

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-11-118134-02433B

27/8/2013

**L'ABANDON DES CAVITES DE STOCKAGE
LESSIVEES DANS LE SEL : STRATEGIES
ENVISAGEES POUR LA FERMETURE DES CAVITES
ET LA MAITRISE DES ALEAS A LONG TERME**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

L'abandon des cavités de stockage lessivées dans le sel : stratégies envisagées pour la fermeture des cavités et la maîtrise des aléas à long terme

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

Les avancées récentes dans la problématique de l'abandon des stockages dans le sel doivent beaucoup aux études réalisées au sein du SMRI et notamment en France, à MM. Pierre Bérest, Benoît Brouard et Gérard Durup.

Suite à une relecture de ce rapport, MM. Pierre Bérest & Benoît Brouard ont judicieusement proposé de l'enrichir en y joignant une synthèse de leur retour d'expérience relatif aux expérimentations in situ d'abandon de cavités salines. Qu'ils en soient vivement remerciés.

Nos remerciements vont également à la DREAL Aquitaine ainsi que la société TIGF, qui nous ont permis, afin d'illustrer le présent rapport, d'avoir accès aux éléments du dossier d'arrêt définitif du stockage souterrain de Carresse-Cassaber.


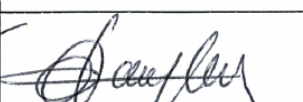

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Franz LAHAIE Alain THORAVAL	Xavier DAUPLEY	Mehdi GHOREYCHI
Qualité	Ingénieurs respectivement à l'Unité ESEG et RNOS à la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol	Responsable de l'Unité RIGE à la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-Sol
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	7
2. CADRE REGLEMENTAIRE DE L'ABANDON D'UN STOCKAGE SOUTERRAIN	9
2.1 Rappel du cadre juridique des stockages souterrains	9
2.2 Les principales phases de la vie d'un stockage souterrain.....	13
2.3 Les procédures administratives associées.....	15
2.3.1 Le permis exclusif de recherches	15
2.3.2 Le titre de concession.....	15
2.3.3 Les autorisations de travaux au titre des mines et des Installations Classées.....	16
2.3.4 La maîtrise des risques et de l'urbanisation.....	16
2.3.5 La police des mines et des stockages souterrains et la police des IC	17
2.3.6 La déclaration d'arrêt définitif des travaux (DADT)	18
2.3.6.1 Objet de la déclaration et réglementation applicable.....	18
2.3.6.2 Contenu du dossier	19
2.3.6.3 Procédure d'instruction.....	21
2.3.7 La renonciation au titre de concession	22
3. LA METHODE « CLASSIQUE » D'ABANDON.....	25
3.1 Vidange du produit et mise en saumure de la cavité.....	26
3.2 Opérations de dépiégeage.....	27
3.3 Caractérisation de l'état de la cavité et du puits	27
3.4 Attente de l'équilibre thermique entre la saumure et le sel.....	28
3.5 Modélisation de l'évolution à long terme de la cavité	29
3.6 Suivi de l'évolution de la cavité avant fermeture	29
3.7 Bouchage définitif du puits	29
3.8 Démantèlement des installations et réhabilitation des terrains de surface ..	31
3.9 Surveillance post-fermeture	31
4. EVOLUTION D'UNE CAVITE LESSIVEE DE STOCKAGE APRES SON ABANDON.....	33
4.1 Préambule : présentation de la démarche.....	33
4.2 Les phénomènes qui gouvernent l'évolution de la cavité	34
4.3 L'effet du réchauffement de la saumure	35
4.4 L'effet combiné du fluage du sel et de la perméation de la saumure à travers les parois de la cavité.....	40
4.5 L'effet des fuites par le puits.....	47
5. LES ALEAS LIES A L'ABANDON DES CAVITES DANS LE SEL	51
5.1 Convergence rapide de la cavité.....	51

5.2	Rupture des parois de la cavité	52
5.2.1	Typologie des ruptures	52
5.2.2	Causes possibles.....	53
5.3	Pollution des eaux souterraines par la saumure	54
6.	MESURES DE REDUCTION DES ALEAS ET STRATEGIES D'ABANDON ALTERNATIVES A LA METHODE « CLASSIQUE »	57
6.1	Mesures de réduction du risque de fracturation de la cavité par réchauffement de la saumure.....	57
6.1.1	Attendre le réchauffement naturel de la saumure	57
6.1.2	Diminuer la pression initiale de la saumure	57
6.1.3	Réchauffer la saumure avant de l'injecter en cavité	57
6.1.4	Injecter du gaz dans la cavité pour en augmenter la compressibilité.....	58
6.2	Les méthodes d'abandon alternatives.....	58
6.2.1	Fermer la cavité à pression atmosphérique	59
6.2.2	Remblayer et fermer la cavité	59
6.2.3	Remplir la cavité de saumure en laissant le puits ouvert.....	59
6.2.4	Remplir la cavité de saumure et de remblais en laissant le puits ouvert..	60
6.2.5	Remplir la cavité de saumure et ouvrir le puits sur un aquifère salin	60
6.2.6	Provoquer l'effondrement de la cavité	60
6.3	Pertinence d'une surveillance après l'abandon d'une cavité dans le sel	63
7.	SYNTHESE ET RECOMMANDATIONS.....	65
8.	REFÉRENCES	73
9.	LISTE DES ANNEXES	75
	ANNEXE A PRINCIPAUX ARTICLES REGLEMENTAIRES RELATIFS A L'ABANDON DES STOCKAGES SOUTERRAINS	1
	ANNEXE B DETAILS DE L'APPROCHE UTILISEE POUR ETUDIER L'EVOLUTION A LONG TERME D'UNE CAVITE ABANDONNEE DANS LE SEL.....	1
B-1.	Hypothèses de modélisation	3
B-2.	Effet du réchauffement de la saumure	6
B-3.	Effet du fluage du sel.....	22
B-4.	Effet de la perméation de la saumure.....	31
B-5.	Effets combinés de la dilatation thermique, du fluage et de la percolation ..	50
B-6.	Effet des fuites par le puits	63
B-7.	Stratégies permettant de réduire le délai de fermeture d'une cavité dans le sel.....	67
	ANNEXE C ARBRE DE SCENARIOS DE RISQUES POUR UN STOCKAGE EN CAVITES LESSIVEES ABANDONNE SELON LA METHODE CLASSIQUEMENT UTILISEE.....	1

ANNEXE D (REDIGEE PAR : P. BEREST ET B. BROUARD) ESSAIS D'ABANDON CONDUITS EN APPUI DE LA MODELISATION DE L'EVOLUTION A LONG TERME DES CAVERNES FERMEES	1
Note liminaire.....	3
D-1. Introduction	3
D-2. Essai à Etrez (EZ53) (France, 1997–1998).....	4
D-3. Essai à Carresse (SPR3) (France, 2003–2004).....	6
D-4. Essai à Carresse (SPR2)	7
D-5. Essai d'abandon dans une mine à Bernburg (Allemagne, 2001–2003)	9
D-6. Abandon d'une cavité à Stade–Süd [Allemagne, 2006]	10
D-7. Essai d'abandon à Stassfurt (Allemagne, 2004–2009)	10
D-8. Essai d'abandon à Tersanne (France, 2007)	12
D-9. Abandon d'une cavité à Barradeel (Pays–Bas, 2009).....	12
D-10. Essai d'abandon d'une cavité à Mont Belvieu, Texas (USA, depuis 2007)	14
D-11. Essai d'abandon à Gellenoncourt (France, depuis 2008).....	15
D-12. Conclusion sur les essais d'abandon	15
D-13. Références	17

1. INTRODUCTION

Le stockage de gaz naturel ou d'hydrocarbures en cavités creusées par dissolution dans le sel est un procédé relativement récent. En effet, le plus ancien stockage de ce type en France a été mis en exploitation il y a moins de 50 ans, ce qui est peu au regard de la durée de vie a priori de ces ouvrages qui, s'ils sont stables et ne sont pas soumis à des cycles d'exploitation trop intenses, pourraient être utilisés pendant des centaines d'années. De fait, il y a encore peu de cas d'abandon de stockages de ce type à travers le monde. En France, le seul exemple à ce jour est celui de Carresse-Cassaber (Pyrénées Atlantiques), dont le dossier d'arrêt définitif est seulement en cours d'instruction.

Néanmoins, depuis quelques années, la problématique de l'abandon des cavités dans le sel suscite une attention croissante des industriels et des pouvoirs publics. De nombreuses études et recherches ont été menées notamment au sein du Solution Mining Research Institute (SMRI) et des expérimentations d'abandon ont été conduites, par exemple en France à Carresse-Cassaber, Tersanne, Etrez ou Vauvert, pour améliorer les connaissances sur le comportement à long terme des cavités salines et pour mettre au point les méthodologies d'abandon qui prévaudront dans les années à venir. L'Administration, quant à elle, est particulièrement vigilante à ce que les méthodes d'abandon vers lesquelles s'orientent les exploitants soient garantes de la sécurité à long terme des personnes et des biens, ainsi que la protection de l'environnement autour des sites concernés.

Cette question de la sécurité et de l'impact des cavités abandonnées dans le sel n'est en effet pas anodine dans la mesure où, selon les options d'abandon les plus probables à ce jour, ces cavités pourraient rester des milliers voire des dizaines de milliers d'années dans le sous-sol avant de se refermer totalement par fluage du sel. Il est donc légitime de se demander si l'étanchéité et la stabilité de ces ouvrages pourra être assurée à des échelles de temps aussi longues et quelles seraient les conséquences sur l'homme et sur l'environnement d'une perte d'intégrité de ces cavités. Si des risques ou impacts résiduels sont à redouter, quelles mesures peut-on mettre en œuvre pour les maîtriser : l'Etat doit-il, par exemple, assurer une surveillance après l'abandon et si oui, pendant combien de temps ?

On le voit, l'abandon des cavités dans le sel pose des questions d'enjeu public qui engagent potentiellement le long terme et pour lesquelles il est important de bien évaluer la pertinence et les implications des stratégies de réponse proposées par les exploitants avant que celles-ci soient définitivement validées. Le présent rapport vise à éclairer les pouvoirs publics sur les stratégies d'abandon actuellement envisagées en France et sur les implications de ces choix en termes d'évolution des cavités à long terme, d'échelles de temps impliquées, de risques ou impacts résiduels associés et de mesures à prendre pour les maîtriser. Ce rapport s'adresse donc en premier lieu à l'Administration et notamment, aux inspecteurs qui seront chargés d'instruire des dossiers d'abandon pour ce type de stockage.

Dans une première partie du document, nous proposons un rappel du cadre réglementaire et des procédures administratives qui accompagnent l'abandon d'un stockage souterrain. Nous décrivons ensuite la méthode d'abandon vers laquelle s'orientent la plupart des exploitants en France et à l'étranger. Cette méthode, que nous qualifierons dans ce rapport de « méthode classique d'abandon », consiste à

mettre la cavité en saumure et à obturer définitivement le puits par bouchage (partiel ou total) au ciment. Dans une troisième partie, nous abordons la question de l'évolution à long terme de la cavité lorsqu'elle sera abandonnée : quelle va être l'évolution de la pression en cavité, quels débits de saumure seront expulsés dans les terrains environnants, en combien de temps la cavité va-t-elle se refermer ?

Dans une quatrième partie, nous procéderons à une analyse générique des aléas susceptibles de demeurer après l'abandon d'une cavité dans le sel. Nous présenterons ensuite un certain nombre de mesures de maîtrise de ces aléas et de stratégies d'abandon alternatives à la méthode « classique ». Enfin, une synthèse et un certain nombre de recommandations concluront le rapport.

Notons que l'on utilisera le terme « abandon » pour désigner « l'arrêt définitif des travaux » tel que défini à l'article 91 du code minier¹. Par ailleurs, le terme « stockage souterrain » se référera aux stockages visés à l'article 3-1 du code minier, c'est-à-dire les stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux ou de produits chimiques à destination industrielle.

Notons enfin que, pour le lecteur non spécialiste, une synthèse est fournie à fin de ce rapport (§ 7).

¹ Notons que toutes les références au Code minier figurant dans ce rapport s'entendent au sens de l'ancien Code minier (avant sa recodification entrée en vigueur le 1^{er} avril 2011)

2. CADRE REGLEMENTAIRE DE L'ABANDON D'UN STOCKAGE SOUTERRAIN

2.1 RAPPEL DU CADRE JURIDIQUE DES STOCKAGES SOUTERRAINS

Le régime juridique propre aux stockages souterrains est relativement complexe, dans le sens où, par nature, ils possèdent à la fois des installations souterraines et des installations de surface. Ils sont donc soumis à une multiplicité de règles qui relèvent à la fois du code minier et du code de l'environnement (voir Figure 1).

Tout d'abord, depuis la loi n°2003-8 du 3 janvier 2003, l'ensemble des stockages de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux ou de produits chimiques à destination industrielle, sont régis par le code minier. Ils sont donc, au titre de l'article 3-1 et du titre V_{bis} de ce code, assimilés à des gisements miniers et l'exploitation d'un stockage souterrain nécessite l'obtention d'un titre de concession.

Les décrets n°2006-648 et n°2006-649 du 2 juin 2006 précisent 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 les travaux et la police des stockages souterrains. Ces deux décrets ont été modifiés par le décret n°2007-910 du 15 mai 2007 qui intègre notamment de nouvelles obligations concernant la protection de la ressource en eau.

En ce qui concerne les dispositions relatives à l'abandon des stockages souterrains (procédure « d'arrêt définitif des travaux »), celles-ci sont mentionnées aux articles 91 à 93 du code minier et aux articles 43 à 50 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 (Figure 2). Deux textes réglementaires précisent les modalités d'application de ces dispositions : la circulaire 4C/2008/05/10257 du 27 mai 2008 et l'arrêté du 8 septembre 2004 (JO n°233 du 06 oct 2004). Le cas échéant, si des risques résiduels subsistent après l'arrêt des travaux, des prescriptions en terme d'occupation des sols ou d'usage peuvent être prises au travers d'un Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM), conformément aux dispositions de l'article 94 du code minier, du décret n°2000-547 du 16 juin 2000 dit « décret PPRM » et de la circulaire du 3 mars 2008 dite « circulaire PPRM ».

Ensuite, les stockages souterrains sont également soumis à un ensemble de règles qui ne relèvent pas du Code minier. Ainsi, l'exploitant doit respecter les dispositions de la directive européenne « Seveso II » (directive 96/82/CE du 9 décembre 1996), qui vise les stockages souterrains. Cette directive a été traduite en droit français, pour les stockages souterrains, par le décret n° 2002-1482 du 20 décembre 2002 (intégré depuis dans le décret du 2 juin 2006) et l'arrêté du 17 janvier 2003.

Les stockages souterrains sont également concernés par la loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages. A ce titre, les stockages souterrains sont soumis aux Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) et sont concernés par le décret n°2005-1130 du 7 septembre 2005 qui en précise les modalités d'application. La circulaire DEVP 1013761C du 10 mai 2010 et la note BSSS/2010-494/SD du 19 décembre 2010 apportent également des compléments sur les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à

l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux PPRT dans les stockages souterrains.

Enfin, la plupart des stockages souterrains comportent en surface des installations classées (IC). A ce titre, ces installations sont soumises aux dispositions réglementaires du Code de l'environnement.

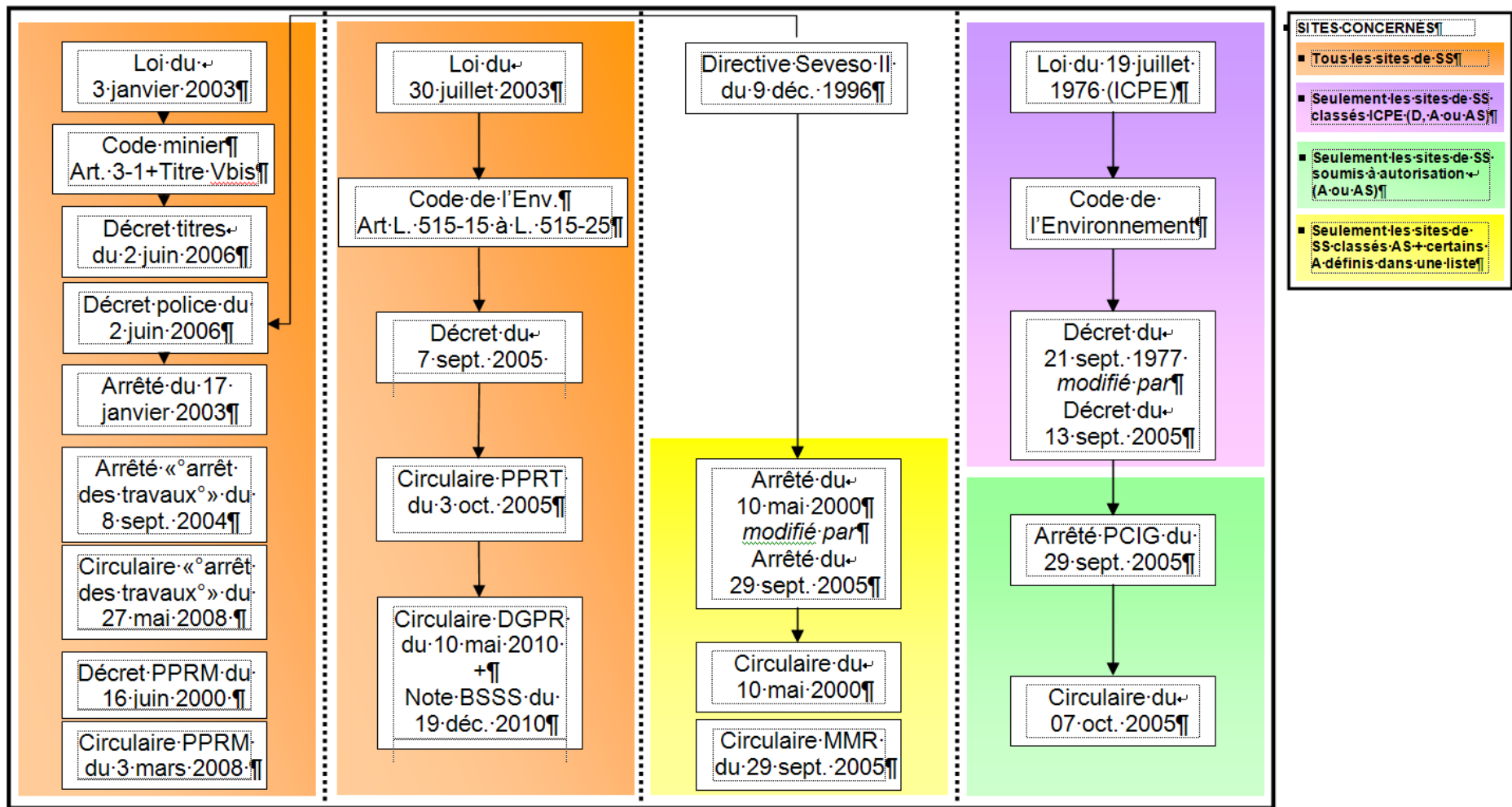


Figure 1 : Cartographie des principaux textes réglementaires applicables aux stockages souterrains

