarbures à l'intérieur de la cavité et ainsi d'éviter les fuites.

Pour garantir une bonne étanchéité du stockage, on met le plus souvent en place un rideau d'eau (Figure D.5). Celui-ci permet de maintenir une pression en eau constante et suffisante autour du stockage et d'éviter que des brèches apparaissent dans la barrière hydraulique. Le rideau d'eau est composé d'une galerie principale d'alimentation à laquelle sont connectés un certain nombre de forages, formant ainsi une sorte de peigne. L'étendue spatiale du rideau d'eau couvre l'ensemble des installations souterraines de stockage.

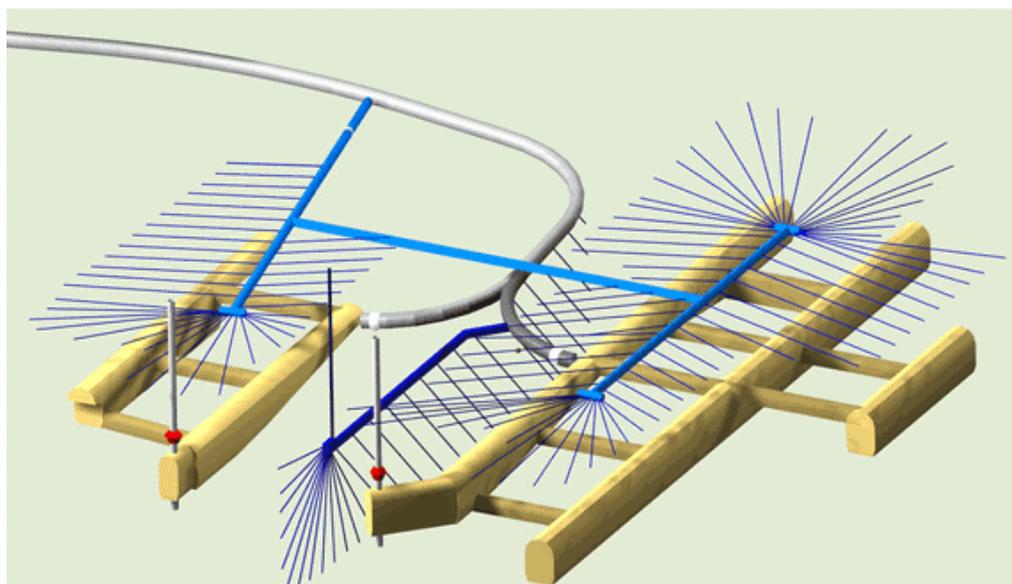


Figure D.5 : La technique du « rideau d'eau » pour le stockage en cavité minée (source : <http://www.geostockgroup.com>)

Nom de l'exploitant	Nom du stockage	Année de mise en service	Profondeur du toit (en m/sol)	Nb de cavités	Stock total (en m ³)	Produit stocké	Surface du périmètre de stockage (en km ²)
GEOGAZ LAVERA	LAVERA (13)	1984	80	2	183 000	GPL (butane)	-
GEOGAZ LAVERA	LAVERA (13)	1971	110	1	120 000	GPL (propane)	-
PRIMAGAZ	LAVERA (13)	1998	142	1	98 200	GPL (propane)	-
SOCIETE DES PETROLES SCHELL	PETIT COURONNE (76)	1966	150	2	65 000	GPL (butane, propane)	-
TOTAL	DONGES (44)	1977	120	2	77 000	GPL (propane)	-
GEOVEXIN	GARGENVILLE (78)	1977	130	1	130 000	GPL (propane)	-
BUTAGAZ	SENECEY LE GRAND (71)	1996	133	1	8 000	GPL (propane)	-

Tableau D.3 : Liste des stockages souterrains en cavités minées en France (2006)

D4.2 - Cavités minées revêtues

Depuis le début des années 1990, un nouveau type de cavités minées est en développement pour le stockage du gaz naturel. Il s'agit de cavités minées revêtues. Deux sites pilotes ont actuellement été mis en service en Corée et en Suède. Ces deux sites correspondent à deux concepts de cavités minées revêtues, développées respectivement par les sociétés Géostock [Amantini et al., 2005 ; Sung-Soo et al., 2007] et Sydkrafts [Johansson, 2004 ; Glamheden & Curtis, 2006].

Dans le cas des infrastructures de stockage développées par Géostock, le gaz est stocké sous forme liquide (GNL : Gaz Naturel Liquéfié) à très basse température. (Figure D.6 et Figure D.7).

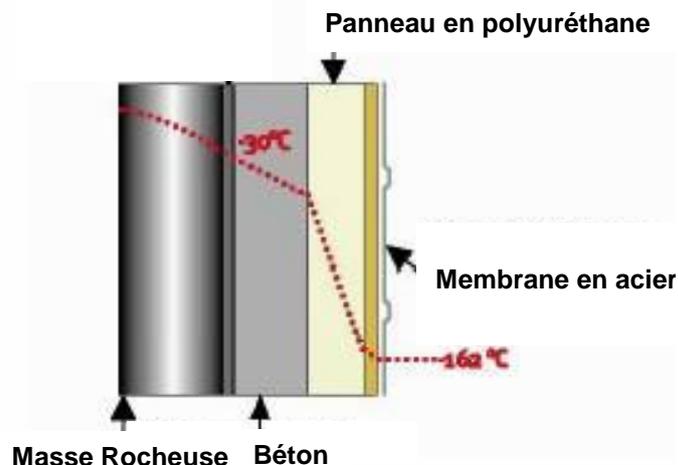


Figure D.6 : Système de confinement et d'isolation thermique (<http://www.geostockgroup.com>)

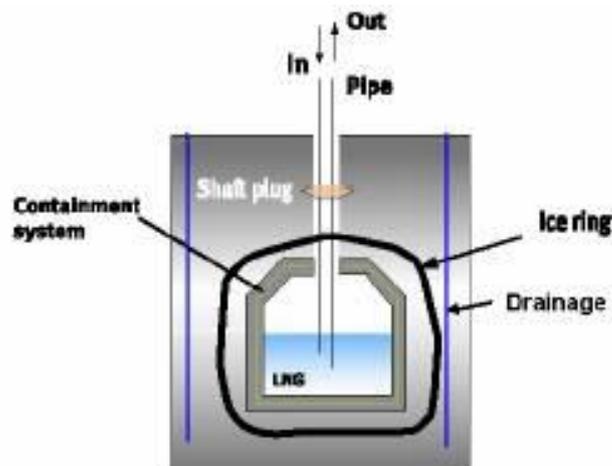


Figure D.7 : Système de drainage et anneau de glace imperméable (<http://www.geostockgroup.com>)

Dans le cas de Sydkrafts, le concept développé utilise une géométrie de cavité cylindrique limitée à la base et au sommet par une demi-sphère [Johansson, 2004 ; Glamheden & Curtis, 2006] (Figure D.8).

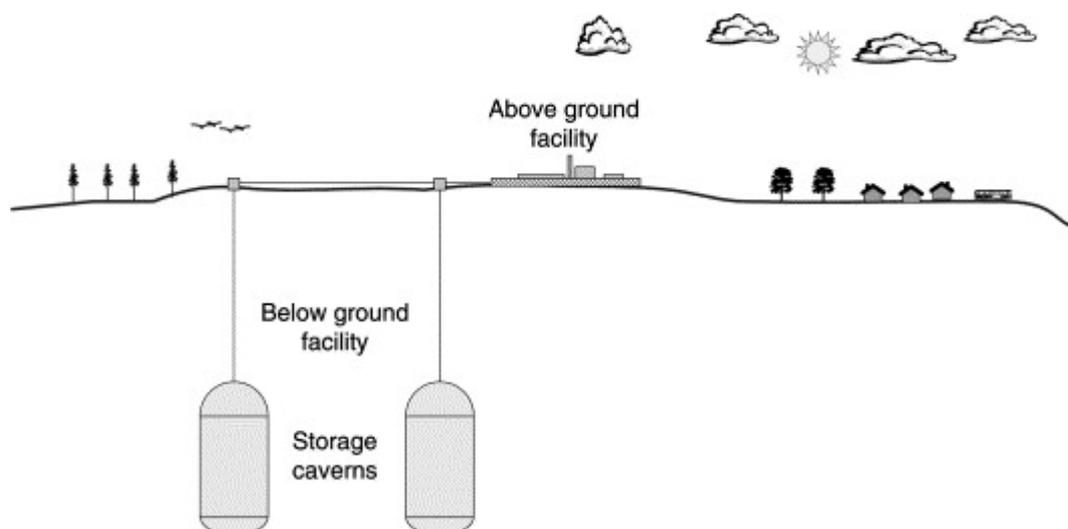


Figure D.8 : Illustration schématique du concept de stockage LRC
[Glamheden & Curtis, 2006]

D.5 – LES INFRASTRUCTURES DE STOCKAGE

D.5.1 - Les puits d'exploitation

Les puits d'exploitation assurent alternativement l'injection et le soutirage du produit dans le stockage. Ils sont constitués principalement :

- d'un ensemble de tubes concentriques (cuvelage) traversant les différents terrains jusqu'au stockage ;
- d'une colonne de production située à l'intérieur du cuvelage, permettant la circulation du produit lors des phases d'injection et de soutirage. Celle-ci comprend notamment :
 - un tubage descendant jusqu'au niveau du réservoir,
 - un certain nombre d'éléments de sécurité (organe de sectionnement à sécurité positive isolant automatiquement le puits en cas de chute de pression anormale en tête de puits, obturateur annulaire permettant d'assurer l'ancrage du tubage sur le cuvelage et l'isolement de l'espace annulaire compris entre les deux avec le réservoir) ;
- d'éléments de fond comprenant notamment :
 - un dispositif de raccordement à la colonne de production,
 - des crépines permettant d'éviter l'entraînement de corps solides lors du soutirage,
 - un dispositif de fermeture et d'ancrage en bas de la dernière crépine ;
- d'une tête de puits située à la surface et comportant un certain nombre de robinets manuels pour les opérations de maintenance.

D.5.2 – Les puits de contrôle

Pour les stockages en milieu poreux, un certain nombre de puits de contrôle permettent de surveiller la zone du réservoir et son confinement. Il existe différents types de puits de contrôle (Figure D.9) :

- les puits de contrôle dans la bulle de gaz : ils sont situés dans la bulle de gaz, près de sa limite, et permettent de mesurer notamment le niveau de l'interface eau/gaz ;
- les puits de contrôle périphériques : ils sont situés à l'extérieur de la bulle de gaz ou en limite de celle-ci, et permettent de faire des mesures de pression ou des prélèvements d'échantillons d'eau. L'atteinte par le gaz de certains de ces puits, situés dans des directions critiques du développement de la bulle, entraîne le ralentissement ou l'arrêt de l'injection ;
- les puits de contrôle des niveaux supérieurs : ils permettent de détecter une éventuelle venue du gaz dans des niveaux supérieurs poreux et perméables grâce à un suivi régulier de la pression et de la composition de l'eau.

Les puits de contrôle en gaz ou susceptibles de passer en gaz sont équipés, comme les puits d'exploitation, d'un organe de sectionnement à sécurité positive, qui est fermé dans les conditions normales et n'est ouvert que pour les travaux de contrôle de l'équipe chargée de l'exploitation des puits.

D.5.3 – Les canalisations ou collectes

Chaque puits d'exploitation est relié à la station par une canalisation appelée collecte du puits.

Ces canalisations sont caractérisées par leur diamètre, longueur, épaisseur et une pression maximale de service (PMS). Les longueurs de ces collectes dépendent naturellement de l'emplacement du puits (sur certains sites, ces collectes peuvent être longues de plusieurs kilomètres).

D.5.4 - La station centrale

Les installations qui composent la station centrale peuvent être regroupées selon le type de fonction qu'elles remplissent (dépendant de la nature du produit exploité et du type de stockage) :

- Gestion du réservoir : il s'agit de gérer (mesurer et contrôler) les débits d'injection et de soutirage dans le réservoir ;
- Traitement du produit soutiré : selon la nature du produit exploité et du type de stockage, un traitement du produit soutiré peut être nécessaire. Pour le stockage de gaz en aquifère, le traitement comprend une désulfuration et une déshydratation du gaz. On peut également citer les systèmes de réfrigération ;
- Traitement du produit à injecter : avant d'injecter le produit dans le réservoir, un certain nombre de traitements peut être nécessaire. Pour le stockage en aquifère, des installations permettent notamment la compression du gaz. Pour le stockage en cavité minée, une installation de réfrigération du produit (GPL) peut être mise en œuvre.
- Interconnexion avec les réseaux extérieurs au site de stockage.