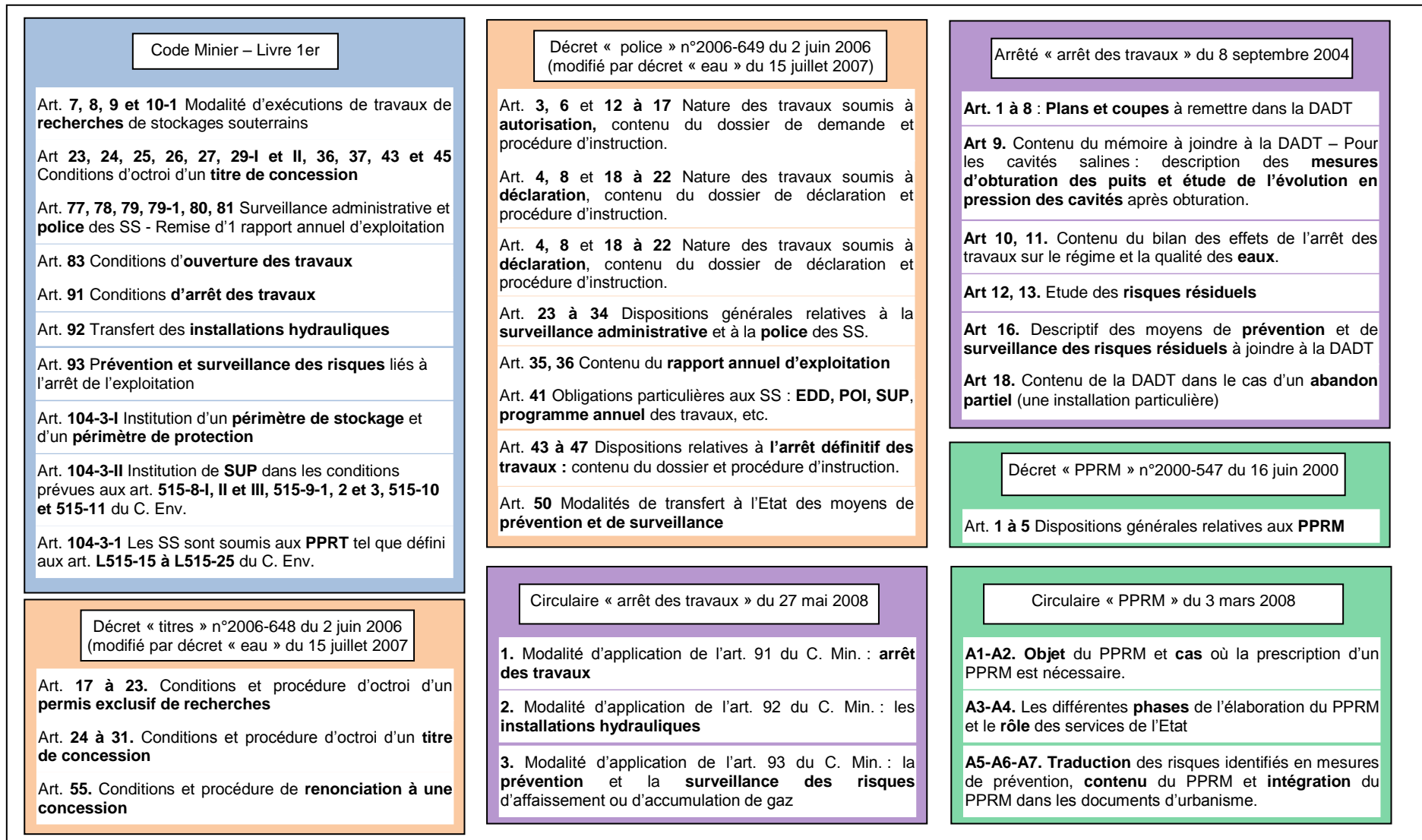


Figure 2 : Synoptique des principaux textes réglementaires relevant du code minier et applicables aux stockages souterrains

2.2 LES PRINCIPALES PHASES DE LA VIE D'UN STOCKAGE SOUTERRAIN

Il serait délicat d'aborder la problématique de l'abandon d'un stockage souterrain sans la resituer dans le processus complet de la vie du stockage. En effet, le choix d'une méthode optimale d'abandon doit intégrer à la fois l'historique du site et les risques qui pourraient survenir après son abandon.

La Figure 3 illustre les principales phases de la vie d'un stockage souterrain. On peut en distinguer trois :

- La phase de recherche, initiée généralement par l'obtention d'un permis de recherches, qui comprend les travaux de forages de reconnaissance ainsi que la réalisation éventuelle de tests d'injection et de soutirage dès lors que le produit utilisé pour ce faire est neutre pour l'environnement.
- La phase de concession, initiée par l'obtention d'un titre de concession, qui comprend elle-même trois grandes phases :
 - L'aménagement du site et la réalisation des essais préalables à la mise en exploitation. Cette phase comprend les travaux de forage, l'équipement des puits, les essais d'étanchéité, la construction des installations de surface, etc. Dans le cas des stockages en cavités salines, cette phase intègre également la création des cavités par lessivage,
 - l'exploitation, c'est-à-dire la réalisation des cycles d'injection et de soutirage du produit stocké. Cette phase peut également inclure des opérations de contrôle ou des travaux de maintenance,
 - l'arrêt définitif (aussi appelée « fermeture » ou « abandon »), qui consiste à réhabiliter le site et à prendre des mesures destinées prévenir les risques de désordres ou de nuisances après l'arrêt de l'exploitation,
- La phase post-concession, que l'on peut également diviser en trois périodes :
 - la phase de gestion des risques résiduels (GRR), qui suit immédiatement la renonciation à la concession et pendant laquelle l'Etat met en œuvre, le cas échéant, des mesures de gestion des risques résiduels : surveillance, Plan de Prévention des Risques Miniers, etc.
 - la phase de mémoire², dont on peut estimer la durée entre 150 et 300 ans, qui consiste en la période de temps pendant laquelle l'humanité va garder la mémoire du stockage et des éventuels risques résiduels associés,
 - la phase d'oubli, qui définit la période à partir de laquelle l'existence du stockage et des éventuels risques associés auront été oubliés.

² Notons que ces notions de phase de « mémoire » et de phase « d'oubli » ne sont pas usuelles pour les stockages de gaz et d'hydrocarbures dans la mesure où le très long terme est une problématique rarement abordée. Nous les introduisons ici à titre de proposition, par analogie avec la terminologie utilisée dans le domaine des stockages de déchets radioactifs.

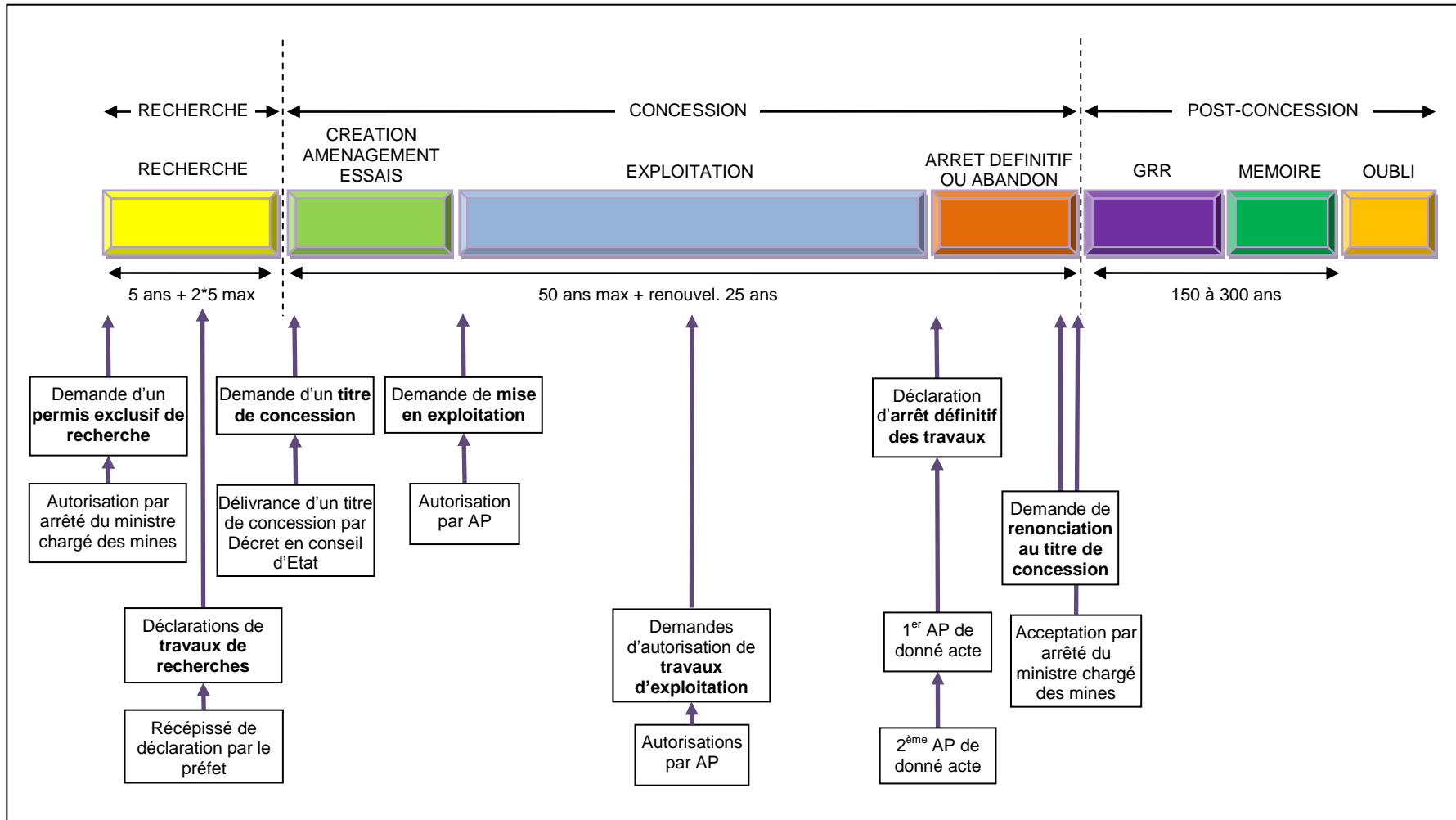


Figure 3 : Principales étapes de la vie d'un stockage souterrain et procédures administratives correspondantes au titre du code minier (GRR = gestion des risques résiduels)

2.3 LES PROCEDURES ADMINISTRATIVES ASSOCIEES

Aux différentes phases de la vie d'un stockage décrites précédemment sont associées un certain nombre de procédures administratives, parfois complexes, qui en sont le préalable indispensable. Nous décrivons ci-après les principales démarches administratives qui jalonnent la vie d'un stockage, en donnant en référence les textes (ou articles) qui les encadrent.

2.3.1 LE PERMIS EXCLUSIF DE RECHERCHES

La première étape du développement d'un stockage souterrain consiste à rechercher les sites géologiques offrant les caractéristiques nécessaires au stockage du produit concerné. Cette recherche est régie par les articles 7 à 9 et par le premier alinéa de l'article 10 du Code minier (Figure 2).

L'outil privilégié pour la recherche de stockages est l'obtention d'un permis exclusif de recherches. La procédure de demande est fixée par les articles 17 à 23 du décret n°2006-648 du 2 juin 2006. Bien que ce permis soit soumis à des conditions d'octroi strictes et qu'il ne soit accordé qu'après une mise en concurrence, celui-ci garantit à son titulaire l'exclusivité du droit de recherches dans son périmètre et permet d'éviter la mise en concurrence de la concession de stockage souterrain qui sera ultérieurement demandée.

Le permis exclusif de recherche est accordé par arrêté du ministre chargé des mines pour une durée maximale de 5 ans. Il peut être prolongé à deux reprises, soit une durée totale de validité de 15 ans au maximum.

2.3.2 LE TITRE DE CONCESSION

Un stockage souterrain étant assimilé à une mine (au sens réglementaire), il ne peut être exploité sans l'obtention d'un titre de concession. Ce titre fixe le périmètre et les formations géologiques auxquels il s'applique. Il est accordé, quasiment dans les mêmes conditions que les concessions de mines, à toute personne qui dispose des garanties techniques et financières requises.

L'obtention du titre de concession répond à une procédure longue et complexe : le contenu du dossier de demande est défini à l'article 24 du décret n°2006-648 du 2 juin 2006. Il comprend notamment un mémoire technique, un descriptif des travaux d'exploitation et une notice d'impact. Cette demande comporte également les informations relatives à l'étendue de la concession demandée : le périmètre de stockage, le périmètre de protection, la nature et le volume maximal estimé du produit stocké.

La concession est accordée par décret en Conseil d'Etat pour une durée limitée ne pouvant dépasser 50 ans. Elle peut faire l'objet de prolongations successives, chacune d'une durée maximum de 25 ans.

2.3.3 LES AUTORISATIONS DE TRAVAUX AU TITRE DES MINES ET DES INSTALLATIONS CLASSEES

L'obtention des titres miniers requis pour la recherche et l'exploitation n'autorise pas l'exploitant d'un stockage à entreprendre des travaux miniers dans le périmètre de ces titres. Le titulaire d'un permis exclusif de recherches ou le concessionnaire doit encore respecter non seulement les procédures de déclaration et d'autorisation de travaux miniers prévues par le décret n°2006-649 du 2 juin 2006 à chaque étape du développement d'un site (forage de puits, réalisation d'essais d'injection ou de soutirage, mise en gaz, etc...), mais encore les prescriptions relatives à la réglementation des installations classées (IC) [Chaptal & Deroubaix, 2008].

Les travaux de recherches doivent ainsi faire l'objet d'une déclaration conformément à l'article 4 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006. Les travaux d'exploitation doivent quant à eux faire l'objet d'une autorisation préfectorale en vertu de l'article 3 dudit décret. Le dossier d'autorisation comprend les éléments énumérés à l'article 6 dont notamment un exposé relatif aux méthodes d'exploitation envisagées, une étude d'impact³ (Code de l'Environnement, art. R. 122-3), un document indiquant à titre prévisionnel les conditions de l'arrêt des travaux et l'estimation du coût associé, des indications sur les caractéristiques essentielles de l'exploitation et une étude de dangers (Code de l'Environnement, art. L. 512-1). L'exploitant doit également transmettre les informations nécessaires à l'élaboration d'un plan particulier d'intervention (PPI) et à l'institution de servitudes d'utilité publique.

L'autorisation ainsi délivrée ne couvre que les travaux miniers et n'a ni pour objet ni pour effet d'autoriser l'exploitation des IC nécessaires à la réalisation de ces travaux (installations de compression, de désulfuration de gaz inflammable ou de combustion). L'exploitant doit ainsi établir les dossiers nécessaires et attendre le récépissé de déclaration ou l'autorisation de l'administration pour la mise en service de ses installations même s'il a déjà obtenu les autorisations de travaux nécessaires au titre de la police des mines. En pratique, les DREAL étant en charge des procédures administratives tant en matière de mines qu'en matière d'installations classées, les demandes nécessaires au titre des deux législations sont réunies dans un même dossier, afin de simplifier des procédures déjà complexes.

2.3.4 LA MAITRISE DES RISQUES ET DE L'URBANISATION

Une fois les titres et autorisations obtenus, l'exploitation d'un stockage peut commencer. L'exploitant est alors tenu à de nombreuses obligations et participe à la mise en place d'outils propres à assurer la sécurité du site :

- un système de gestion de la sécurité SGS (arrêté du 17 janvier 2003), qui vise à éviter la survenance d'un incident ou d'un accident,
- un plan d'opération interne POI (arrêté du 17 janvier 2003), qui vise à organiser les moyens d'intervention pour protéger le personnel, les populations et l'environnement en cas d'accident survenant sur son site,
- un plan particulier d'intervention PPI (décret n°2005-1158 du 13 septembre 2005), qui vise à assurer une coordination optimale des différents acteurs

³ Pour les injections de gaz naturel ou de gaz de pétrole liquéfié (GPL) en nappe aquifère.

susceptibles d'intervenir (services de police, pompiers, etc.) si les conséquences d'un accident dépassent l'enceinte du site de stockage.

Ces différents systèmes, visant à garantir la sécurité du site de stockage, s'accompagnent d'outils permettant de maîtriser l'urbanisation autour du site :

- l'instauration de servitudes d'utilité publique SUP (Code minier, art. 104-3-II), dont les modalités d'institution sont celles destinées à régler les IC (Code de l'Environnement, art. L. 515-8,I,II, et III, art. L. 515-9, al. 1, 2 et 3, L. 515-10, L. 515-11),
- l'établissement d'un Plan de Prévention des Risques Technologiques PPRT (Code minier, article 104-3-1 inséré par la loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 et appliquant aux stockages souterrains les articles L. 515-15 à L. 515-25 du code de l'Environnement), qui définit un périmètre global d'exposition aux risques. A l'intérieur de celui-ci, l'Administration peut, en fonction du type de risques, de leur gravité, de leur probabilité et de leur cinétique (notamment au vu des informations contenues dans l'étude de dangers) définir plusieurs secteurs sur lesquels pourront être instaurées des mesures d'inconstructibilité (ou de constructibilité sous conditions), des droits de préemption, des droits de délaissement, voire des mesures d'expropriation.

2.3.5 LA POLICE DES MINES ET DES STOCKAGES SOUTERRAINS ET LA POLICE DES IC

Au-delà de l'obligation d'obtenir les titres et autorisations nécessaires avant d'entreprendre tous travaux de recherche ou d'exploitation sur son site, l'exploitant est soumis, lors de ces travaux, à la police des mines et des stockages souterrains (Code Minier, art. 77 à 81, 83 et 85). Celle-ci vise à prévenir et faire cesser les dommages et nuisances qui seraient générés par ces travaux, en particulier ceux susceptibles de menacer les intérêts fondamentaux à préserver, à savoir (art. 79 du code minier) :

- assurer la sécurité et la salubrité publiques ;
- préserver les caractéristiques essentielles du milieu environnant,
- garantir la solidité des édifices publics et privés,
- préserver les intérêts agricoles et de l'archéologie,
- préserver les monuments historiques et les sites naturels remarquables,
- conserver les voies de communication,
- assurer la protection de la ressource en eau.