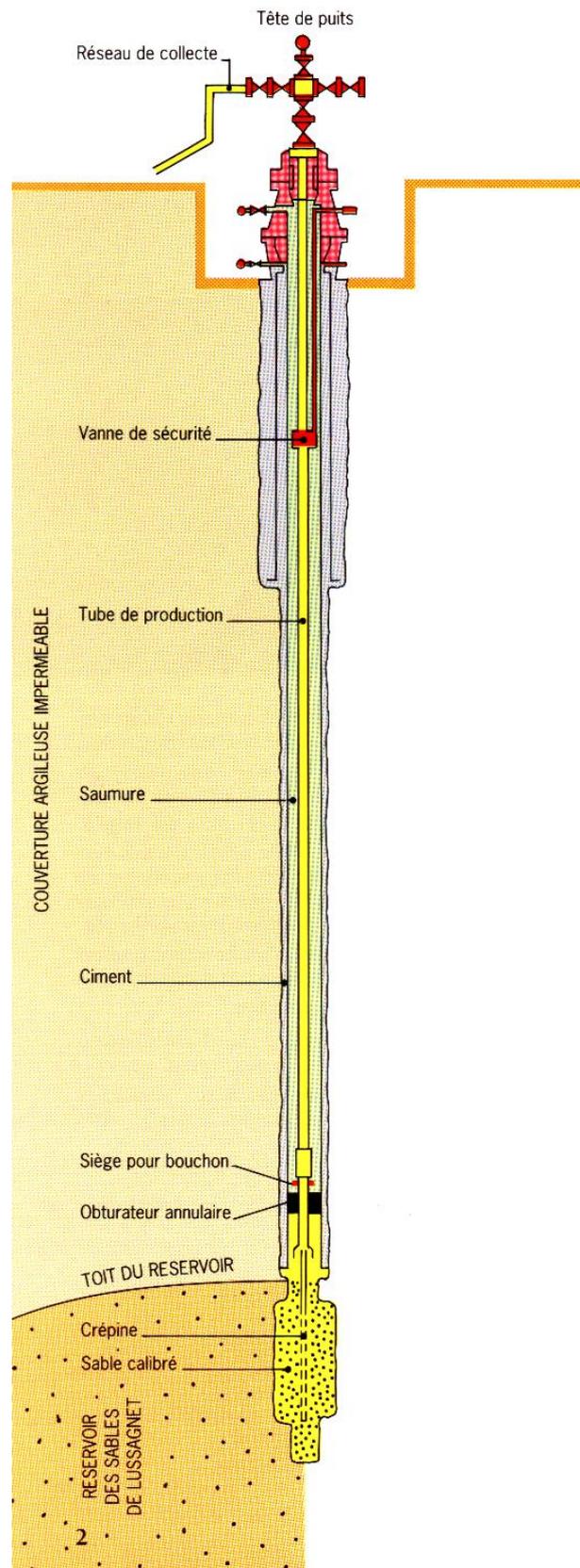


Figure D.9 : Schéma type d'un puits d'exploitation.

ANNEXE E

DESCRIPTION SUCCINCTE DE TRAVAUX DE DIMENSIONNEMENT DE STOCKAGES EN CAVITES MINEES

You et al. [2003] présentent l'étude de stabilité relative au stockage de GPL de Elgas à Sydney en Australie. Il s'agit d'un stockage de propane d'une capacité de 130 000 m³ creusé dans un grès stratifié et fracturé. Les cavités font 11 m de hauteur, 14 m de largeur et 100 à 240 m de longueur. La fracturation des terrains et la forte anisotropie des contraintes ont nécessité la mise en place d'un soutènement pour préserver l'intégrité du toit de la cavité (Figure E.1).

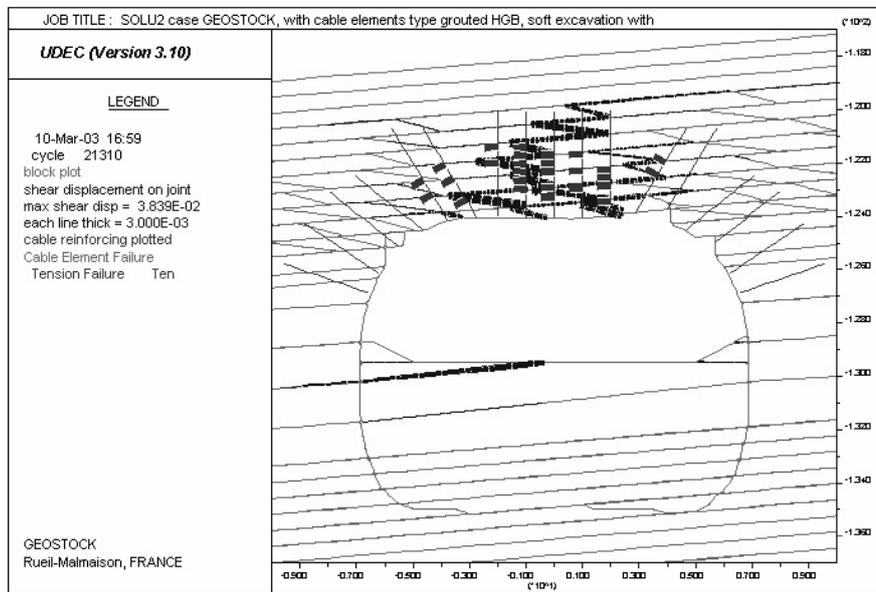


Figure E.1 : Dimensionnement du soutènement de la cavité à l'aide d'un modèle numérique (d'après You et al. [2003])

Zhao et al. [(a) et (b), 1996] précisent les règles de base à suivre pour le dimensionnement des cavités minées permettant d'éviter les instabilités et les fuites de produits stockés. Le cas particulier d'un stockage de pétrole d'une capacité de 1 000 000 m³ est présenté. Il s'agit de 5 cavernes de 33 m de hauteur de 19 m de largeur et de 325 m de longueur séparées par des piliers de 40 m d'épaisseur (Figure E.2).

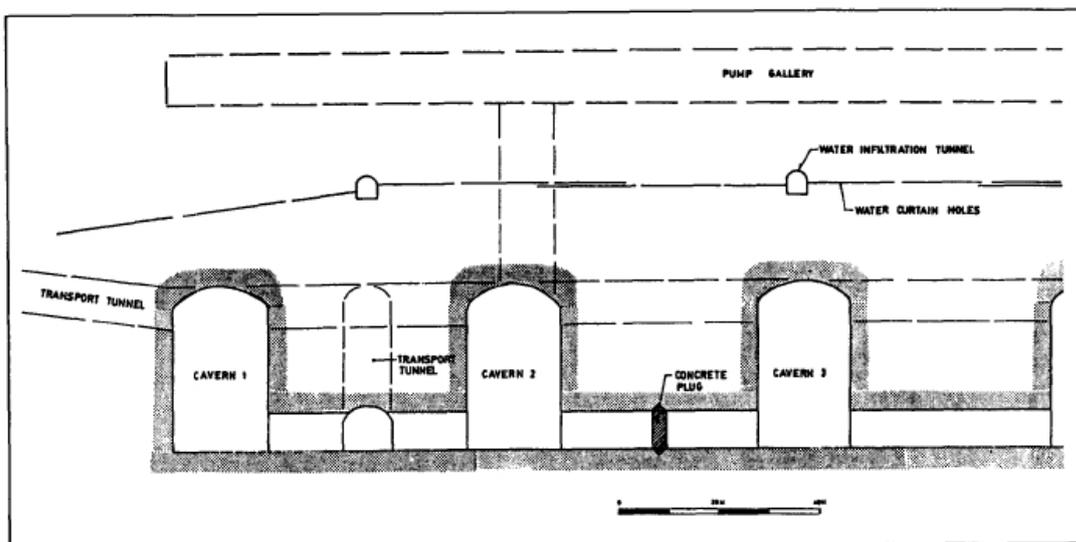


Figure E.2 : Géométrie d'un stockage de pétrole brut à Singapore (d'après Zhao et al. (b) [1996])

Sturk et al. [1995] présentent la conception et la construction d'un stockage en souterrain de carburant à Harare, au Zimbabwe. Il s'agit de 2 cavités de 36 m de diamètre et de 21 m de hauteur creusées dans un granite fracturé (Figure E.3). Le recouvrement au-dessus des cavités est d'environ 40 m. L'analyse de stabilité a conduit à la mise en place d'un soutènement par boulonnage et d'un renforcement des terrains.

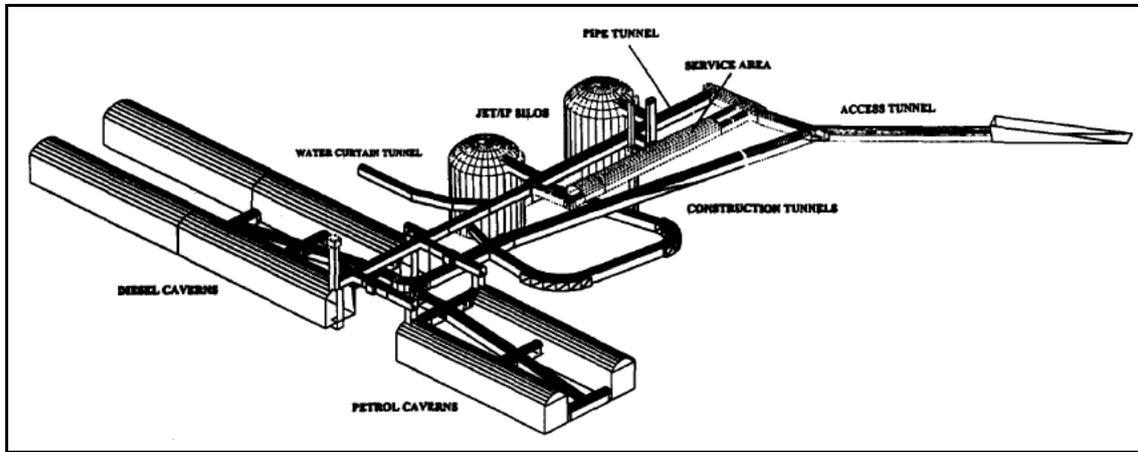


Figure E.3 : Vue d'ensemble du stockage souterrain de Harare au Zimbabwe (d'après Sturk et al. [1995])

Lee [2003] présente une synthèse des cavités minées réalisées en Corée depuis les années 1970 pour le stockage du pétrole brut et du gaz liquéfié (Figure E.4). Il présente les études faites pour les stockages de propane et de butane liquéfié de Yosu (capacité : 300 000 m³, roche hôte : andésite, calcaire) et de Ulsan (capacité : 500 000 m³, roche hôte : grès). Des analyses hydromécaniques ont été conduites à l'aide de modèles par éléments finis prenant en compte le comportement différé des terrains pour évaluer la stabilité et la perturbation du régime hydraulique autour des cavités (Figure E.5).



Figure E.4 : Projet de stockage souterrain en Corée du Sud (d'après Lee [2003])

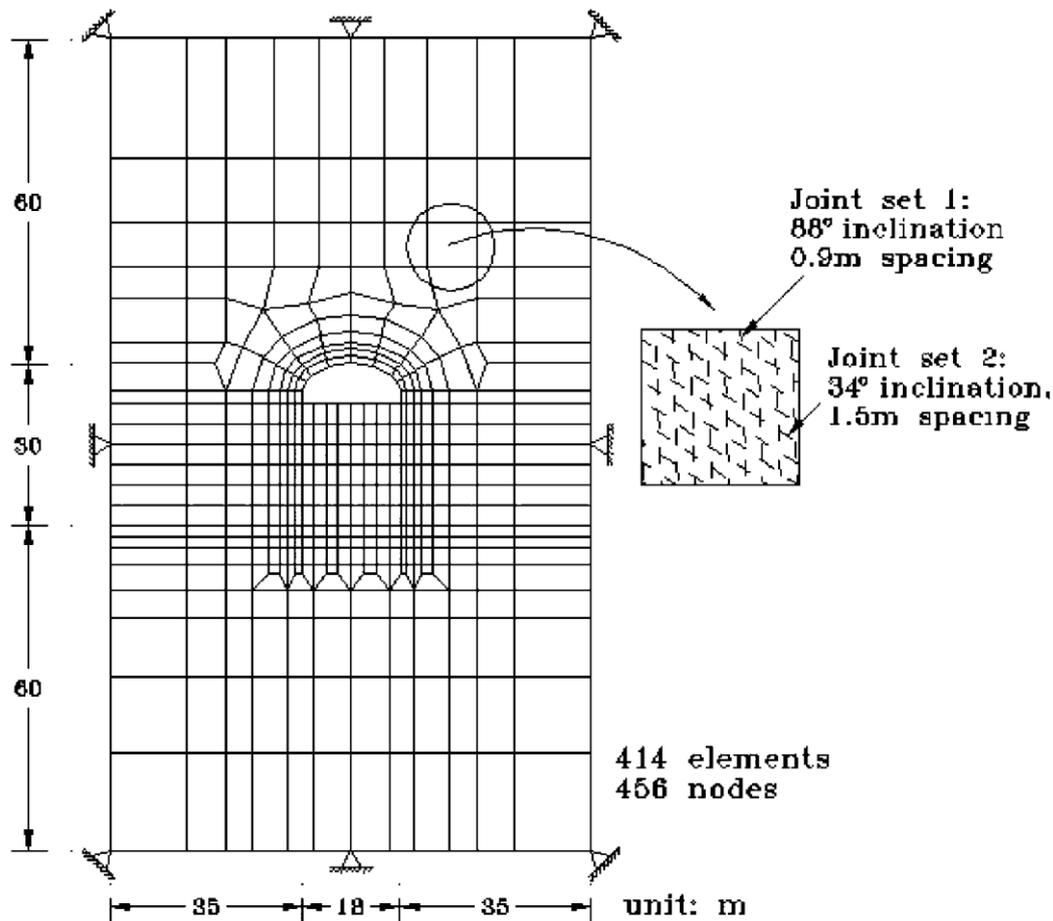


Figure E.5 : Modèle de calcul utilisé pour le dimensionnement d'une cavité souterraine en Corée du Sud (d'après Lee [2003])

Park et al. [2005] présentent une étude relative au stockage de gaz liquéfié de Pyongtaek construit sous le lac Namyang en Corée du Sud dans une roche métamorphique (gneiss gréseux et micaschiste) fracturée (Figure E.6). Des analyses numériques ont été effectuées pour prévoir l'impact hydrogéologique potentiel sur une cavité remplie de butane située à proximité. Cette étude a conduit à la réalisation d'un rideau d'eau pour empêcher l'abaissement de la nappe. La profondeur et la géométrie de la nouvelle caverne ont été déterminées par modélisation en tenant compte des caractéristiques géotechniques des terrains, des contraintes initiales et des pressions hydrauliques imposées pendant l'exploitation du stockage (Figure E.7).

Levinsson et al. [2004] présentent les opérations de dimensionnement et de construction du stockage de gaz liquéfié de Ningbo en Chine. Le stockage est composé de 5 cavernes dont la taille maximale est 20 m de large, 22 m de haut et 290 m de longueur pour une capacité totale de 500 000 m³.

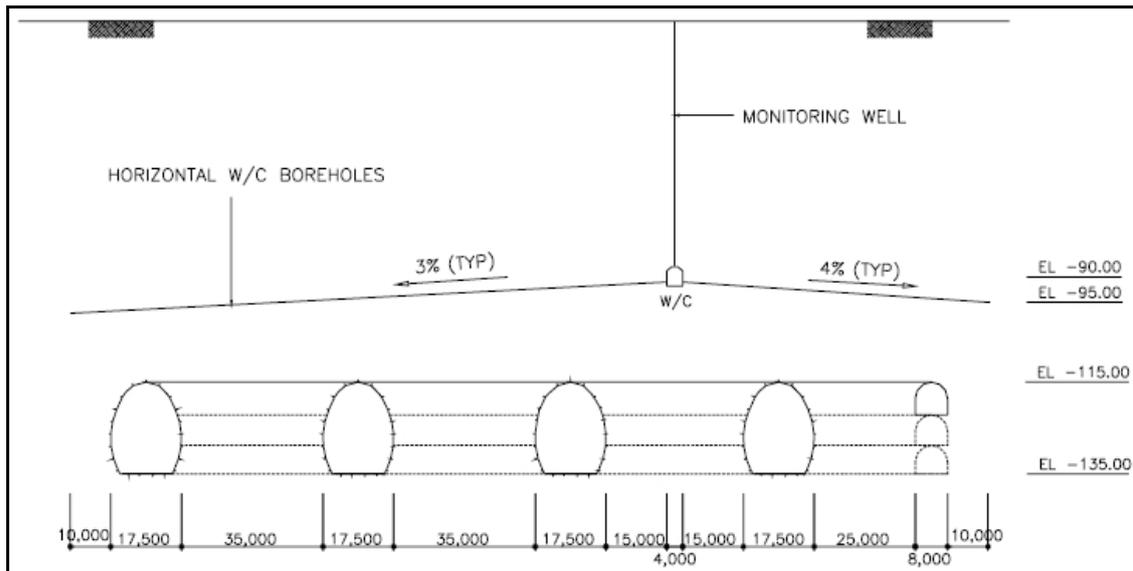


Figure E.6 : Schéma de principe du stockage de gaz liquéfié de Pyongtaek construit sous le lac Namyang en Corée du Sud (d'après Park et al. [2005])

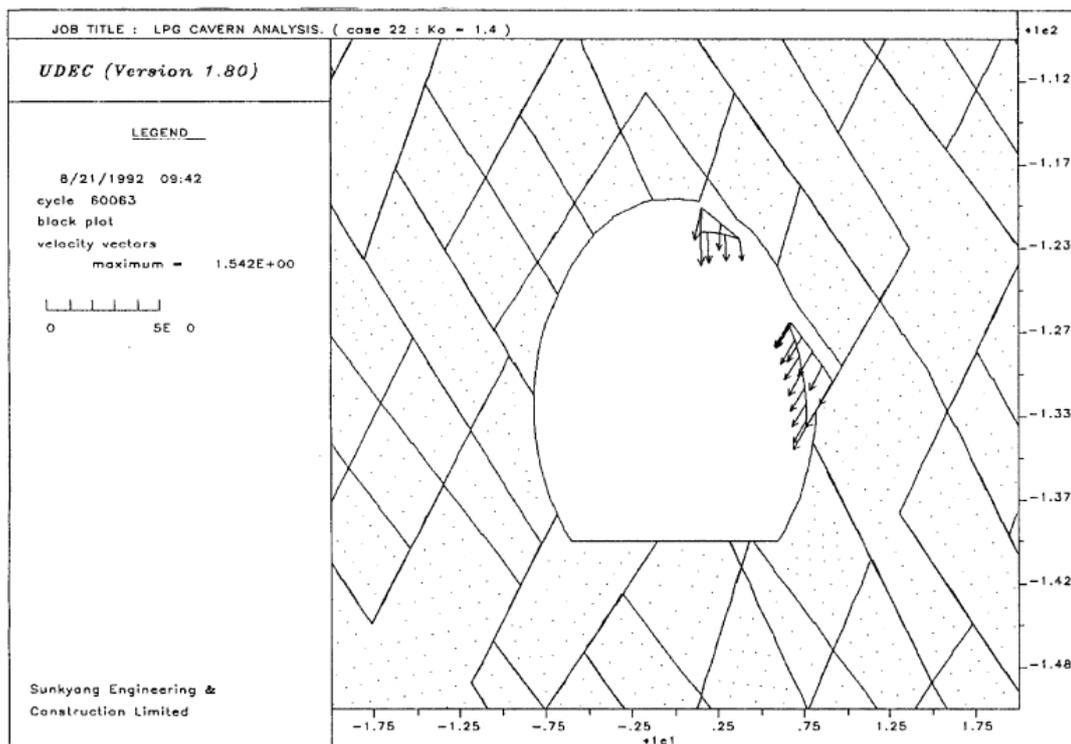


Figure E.7 : Analyse de la stabilité des cavités de stockage dans le but de dimensionner leur soutènement (d'après Park et al. [2005])

ANNEXE F

ACCIDENTOLOGIE PERTINENTE POUR L'ABANDON DES
STOCKAGES SOUTERRAINS

F1 - ACCIDENTOLOGIE DANS LE CONTEXTE DES STOCKAGES DE GAZ ET D'HYDROCARBURES

F1.1 - Stockages en milieux poreux

Les incidents/accidents répertoriés sont les suivants :

Aquifer Leroy, Uinta County, Wyoming, E.U. :

Source : Arakting et al. [1984], Katz & Tek [1981], cités par Nelson et al. [2005].

Rappel des faits : Ce stockage de gaz en aquifère, situé à une profondeur d'environ 900 m, a connu des problèmes récurrents de fuite au cours de son exploitation [Nelson et al., 2005]. En 1973, une fuite au niveau du cuvelage d'un ancien puits d'exploration a été détectée à une profondeur de 415 mètres. En 1978, une campagne de prospection en surface a mis en évidence un bullage de gaz dans un ruisseau à la verticale du site de stockage. Sur une durée de 10 années le volume total de gaz perdu est estimé à 17 millions de m³.

Hypothèses sur l'origine de la fuite et le cheminement du gaz : il a été établi que les fuites de 1973 étaient liées à la corrosion du cuvelage d'un ancien puits d'exploration. Par conséquent, ce puits a été bouché et abandonné. Une autre fuite est apparue en 1978 en surface. L'utilisation de gaz traceurs a permis d'identifier l'origine des pertes de gaz en indiquant une connexion directe entre le réservoir et la surface [Arakting et al., 1984]. En effet, ceux-ci réapparaissaient en surface quelques semaines après leur injection dans le réservoir (Figure F.1). L'examen de l'historique des pressions d'exploitation suggère que le stockage ait été exploité à une pression trop importante (12,6 MPa alors que la pression initiale dans le réservoir était de 10,3 MPa). Cette surpression aurait induit une fracturation du caprock, qui aurait compromis l'étanchéité du stockage et induit les fuites survenues en 1978.

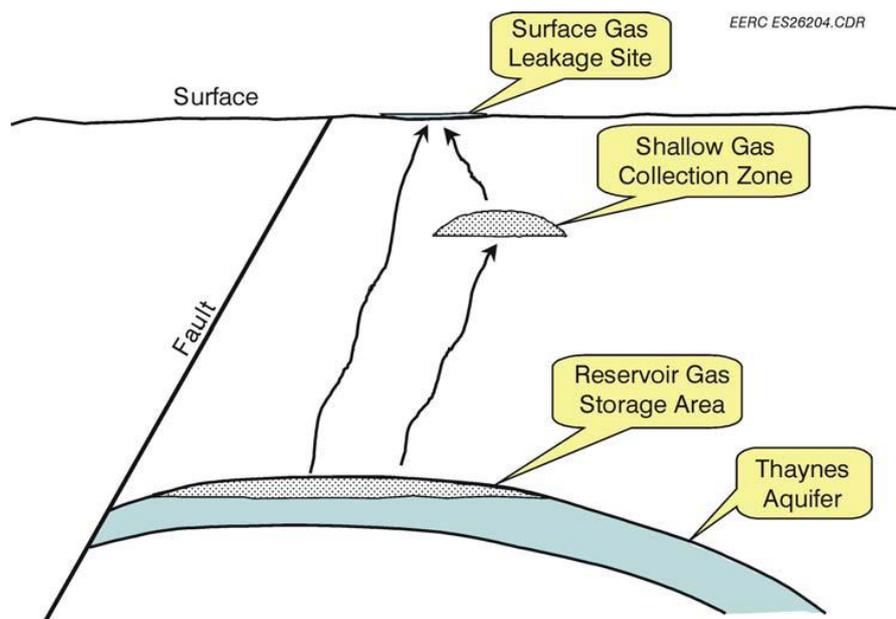


Figure F.1 : Vue en coupe du réservoir de gaz au sein de l'aquifère et des chemins d'écoulement du gaz (d'après Nelson et al. [2005])

F.1.2 - Stockages en cavités salines

Les incidents/accidents répertoriés sont les suivants :

Accident n°1 de Mont Belvieu, Texas, E.U. :

Source : Berest et Brouard [2003]

Rappel des faits : Le 17 septembre 1980, une chute de pression est enregistrée dans l'une des cavités du site de stockage de Mont-Belvieu contenant du GPL. Le 3 octobre, une explosion intervient dans une maison proche du stockage. Les jours suivants, 50 familles sont évacuées suite à des émanations de gaz dans la zone aux abords du stockage.

Hypothèses sur l'origine de la fuite et le cheminement du produit : L'explosion intervenue le 3 octobre est liée à l'accumulation de propane (30 %) et d'éthane (70 %) dans les fondations de la maison. L'explosion a été déclenchée suite à une étincelle sur le circuit électrique. L'émanation de gaz en surface a été expliquée par des fuites de GPL du fait d'une corrosion du cuvelage et d'une dégradation du ciment situé à l'extérieur du cuvelage du puits d'exploitation. Le GPL a ensuite migré (en se vaporisant progressivement) jusqu'à la surface (Figure F.2). La fuite dans le cuvelage est apparue 22 ans après la mise en service du puits. Cet accident a conduit à une évolution de la réglementation au Texas en 1993. Les nouveaux puits d'exploitation de cavités de stockage dans le sel doivent être aujourd'hui équipés d'un « double cuvelage » (c'est-à-dire d'un cuvelage et d'un tubage séparés par un annulaire).

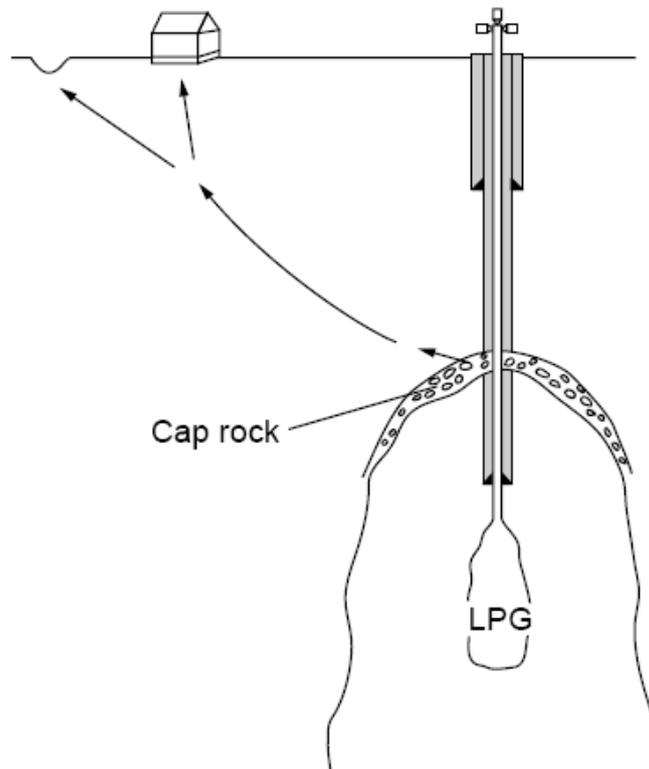


Figure F.2 : Schématisation de la fuite de gaz du stockage de Mont-Belvieu, Texas (d'après Berest et Brouard [2003])

Accident n°2 de Mont Belvieu, Texas, E.U. :

Source : Cartwright et al. [2000], Ratigan [1991 et 1996] cités par Brouard [2002]

Rappel des faits : Il s'agit d'un effondrement qui s'est produit en 1993 sur le site de stockage précédent. Un cratère s'est formé entre deux puits et au-dessous de canalisations. Le cratère de 12 mètres de diamètre et de 6 mètres de profondeur s'est stabilisé en quelques heures.