Les différents types de mesures qui peuvent être prises par le préfet au titre de la police des mines et des stockages souterrains sont : des mesures d'injonction, des mesures d'interdiction, des mesures d'exécution d'office [Chaptal & Deroubaix, 2008]. Par ailleurs, si le préfet est titulaire de l'exercice de la police des mines, il est également l'autorité compétente pour l'exercice de la police des IC. Cette double compétence fait de lui l'autorité centrale en matière de stockage et permet une surveillance cohérente de l'exploitation.

2.3.6 LA DECLARATION D'ARRET DEFINITIF DES TRAVAUX (DADT)

2.3.6.1 OBJET DE LA DECLARATION ET REGLEMENTATION APPLICABLE

L'arrêt de l'exploitation d'un stockage souterrain (ou de l'utilisation d'une partie de ses installations) s'accompagne d'une procédure juridique appelée « arrêt définitif des travaux ». Celle-ci est régie par les articles 91, 92 et 93 du Code minier et précisée dans les articles 43 à 50 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006⁴. La circulaire du 27 mai 2008 et l'arrêté du 8 septembre 2004 apportent des précisions sur les modalités d'application de ces articles.

L'arrêt définitif des travaux est l'acte par lequel « *l'exploitant fait connaître les mesures qu'il envisage de mettre en œuvre pour préserver les intérêts mentionnés à l'article 79 [du code minier (voir § 2.3.1.5)], 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* » (Code minier, art. 91, al. 2).

L'arrêt des travaux a donc pour objet principal la sécurisation du site, c'est-à-dire l'analyse des risques et impacts à long terme qui pourraient survenir après l'arrêt de l'exploitation et la mise en place de mesures destinées à les prévenir. Dans le cas où il n'existe pas de mesures techniques « *raisonnablement envisageables permettant de prévenir ou faire cesser tout désordre* », l'exploitant doit procéder à une étude des risques résiduels et « *présenter les mesures, en particulier de surveillance, qu'il estime devoir être poursuivies* » lorsque l'arrêt des travaux sera prononcé (Code minier, art 91, al. 3). Si de tels risques sont identifiés, la mise en place et l'exploitation des mesures de prévention et de surveillance destinées à les maîtriser est à la charge de l'exploitant jusqu'à l'expiration du titre de stockage. Après l'acte de renonciation, la responsabilité de ces mesures est transférée à l'Etat, après versement par l'exploitant d'une soulte correspondant au coût des dix premières années de leur mise en œuvre. (Code minier, art 93).

Notons qu'au sens strict de la réglementation, la mise en œuvre d'éventuelles mesures de prévention et de surveillance après abandon n'a pas été prévue par le législateur dans le cas des stockages souterrains. En effet, le titre V_{bis} du code minier ne renvoie pas à l'article 93 de ce code, comme il ne renvoie pas non plus à l'article 94, qui prévoit l'établissement de Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM). Toutefois, en pratique, si des risques résiduels importants et susceptibles de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens demeuraient après l'abandon d'un stockage, il n'y a pas lieu de penser qu'une différence serait faite, en terme de gestion des risques résiduels, entre une mine et un stockage souterrain. Autrement dit, les stockages souterrains seraient soumis, comme pour les mines, à des mesures de prévention et de surveillance (conformément aux dispositions de l'article 93 du code minier) et s'il y a lieu, à l'établissement de PPRM (conformément aux dispositions de l'article 94 du code minier, du décret n°2000-547 du 16 juin 2000 et de la circulaire PPRM du 3 mars 2008). D'ailleurs, il faut noter qu'un stockage souterrain français, le stockage de May-Sur-Orne (Yvelines), a déjà fait l'objet d'un PPRM, même si ce cas est un peu particulier puisque le PPRM n'a pas été prescrit au titre de stockage souterrain mais au titre d'une ancienne mine de fer qui a été reconvertie ensuite en stockage souterrain. Sans aller jusqu'à la prescription d'un PPRM, il est

⁴ ou par les articles 44 à 49-2 de l'ancien décret n°95-696 du 9 mai 1995 pour les demandes déposées avant l'entrée en vigueur du décret du 2 juin 2006.

également possible d'inclure, par exemple, des têtes de puits dans un document d'urbanisme au travers d'un porté à connaissance (création de servitudes d'utilité publique dans un POS ou PLU).

En terme de procédure, l'arrêt des travaux est initié par l'exploitant, qui constitue un dossier de « déclaration d'arrêt définitif des travaux » (DADT), aussi appelé couramment « dossier d'abandon ». Ce dossier doit être adressé au préfet au moins 6 mois avant la fin des travaux et de l'utilisation des installations mentionnées dans la déclaration.

2.3.6.2 CONTENU DU DOSSIER

Le contenu du dossier de DADT est défini par l'article 43 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 et par l'arrêté ministériel du 8 septembre 2004. Le dossier comprend notamment :

- des plans, coupes et documents divers relatifs à la description du stockage souterrain et aux travaux et installations faisant l'objet de la procédure d'arrêt. Il est notamment fourni un 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. Pour les stockages en cavités, il est indiqué sur un plan de surface la projection horizontale de chaque cavité et, suivant sa forme, sa projection sur un ou plusieurs plans verticaux et en trois dimensions. Les projections dans le plan vertical comportent l'indication de l'épaisseur de la planche de garde laissée au toit ;
- un mémoire exposant les mesures déjà prises et celles envisagées pour prévenir les risques de survenance de désordres après l'arrêt des travaux et pour préserver les intérêts mentionnés à l'article 79 du code minier. Ce mémoire comporte notamment :
 - un historique du stockage présentant les méthodes de création, d'aménagement et d'exploitation des cavités ou des formations souterraines concernées,
 - un exposé des incidents et accidents d'exploitation survenus sur le site,
 - pour les stockages en cavités, une description des traitements réalisés ou prévus sur les cavités lors de l'arrêt des travaux (méthode d'abandon),
 - parmi ces traitements, 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,
 - pour des cavités exploitées en gaz, les conditions et les modalités de dégazage et/ou d'ennoyage de ces cavités,
 - une étude de dangers destinée à évaluer les risques engendrés par les opérations d'abandon, notamment les opérations de dégazage et ou d'ennoyage citées à l'alinéa précédent,
 - pour les stockages en cavités lessivées, les dispositions prises pour obturer les liaisons entre les cavités souterraines et le jour, et isoler les nappes souterraines entre elles et des cavités,
 - une étude démontrant que les mesures d'obturation précédentes n'auront pas de répercussion sur la pression régnant dans les cavités susceptible de conduire à la rupture des terrains ou de porter atteinte à l'intégrité des cuvelages, de leur cimentation ou des bouchons réalisés

ou prévus à l'intérieur de ceux-ci. A défaut, le mémoire doit indiquer les mesures que l'exploitant envisage de prendre pour éviter ces désordres (arr. du 8 sept 2004, art 9-II-3),

- un bilan des effets des travaux sur la qualité des eaux, des conséquences de l'arrêt des travaux sur celles-ci ainsi que des mesures envisagées pour y remédier. Ce bilan comprend notamment :
 - un rappel des données disponibles sur l'état des milieux aquatiques (eaux souterraines et superficielles) environnant le stockage avant l'exploitation,
 - un état de la situation de ces mêmes milieux à la date de déclaration d'arrêt des travaux : description, localisation, qualité des eaux, usage, piézométrie, etc.,
 - une étude de l'impact prévisible, qualitatif et quantitatif, de l'arrêt des travaux sur ces milieux : cours d'eau ou aquifères influencés, impact sur la qualité de l'eau et son usage,
 - un exposé des éventuelles mesures de suivi envisagées après l'arrêt des travaux ;
 - dans le cas où l'étude des aléas résiduels (voir alinéa suivant) a mis en évidence un risque d'effondrement de cavité de stockage, le bilan étudie les effets possibles d'un effondrement éventuel sur le régime des eaux souterraines et superficielles et identifie sur les plans les secteurs des aquifères concernés ;
- une étude des risques importants (art. 93 du code minier) susceptibles de demeurer après l'arrêt définitif des travaux et pouvant mettre en cause la sécurité des biens et des personnes. Cette étude doit définir la nature et l'ampleur de ces risques, les secteurs géographiques potentiellement affectés ainsi que les raisons techniques et financières pour lesquelles ces risques ne peuvent être supprimés. Les trois types d'aléas « importants » qui peuvent potentiellement subsister après l'arrêt de l'exploitation d'un stockage souterrain sont décrits dans le rapport général de l'INERIS sur l'abandon des stockages souterrains (réf. DRS-08-86168-00481D). Il s'agit :
 1. du mouvement brutal de la surface du sol (fontis, effondrement localisé ou effondrement généralisé) lié à une ancienne cavité de stockage, un réseau de cavités ou un ouvrage d'accès (puits ou descenderie) qui, du fait de circonstances très particulières, deviendraient instables et viendraient à s'écrouler, entraînant les terrains sus-jacents jusqu'à la surface,
 2. de l'inflammation ou de l'explosion en surface de produit qui n'aurait pas été totalement retiré lors des opérations de déstockage (cas des stockages en cavités) ou provenant du gaz coussin (dans le cas des stockages en aquifères ou en gisements déplétés) et qui viendrait à remonter en surface par un ancien puits ou par des anfractuosités des terrains au toit de la cavité ou de la formation géologique servant au stockage,
 3. d'une pollution de nappe par le produit résiduel ou, dans le cas d'un stockage en cavité lessivée, par la saumure injectée dans la cavité lors de l'abandon et qui viendrait à être expulsée de la cavité du fait d'un

défaut d'étanchéité du puits ou d'une fracturation des parois de la cavité.

Dans tous les cas, l'étude des risques résiduels doit s'efforcer de quantifier ces aléas : prédisposition du site aux phénomènes redoutés, intensité des effets prévisibles. Elle doit également les cartographier et pour cela, évaluer l'extension des zones d'effets prévisibles. Par exemple, elle doit déterminer le périmètre d'influence dans le cas où un aléa de type « affaissement » ou « effondrement brutal » serait identifié au droit d'une cavité ou d'un réseau de cavités abandonnées. L'étude doit également tenir compte de l'évolution prévisible des paramètres à long terme et du vieillissement des roches et des ciments ;

- dans le cas où l'étude précédente a révélé la persistance de tels risques, l'indication des mesures de surveillance ou de prévention que l'exploitant estime devoir être poursuivies après l'arrêt des travaux. Il est remis notamment un document qui justifie la méthode de surveillance et de prévention envisagée, les moyens et techniques retenus et leur adaptation au site, la durée prévisible de la surveillance et de la prévention, ainsi que l'évolution du dispositif au cours de cette période. Le document indique également le montant de l'investissement initial, le calendrier de mise en service des installations de surveillance et de prévention, le coût de leur fonctionnement pour une période de dix ans ainsi que, s'il y a lieu, la liste des servitudes nécessaires à leur mise en œuvre.

2.3.6.3 PROCEDURE D'INSTRUCTION

La procédure d'instruction du dossier de DADT est illustrée sur la Figure 4.

Après réception de la DADT, le préfet peut demander à ce que celle-ci soit complétée s'il y a lieu. Elle est ensuite transmise pour avis aux services intéressés et aux maires concernés puis le préfet donne acte de la déclaration ou communique à l'exploitant les autres mesures de remise en état qu'il envisage de prescrire. L'exploitant peut présenter ses observations dans un délai d'un mois. Le préfet arrête ensuite tout ou partie desdites mesures, ainsi que le délai de réalisation (1^{er} arrêté de donné acte). Si l'exploitant n'exécute pas ces mesures, l'Administration assure leur exécution d'office à ses frais.

Lorsque toutes les mesures envisagées par l'exploitant ou prescrites par l'Administration ont été exécutées, l'exploitant adresse un mémoire descriptif de celles-ci au préfet qui fait établir un procès-verbal de récolement et qui donne acte par arrêté de leur exécution (2^{ème} arrêté de donné acte). Cette formalité met fin à l'exercice de la police des mines. Néanmoins, si des risques importants pour la sécurité des biens et des personnes apparaissent après l'accomplissement de cette formalité, la police des mines peut être réactivée et l'Administration peut intervenir jusqu'à l'expiration du titre dans les conditions prévues à l'article 79 du code minier. Parmi les cas pouvant donner lieu à réactivation de la police des mines, on peut citer la découverte d'un puits fuyard après le 2^{ème} donné acte : dans ce cas, il serait demandé à l'exploitant de prendre des mesures préventives.

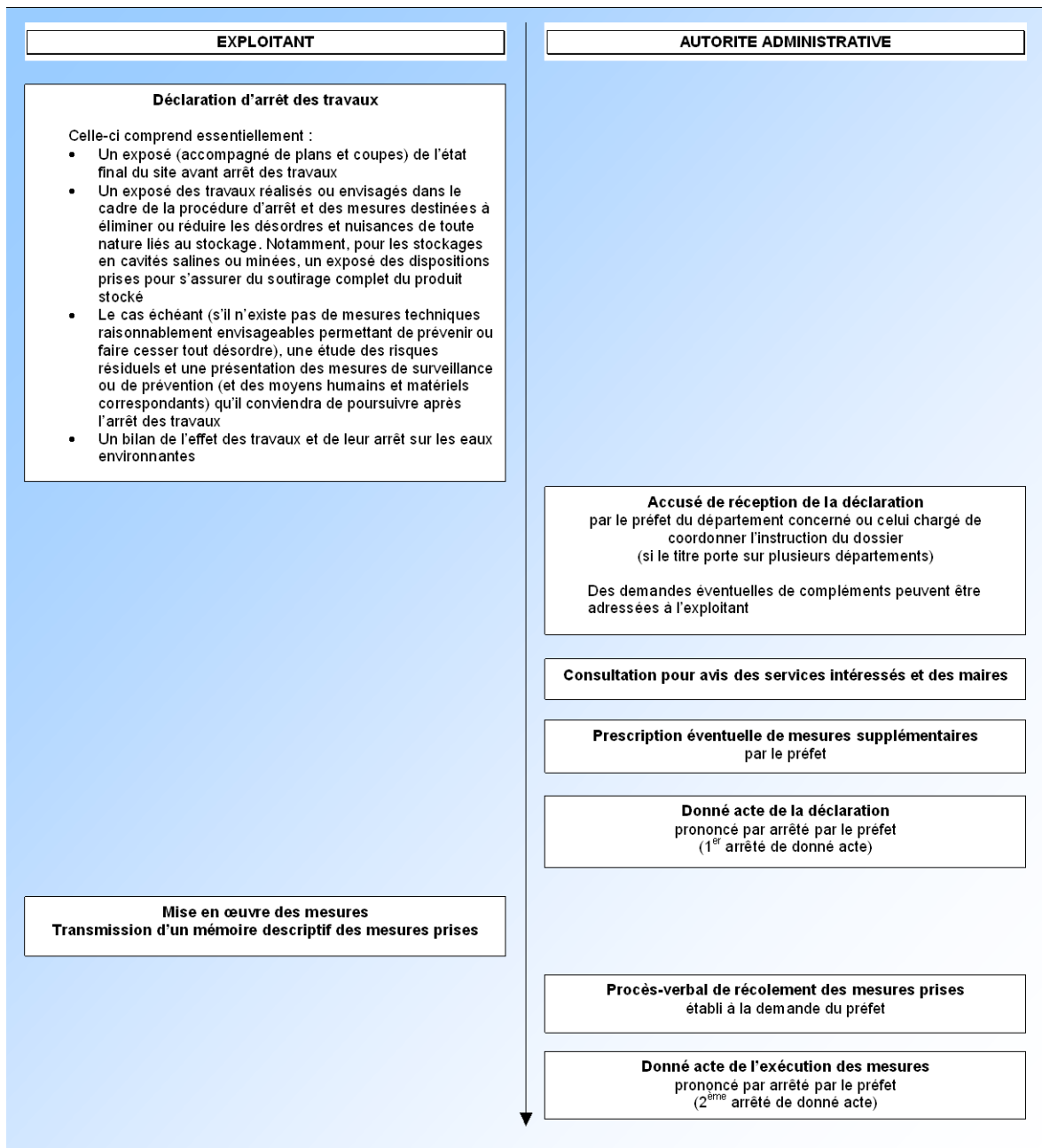


Figure 4 : Procédure d'arrêt définitif des travaux d'un stockage souterrain

2.3.7 LA RENONCIATION AU TITRE DE CONCESSION

La renonciation au titre de stockage souterrain est la formalité qui acte le retrait officiel 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 soulte correspondant au coût estimé des dix premières années de la surveillance et de la prévention des risques et du fonctionnement des équipements. Les modalités de calcul de cette soulte sont fixées dans l'arrêté du 23 août 2005.

La procédure de renonciation est illustrée sur la Figure 5. Il s'agit d'une procédure relativement simple dès lors que le 2^{ème} arrêté de donné acte a été délivré par l'administration. L'acceptation de la renonciation est prononcée par arrêté du ministre chargé des mines.

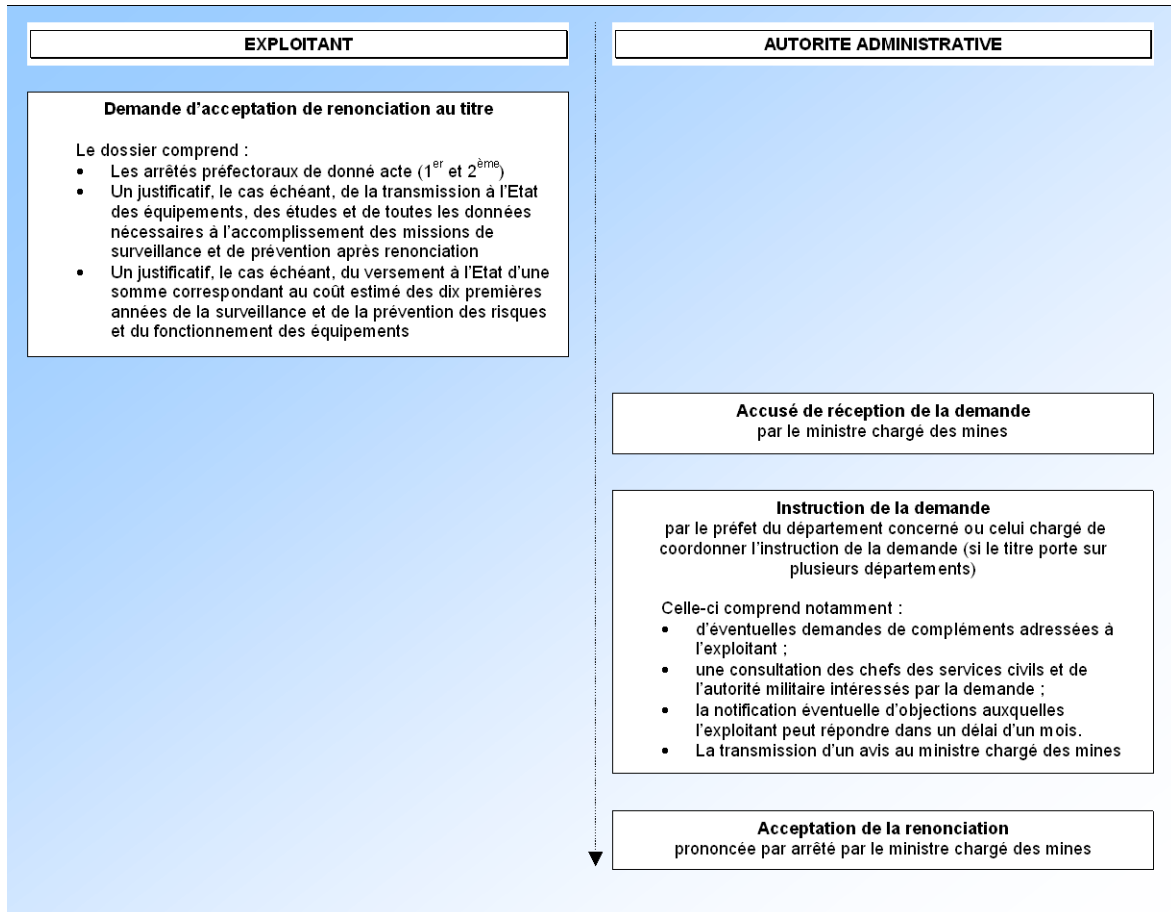


Figure 5 : Procédure de renonciation à une concession de stockage souterrain

3. LA METHODE « CLASSIQUE » D'ABANDON

Après ce préambule général sur la réglementation des stockages souterrains et de leur abandon, nous allons maintenant décrire techniquement en quoi consistent les opérations d'abandon dans le contexte d'un stockage en cavités lessivées.