Hypothèse sur l'origine de l'effondrement : Le contexte géologique est schématisé sur la Figure F.2. Le « caprock » et le toit du sel sont à des profondeurs moyennes respectives de 200 et 420 mètres. Les origines exactes de l'effondrement n'ont pas été déterminées. Toutefois, on suppose qu'il existe un lien entre le puits fuyard (accident n°1) et l'effondrement qui aurait été engendré par des processus de dissolution.

Accident de Hutchinson, Kansas, E.U. :

Source : Allison [2001], Kansas Geological Survey Web Site [2001], cités par Berest et Brouard [2003]

Rappel des faits : Le 17 janvier 2001 une explosion importante a eu lieu dans le centre de la ville d'Hutchinson, Kansas, E.U.. Cette explosion, liée à l'éruption de gaz naturel en surface, a provoqué des incendies qui ont duré plus de 12 heures, alimentés en continu par du gaz.

Hypothèses sur l'origine de la fuite et le cheminement du gaz : Des analyses ont pu établir que le gaz qui a provoqué ces explosions provenait d'un site de stockage situé à environ 11 km au Nord-Ouest d'Hutchinson. La zone de développement des cavités est une ancienne zone d'exploitation salinière. Les cavités ont été dimensionnées et développées pour le stockage de GPL dans les années 1980. Ces cavités sont de petites tailles (vraisemblablement de l'ordre de 40 000 à 50 000 m³) et peu profondes (le toit des cavités est à 150 m environ, le toit du sel à 130 mètres). A la fin des années 1980, l'exploitation de GPL a été abandonnée et les puits bouchés. En 1993, les bouchons ont été forés et les cavités ont été converties en stockage de gaz naturel. Une malfaçon lors de la foration des bouchons serait à l'origine de la fuite. Le gaz aurait ensuite cheminé à travers la cimentation puis les terrains (Figure F.3). Une veine de dolomie particulièrement poreuse de 45 mètres de large et de 0,60 mètre d'épaisseur, (figurée en pointillés) a été localisée dans la zone. Cette couche se trouve être en contact direct avec les puits. Elle s'étendrait vers le Sud-Est jusqu'à Hutchinson et au-delà. Le gaz, profitant de cette "conduite", a formé des poches en profondeur bloquées par les couches géologiques supérieures de schistes imperméables. Les éruptions de gaz en surface auraient eu lieu par le biais d'anciens puits d'exploitation de saumure datant de la fin du XIX^{ème} et du début du XX^{ème} siècle et qui ne sont malheureusement pas tous répertoriés. Plus de 2 millions de m³ de gaz se seraient échappés du stockage.

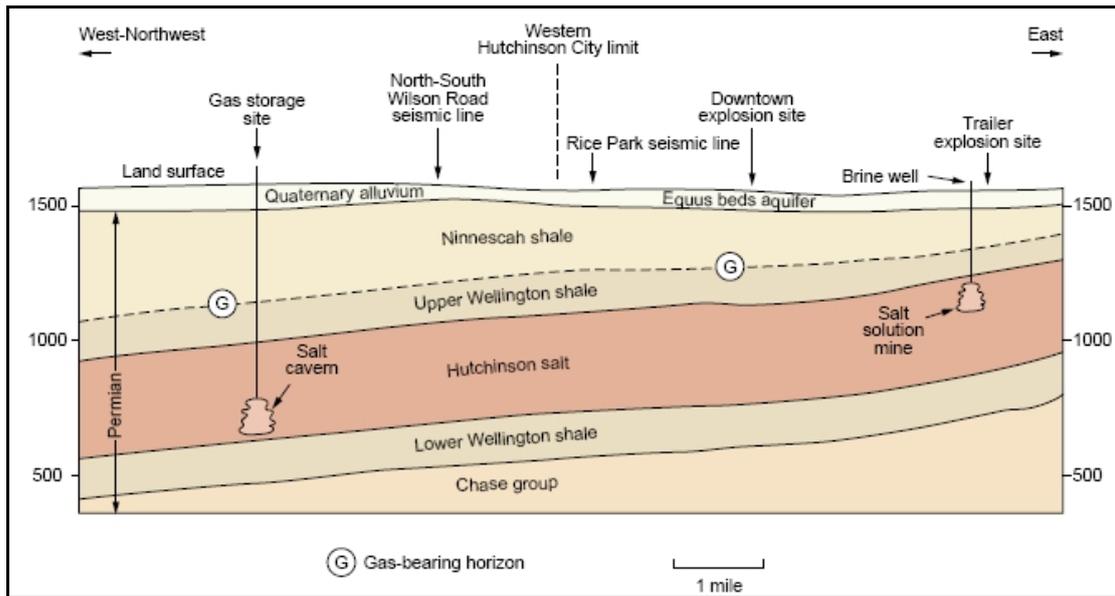


Figure F.3 : Cheminement du gaz relatif à l'accident de Hutchinson, Kansas (d'après Kansas Geological Survey Web Site [2001])

Cavité saline d'Eminence, Mississipi, E.U. :

Source : Fenix & Scisson Inc [1983] cité par Berest et Brouard [2003] ; Ghoreychi et al. [1987].

Rappel des faits : Convergence excessive de la cavité. Peu après sa mise en service, entre 1970 et 1972, la cavité de stockage a perdu 40 % de sa capacité de stockage et la base de la cavité a été surélevée de 35 mètres (Figure F.4). Nous n'avons pas d'information concernant les conséquences en surface.

Hypothèses sur l'origine de la convergence : Celle-ci est liée au fluage du sel due à la trop faible valeur de pression de saumure appliquée dans la cavité. Berest et al. [1986] expliquent l'asymétrie de la convergence (forte surélévation du fond de la cavité et faible convergence des parois verticales) par un contraste de pression trop important entre le fond et le sommet de la cavité de stockage.

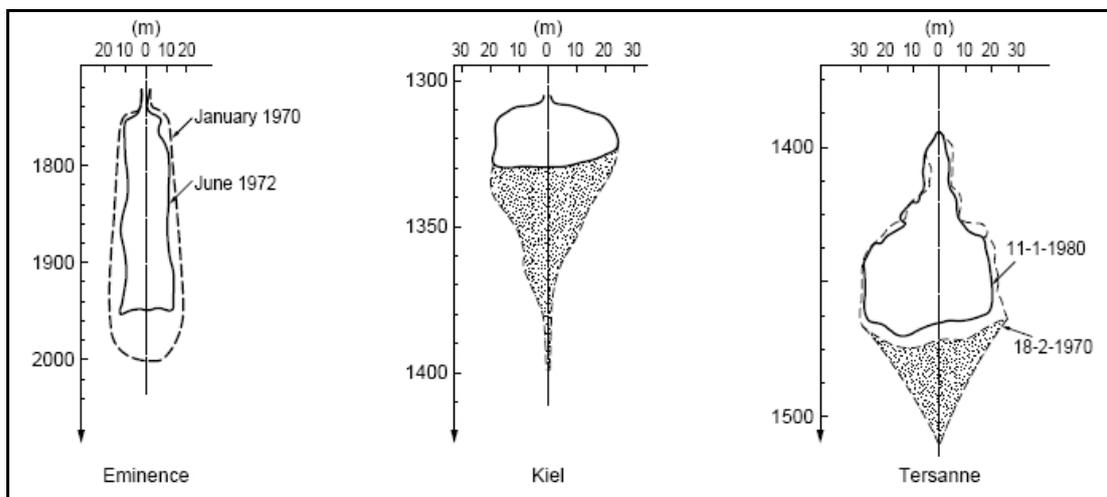


Figure F.4 : Vues en coupe des cavités salines d'Eminence, de Kiel et de Tersanne (d'après Berest et Brouard [2003])

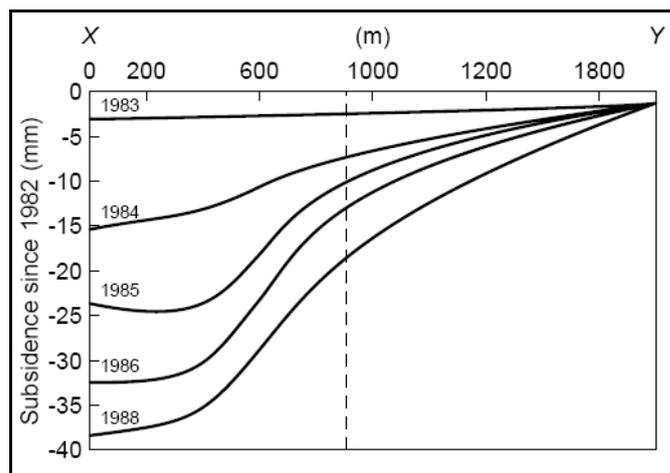
Cavités salines de Tersanne, France :

Source : Durup [1991], Ghoreychi et al. [1987], Vouille et al. [1984], cités par Berest et Brouard [2003] ; Durup et al. [2007].

Rappel des faits : Gaz de France exploite 14 cavités à proximité de Tersanne depuis 1970. L'une d'entre elles, située à environ 1500 m de profondeur (Figure F.4.) avait un volume initial d'environ 100 000 m³. Après 10 années d'exploitation, la perte de volume a été de 30 %. Après 35 années d'exploitation, la perte a atteint 50 % (Figure F.5). Cette perte de volume, augmentée de celles des autres cavités, a occasionné en surface un affaissement en surface de 4 cm entre 1983 et 1988.

Hypothèses sur l'origine de la convergence : La perte de volume de la cavité est liée à une convergence importante de la cavité par fluage du sel. Cette forte convergence est due à une propension au fluage particulièrement importante du sel dans ce cas. Les dissymétries observées par ailleurs entre le bas et le haut de la cavité sont liées à la différence des gradients de pression dans la saumure et le sel (voir § 6.3.1) dont les conséquences sont particulièrement visibles ici du fait de la hauteur importante de la cavité.

a - Evolution des mouvements de surface au cours du temps



b - Comparaison de la perte de volume des cavités avec le volume de la cuvette d'affaissement en surface

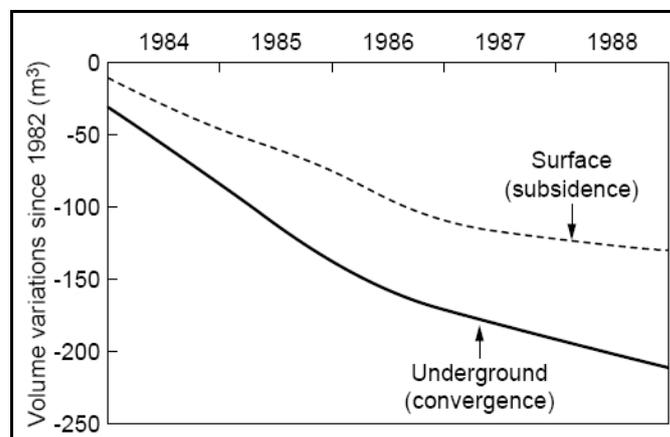


Figure F.5 : Fermeture de la cavité saline de Tersane (d'après Durup [1991])

Accident de Weeks Island, Louisiane, E.U. :

Source : Bauer et al. [2000], Ehgartner [1993], Hoffman [1994], cités par Brouard [2002].

Rappel des faits : La mine de sel de Weeks Island a été ouverte en 1902 et a été exploitée commercialement par chambres et piliers jusqu'en 1977. Cette mine a ensuite été convertie en réserve stratégique (SPR) par le département américain de l'énergie (DOE). Le volume cumulé de pétrole brut stocké sur le site était de 73 millions de barils en 1981 (11,6 millions de m³). En 1992 puis en 1995, des effondrements sont apparus à l'aplomb des anciennes galeries minières contenant le pétrole. Le premier cratère a été observé dans un secteur où la mine était exploitée sur deux niveaux. Son diamètre était au départ d'environ 11 mètres, et sa profondeur de l'ordre de 9 mètres. L'apparition du second cratère en 1995 (diamètre de 4,3 mètres et profondeur de 3 mètres) montra que le processus ayant créé le premier cratère était toujours actif. Ces événements ont abouti à l'abandon définitif du stockage.

Hypothèses sur l'origine des effondrements : Il semblerait que les effondrements apparus à l'aplomb du stockage soient liés à la présence de discontinuités structurales naturelles (Figure F.6). Ce contexte géologique peu favorable a été aggravé par l'exploitation minière qui a précédé le stockage. Ce dernier a induit des changements de contraintes au sein du massif. Il en a résulté une augmentation de perméabilité des discontinuités affectant la couche de sel. La perméabilité du recouvrement a favorisé l'infiltration des eaux dans les discontinuités, ce qui a engendré des processus de dissolution menant aux effondrements de surface.

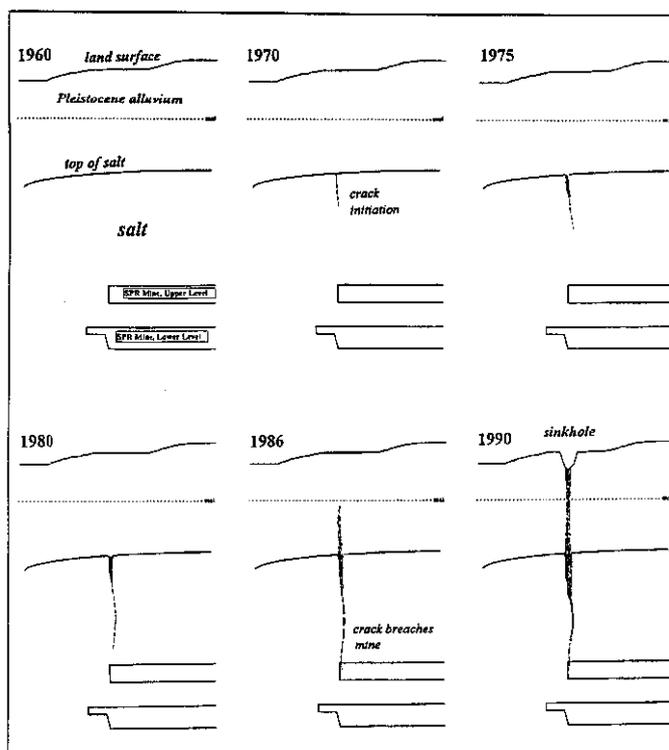


Figure F.6 : Principe du développement d'une fissure à Weeks Island (d'après Bauer et al. [2000], cité par Brouard [2002])

Accident de Brenham, Texas, E.U. :

Source : National Transportation Safety Board (NTSB) [1993], cité par Berest et Brouard [2003]

Rappel des faits : Le stockage de Brenham est une cavité de 60 000 m³ remplie de GPL (mélange de propane, d'éthane, de n-butane et autres gaz). La cavité est reliée à la surface par un cuvelage cimenté de 810 mètres de hauteur et de 0,34 mètre de diamètre (Figure F.7). Le 7 avril 1992, une éruption de gaz d'un volume estimé entre 500 et 1600 m³ est intervenue au niveau d'une cavité de stockage. Cette éruption incontrôlée a formé un nuage de gaz qui a ensuite explosé, tuant 3 personnes et en intoxiquant 21 autres. Les dommages matériels de l'accident s'élèvent à 9 millions de dollars.

Hypothèses sur l'origine de la fuite et le cheminement du gaz : L'accident est lié à un sur-remplissage en GPL de la cavité, provoqué par une sous estimation du volume de produit déjà présent dans la cavité. Le sur-remplissage de la cavité a abaissé la limite GPL/saumure jusqu'au niveau de l'entrée du tubage réservé à l'injection de saumure. Le GPL a alors pu s'échapper, par le tubage central de la cavité. Il faut noter qu'en ce qui concerne cet accident, les systèmes d'alarme ont été défaillants. Une vanne automatique n'a pas fonctionné, sans doute parce qu'elle a été incorrectement remontée après un essai de fonctionnement. Suite à cet accident, de nouvelles réglementations ont été promulguées par l'état du Texas. Elles rendent obligatoire que des cavernes de stockage de GPL soient protégées par une détection automatique des sur-remplissages et une fermeture automatique des vannes.

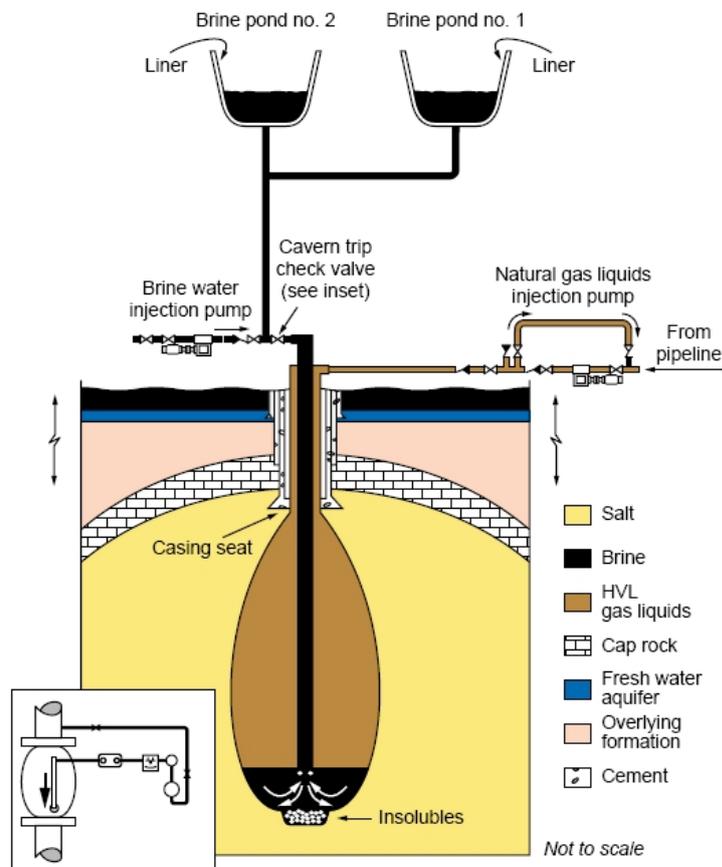


Figure F.7 : Schéma de principe du stockage de Brenham (d'après NTSB [1993])

Accident de Moss Bluff, Liberty, Texas, E.U. :

Source : Hopper [2004], Seni & al [2005]

Rappel des faits : Il s'agit d'un stockage de gaz naturel dans une cavité saline dont le sommet est situé à 800 m de profondeur. Les dimensions de la cavité sont de 400 m verticalement et 80 m horizontalement (Figure F.8a). Suite à une expulsion brutale du gaz de la cavité, une rupture est apparue au niveau d'une canalisation aérienne de saumure, située entre la tête de puits et une vanne de fermeture d'urgence (Figure F.8b), pendant des opérations combinées de soutirage de saumure et d'injection de gaz comprimé dans la cavité. Le gaz s'est ensuite enflammé (Figure F.9).

Hypothèse sur l'origine de l'accident :

Vers 4 heures du matin le 19 août 2004, une fuite dans la colonne d'extraction de saumure (à proximité de l'interface gaz/saumure) a conduit à une expulsion brutale du gaz de la cavité. L'origine de la fuite reste inconnue, du fait que la partie concernée de la colonne n'a pas pu être récupérée après l'accident.

La remontée de gaz sous pression dans la colonne d'extraction de saumure a provoqué la fermeture d'une vanne de sécurité en surface (qui a correctement fonctionné). Toutefois, le coup de bélier dû à la fermeture de cette vanne a mené à la rupture d'une portion de canalisation dont l'épaisseur avait été réduite sous l'effet de la corrosion interne.

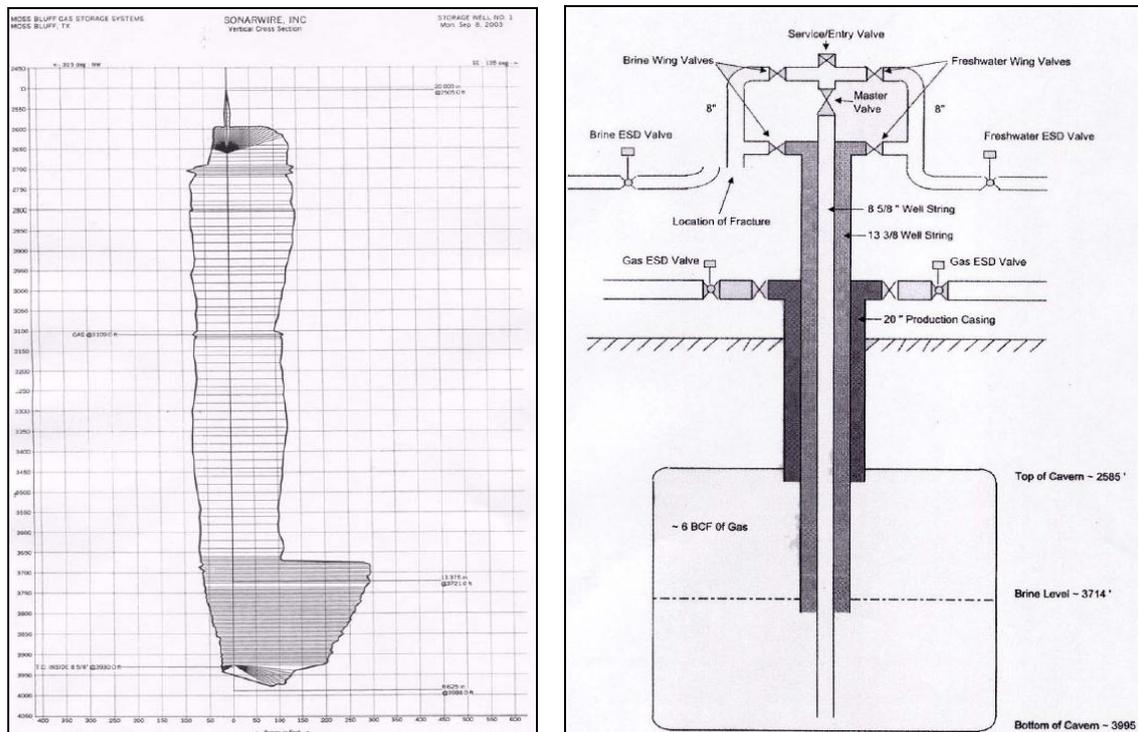


Figure F.8 : (a) Géométrie de la caverne de Moss Bluff - (b) Schématisation de la tête de puits (avec localisation de la rupture de la canalisation de saumure)

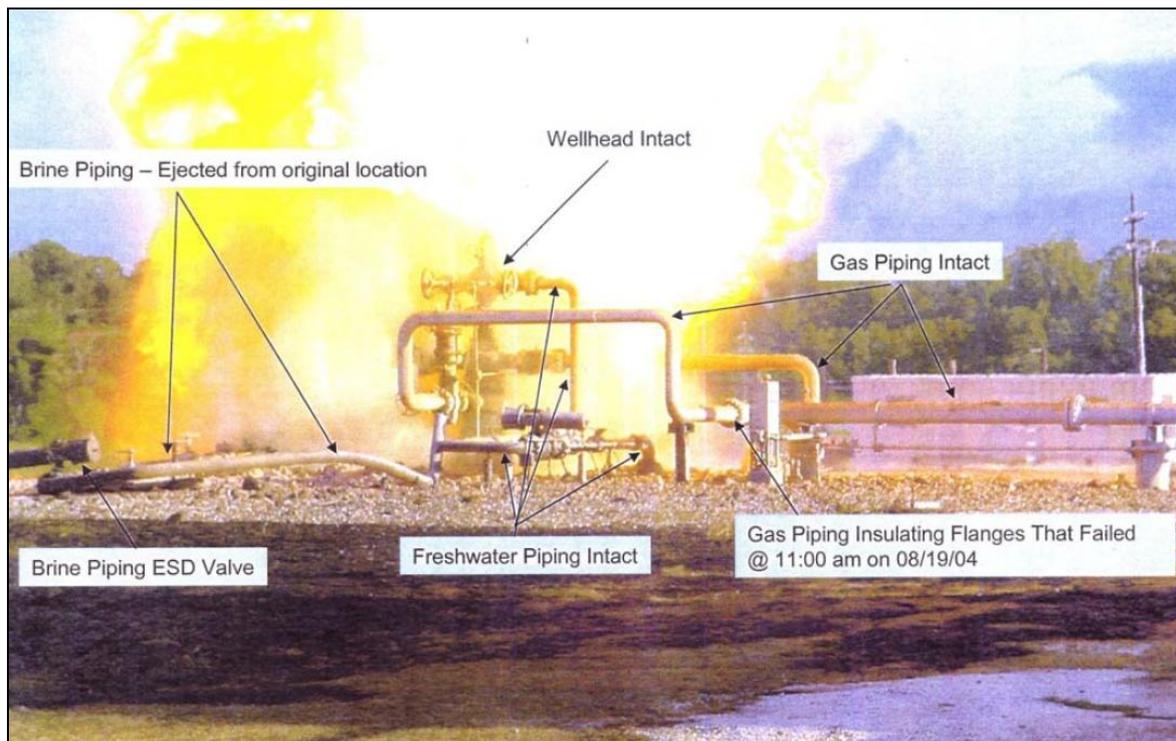


Figure F.9 : Photo de l'incident (le 19 août 2004 à 7 heures du matin)

F.1.3 - Stockages en cavités minées

Emanations de gaz à May-sur-Orne, France :

Source : Brocard H. [1983], cité par Kimmel [2004] ; Besnard, [2006]

Rappel des faits : Le site a été présenté dans la section 2.2 de ce rapport (Figure 5). En 1982, les différentes stations de distribution de fioul stockées dans les anciennes mines de fer de May-sur-Orne signalent des problèmes de moussage du produit pendant le chargement des bateaux, camions ou wagons. De plus des phénomènes de feux follets sont signalés au niveau de la voie ferrée à l'aplomb du stockage. Les analyses de gaz ordonnées suite aux événements relatés révèlent des teneurs maximales en méthane de 35 %. L'arrêt de l'exploitation est décidé le 3 mars 1982 et un ensemble de mesures sont prises, visant à sauvegarder la sécurité publique.