Pour cela, nous allons nous baser sur le concept d'abandon le plus étudié au cours des vingt dernières années et documenté notamment dans Crotogino & Kepplinger [2006]. Celui-ci consiste à mettre la cavité en saumure et à obturer définitivement le puits par remplissage (partiel ou total) de ciment (Figure 6). C'est cette stratégie qui a par exemple été choisie pour la fermeture du site de Carresse-Cassaber [de Laguerie et al., 2004, 2006].

Ce concept est celui qui apparaît aujourd'hui aux yeux des experts et des exploitants comme celui qui offre le plus de garanties de sécurité à long terme tout en restant relativement pragmatique et économiquement acceptable pour l'exploitant⁵.

Fondamentalement, ce concept vise à préserver l'intégrité mécanique et l'étanchéité de la cavité à long terme. Il s'appuie sur la prévision désormais bien établie, et confirmée par les premières expérimentations d'abandon réalisées en France et à l'étranger⁶, selon laquelle la cavité, une fois fermée, verra sa pression augmenter vers une pression d'équilibre située entre la pression halmostatique (pression exercée par le poids de la saumure jusqu'à la surface) et la pression lithostatique (pression exercée par le poids des terrains encaissants).

Il est considéré qu'au cours de cette évolution (point encore à confirmer par des recherches en cours), la pression en cavité restera à tout moment dans une gamme de valeurs acceptable pour le maintien de l'intégrité mécanique de la cavité et de la cimentation du puits. Le seul « désordre » attendu peut être lié à une convergence lente de la cavité du fait du fluage du sel environnant qui doit aboutir, à terme, à une fermeture totale de la cavité. Cette convergence s'accompagnera nécessairement d'un affaissement des terrains de surface mais il est considéré que celui-ci aura lieu sur des échelles de temps suffisamment longues (typiquement plusieurs milliers d'années) pour que les effets restent imperceptibles à l'échelle humaine.

Par ailleurs, il est fait l'hypothèse que l'étanchéité de la cavité restera essentiellement préservée tout au long de ce processus, c'est-à-dire qu'il n'y aura pas de fuite massive de saumure vers l'extérieur de la cavité. La seule migration de saumure attendue est celle, très lente, qui s'opère à travers les parois de la cavité (on parle de microperméation). Quant aux éventuelles fuites le long du puits, du fait de la faible section du puits par rapport à la surface totale de la cavité, leur contribution au débit total de saumure sortant de la cavité est généralement considérée comme négligeable [Crotoino & Kepplinger, 2006].

Nous allons revenir en détail, dans la suite de ce rapport, sur la validité de ces différentes hypothèses mais dans un premier temps, nous proposons de décrire les opérations techniques mises en œuvre dans le cadre de cette méthode d'abandon.

⁵ qu'il s'agisse d'un exploitant de stockage souterrain ou d'un « petit » producteur de sel, puisque cette méthode est aussi préconisée pour l'abandon des cavités de production de sel.

⁶ Une description précise de certaines de ces expérimentations est proposée par P. Bérest et B. Brouard en annexe D de ce rapport.

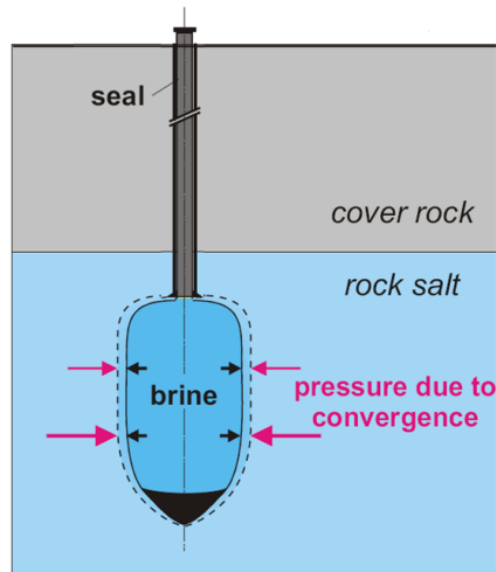


Figure 6 : Le principe standard (dit « principe SMRI ») d'abandon d'une cavité lessivée dans le sel.

3.1 VIDANGE DU PRODUIT ET MISE EN SAUMURE DE LA CAVITE

La première étape de la méthode consiste à vider la cavité de son produit (gaz ou hydrocarbures) et de la remplir entièrement de saumure. L'évacuation du produit s'opère au fur et à mesure du remplissage en saumure, de sorte que la pression interne demeure constamment à un niveau suffisant pour assurer la stabilité de la cavité.

Le bon déroulement de cette opération est assuré par un suivi de l'interface entre le produit et la saumure. Ce suivi peut être effectué de plusieurs manières :

- à partir de la connaissance du volume de saumure injecté et d'un abaque donnant le volume cumulé de la cavité en fonction de la profondeur,
- en effectuant une mesure directe en puits (log Gamma-Gamma) ; cette approche, utilisée de manière occasionnelle, permet de vérifier/calibrer l'estimation réalisée par l'approche précédente,
- à partir de la mesure de la pression en tête de puits.

Lorsque l'interface se rapproche du sabot du dernier cuvelage cimenté, on observe généralement un temps d'attente afin de permettre à la saumure de se saturer et, ainsi, de réduire les risques de dissolution du sel à proximité du sabot.

Précisons que l'injection d'eau douce (au lieu de la saumure) est également envisageable. Toutefois, cette solution présente plusieurs inconvénients :

- elle mène à un agrandissement de la cavité par dissolution du sel. Il faut alors s'assurer que le dimensionnement mécanique de la cavité le permet ;
- elle a pour effet de retarder doublement la mise à l'équilibre (et donc la fermeture) de la cavité dans le sens où :
 - il faut attendre d'avantage de temps pour que la saturation de la saumure soit atteinte ;

- le processus de dissolution va avoir tendance à refroidir la saumure et donc à retarder la mise à l'équilibre thermique de la cavité avec le massif.

Cette dernière solution n'est donc pas recommandée dans le cas général.

3.2 OPERATIONS DE DEPIEGEAGE

Lors de la mise en saumure de la cavité, une certaine quantité de produit peut rester piégée (ou être freinée dans sa remontée) du fait des aspérités des parois de la cavité. Dans le cas d'une cavité en gaz, il est donc recommandé, dans les premiers temps après le remplissage en saumure, de purger régulièrement la cavité des résidus de gaz susceptibles de s'être accumulés au toit de la cavité. Dans le cas d'une cavité en produit liquide ou liquéfié (GPL par exemple), il existe des opérations spécifiques dites de « dépiégeage » qui peuvent permettre de récupérer une partie du produit piégé.

Une méthode mise en œuvre à Carresse-Cassaber dans le cas de cavités de propane, consiste à injecter dans la cavité un gaz sous pression (air ou azote), l'excès de saumure étant récupéré au fur et à mesure de l'injection du gaz. Lorsqu'une quantité suffisante de saumure est évacuée, on procède à la décompression du gaz jusqu'à atteindre une pression en cavité inférieure à la tension de vapeur du produit piégé (~0,7 MPa dans le cas du propane). 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, lors de cette opération, de veiller à ce que la cavité ainsi décomprimée reste stable et que le refroidissement lié à la vaporisation du produit n'endommage pas localement les parois de la cavité. A Carresse-Cassaber, cette méthode a permis de récupérer plus de 800 tonnes de propane supplémentaire, en cumulé sur les 3 cavités.

Un autre procédé de récupération consiste à lessiver lentement la paroi de la cavité pour la lisser en dissolvant les aspérités susceptibles de piéger ces produits. Compte tenu de son coût, cette option n'a d'intérêt que si la quantité de produit piégée est importante. De plus, le contrôle du lessivage peut être très délicat à réaliser en pratique.

De manière générale, il est difficile de récupérer la stricte totalité du produit stocké. Dans le cas d'une cavité saline, le principal problème associé au maintien de produits résiduels en cavité est qu'ils peuvent empêcher une bonne adhésion du bouchon de ciment aux parois de la cavité (ou du puits) et donc, mettre en cause la qualité du scellement à long terme. C'est pourquoi il est important, à défaut de pouvoir retirer totalement le produit, qu'au moins la zone sur laquelle le bouchon de ciment doit être réalisé soit parfaitement nettoyée (voir 3.7).

3.3 CARACTERISATION DE L'ETAT DE LA CAVITE ET DU PUIT

Avant d'entreprendre la fermeture définitive d'une cavité, il est important de collecter le plus d'informations possibles sur son état avant abandon. Si certaines de ces informations sont le plus souvent déjà disponibles, d'autres doivent être acquises au moyen d'essais complémentaires.

Parmi les données importantes à collecter, on peut citer notamment :

- le **contexte géologique et hydrogéologique** de la cavité (géométrie de la couche de sel ou du diapir, nature du sel et des roches encaissantes, présence et nature des insolubles (marnes, argile, anhydrite), présence d'aquifères environnants, etc.),
- les **paramètres de fluage du sel** ;
- la **perméabilité du sel**. Il convient à ce propos de distinguer la perméabilité intrinsèque du sel (déterminée en laboratoire) de la perméabilité du massif de sel (intégrant à la fois le sel et les bancs d'insolubles), dont la caractérisation nécessite un test d'étanchéité sur cavité. Pour simuler l'évolution de la cavité à long terme, il est préférable de disposer de la perméabilité du massif de sel ;
- le **volume et la forme de la cavité**. Il convient à ce propos de distinguer le volume total de la cavité, c'est-à-dire le volume calculé à partir des contours géométriques de la cavité, du volume « libre », c'est-à-dire le volume disponible une fois retiré celui occupé par les insolubles tombés au fond de la cavité. Pour caractériser le volume libre, la méthode optimale consiste à effectuer un sonar ;
- la **compressibilité de la cavité remplie de saumure** (nous reviendrons sur ce paramètre plus loin)
- la **température initiale du massif de sel et de la saumure**,
- l'**historique** de la **cavité** ainsi que celle du **puits**,
- le log de l'**état de la cimentation du puits**, en particulier à proximité du sabot du dernier cuvelage cimenté,
- le log de l'**état de corrosion des cuvelages**, en particulier le dernier cuvelage cimenté.
- Les résultats des **tests d'étanchéité** réalisés sur le puits et sur la cavité. Ces tests d'étanchéité sont réalisés selon des protocoles issus du savoir-faire de l'industrie pétrolière, dont la description dépasse le cadre du présent rapport.

3.4 ATTENTE DE L'EQUILIBRE THERMIQUE ENTRE LA SAUMURE ET LE SEL

La température de la saumure injectée dans la cavité (en moyenne annuelle autour 12°C) est généralement beaucoup plus froide que celle du massif de sel (entre 20 et 60°C selon la profondeur de la cavité). Le réchauffement de la saumure au contact du massif de sel va alors entraîner, si la cavité est fermée, une augmentation rapide de la pression (liée à la dilatation thermique de la saumure réchauffée) qui peut, dans certaines conditions, dépasser la pression de fracturation de la cavité ou la pression d'endommagement du cuvelage, de l'annulaire cimenté ou du bouchon du puits.

Il est donc dans la plupart des cas nécessaire, avant de boucher définitivement la cavité, d'observer un temps d'attente pendant lequel on va laisser la saumure se réchauffer, en purgeant régulièrement la cavité sur dépassement d'un seuil de pression. Comme nous le verrons au § 4.3, ce temps d'attente peut être long (plusieurs dizaines d'années dans le cas de grandes cavités. Il existe néanmoins des stratégies permettant de réduire ce délai (§ 6.1).

3.5 MODELISATION DE L'EVOLUTION A LONG TERME DE LA CAVITE

A partir de l'ensemble des données recueillies sur la cavité et sur le puits (§ 3.3), un modèle géomécanique est réalisé pour simuler l'évolution de la cavité depuis le moment de sa fermeture et jusque sur le très long terme. L'objectif principal de ce modèle est de vérifier que la pression en cavité va rester constamment dans une gamme de valeurs acceptables du point de vue de la stabilité mécanique de la cavité et de l'intégrité des cuvelages et des cimentations du puits.

En pression haute, on considère généralement qu'il y a un risque de fracturation du sel à partir du moment où la pression en un point quelconque de la cavité dépasse la pression lithostatique, P_R . Si l'on raisonne en terme de pression moyenne P_S de la saumure dans la cavité, il convient de respecter une marge par rapport à ce critère local, notamment dans les cavités très hautes. En effet, 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. Si l'on suppose que la pression de saumure est égale en moyenne à la pression lithostatique, elle devient légèrement supérieure à celle-ci au toit de la cavité, induisant ainsi un risque de rupture en traction du sel (fracturation hydraulique). C'est pourquoi la pression maximale autorisée, P_{max} , est généralement définie entre 80% et 90% de P_R [Crotogino & Kepplinger, 2006].

En pression basse, on définit également une pression minimale, P_{min} , et un temps de résidence maximum en dessous de P_{min} , afin d'éviter l'apparition de ruptures en paroi de la cavité.

3.6 SUIVI DE L'EVOLUTION DE LA CAVITE AVANT FERMETURE

Afin de vérifier la validité du modèle prédictif évoqué à l'étape précédente (§ 3.5), un suivi de la cavité doit être opéré, qui peut s'étendre typiquement sur plusieurs années. Ce suivi concerne généralement les paramètres suivants :

- la pression en tête de puits,
- la température de la saumure en cavité et éventuellement, le long du puits.

En fonction de la qualité du calage entre les mesures et le modèle, ce dernier peut être corrigé / affiné jusqu'à ce qu'on le juge à même de reproduire fidèlement l'évolution à long terme de la cavité. Dès lors que le modèle a fait la preuve de sa validité et que ses prévisions sont acceptables en termes de risques pour la sécurité ou pour l'environnement, la fermeture définitive du puits peut être envisagée.

3.7 BOUCHAGE DEFINITIF DU PUIITS

Le puits est une voie de communication privilégiée entre la cavité et les niveaux sus-jacents (aquifères, surface). Le bon scellement du puits est donc une étape essentielle de la procédure d'abandon. Le bouchon mis en place doit être conçu pour assurer la stabilité et l'étanchéité à long terme de celui-ci vis-à-vis de la saumure occupant la cavité.

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 (« bridge ») 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. La cimentation peut être continue jusqu'à la surface où bien être constituée d'une alternance de zones cimentées et d'intervalles remplis de boues⁷.

En ce qui concerne l'emplacement de la butée (« bridge »), celle-ci peut être placée à différents endroits (voir Figure 7) :

- **dans le dernier casing cimenté.** C'est la solution la plus simple à mettre en œuvre techniquement et par conséquent la plus économique. Elle ne peut toutefois être retenue que si les tests d'étanchéité ont démontré que la cimentation du dernier cuvelage cimenté est de bonne qualité, en particulier au niveau du sabot. La zone qui environne le sabot du dernier cuvelage cimenté est en effet la plus critique pour l'étanchéité du puits. Pendant des années, le ciment y a été exposé aux fluctuations de pression et de température générées par les opérations de lessivage puis les cycles de stockage/déstockage, sans oublier les opérations de travaux sur puits (« work-over »). C'est pourquoi il est essentiel de s'assurer de l'intégrité de cette zone avant d'opter pour cette 1^{ère} solution de bouchage ;
- **dans la cheminée de la caverne** (cavern neck), au dessous du sabot du dernier casing cimenté. Cette solution peut s'avérer appropriée si les tests d'étanchéité du puits n'ont pas montré des résultats satisfaisants ou s'ils n'ont pas pu être réalisés pour des raisons diverses. Le fait que le ciment soit directement en contact avec le sel assure un couplage optimal et favorise l'étanchéité. Cette solution requiert toutefois que la cheminée soit de longueur suffisante et de section appropriée.
- **dans une fenêtre réalisée dans la partie basse du dernier casing cimenté.** Si la géométrie de la cheminée n'est pas adaptée à pose d'un bouchon (longueur insuffisante, d'une section de diamètre trop important ou de forme elliptique), cette 3^{ème} option, qui consiste à retirer le cuvelage sur une certaine hauteur et à réaliser un découvert cavé dans lequel le ciment sera coulé, est une alternative intéressante. Comme dans le cas précédent, elle permet de créer un contact direct entre le ciment et la formation et d'assurer ainsi un couplage et donc une étanchéité optimale.

⁷ On peut trouver au Titre « Forages » du Règlement Général de l'Industrie Extractive (décret n°2000-78 et circulaire du 22 mars 2000) des prescriptions utiles pour la fermeture définitive des puits, notamment des consignes concernant le diamètre et la longueur des bouchons.