En 2006, du radon est également mis en évidence en concentrations importantes en surface et dans les anciens vides de stockage.

Hypothèses sur l'origine des émanations de gaz : Le stockage est exploité par compensation hydraulique, le gasoil déstocké est remplacé par de l'eau pompée dans l'Orne. Cette eau n'étant ni filtrée, ni traitée, des sédiments et de la matière organique, ainsi qu'une flore bactérienne ont été introduits dans le stockage. Il a été établi que le phénomène de production de méthane résultait du développement de bactéries à partir de l'eau de l'Orne.

Les concentrations importantes de radon, quant à elles, sont liées à la présence des travaux miniers laissés vides après le déstockage des hydrocarbures. Ces vides favorisent l'exhalation du radon. Des mesures complémentaires sont en cours de réalisation par l'INERIS sur ce site. L'objectif est d'évaluer qualitativement et quantitativement le rôle joué par la présence de vides en profondeur sur les augmentations de concentration en radon en surface.

F2 - ACCIDENTOLOGIE DANS LE CONTEXTE DE L'EXPLOITATION PETROLIERE

Les incidents/accidents répertoriés sont les suivants :

Champ pétrolifère d'Haoud Berkaoui, Algérie :

Source : Morisseau [2000]

Rappel des faits : En octobre 1986, un effondrement brutal est apparu au niveau du champ pétrolifère d'Haoud Berkaoui dans la partie nord du Sahara algérien. Il s'agit du plus grand cratère connu qui soit une conséquence involontaire de l'activité humaine. Actuellement, le cratère atteint un diamètre de 300 mètres et une profondeur de 75 mètres. On estime que la cavité sous-jacente (Figure F.10) a un diamètre maximal de 700 mètres. Cet effondrement est la conséquence de l'apparition d'une cavité dans un horizon géologique salifère. Le lessivage de cette formation induit actuellement une pollution conséquente en saumure des aquifères alimentant plusieurs oasis régionaux.

Hypothèse sur l'origine de l'effondrement : Cette dissolution incontrôlée d'un niveau évaporitique est la conséquence de la réalisation d'un puits de pétrole en février 1978 (forage OKN32, voir Figure F.10). L'opération de forage a été stoppée, suite à des difficultés techniques, à une profondeur de 2500 m. Le forage a alors été abandonné sans avoir subi d'opération de complétion (c'est-à-dire sans qu'il ait été procédé à la mise en place d'un cuvelage). Ce forage a alors mis en communication un aquifère profond, en surpression de 2,5 MPa, avec les aquifères superficiels. Le niveau salifère situé sur le passage de l'eau a alors été lessivé, ce qui a amené à la formation d'une cavité. Le développement de cette cavité a été très rapide : en 1981, elle atteignait un forage en production situé à une distance de 80 mètres (forage OKN32bis). C'est l'arrêt brutal de production de ce forage qui a révélé la présence de la cavité. Le débit entre l'aquifère inférieur et les aquifères superficiels est de 2000 m³/h et le lessivage est toujours en cours actuellement. Dans les aquifères superficiels, ressource en eau importante, un panache de saumure résultant du lessivage de l'horizon évaporitique, s'étend maintenant sur plusieurs kilomètres.

-a-

-b-

-c-

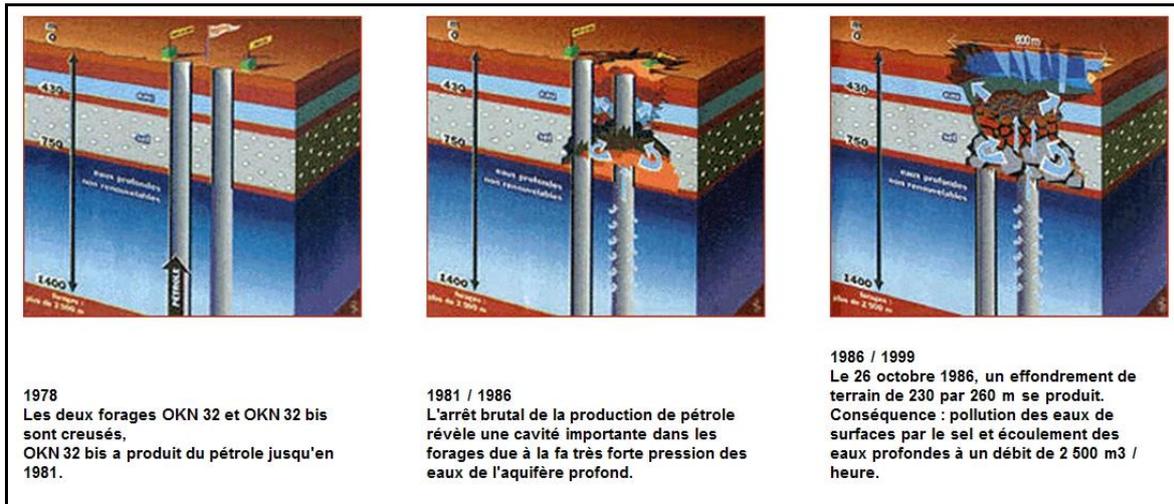


Figure F.10 : Mécanisme de l'effondrement d'Haoud Berkaoui, Algérie (d'après <http://www.h2o.net/magazine/urgences/catastrophes/>)

Accident de Wink Sink, Texas, E.U. :

Source : Baumgardner et al. [1982] et K.S. Johnson [1987 et 2001], cités par Brouard [2002]

Rappel des faits : Un effondrement est survenu le 3 juin 1980 au centre du champ de pétrole de Hendrick, exploité depuis 1926. Il a donné lieu à un cratère de 110 mètres de diamètre et de 34 mètres de profondeur. L'effondrement est apparu à l'emplacement d'un puits de pétrole abandonné (Figure F.11).

Hypothèse sur l'origine de l'effondrement : L'effondrement est lié à l'abandon mal réalisé d'un puits d'extraction de pétrole (mauvaise qualité du bouchon de scellement). La dégradation de ce puits a provoqué la mise en communication de deux aquifères. A la différence du cas de Berkaoui, la circulation d'eau s'est faite de l'aquifère supérieur vers l'aquifère inférieur, avec dissolution de la couche de sel intermédiaire, amenant à la formation d'une cavité qui est à l'origine de l'effondrement en surface. D'après Johnson [1987], la cavité se serait d'abord formée dans la couche de sel puis aurait ensuite migré verticalement sous l'effet du délitement successif des couches sus-jacentes (Figure F.12).



Figure F.11 : Vue aérienne du cratère de Wink Sink (d'après Johnson [1987])

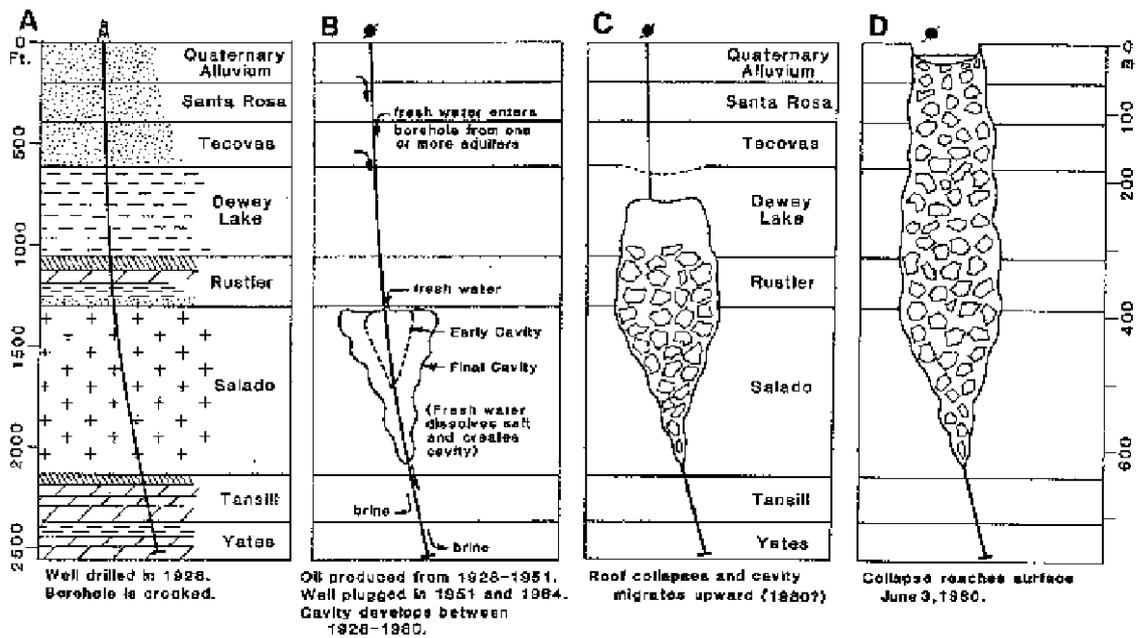


Figure F.12 : Coupe stratigraphique montrant le mécanisme supposé être à l'origine de l'effondrement de Wink Sink (d'après Johnson [1987])

F3 - ACCIDENTOLOGIE DANS LE CONTEXTE D'EXPLOITATIONS MINIERES

Effondrement provoqué des cavités SG₄ et SG₅ de Gellenoncourt, France :

Source : Buffet [1998], cités par Brouard [2002]

Rappel des faits : La Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est a démarré, en 1967, l'exploitation par dissolution d'une couche de sel sur le site de Gellenoncourt, près de Nancy. Dans ce but, cinq puits d'exploitation (SG₁ à SG₅) ont été réalisés jusqu'à la base du sel. Une planche de sel devait être maintenue au toit afin d'assurer la stabilité des cavernes ainsi créées. Après la jonction, en 1971, des deux premières cavernes (SG₄ et SG₅), les puits correspondants ont été arrêtés et le lessivage a été repris via les autres puits (SG₁, SG₂ et SG₃). Malgré l'arrêt de l'injection au niveau des puits SG₄ et SG₅, la saumure produite sur les autres puits a continué de transiter par ces deux cavernes, de sorte qu'en 1982 le toit du sel a été atteint au niveau des puits SG₄ et SG₅ (Figure F.14b), mettant directement en contact la saumure avec la couche de marnes sus-jacente. Après une période de 10 ans (1982-1992) où aucune évolution notable n'a été observée (Figure F.14c), les marnes du toit se sont délitées jusqu'à dégager une surface de 25x75 m² au mur de l'horizon très raide de la Dolomie de Beaumont (Figure F.14d). La tenue à long terme de cette dalle de dolomie étant incertaine, il a été décidé de provoquer sa rupture en reprenant le lessivage et en agrandissant les cavernes concernées. L'effondrement s'est produit en mars 1998. Le cratère formé constituait une cheminée d'environ 50 m de diamètre et 120 m de profondeur (Figure F.13).

Hypothèse sur l'origine de l'effondrement : L'effondrement a été provoqué ; son origine est donc parfaitement connue et décrite ci-avant.

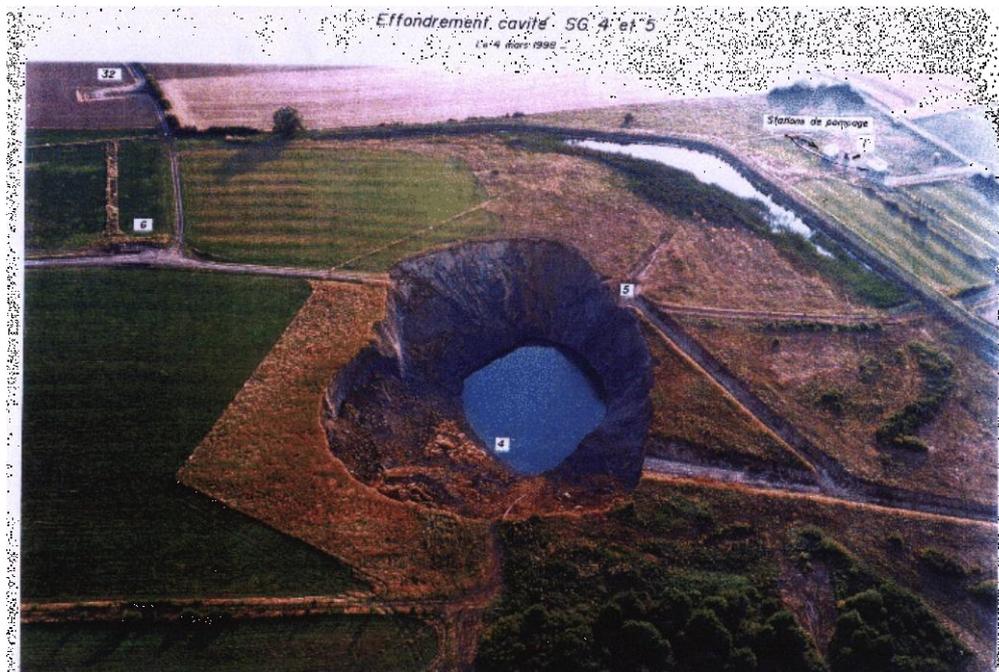
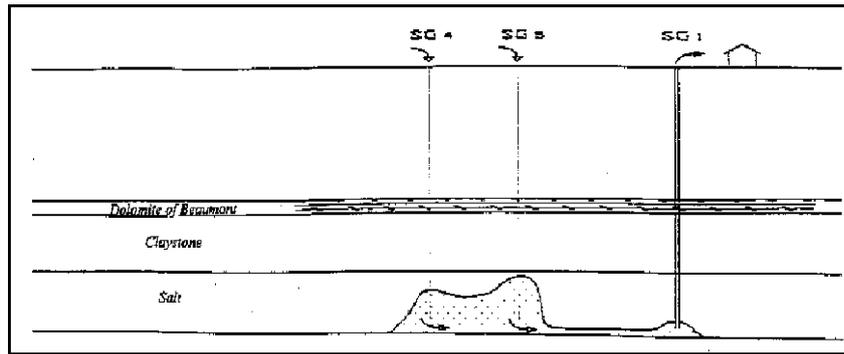
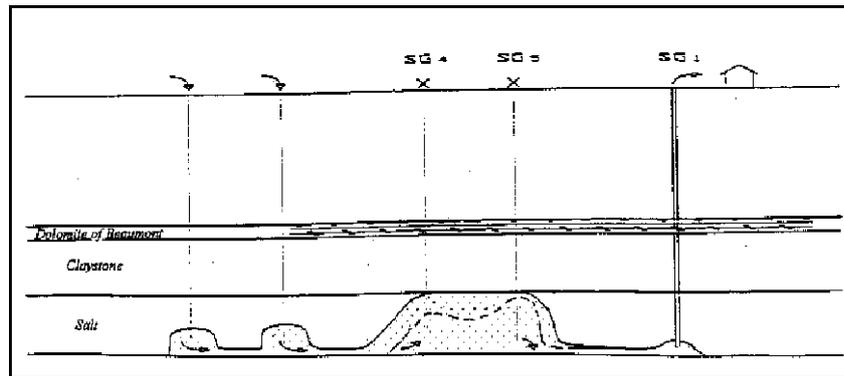