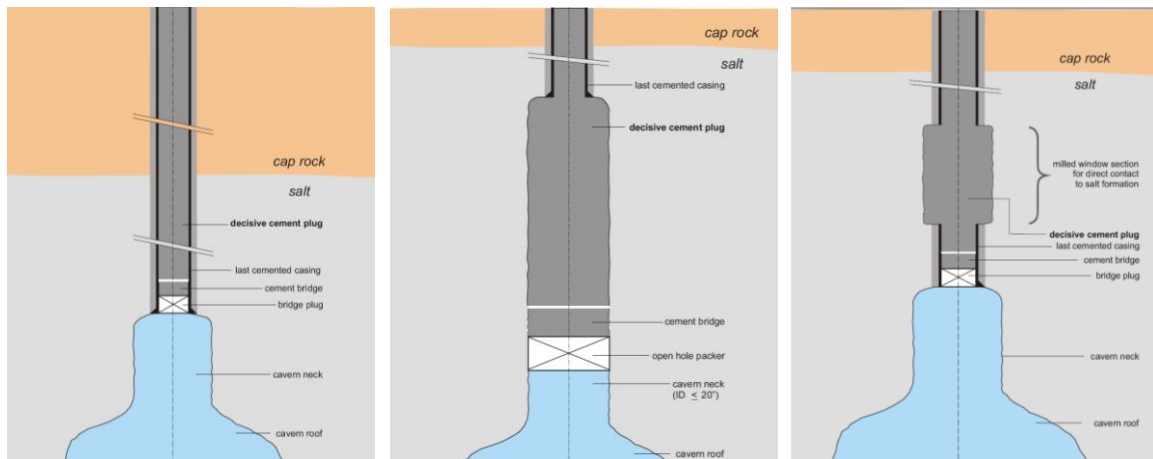


Figure 7 : Les trois options de bouchage définitif d'un puits
(d'après Crotagino et Keplinger, 2006)

Dans le cas d'une cavité en hydrocarbures, il convient, préalablement à la réalisation du bouchon de ciment, d'effectuer un nettoyage du dernier casing cimenté, ainsi que de la partie haute de la cavité (si cette zone doit être cimentée) des éventuels résidus d'hydrocarbures, de manière à assurer une bonne qualité de scellement.

Dans tous les cas, une attention particulière doit être accordée aux propriétés d'adhérence du ciment, surtout lorsque celui-ci est en contact direct avec le sel environnant. Le laitier de ciment doit dans ce cas avoir une densité importante, de sorte que le ciment durci soit aussi compact et imperméable que possible. Le laitier doit également être mélangé à de la saumure saturée pour empêcher toute lixiviation des murs de forage ou toute dissolution du sel. Le ciment ne doit également pas souffrir d'un retrait pendant sa déshydratation de sorte qu'aucune fissuration ne soit créée dans le ciment et à l'interface avec la roche.

Notons que la problématique de l'étanchéité des puits sur le long terme, voire le très long terme (puisque l'on s'intéresse ici à des cavités qui perdureront à des échelles de temps géologiques), est un domaine de recherche important, notamment en lien avec les problématiques de stockage à long terme, que ce soit pour le CO₂ ou les déchets radioactifs.

3.8 DEMANTELEMENT DES INSTALLATIONS ET REHABILITATION DES TERRAINS DE SURFACE

Une fois le puits définitivement bouché, la tête de puits et les installations de surface nécessaires à la maintenance et au suivi de la cavité peuvent être démantelées. Le cuvelage est généralement sectionné à quelques mètres sous la surface et les terrains de surface sont réhabilités. Notons que certaines réglementations, notamment au Kansas, prescrivent de laisser le cuvelage dépasser de la surface du sol et de le recouvrir d'une plaque (Crotagino et Keplinger, 2006).

3.9 SURVEILLANCE POST-FERMETURE

Les recommandations que l'on peut trouver chez certains auteurs en matière de surveillance [par ex. Crotagino et Keplinger, 2006] reposent sur le principe d'une

maintenance et d'une surveillance nulles après l'abandon de la cavité. Seul un suivi topographique, pendant une période limitée, est préconisé.

Même si cet objectif est inévitable à terme, il nous apparaît qu'à ce stade initial où les premiers abandons de cavités n'ont même pas encore été prononcés en France, nous ne bénéficions pas d'un retour d'expérience suffisant sur le comportement des cavités abandonnées (notamment sur des périodes suffisamment longues et dans des contextes suffisamment variés) pour faire l'économie d'une surveillance post-fermeture, au moins sur les premières cavités et pendant les premières années après leur abandon. Nous reviendrons sur ce point au § 6.3.

4. EVOLUTION D'UNE CAVITE LESSIVEE DE STOCKAGE APRES SON ABANDON

4.1 PREAMBULE : PRESENTATION DE LA DEMARCHE

L'étude de l'évolution à long terme de la cavité après son abandon est un des éléments importants du dossier d'arrêt. Cette étude doit permettre à l'exploitant de démontrer (et à l'Administration de s'assurer) que les conditions d'abandon retenues pour la cavité garantissent, sur le long terme, la sécurité et la protection de l'environnement autour du site concerné. Pour réaliser cette étude, l'exploitant s'appuie sur un ou plusieurs modèles, qui peuvent aller du simple modèle analytique ou semi-analytique, qui reposent généralement sur des simplifications importantes (cavité sphérique ou cylindrique, massif de sel homogène, voir par exemple Bérest et al., 1997) mais qui peuvent s'avérer suffisantes en première approche, à des modèles plus sophistiqués faisant appel à la modélisation numérique tridimensionnelle de la cavité.

Ce chapitre vise à présenter les aspects essentiels de l'évolution d'une cavité saline après son abandon : quels sont les phénomènes qui gouvernent cette évolution, comment vont évoluer la température et la pression en cavité, en combien de temps la cavité va-t-elle atteindre un état d'équilibre, quel vont être les débits de saumure expulsés vers les terrains environnants, en combien de temps la cavité va-t-elle se refermer, quels sont les paramètres qui influent sur l'ensemble de ces valeurs ?

Le but de ce chapitre n'est pas de fournir une évaluation précise pour une cavité particulière mais de dégager des ordres de grandeurs pour un grand nombre de contextes possibles, afin d'obtenir une vision globale des aléas qui peuvent survenir, des contextes (en termes de profondeur, de dimensions, de forme de la cavité, de nature du sel, etc.) qui sont propices à l'apparition de certains aléas et des échelles de temps sur lesquels ces aléas sont amenés à perdurer et donc, à devoir être gérés par la puissance publique.

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur un modèle semi analytique⁸, basé sur les formulations de Bérest et Brouard. Ces formulations ont été implantées et résolues à l'aide du code de calcul COMSOL. Nous avons choisi de programmer nous-mêmes ces formulations plutôt que d'utiliser un logiciel existant (par exemple le logiciel LOCAS⁹ développé par B. Brouard [2010]) afin de disposer d'une certaine souplesse dans les modalités de simulations effectuées, le mode de présentation des résultats, le choix des hypothèses et les paramètres du modèle.

⁸ L'utilisation d'un modèle semi-analytique se prête bien à notre objectif puisqu'il permet de réaliser un grand nombre de modalités de simulations et donc, d'explorer un grand nombre de contextes possibles, en un temps relativement court.

⁹ Locas est un logiciel aux éléments finis spécialement dédié aux cavités creusées dans de sel. De nombreux phénomènes peuvent être pris en compte, permettant à l'utilisateur de simuler et de comprendre le comportement des cavités remplies de saumure ou de gaz. Il couvre de nombreux aspects, de la stabilité mécanique à court terme à l'évaluation à long terme des affaissements au droit des cavités, en prenant en compte à la fois le comportement mécanique du sel, mais également les effets couplés thermo-hydro-chimiques.

Tous les détails de ce modèle sont présentés en annexe B. Nous n'en reprendrons dans ce chapitre que les résultats essentiels.

4.2 LES PHENOMENES QUI GOUVERNENT L'EVOLUTION DE LA CAVITE

L'évolution d'une cavité abandonnée dans le sel est gouvernée principalement par cinq phénomènes :

1. le réchauffement de la saumure : la saumure injectée dans la cavité est généralement à la température de la surface (autour de 12°C en moyenne annuelle). Sa mise en contact avec le massif de sel beaucoup plus chaud (entre 20-60°C selon la profondeur de la cavité) va donc générer un phénomène de dilatation thermique qui va se traduire, selon que la cavité est ouverte ou fermée, par un débit de saumure sortant du puits (dans le premier cas) ou par une augmentation de la pression dans la cavité (dans le deuxième cas) ;
2. la convergence de la cavité par fluage du sel : le sel gemme est une roche viscoplastique à seuil de contrainte déviatorique nul : soumis à la moindre contrainte déviatorique, le sel se déforme (« flue » ou « s'écoule »). Ainsi, la moindre différence de pression entre la cavité et le massif environnant va entraîner une déformation de la cavité par fluage du sel, qui va prendre la forme d'une convergence (la pression interne étant en principe inférieure à la pression des terrains) ;
3. la perméation de la saumure à travers le massif de sel : bien que très faible (typiquement entre 10^{-17} et 10^{-21}m^2), la perméabilité du massif sel n'est pas nulle, ce qui permet une migration très lente de la saumure vers l'extérieur de la cavité. Cette perméation tend à contrarier l'augmentation de pression liée au fluage du sel et au réchauffement de la saumure ;
4. la fuite de saumure par l'intermédiaire du puits : un bouchon de ciment, quelle que soit sa qualité, ne peut garantir une étanchéité parfaite. Par ailleurs, à très long terme, le vieillissement du ciment peut mener à ce que des fuites de saumure apparaissent à l'interface entre le ciment et le terrain ou à travers le ciment lui-même. Ces fuites vont contribuer, comme la perméation à travers le sel, à réduire la pression en cavité ;
5. la dissolution complémentaire du sel par la saumure : il se peut que la saumure introduite dans la cavité ne soit pas totalement saturée en sel, donc si un temps suffisant n'est pas respecté entre la mise en saumure et la fermeture de la cavité, la dissolution du sel peut se poursuivre après la fermeture de la cavité. D'autre part, la saturation de la saumure augmentant avec la pression et la température, l'évolution de ces deux paramètres après fermeture de la cavité va entraîner une dissolution complémentaire du sel. Toutefois, ce phénomène peut généralement être considéré comme du deuxième ordre comparé aux autres phénomènes.

Nous allons, dans les simulations qui vont suivre, ignorer la dissolution complémentaire du sel en considérant qu'un temps suffisant a été respecté entre le remplissage en saumure et la fermeture de la cavité pour pouvoir ignorer ce phénomène. L'évolution de la cavité sera donc gouvernée par trois processus : thermique (équilibre entre la saumure et le massif), mécanique (fluage de la paroi de la cavité) et hydraulique (percolation de la saumure à travers le sel et le long du puits). Chaque phénomène étant caractérisé par un temps caractéristique,

l'évolution globale sera régie par la concurrence entre ces différentes constantes de temps.

4.3 L'EFFET DU RECHAUFFEMENT DE LA SAUMURE

La saumure injectée dans la cavité peut présenter un écart de température important avec le massif de sel. Si l'on considère que la saumure est injectée à la température de la surface (12°C en moyenne sur l'année) et que le gradient géothermique est de l'ordre de 3°C / 100 m¹⁰, cet écart de température peut aller de 9°C pour une cavité à 300 m de profondeur jusqu'à 45°C pour une cavité à 1500 m de profondeur. Dans ces conditions, le réchauffement de la saumure au contact du massif va générer un phénomène de dilatation thermique qui, en cavité fermée, va provoquer une augmentation de pression. Si cette augmentation de pression n'est pas maîtrisée, on peut craindre un dépassement de la pression lithostatique (voir illustration sur la Figure 9) et de ce fait, une rupture de la cavité ou des cimentations du puits par fracturation hydraulique.

Pour éviter cette situation, la solution la plus simple consiste à d'attendre que la saumure se réchauffe avant de fermer définitivement la cavité, soit en laissant le puits ouvert soit en purgeant régulièrement la cavité sur dépassement d'un seuil de pression. Le problème est que la cinétique de ce réchauffement peut être lente (voir Figure 8), notamment dans le cas des cavités de grandes tailles, et allonger considérablement la procédure d'abandon. Les estimations du temps d'atteinte de l'équilibre thermique que nous présentons en annexe B (voir Figures B2 à B5) varient en fonction des hypothèses de modélisation considérées (notamment de la prise en compte ou non des transferts thermiques par convection¹¹) mais on peut estimer globalement qu'une cavité mise en saumure à une température de 12°C va mettre une dizaine d'années pour atteindre l'équilibre thermique¹² si la cavité est petite (15 000 m³), une cinquantaine d'années si elle est moyenne (150 000 m³) et une centaine d'années si elle est grande (500 000 m³). Notons que ce délai varie non seulement en fonction du volume mais également de la forme de la cavité : du fait qu'elle présente une surface de contact plus importante entre la saumure et le massif, une cavité élancée se réchauffera plus rapidement qu'une cavité de forme isotrope (environ deux fois plus vite lorsque l'on passe d'un facteur de forme de 1 à 10, voir Figure B5).

¹⁰ Cette valeur moyenne globale est surestimée dans le sel, matériau dont la conductivité thermique (~5-6 W /m/K) est environ 3 fois supérieure à la moyenne des roches. Le gradient géothermique dans le sel est donc en principe inférieur à la valeur moyenne, sauf dans les bassins sédimentaires soumis à un fort flux géothermique, par exemple en Alsace.

¹¹ On montrera en annexe B (§ B-2-1) que les transferts de chaleur dans la saumure se font essentiellement par convection plutôt que par conduction.

¹² Celui-ci est défini comme le moment où 95% de l'écart de température initial entre la saumure et le massif est résorbé.

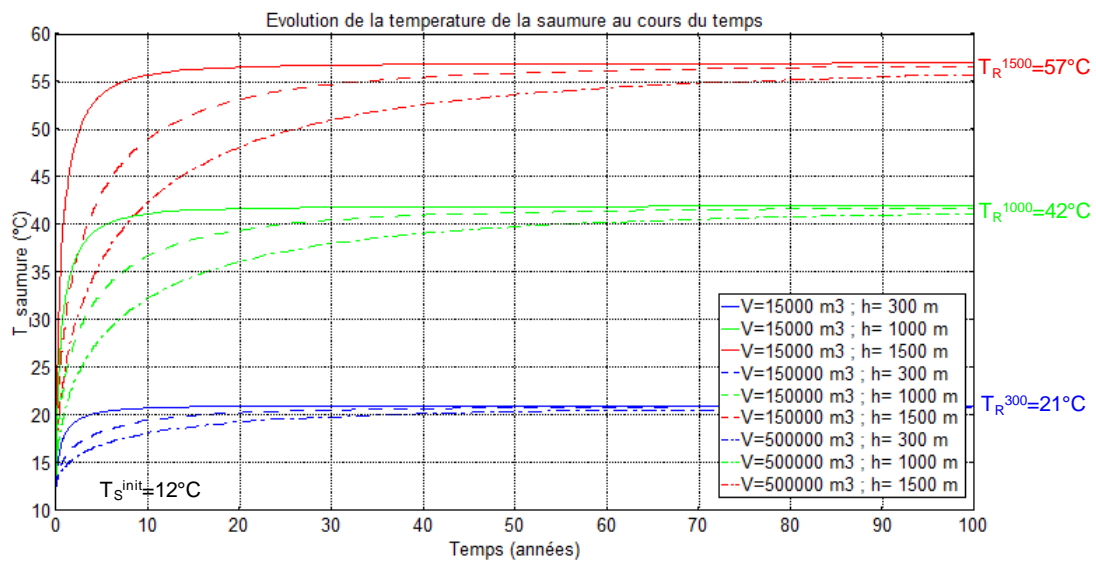


Figure 8 : Evolution de la température en cavité en fonction de son volume et de sa profondeur – la cavité est supposée sphérique et remplie d’une saumure initialement à 12°C (les échanges convectifs sont pris en compte en considérant une conductivité infinie de la saumure)

En pratique, il n’est pas nécessaire d’attendre que l’équilibre thermique soit atteint pour que la cavité puisse être fermée définitivement. Il convient simplement d’attendre que la saumure ait atteint une valeur de température suffisante (température que l’on appellera « critique » ou « de sécurité ») pour que la cavité puisse être fermée sans risque que la pression ne dépasse ultérieurement la pression lithostatique.

Pour reprendre l’exemple illustré sur la Figure 9 et en se donnant pour marge de sécurité que la pression en cavité ne dépasse pas 90% de P_R , où P_R est la pression lithostatique, on peut voir que la température de sécurité dans ce cas est de 32,5°C. La Figure 10 montre que pour que la saumure atteigne cette température par simple réchauffement naturel (en partant d’une température de 12°C), il faut attendre environ 4,6 ans.

Ce délai d’attente nécessaire pour atteindre la température de sécurité (délai que l’on pourrait appeler « délai de sécurité ») varie en fonction de plusieurs paramètres liés au contexte de la cavité (voir récapitulatif dans le Tableau 1, 2^{ème} ligne) et notamment :

- du volume et de la forme de la cavité, qui jouent sur la cinétique de réchauffement de la saumure : plus la cavité est petite et élancée, plus le réchauffement est rapide ;
- de la perméabilité du sel, de la perméabilité du puits ainsi que du volume et de la forme de la cavité, qui jouent sur capacité de la saumure à migrer hors de la cavité : plus cette migration est facilitée, plus le pic de pression lié au réchauffement de la saumure est réduit dans le temps et par conséquent, plus la cavité peut être fermée tôt ;

- de l'écart initial de température entre la saumure et le massif : plus cet écart est faible, plus vite est atteinte la température de sécurité.

Les simulations réalisées dans le cadre de cette étude (voir Figures B39 à B46) montrent que si aucun réchauffement préalable de la saumure n'est effectuée (c'est-à-dire si la saumure est injectée dans la cavité à une température de 12°C), le délai d'attente nécessaire pour pouvoir fermer une cavité saline sans risque de s'exposer à une fracturation ultérieure de ses parois va de quelques années (1-10 ans) pour une petite cavité peu profonde (15 000 m³ à 300 m de profondeur) à plusieurs dizaines d'années (10-50 ans) pour une grande cavité profonde (500 000 m³ à 1500 m de profondeur). Notons que la plupart des cavités de stockage de gaz naturel en France sont dans ce deuxième cas.

Ces délais qui, on le voit, peuvent être importants dans certains cas, posent des questions pratiques vis-à-vis de la procédure d'abandon : il est en effet difficile pour un exploitant d'attendre et de maintenir ses installations d'évacuation de saumure¹³ pendant plusieurs dizaines d'années avant de pouvoir fermer et abandonner sa cavité. Il apparaît donc important de mettre au point et de tester in situ des stratégies permettant de réduire ce délai d'abandon. Plusieurs pistes sont évoquées dans ce rapport : diminuer la pression initiale de la cavité, réchauffer la saumure avant de l'injecter en cavité, injecter du gaz dans la cavité pour en augmenter la compressibilité. Nous reviendrons sur ces solutions au § 6.1.