Figure F.13 : Photo des cratères en surface induits par l'effondrement des cavités SG₄ et SG₅ de Gellenoncourt, France (d'après [Buffet, 1998])

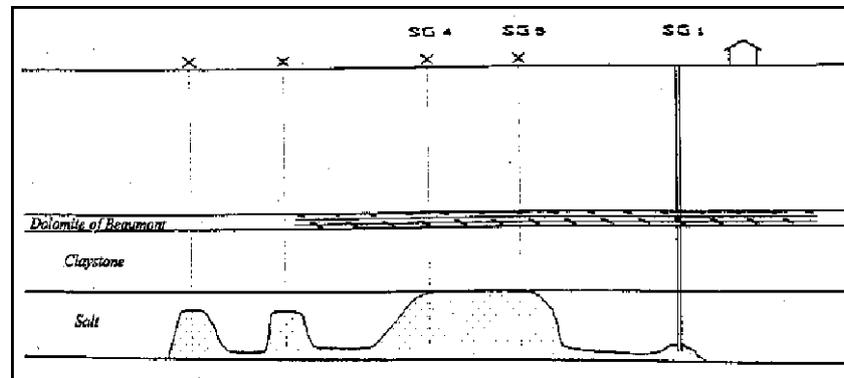
a - 1967-1971, jonction des cavités SG4 et SG5



b - 1971-1982, poursuite de la dissolution jusqu'au toit du sel



c - 1982-1992, absence d'évolution notable



d - 1992-1993, effondrement du toit marneux montant jusqu'à la dolomie

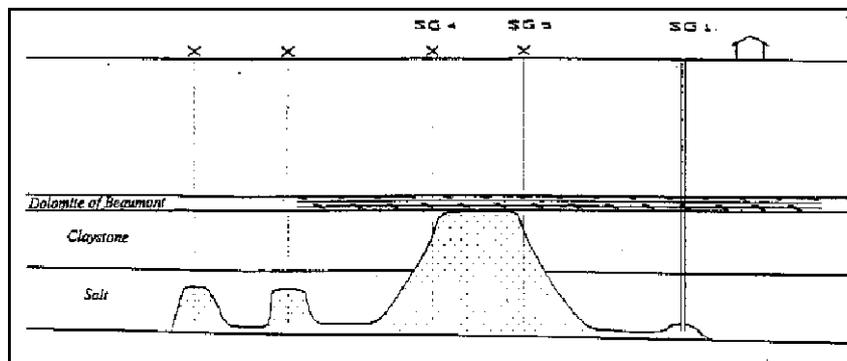


Figure F.14 : Processus d'effondrement des cavités SG4 et SG5 de Gellenoncourt, France (d'après [Buffet, 1998])

Accident de Pannink Sink, Kansas, E.U. :

Source : Walters [1978 et 1991], cité par Brouard [2002].

Rappel des faits : Cet accident concerne un gisement pétrolier, à savoir le gisement de Barton County au Kansas, réutilisé pour y stocker de la saumure. Une saumure très claire a ainsi été injectée dans les dolomies de l'Arbuckle Group à 995 mètres de profondeur entre 1946 et 1958 (voir Figure F.15). En avril 1959, un cratère s'est formé autour d'un puits d'injection de saumure.

Hypothèse sur l'origine de l'effondrement : La cause de l'accident est la dissolution du sel Permien de la formation de Hutchinson (située entre 298 et 389 mètres de profondeur - voir Figure F.15) par une saumure sous saturée. Le cuvelage du puits d'injection était corrodé (ce puits avait été auparavant utilisé comme puits de production de pétrole). De plus, il était non cimenté dans la partie supérieure de la couche de sel, permettant une circulation dans la formation salifère (cette non-cimentation est liée à l'élargissement de ce puits au niveau de la couche de sel du fait de l'utilisation de boues non saturées pendant sa foration). La corrosion du cuvelage a permis l'entrée de l'eau salée dans la formation salifère. Une cavité de grande taille se serait formée, d'au moins 100 mètres de diamètre en partie haute et d'une dizaine de mètres de hauteur. La cavité a migré vers la surface, la surface du sol s'est affaissée, le derrick s'est incliné et le puits a été abandonné en janvier 1959. L'effondrement final a eu lieu 4 mois plus tard.

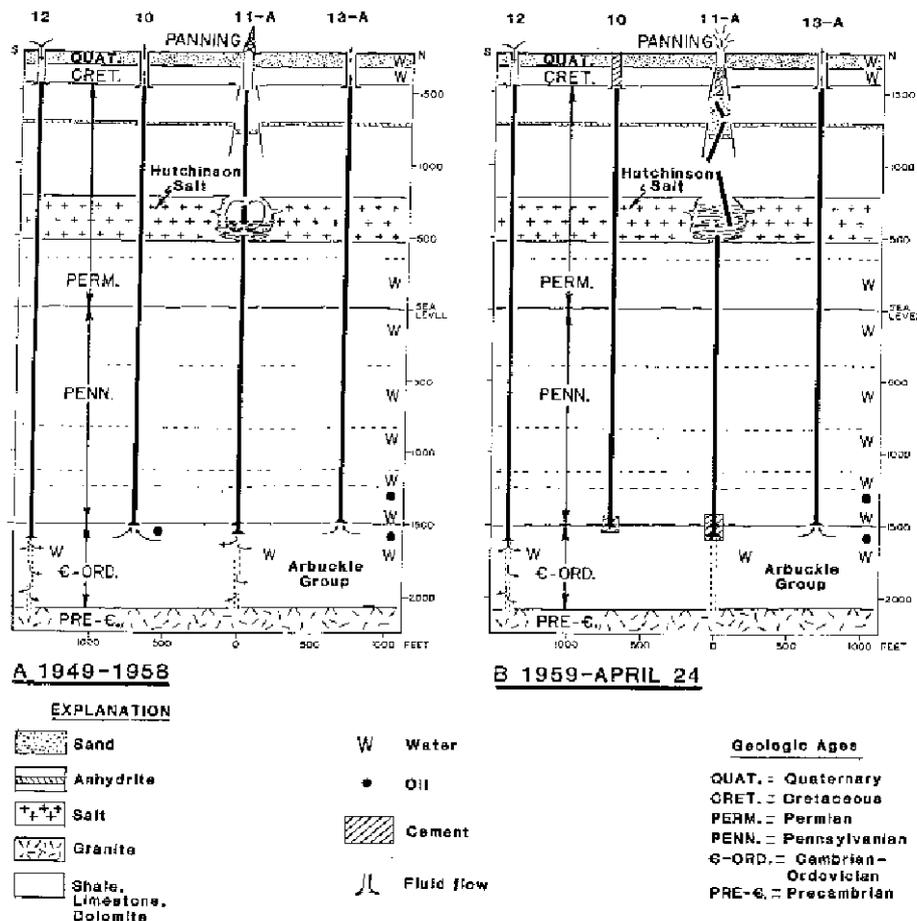


Figure F.15 : Coupe stratigraphique illustrant le processus de dissolution incontrôlée du sel et le développement de l'effondrement [Johnson, 2001]

Affaissement rapide et effondrement à Twenthe-Rijn, Pays-Bas :

Source : Wassmann [1980 et 1995]

Rappel des faits : cet accident concerne une ancienne exploitation de sel par dissolution. La couche de sel fait 50 m d'épaisseur et est située entre 350 et 400 m de profondeur. Les diamètres maximums des cavités créées (cavités isolées les unes des autres) varient de 60 m à 200 m. Un log géologique est donné Figure F.16. Plusieurs années après l'arrêt de l'exploitation, on a noté l'apparition d'affaissements lents (12 mm/an), d'affaissements rapides (5 m/an) et même d'une cuvette d'effondrement.

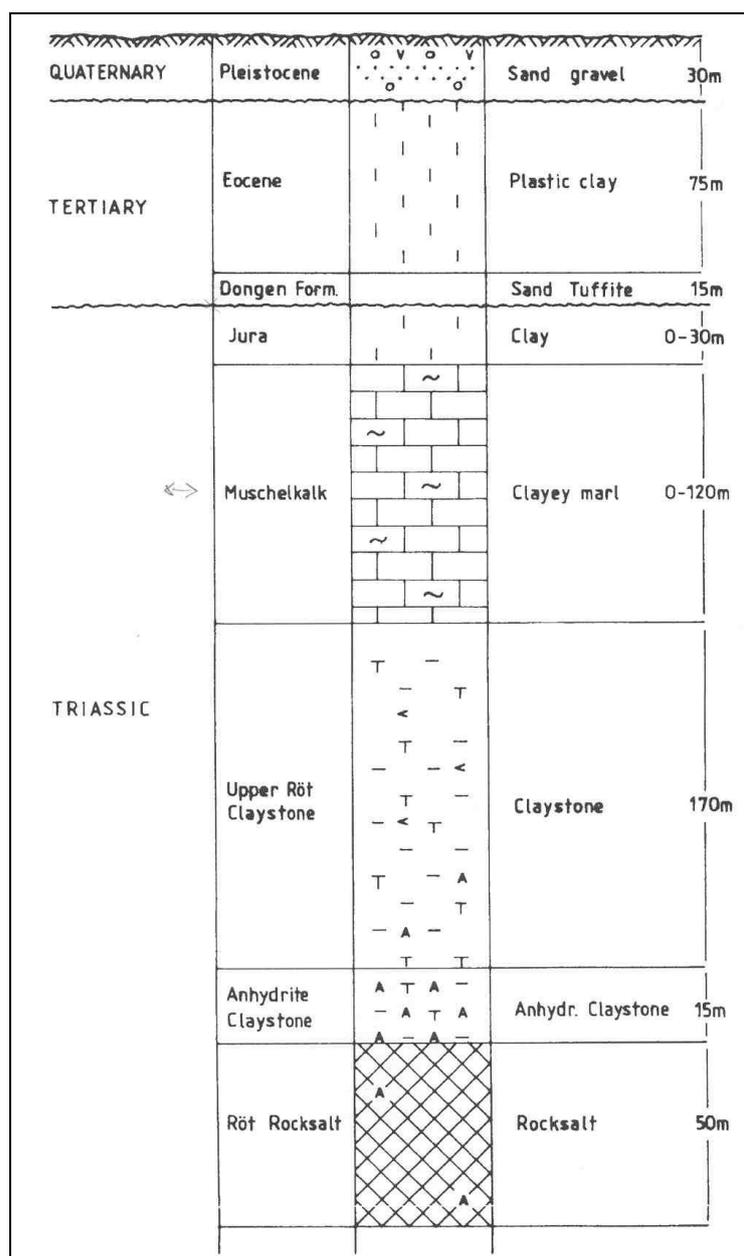


Figure F.16 : Profil géologique de la mine de Twenthe-Rijn [Wassmann, 1995]

Hypothèse sur l'origine des mouvements de surface : ils seraient dus à une évolution normale dans le recouvrement d'une cavité créée par dissolution du sel. Cette migration se fait à vitesse variable. L'anhydrite, rencontrée au toit du sel, joue un rôle de blocage relatif grâce à ses bonnes propriétés mécaniques et s'oppose à la migration qui se fait à une vitesse moyenne de 1,3 m/an. Au sein des argilites, qui, elles aussi, affichent une certaine résistance (mais plus faible que l'anhydrite), la migration est plus rapide ; la vitesse peut alors atteindre 17,5 m/an. Néanmoins, malgré la résistance de ces couches, de faibles affaissements, de l'ordre de quelques millimètres par an, sont enregistrés en surface pendant la migration de la cavité. Lorsque la cavité atteint la base des argiles non consolidées, celles-ci fléchissent au-dessus de la cavité et probablement s'éboulent et comblent rapidement tout le volume disponible, rendant les affaissements plus importants en surface. Le rythme des affaissements s'accélère alors pour diminuer rapidement ensuite.