¹³ Les débits de saumure attendus en sortie du puits sont de 1-10 m³/j au début de la période de réchauffement, de 0,1-1 m³/j après 10 ans et ne sont plus que de quelques litres/jour après 1 siècle (voir Figures B10 à B12)

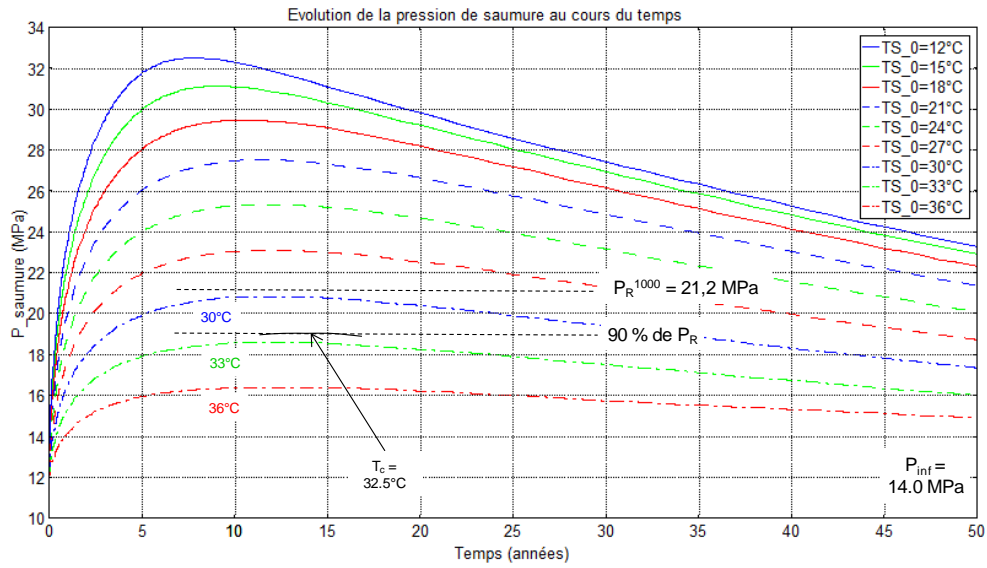


Figure 9 : Effet du réchauffement de la saumure sur la pression en cavité pour une cavité sphérique de 150000 m^3 située à 1000 m de profondeur
 Perméabilité du sel : 10^{-19} m^2 - Fluage « moyens¹⁴ »
 (les échanges convectifs sont pris en compte en considérant une conductivité infinie de la saumure)

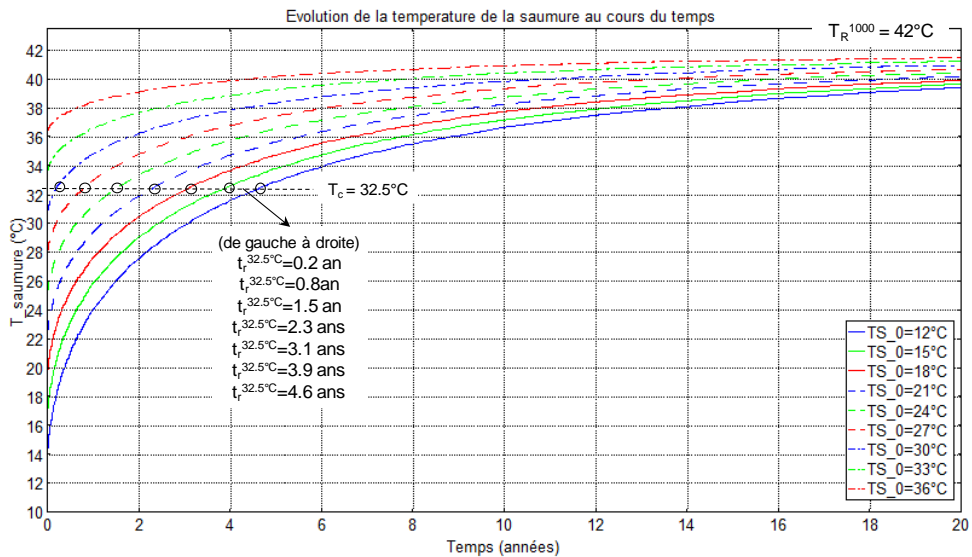


Figure 10 : Evolution de la température dans une cavité sphérique de 150000 m^3 située à 1000 m de profondeur et pour différentes valeurs de température initiale.
 (les échanges convectifs sont pris en compte en considérant une conductivité infinie de la saumure)

¹⁴ Le concept de « fluage moyen » est explicité en annexe B (§ B-3-1 – page B-20).

	Intitulés	Qualificatifs	PARAMETRES															
			Ecart de T°C initial entre la saumure et le massif		Profondeur de la cavité		Dimension de la cavité		Forme de la cavité		Nature du sel		Perméabilité du sel		Qualité de la cimentation (perméabilité équivalente)			
			Faible	Grand	Faible	Grande	Petite	Grande	Sphérique	Elancée	Peu fluant	Très fluant	Faible	Forte	Peu dégradée	Très dégradée		
		Valeurs indicatives	9°C	45°C	300 m	1500 m	150 000 m ³	500 000 m ³	Facteur de forme = 1	Facteur de forme = 10	dε/dt < 10 ⁻⁵ an ⁻¹	dε/dt > 10 ⁻³ an ⁻¹	10 ⁻²¹ m ²	10 ⁻¹⁷ m ²	10 ⁻¹⁴ m ²	10 ⁻¹⁰ m ²		
INDICATEURS D'EVOLUTION DE LA CAVITE	Temps d'atteinte de l'équilibre thermique (en supposant une T°C initiale de 12°C)	Long	100 ans															
		Court	10 ans	↗		↗		↗		↘								
	Temps d'atteinte de la température de sécurité (bouchage du puits possible)	Longue	10-50 ans															
		Courte	1-10 ans	↗		↗		↗		↘					↘			↘
	Valeur de la pression d'équilibre	Lithostatique	2,2 MPa/100m															
		Halmostatique	1,2 MPa/100m			↗		↗		↘		↗		↘			↘	
	Temps d'atteinte de l'équilibre de pression (en supposant une pression initiale halmostatique)	Long	10 ³ -10 ⁴ ans															
		Court	1-10 ans			↘		↗		↘		↘		↘			↘	
	Temps de fermeture de la cavité	Long	10 ⁷ -10 ⁸ ans															
		Court	10 ³ -10 ⁴ ans			↘		↗		↘		↘		↘			↘	
Débit de saumure sortant de la cavité	Significatif	qq 100 m ³ /an																
	Négligeable	qq litres/an			↗		↗		↗		↗		↗			↗		
Coût de l'énergie nécessaire pour réchauffer la saumure jusqu'à la T°C de sécurité	Elevé	700 k€																
	Faible	0 k€	↗		↗		↗		↘				↘			↘		

Tableau 1 : Grille indicative de l'influence du contexte de la cavité sur son évolution après abandon. Les flèches indiquent le sens des corrélations. Les cases grisées marquent une absence d'influence

4.4 L'EFFET COMBINÉ DU FLUAGE DU SEL ET DE LA PERMEATION DE LA SAUMURE À TRAVERS LES PAROIS DE LA CAVITÉ

Même si le réchauffement de la saumure est un processus assez lent (plusieurs dizaines d'années), il reste transitoire à l'échelle de la vie de la cavité, qui peut perdurer plusieurs milliers d'années avant de se refermer totalement. Une fois passée la période initiale de réchauffement de la saumure, la cavité sera gouvernée essentiellement par deux phénomènes : le fluage du sel, qui engendre une convergence des parois de la cavité et qui tend par conséquent à faire augmenter la pression en cavité, et la perméation de la saumure à travers le massif de sel (ainsi que le long du puits), qui tend au contraire à relaxer la pression en cavité. La pression va donc s'installer, à terme, sur une valeur d'équilibre où le débit de saumure sortant de la cavité équivaut exactement à la perte de volume liée à la convergence de la cavité.

Cette pression d'équilibre est comprise entre la pression de pore régnant dans le massif de sel autour de la cavité (généralement considérée comme étant halmostatique, bien qu'il soit très difficile de l'estimer en pratique) et la pression lithostatique. Sa proximité par rapport à l'une ou à l'autre de ces deux pressions dépend de la capacité du sel à fluer par rapport à la capacité de la saumure à migrer hors de la cavité. On montre en annexe B que les paramètres qui déterminent la capacité du sel à fluer sont :

- la nature du sel, que l'on peut classer globalement en trois 3 grandes catégories : « très fluant », « standard » ou « peu fluant » (voir définitions de Bérest et Brouard données au § B-3-1 à la page B-20) ;
- la température, qui est directement liée à profondeur de la cavité.

Quant aux paramètres qui déterminent la capacité de la saumure à migrer hors de la cavité, il s'agit essentiellement de :

- la perméabilité du sel,
- la perméabilité équivalente du puits (incluant le cuvelage, l'annulaire cimenté et le bouchon de ciment)
- le volume et la forme de la cavité (la perméation de la saumure dans le massif de sel est plus efficace dans une cavité de petit volume et de forme allongée) ;

La pression d'équilibre va donc être d'autant plus proche de la pression lithostatique que le sel est fluant (Figure 11), que la cavité est profonde (Figures B20 à B22), que la perméabilité du sel est faible (voir Figure 12), qu'il y a peu de fuites à travers le puits et que la cavité est de grand volume (Figures B20 à B22) et de forme étirée (Figure B23) (voir récapitulatif dans le Tableau 1, 3^{ème} ligne).

Il est possible, avant d'abandonner une cavité, d'estimer la pression d'équilibre qui sera atteinte à moyen terme en réalisant un essai de pression par paliers du type de celui réalisé en 2003 sur la cavité SPR3 à Carresse-Cassaber (voir Figure 13). Cet essai consiste à amener, par des injections ou des soutirages de liquides, la pression dans la cavité à différents niveaux, puis à enregistrer pendant plusieurs semaines l'évolution naturelle de la pression. Suivant le niveau de pression atteint au début de chaque palier, la pression augmente ou diminue pendant la suite du palier, selon que le fluage du sel ou la perméation de la saumure (à travers le massif et le puits) l'emporte. Dans le cas de l'essai réalisé à Carresse-Cassaber, on observe l'existence vraisemblable d'une pression d'équilibre autour de 10 MPa. Notons que cette pression d'équilibre est très inférieure à la pression lithostatique,

estimée dans ce cas à 15,4 MPa et supérieure à la pression halmostatique, estimée à 8,4 MPa.

Si l'on regarde l'ensemble des simulations réalisées (Figures B17 à B23), on remarque globalement que, la pression d'équilibre tend à être plus proche de la pression halmostatique que de la pression lithostatique. Ceci est d'autant plus remarquable que si des fuites apparaissent le long du puits au cours du temps, la perméabilité effective de la cavité (intégrant la contribution du puits) sera plus proche de 10^{-17} m^2 que de 10^{-21} m^2 (voir § 4.5). De plus, certains auteurs ont montré que la perméabilité des roches salines augmentait significativement lorsque la pression de saumure rapproche de la pression lithostatique (voir Héas, 2003). Il y a donc tout lieu de penser que dans la plupart des cas, la pression d'équilibre restera assez éloignée de la pression lithostatique et que le risque de fracturation des parois de la cavité par excès de pression sera peu probable. En revanche, le scénario de fracturation de la cavité par déficit de pression (déconfinement) restera à étudier dans tous les cas (voir § 5.2.2).

En ce qui concerne le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre de pression, il dépend évidemment de la distance entre la pression initiale (au moment de l'abandon) et la pression d'équilibre, ainsi que des paramètres (cités précédemment) qui contrôlent d'une part le fluage et d'autre par la perméation. Si la cavité est fermée à pression halmostatique, les calculs réalisés (Figures B17 à B23) montrent que le temps d'atteinte de l'équilibre peut aller de quelques années dans le cas d'une cavité profonde et d'un sel fluant et perméable à plusieurs milliers d'années dans le cas opposé. Il est bien-sûr possible de réduire ce délai en estimant préalablement la pression d'équilibre par un essai in situ (comme on vient de le voir plus haut), et en fermant la cavité à une pression la plus proche possible de cette valeur.

A très long terme et même si la cavité ne subit aucune instabilité majeure (en réalité, des phénomènes d'instabilité tels que des chutes de toit ont bien lieu dans de nombreuses cavités), la convergence liée au fluage du sel va amener celle-ci à se refermer sur elle-même. Le temps caractéristique de fermeture de la cavité peut être très long, voire infini à l'échelle humaine, comme le montrent les Figure 14 et Figure 15 ainsi que les Figure B26 à B29. Il dépend des paramètres qui contrôlent le fluage d'une part, et de ceux qui contrôlent la perméation d'autre part (voir Tableau 1). Globalement, les estimations réalisées en annexe B aboutissent à des temps de fermeture compris entre 10^3 - 10^4 ans pour une cavité profonde et un sel fluant et perméable et 10^7 - 10^8 ans dans les conditions inverses.

Néanmoins, il est important de noter que ces calculs de fluage ne tiennent pas compte de l'endommagement autour de la cavité (ruptures de bancs, chutes de toit) qui tend à en accélérer la fermeture. C'est le cas de certaines cavités salines qui ont conduit à une convergence rapide et inattendue (Tersanne, Eminence, Twenthe-Rijn, Heiligrelee brine field). A Tersanne (France), une perte de volume de 30% a été constatée en 10 ans, conduisant à un affaissement pluricentimétrique en surface [Durup, 1991]. A Eminence (EU), la cavité a perdu 40% de sa capacité de stockage dans les deux années qui ont suivi sa mise en service [voir références dans Charmoille et Thoraval, 2010]. Si ces incidents sont très particuliers et s'expliquent à la fois par l'aptitude importante au fluage de ces formations salifères et par les conditions d'exploitation peu sécuritaires notamment dans le cas d'Eminence (maintien d'une pression trop faible en cavité), ils témoignent du fait que dans certains contextes, la vitesse de convergence peut être beaucoup plus rapide que celle prévue par le modèle de fluage et que des temps de fermeture de quelques centaines (voire dizaines) d'années, ne sont pas à exclure. Il n'en demeure pas moins qu'en pratique et dans bien des cas, il sera préférable de mener l'analyse des aléas résiduels en considérant que la cavité sera présente sur de longues périodes dans le sous-sol.

Enfin, il est également intéressant, dans une perspective d'évaluation des aléas, de déterminer le débit de saumure qui va migrer hors de la cavité. Celui-ci est très variable et dépend à nouveau des paramètres qui contrôlent le fluage et de ceux qui contrôlent la percolation (voir Tableau 1). Les estimations réalisées dans le cadre de cette étude (voir Figures B30 à B35) aboutissent à des débits compris entre quelques litres/an (pour des cavités peu profondes, avec un sel peu fluant et peu perméable) et quelques centaines de m³/an (dans le cas inverse). Notons que ces valeurs ne traduisent que la perméation à travers le sel et qu'il faut y ajouter les fuites par le puits, que l'on peut également estimer entre quelques m³/an et quelques centaines de m³/an (voir § 4.5 et § 5.3). Il revient donc à l'exploitant, dans le contexte propre du site, de bien évaluer l'importance de l'ensemble de ces rejets et l'impact qu'ils pourraient avoir sur la qualité des eaux environnantes.

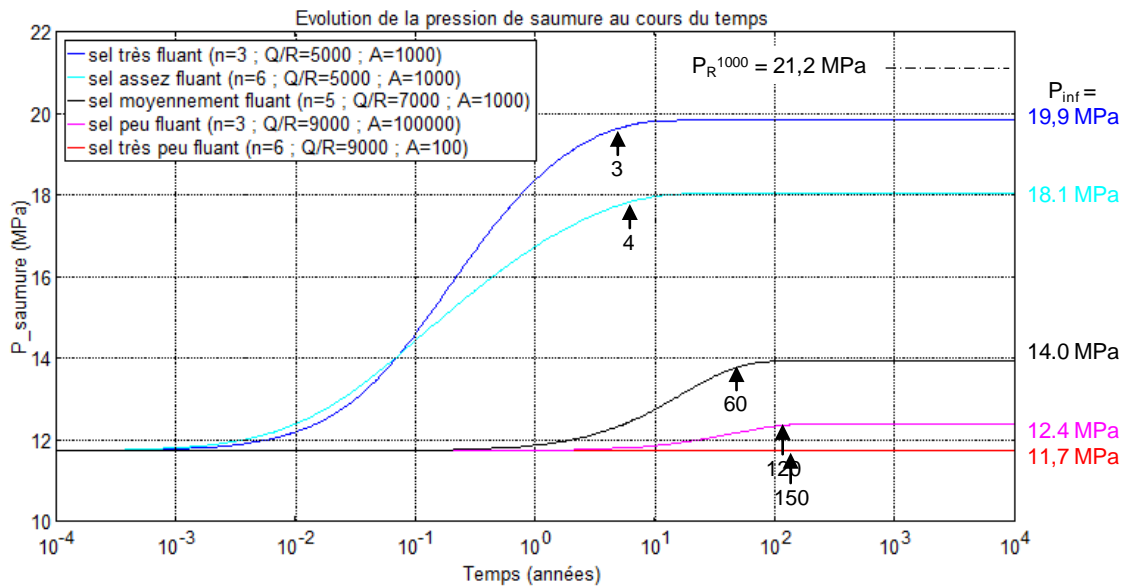


Figure 11 Impact des caractéristiques de fluage du sel sur l'évolution de la pression en cavité dans le cas d'une cavité sphérique de 150000 m^3 à 1000 m de profondeur et pour une perméabilité de 10^{-19} m^2 (cette simulation ne tient pas compte du réchauffement de la saumure)

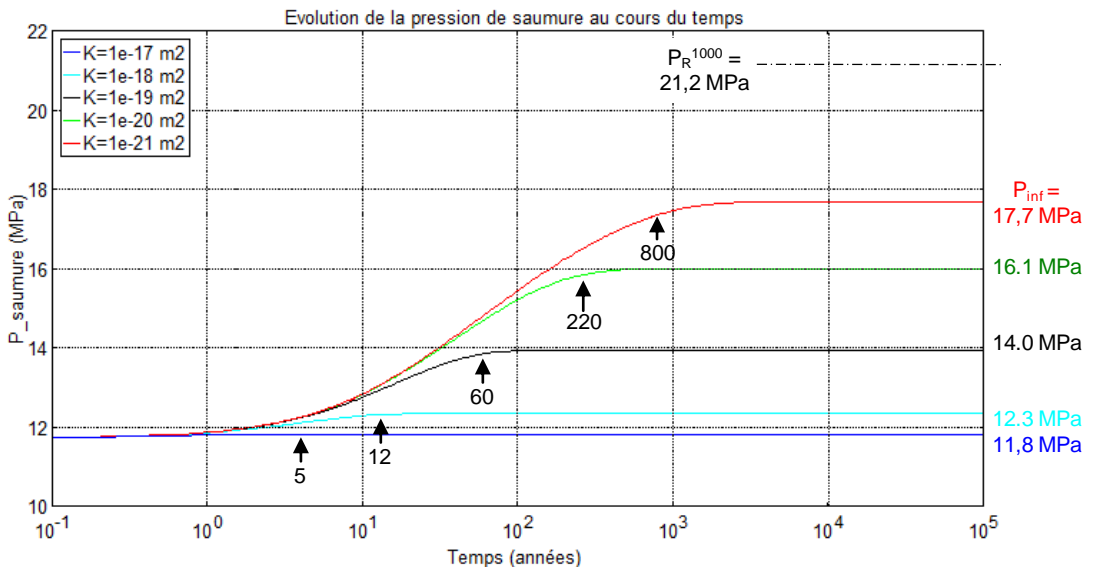


Figure 12 : Impact de la perméabilité du sel sur l'évolution de la pression en cavité dans le cas d'une cavité sphérique de 150000 m^3 à 1000 m de profondeur et avec un sel de paramètres de fluage standards (cette simulation ne tient pas compte du réchauffement de la saumure)

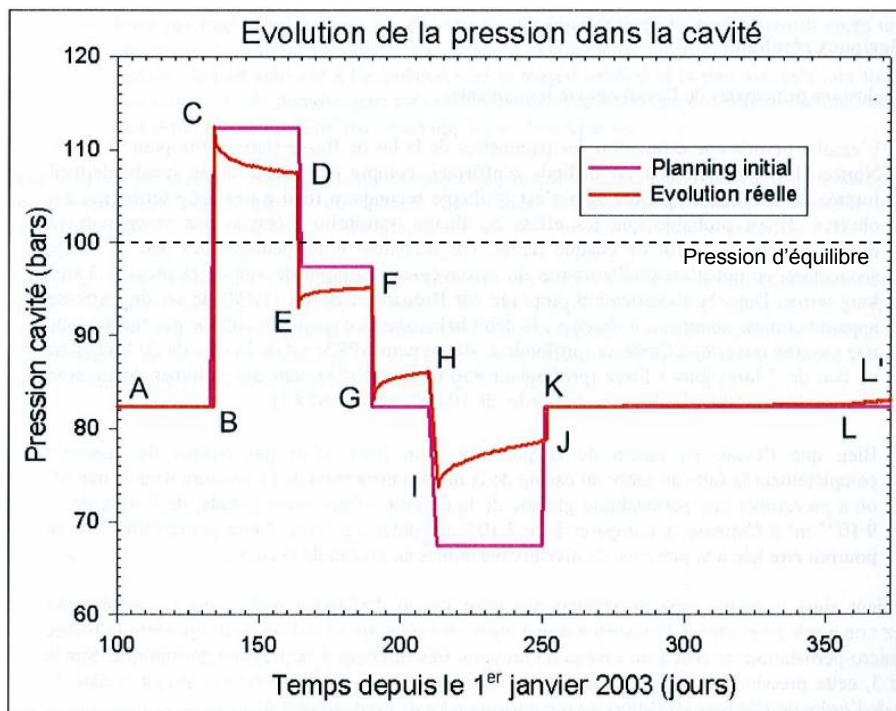


Figure 13 : Evolution de la pression dans la cavité SPR3 au cours de l'essai par paliers réalisé en 2003 (d'après Héas, 2003)

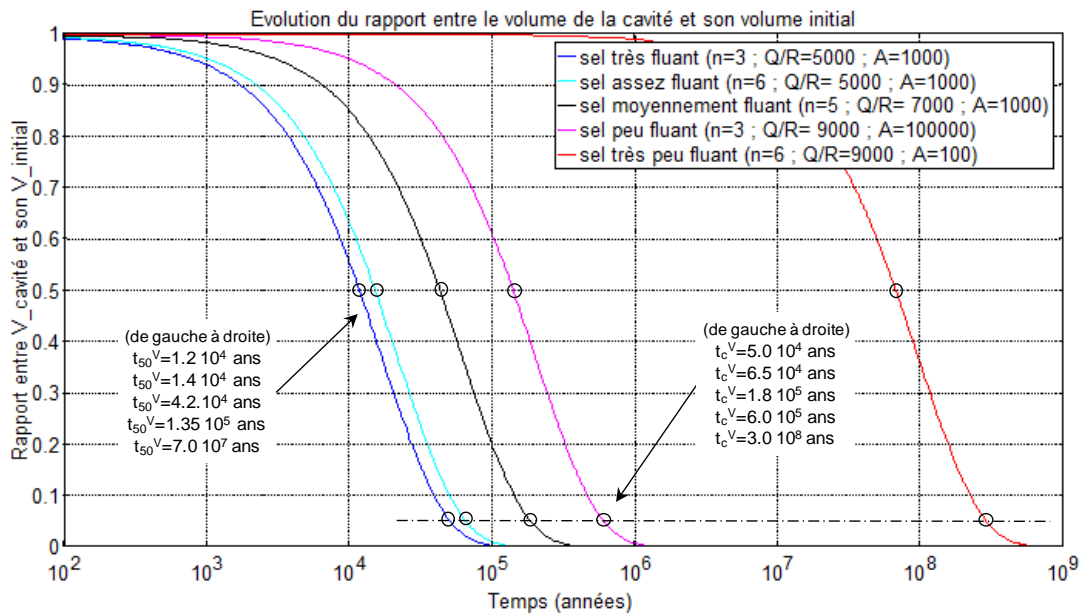


Figure 14 : Evolution du volume normalisé de la cavité en fonction des caractéristiques de fluage du sel (n [-]; Q/R [K]; A [année⁻¹]) dans le cas d'une cavité sphérique de 150000 m³ à 1000 m de profondeur et pour une perméabilité du sel de 10⁻¹⁹ m²

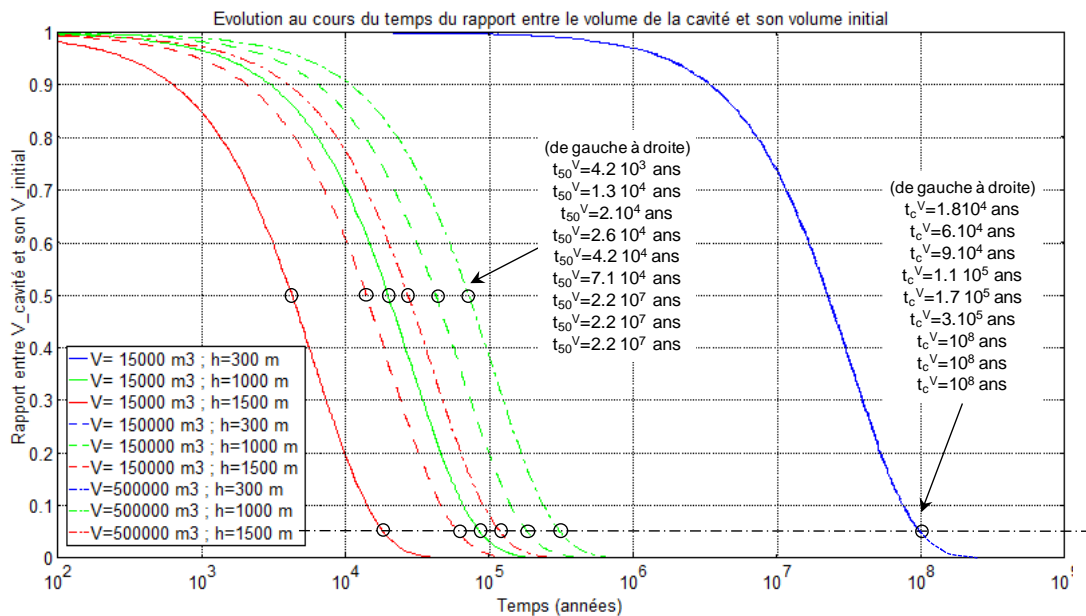


Figure 15 : Evolution du volume normalisé de la cavité en fonction de sa profondeur et de son volume initial dans le cas d'un sel de perméabilité 10⁻¹⁹ m² et de paramètres de fluage standards

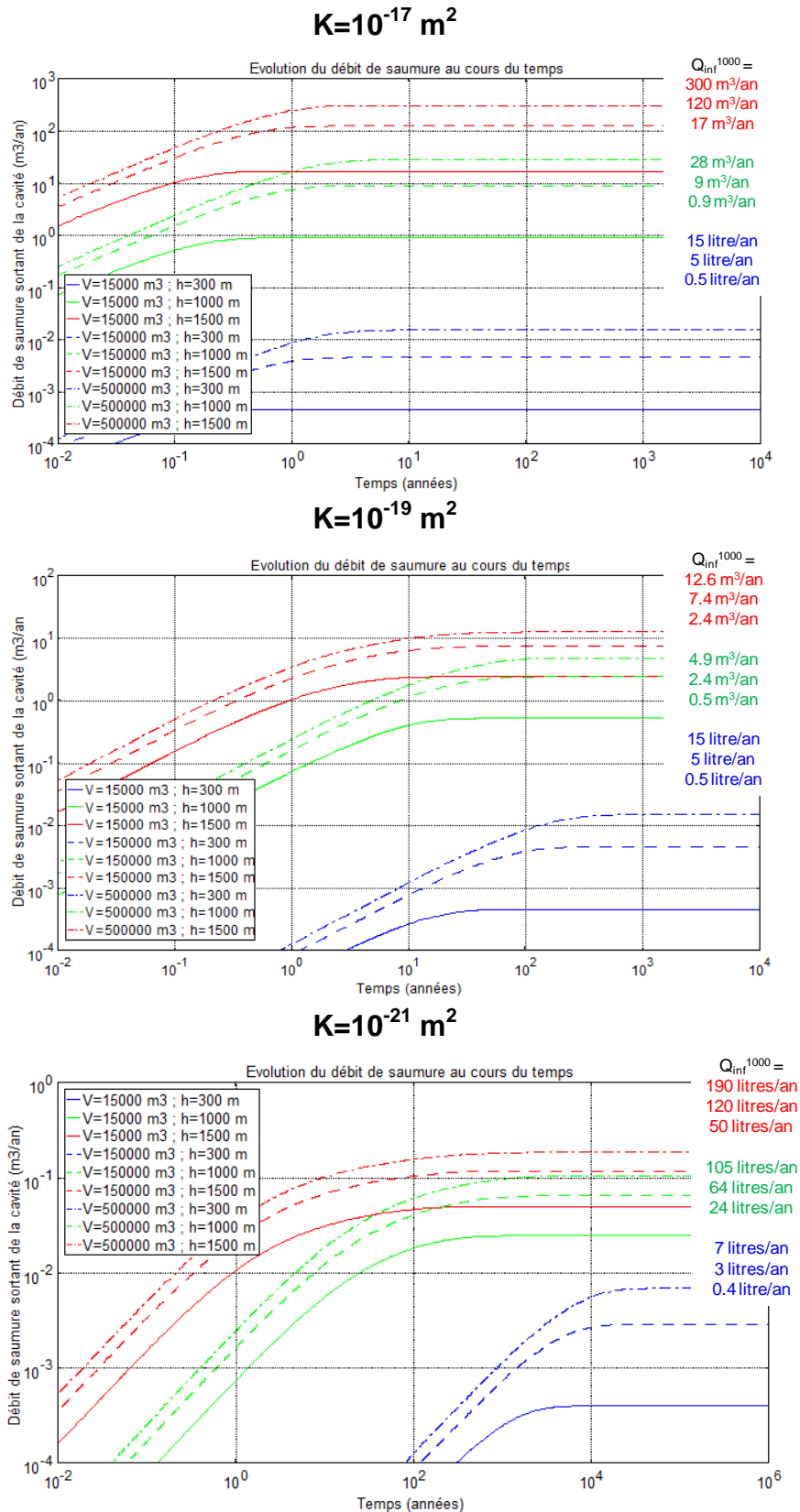


Figure 16 : Débit de saumure expulsé de la cavité en fonction du volume, de la profondeur de la cavité et de la perméabilité du sel (10^{-17} , 10^{-19} et 10^{-21} m^2). Les paramètres de fluage du sel sont standards ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) et l'équilibre thermique est supposé établi au moment de la fermeture de la cavité.

4.5 L'EFFET DES FUITES PAR LE PUIT

La question du vieillissement des puits et du devenir de leur étanchéité à long terme est une question prégnante dans un grand nombre de domaines : stockage géologique de déchets radioactifs, stockage géologique du CO₂, forages pétroliers, etc. L'abandon des cavités de stockage dans le sel n'échappe pas à cette problématique dans la mesure où les cavités abandonnées seront amenées, comme on l'a vu précédemment, à perdurer dans le sous-sol à des échelles de temps géologiques. Il est donc nécessaire d'évaluer et de prendre en compte dans l'évolution à long terme de la cavité, l'impact éventuel de fuites par les puits qui peuvent être présentes au moment de l'abandon (même si elles sont souvent faibles à ce stade) ou apparaître plus tard sous l'effet du vieillissement des cimentations.

Les fuites par les puits peuvent se produire au travers de l'annulaire cimenté, du cuvelage en acier, du bouchon de ciment mis en place au moment de l'abandon ou encore, des interfaces entre ces éléments (voir Figure 17). Ces fuites¹⁵ peuvent être prises en compte dans l'évolution de la cavité en affectant au puits une perméabilité que l'on estime en général aux alentours de 10⁻¹⁴ m² pour un ciment sain, 10⁻¹² m² pour un ciment dégradé et 10⁻¹⁰ m², voire plus, pour un ciment très dégradé¹⁶.

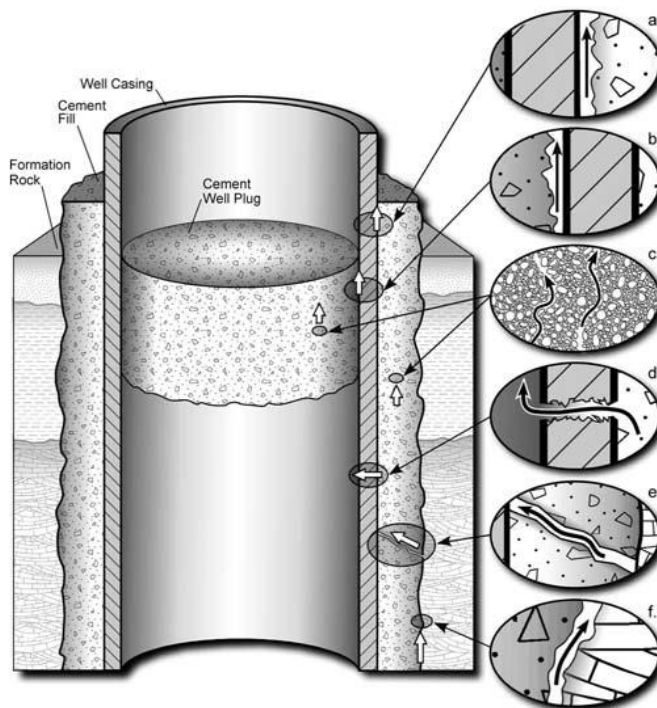


Figure 17 : Schématisation des différentes potentialités de fuites le long d'un puits abandonné : entre le ciment et le casing en acier (a et b), à travers le ciment (c et e), à travers le casing (d), entre le ciment et la roche (f), à travers la roche le long du puits (c) (d'après M.A. Celia et al., 2004)

¹⁵ Les essais d'étanchéité réalisés en cavité saline ont 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 barils/an [Thieland Russel, 2004], soit 160 m³/an, ce qui en vertu des équations (B32) et (B33) en annexe B, équivaut à une perméabilité de l'ordre de 10⁻¹² m².

¹⁶ Des éléments de dévaluation de la perméabilité des ciments et de leur évolution au cours du temps peuvent être trouvés dans Bachu et al. [2007], Duguid [2010], Nordbotten et al., [2009].

Il est souvent considéré que la contribution des fuites par le puits au débit total de saumure expulsé de la cavité est négligeable du fait que la section du puits est extrêmement faible par rapport à la surface totale de la cavité [par ex. Crotofino et Kepplinger, 2006]. Nous montrons en annexe B que cette hypothèse n'est pas valide dans tous les cas. La Figure B52 présente ainsi l'ordre de grandeur du rapport des débits expulsés par le puits et par le sel ($Q_{\text{puits}}/Q_{\text{sel}}$) en fonction des perméabilités du puits (K_{puits}) et du sel (K_{sel}), pour une petite et pour une grande cavité. A noter que l'axe des abscisses, qui représente la perméabilité du puits, peut aussi être vu comme l'axe du temps.

Globalement, on constate que les fuites par le puits sont rarement négligeables par rapport à la migration de saumure à travers le sel. Elles le sont uniquement lorsque que le ciment est relativement sain ($K_{\text{puits}}=10^{-14}$ - 10^{-13} m²) et que la perméabilité du sel est élevée ($K_{\text{sel}}=10^{-17}$ - 10^{-18} m²). Les fuites par le puits sont même le plus souvent prédominantes (particulièrement pour les petites cavités) ou tendent à le devenir avec le temps au fur et à mesure que le ciment se dégrade.

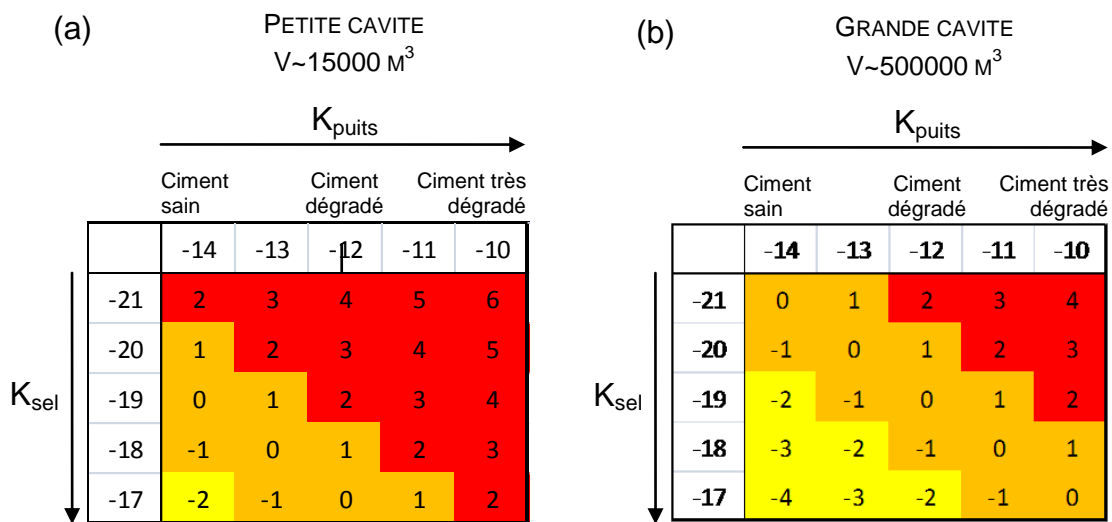


Figure 18 : Rapport $Q_{\text{puits}}/Q_{\text{sel}}$ entre le débit de fuite par le puits et le débit de saumure sortant de la cavité en fonction des valeurs de perméabilité respectives du puits et du sel (a) pour une petite cavité ($V \sim 15000 \text{ m}^3$) et (b) une grande cavité ($V \sim 500000 \text{ m}^3$). Les chiffres correspondent à des puissances de 10. Les cases rouges indiquent les situations où les fuites par le puits dominent, les cases jaunes indiquent celles où les fuites par le puits sont négligeables et les cases oranges indiquent celles où Q_{puits} et Q_{sel} sont du même ordre.