Au moment de l'exploitation, la stabilité de la surface du sol était bien le but recherché. En effet à partir des essais de laboratoire sur des carottes, un diamètre maximal conseillé d'environ 80 m a été calculé pour les cavités soient stables. Cependant, dans ces calculs, les changements de propriétés mécaniques en raison de l'humidification des formations rocheuses, notamment dans les « red beds », n'ont pas été considérés.

Dans la réalité, des cavités n'ayant pas 80 m de diamètre se sont révélées instables. Le contact entre la saumure et les couches sus-jacentes entraîne une perte de résistance de celles-ci et ceci d'autant plus que la fissuration est importante. Les niveaux argileux sont très sensibles à ce phénomène et les anhydrites un peu moins. Cela explique bien, en plus de la résistance propre de chacun des matériaux, les différences de vitesse de migration de la cavité au sein des couches.

L'anhydrite située au toit du sel va devoir supporter la pression des terrains sus-jacents. Cela va se manifester au niveau des bancs raides par une flexion et à partir d'un certain seuil, des fissurations vont apparaître. Ces dernières pourront alors être empruntées par le fluide pour se propager au sein de la roche entraînant alors la perte des propriétés mécaniques d'où leur effondrement.

Heiligrelee brine field, Pays-Bas :

Source : Eckemeier et al. [2002]

Rappel des faits : « Heiligrelee brine field » exploite par dissolution un dôme de sel du Permien localisé au nord est des Pays-Bas. Le sommet du dôme est à 500 m de profondeur, les cavités étant situées entre 700 et 1400 m. Elles sont au nombre de 9, leur diamètre est au maximum de 100 m, leurs hauteurs varient de 420 m à 630 m. Les cavités sont séparées par des piliers de 100 à 125 m de large (Figure F.17).

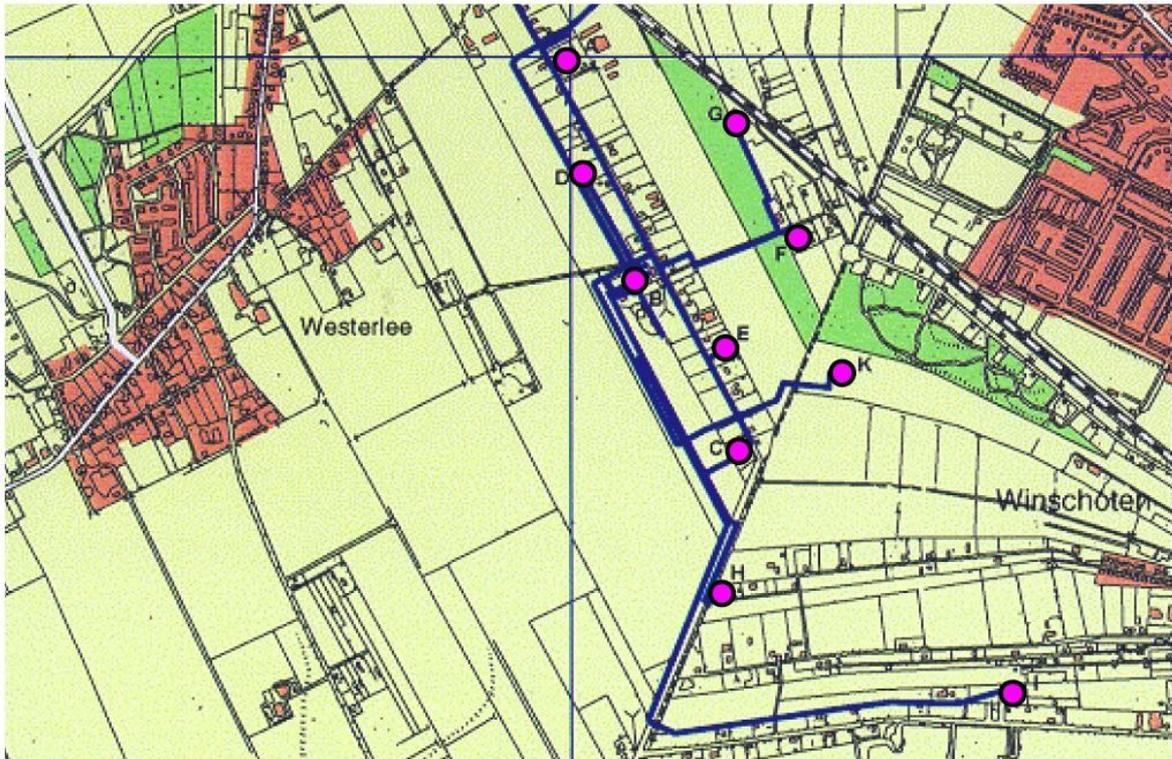


Figure F.17 : Profil géologique de la mine de Twenthe-Rijn
[Eckemeier et al., 2002]

Les mesures d'affaissement faites à l'aplomb des cavités montrent que la vitesse de l'affaissement maximal est de 5,6 mm/an pendant la période d'extraction.

Hypothèse sur l'origine des mouvements de surface : les mouvements de surface sont liés à une convergence des cavités par fluage du sel. Les modèles prédisent une augmentation importante des mouvements de surface à long terme ($\times 2$) si l'on augmente le diamètre des cavités de 100 à 125 m.

La fermeture des cavités (scellement des puits) permet de réduire les vitesses de fluage de 2 à 3 ordres de magnitude. Si la cavité reste ouverte, la vitesse l'affaissement induit sera de 4,5 mm/an après 80 ans ; si on la ferme, la vitesse de l'affaissement se poursuivra à un rythme de 0,1 mm/an pendant 45 ans. Les mouvements de surface augmentent donc beaucoup plus lentement après fermeture des cavités.

ANNEXE G

ARBRES DES CAUSES DES PRINCIPAUX PHENOMENES REDOUTES DANS LE CONTEXTE DES STOCKAGES SOUTERRAINS ABANDONNES

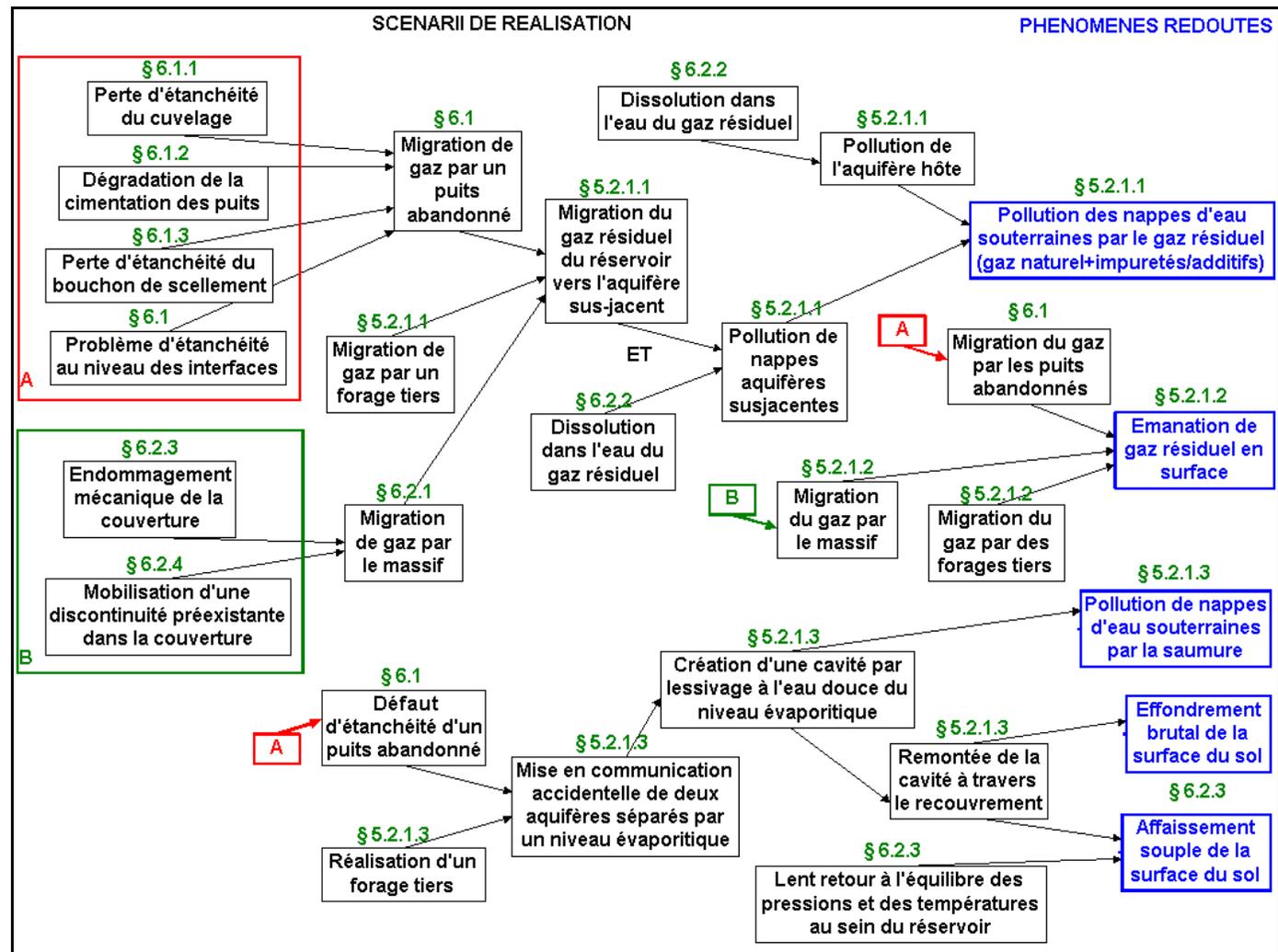


Figure G.1 : Arbres des causes des principaux phénomènes redoutés dans le contexte d'un stockage abandonné en milieu poreux

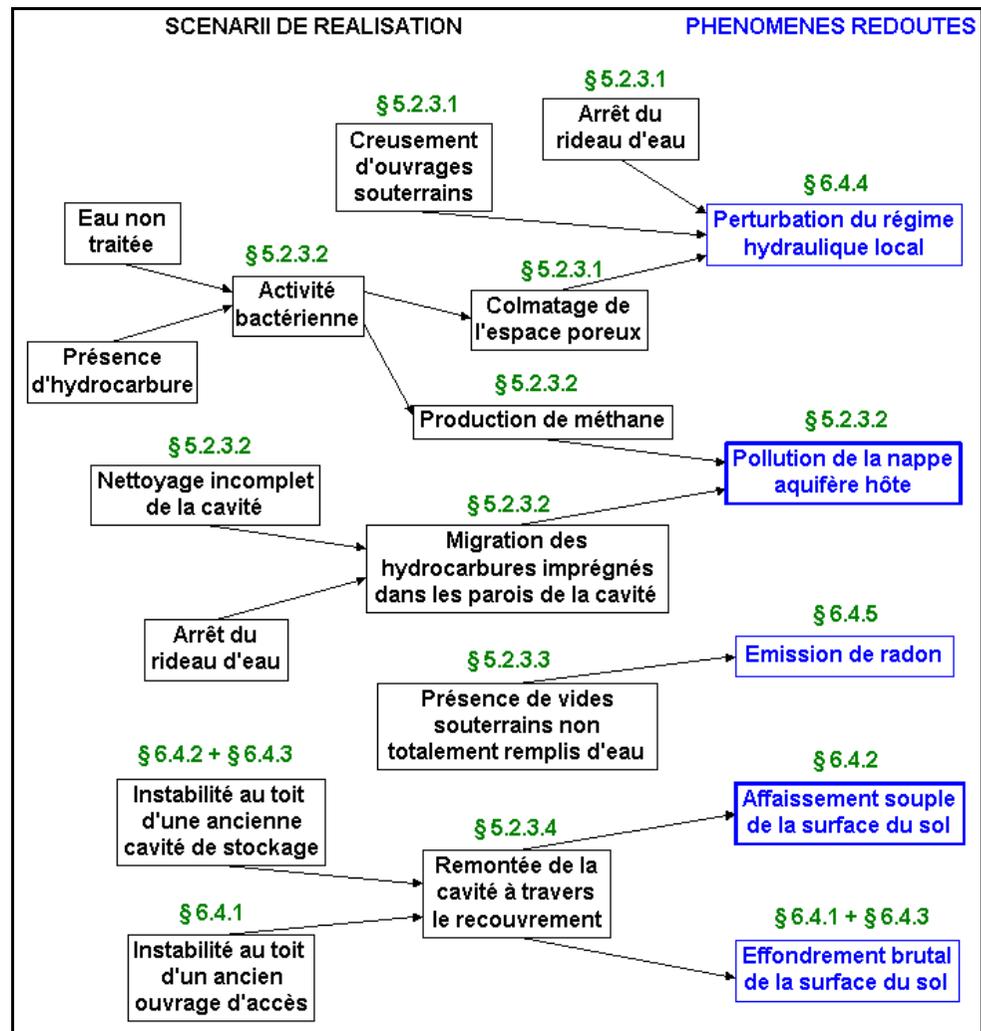


Figure G3 : Arbres des causes des principaux phénomènes redoutés dans le contexte d'un stockage abandonné en cavités minées