Pour intégrer les fuites par le puits dans la simulation de l'évolution à long terme de la cavité, une approche simple consiste à utiliser les mêmes équations que celles qui expriment la perméation à travers le sel, à savoir les équations (B20) et (B21) de l'annexe B (§ B-4-1-a), en remplaçant la perméabilité du sel par une perméabilité équivalente K_{eq} qui tient compte des perméabilités du puits et du sel :

————— (eq (B35) de l'annexe B)

La Figure 19 représente l'ordre de grandeur de la perméabilité équivalente (puits+sel) en fonction des perméabilités individuelles du puits et du sel. On constate que lorsque la perméabilité du sel est grande (10^{-17} m^2), la présence du puits modifie assez peu la perméabilité globale. En revanche, lorsque la perméabilité du sel est faible (10^{-21} m^2), le puits a un impact très important sur la perméabilité globale. Pour illustration, dans le cas d'une petite cavité et pour un sel de perméabilité 10^{-20} m^2 , l'effet d'un puits dégradé (10^{-11} m^2) revient à augmenter de 4 ordres de grandeur la perméabilité globale (qui se trouve alors être de 10^{-16} m^2).

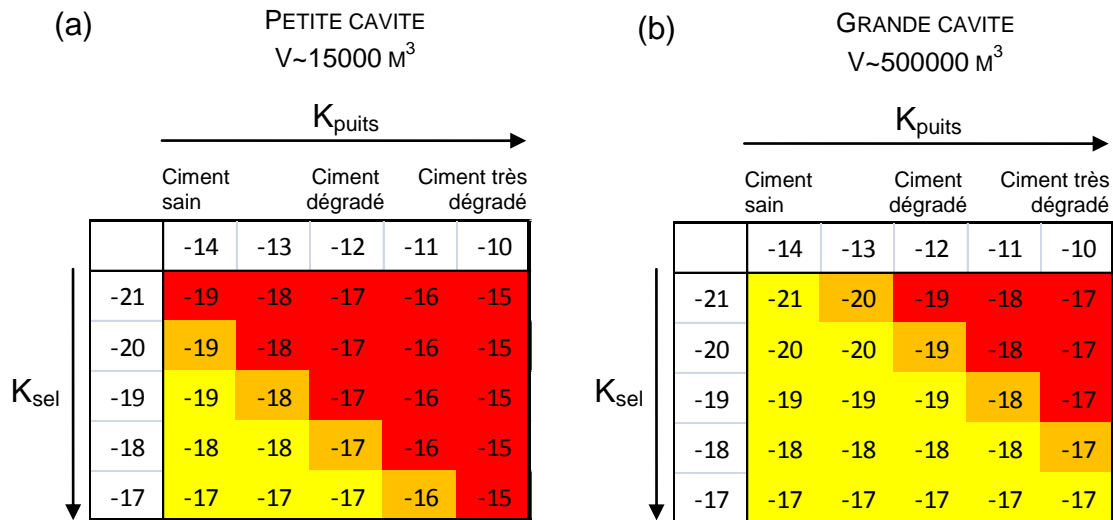


Figure 19 : Perméabilité équivalente K_{eq} en fonction des perméabilités respectives du sel et du puits (a) pour une petite cavité ($V \sim 15000 \text{ m}^3$) et (b) une grande cavité ($V \sim 500000 \text{ m}^3$). Les chiffres correspondent à des puissances de 10. Les cases jaunes indiquent les cas où la perméabilité équivalente est la même que celle du sel, les cases oranges celles où elle est supérieure d'1 ordre de grandeur à celle du sel et les cases rouges celles où elle est supérieure de 2 ordres de grandeur et plus à celle du sel.

Les fuites par le puits ont donc le même effet sur le comportement de la cavité qu'une augmentation de la perméabilité du sel, à savoir : elles réduisent le pic de pression lié au réchauffement de la saumure, elles font tendre la pression d'équilibre vers la pression halmostatique et elles accélèrent la convergence de la cavité. Pour obtenir des estimations plus quantitatives, il suffit d'utiliser les résultats fournis dans ce rapport en se référant aux courbes relatives à la valeur de la perméabilité équivalente (puits+sel) au lieu de celles relatives à la perméabilité du sel.

5. LES ALEAS LIES A L'ABANDON DES CAVITES DANS LE SEL

Cette section a pour objectif d'identifier les aléas ou impacts qui peuvent potentiellement subsister après l'abandon d'une cavité de stockage dans le sel, ainsi que les mécanismes qui peuvent conduire à ces aléas. Ceux-ci sont récapitulés sous forme d'arbre en annexe C. Ces éléments sont issus :

- du retour d'expérience des incidents/accidents survenus sur des cavités de stockage ou des cavités d'exploitation de sel [voir références dans Charmoille et Thoraval, 2010] ;
- de la littérature abondante sur l'abandon des cavités salines et les aléas associés [Ghoreychi et Cozensa, 1993 ; Berest et Brouard, 1997, 2003 ; Joe L. Ratigan, 2003 ; Fritz Crotofino & Jürgen Keplinger, 2006] ;
- des ordres de grandeurs caractéristiques de l'évolution à long terme d'une cavité saline établis au § 4.

Notons qu'il s'agit ici de récapituler, de manière générique, tous les phénomènes qui nous apparaissent comme physiquement plausibles à long terme dans le contexte d'une cavité saline abandonnée. Ceci ne préjuge pas qu'ils soient à redouter sur un site particulier. C'est l'analyse des risques résiduels propre à ce site qui doit établir si ces risques sont avérés ou non.

5.1 CONVERGENCE RAPIDE DE LA CAVITE

La convergence d'une cavité par fluage du sel est un phénomène normal et attendu dans l'évolution d'une cavité saline après son abandon. A terme, et sauf si la cavité est remblayée, ce phénomène aboutira à la fermeture totale de la cavité. En terme d'impact en surface, à moins que des couches très rigides, épaisses et continues empêchent la propagation des déplacements (circonstance peu fréquente à très long terme), on peut s'attendre à ce que cette perte de volume se répercute au moins partiellement¹⁷ en surface. L'amplitude maximale de l'affaissement qui va en résulter va dépendre de la profondeur, de la géométrie de la cavité, ainsi que de la nature des terrains de recouvrement mais on peut l'estimer en général d'ordre métrique.

Dans la plupart des cas, cet affaissement va s'effectuer sur des échelles de temps tellement grandes qu'il sera imperceptible à l'échelle humaine. Nous avons vu au § 4.4 que le temps de fermeture d'une cavité était de l'ordre du millier d'année pour le cas le plus rapide (cavité profonde, sel très fluant, forte perméabilité du sel), ce qui amène à prédire des vitesses maximum d'affaissement de l'ordre du mm/an. Néanmoins, comme nous l'avons dit au 4.4, le retour d'expérience des affaissements qui ont eu lieu suite à la convergence rapide et inattendue de certaines cavités dans le sel, qu'il s'agisse de cavités de stockage (Tersanne, Eminence) ou de cavités d'exploitation du sel (Twenthe-Rijn, Heiligreef brine field) montre que dans certains contextes, une vitesse d'affaissement de l'ordre du cm/an n'est pas à exclure.

¹⁷ Dans le cas où la convergence de la cavité ne serait liée qu'au fluage du sel, la perte de volume correspondante se répercuterait quasiment intégralement en surface. En réalité, il y a toujours des ruptures en paroi de la cavité (voir § 5.2) qui génèrent des chutes de blocs dont le foisonnement, limite le report du vide en surface.

Du fait de son caractère souple et progressif et de sa grande surface d'application (plusieurs kilomètres carrés), un tel affaissement (même de l'ordre du cm/an) ne présenterait pas de risques directs pour des enjeux humains. En revanche, il pourrait avoir des impacts sur les infrastructures (bâties) ou sur l'environnement (perturbation du système hydrographique, inondations, etc.) qu'il convient d'évaluer. Cet affaissement serait particulièrement marqué (et ses effets potentiels importants) si la cavité venait à se dépressuriser (suite à une perte d'étanchéité par exemple). La pression interne serait alors ramenée à la valeur de la pression de pore régnant dans l'environnement de la cavité, que l'on considère en général halmostatique.

Compte-tenu de ces éléments, il nous semble opportun que l'étude des risques résiduels remise avec le dossier d'arrêt intègre le scénario d'une mise à la pression halmostatique de la (des) cavité(s) concernée(s) par le projet d'abandon et en évalue l'impact sur la stabilité de ces cavités ainsi que sur les mouvements qui en résulteraient à la surface du sol.

5.2 RUPTURE DES PAROIS DE LA CAVITE

5.2.1 TYPOLOGIE DES RUPTURES

La rupture des parois d'une cavité saline est un phénomène qui peut revêtir plusieurs aspects : simple écaillage (« désquamation » superficielle localisée à la paroi de l'ouvrage), chute de blocs ou de dalles (insolubles présents dans le massif de sel en bancs d'épaisseur métrique ou en rognons qui ne se sont pas détachés pendant la phase de lessivage et qui peuvent tomber ultérieurement), rupture localisée du toit et enfin rupture généralisée, c'est-à-dire l'écroulement de la cavité.

Si les deux premiers phénomènes sont des réajustements locaux qui n'ont pas d'incidence sur la stabilité globale de l'ouvrage, les deux derniers sont en revanche susceptibles d'avoir des conséquences importantes, que ce soit en terme de mouvements de la surface du sol ou en terme de pollution des eaux souterraines par la saumure.

Une rupture localisée au toit consiste en la fracturation et le détachement brutal d'une partie du massif de sel situé au toit de la cavité. Typiquement, une telle rupture concerne une surface de quelques centaines de mètres carrés sur quelques mètres d'épaisseur. Elle conduit à la formation d'un toit « en cloche », stable naturellement, mais qui peut avoir pour conséquence :

- de détériorer l'extrémité inférieure du puits (cuvelage, annulaire cimenté et bouchon de ciment). Cette détérioration peut entraîner la perte d'étanchéité de l'ouvrage souterrain au niveau du puits ;
- de diminuer la garde de sel au toit de la cavité ; une succession de ruptures localisées peut donc, à terme, finir par détruire totalement la planche de sel et mener à une instabilité macroscopique ;
- que la pression de saumure au sommet de la nouvelle cavité dépasse la valeur admissible, conduisant à une propagation instable de la fracturation vers le toit du sel.

Une rupture généralisée, quant à elle, consiste en la fracturation et l'éboulement global du toit de la cavité, toit que les blocs de roche qui s'en détachent amènent à se déplacer vers le haut, induisant de proche en proche un cône d'effondrement dont le développement ne s'interrompt que lorsque les éboulis viennent, par leur foisonnement, combler en totalité la cavité. 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 »¹⁸), les conséquences en surface peuvent être de deux types : un affaissement souple de la surface du sol (cuvette d'affaissement) ou un effondrement brutal (formation d'un cratère) tel qu'on l'observe dans certaines exploitations de sel par dissolution ou tel que cela s'est produit, de manière accidentelle, sur certaines cavités de stockage par dissolution (voir par exemple le cas de Mont Belvieu, documenté dans Charmoille et Thoraval [2010]).

Outre les dérangements mécaniques induits dans le recouvrement (pouvant potentiellement remonter jusqu'en surface), une rupture généralisée de la cavité pourrait avoir pour conséquence de mettre la cavité en communication directe avec une formation aquifère poreuse et perméable. La saumure irait ainsi polluer la nappe aquifère et/ou l'eau de l'aquifère envahirait la cavité, se chargeant en sel (second facteur de pollution) et risquant d'aggraver l'instabilité mécanique en défruitant le massif de sel¹⁹.

5.2.2 CAUSES POSSIBLES

La rupture du massif de sel en paroi d'une cavité peut avoir principalement deux origines possibles :

- une pression excessive en cavité menant à l'apparition de contraintes en traction en paroi de la cavité : on parle alors de fracturation hydraulique. Concrètement, la résistance à la traction du sel étant très faible (2 MPa au maximum), on entend par « pression excessive » une pression qui atteint ou dépasse très légèrement la pression lithostatique. Du fait du contraste de densité entre la saumure et le sel (qui induit des gradients de pression différents), cette fracturation tend à apparaître préférentiellement au toit de la cavité, particulièrement pour les cavités de grande hauteur [voir par ex. Bérest et al., 1997] ;
- une pression insuffisante en cavité engendrant des contraintes de cisaillement en paroi de la cavité et pouvant mener au dépassement du critère de rupture du sel considéré. Notons que ce critère ne dépend pas seulement des propriétés intrinsèques du sel mais également de la température (donc de la profondeur) et de la vitesse de sollicitation.

Une pression excessive peut résulter de deux phénomènes :

- la dilatation thermique liée au réchauffement de la saumure : ce phénomène a été étudié en détail au § 4.3. la surpression liée à ce réchauffement peut être

¹⁸ 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.

¹⁹ Il y a toutefois une possibilité non négligeable que la saumure créée soit piégée par son propre poids dans la cavité.

évité en laissant la saumure se réchauffer avant de fermer la cavité ou en mettant en œuvre des stratégies que nous verrons au § 6 ;

- la convergence de la cavité par fluage du sel. Nous avons vu au § 4.4 que ce risque pouvait être considéré comme relativement modéré du fait que la pression d'équilibre atteinte par la saumure sur le long terme tend généralement à être relativement éloignée de la pression lithostatique. Toutefois, la détermination de cette pression d'équilibre dans le contexte de chaque cavité (par modélisation ou mieux encore, par la réalisation d'un test in situ tel que celui réalisé sur la cavité SPR3 à Carresse-Cassaber, voir Figure 13) fait partie des éléments importants de démonstration des conditions sécuritaires d'abandon d'une cavité.

Une pression insuffisante en cavité est le reflet d'une perméation trop importante de la saumure hors de la cavité (à travers le massif de sel ou le long du puits) par rapport à la mise en pression liée au fluage du sel. Ce déséquilibre peut être inhérent aux conditions du site (forte perméabilité du massif de sel, sel peu fluant, faible profondeur, cavité de petite dimension, etc.) mais peut aussi apparaître de manière accidentelle : perte incontrôlée de saumure suite à une fracturation des parois de la cavité ou à l'apparition d'anfractuosités au niveau d'un banc d'insoluble, perte d'étanchéité suite à une défaillance de la cimentation du puits, atteinte de la cavité par un forage tiers réalisé postérieurement à l'abandon (par exemple au-delà de la phase de « mémoire », voir Figure 3). Dans tous les cas, la pression en cavité ne pourra pas descendre en deçà d'une valeur minimale qui est la valeur de la pression de pore régnant dans les terrains environnant la cavité. Cette pression est généralement considérée comme étant halmostatique.

Notons qu'une rupture (localisée ou généralisée) au toit de la cavité peut être favorisée par :

- un toit plat de portée importante. La conception des cavités de stockage en France est telle que cette condition est rarement rencontrée. En effet, les portées plates des toits dépassent rarement les 1.000 m² ;
- une mauvaise qualité du sel au toit de la cavité (cette qualité peut avoir été dégradée par les cycles d'exploitation) ;
- une garde de sel insuffisante au toit de la cavité. Là encore, les cavités de stockage en France bénéficient d'une garde de sel relativement importante, dans tous les cas supérieure à 25 m (voir note INERIS DRS-09-103911-09771A)

Dans le cas de stockages constitués de plusieurs cavités proches l'une de l'autre, il est possible également 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.

5.3 POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES PAR LA SAUMURE

La pollution des eaux souterraines par la saumure injectée dans la cavité au moment de l'abandon est un aléa à ne pas négliger dans l'étude des risques et impacts résiduels remise avec le dossier d'arrêt.

En effet, nous avons montré au § 4.4, que le simple phénomène de perméation à travers le massif de sel pouvait aboutir, selon les conditions, à des débits de saumure négligeables (quelques litres/an) dans les conditions les plus favorables (cavités peu profondes, sel peu fluant et peu perméable) mais également à des débits pouvant devenir plus significatifs (jusqu'à plusieurs centaines de m³/an) dans d'autres cas (cavités profondes, sel fluant et perméable). Il faut ajouter à cela les fuites par le puits qui, selon la qualité initiale des cimentations et l'âge du puits, peuvent varier entre quelques m³/an et plusieurs centaines de m³/an (voir équations B32 et B33 en Annexe B en considérant pour le ciment des valeurs comprises entre 10⁻¹⁴ et 10⁻¹⁰ m²) Il est donc envisageable que dans certains contextes, plusieurs centaines de m³ de saumure soient expulsées chaque année de la cavité et se retrouvent dans les terrains environnants, c'est-à-dire en premier lieu dans le massif de sel et le cas échéant, dans les terrains sus-jacents et les nappes phréatiques qu'ils abritent.

Par ailleurs, en dehors de ces scénarios de fuites dites « normales », on ne peut ignorer la possibilité de fuites accidentelles liées, par exemple, à la rupture du toit de la cavité, à la rupture d'un pilier entre deux cavités ou encore, à un défaut majeur d'étanchéité du puits lié à une fracturation des cimentations par surpression en cavité. Ce scénario d'évolution dite « altérée » donnerait lieu à une expulsion importante de saumure dans les terrains environnants qui ne s'arrêterait que lorsque la pression en cavité (qui est le moteur de l'écoulement) serait revenue à la pression de pore des terrains environnants (pression halmostatique). En fonction de la pression initiale et du volume de la cavité, on peut envisager une expulsion de plusieurs milliers (voire dizaines de milliers de m³) de saumure dans l'environnement de la cavité.

Ce scénario d'évolution « altérée » est certes peu probable à l'échelle d'une vie humaine pour une seule cavité mais il est difficile de l'exclure sur l'ensemble des cavités existantes (il en existe environ 80 à ce jour en France), notamment au regard de la longue durée de vie de ces cavités. Aussi, nous estimons que l'étude d'impact à remettre avec le dossier d'abandon devrait systématiquement établir deux estimations : (1) une estimation des débits de fuites attendus (et de leur impact sur la qualité des eaux environnantes) en conditions normales, c'est-à-dire en intégrant des scénarios de fuites tels que la perméation « normale » à travers le sel et les fuites « normales » à travers le puits et (2) une estimation des débits de fuites attendus (et de leur impact sur la qualité des eaux environnantes) en conditions altérées. Parmi les scénarios d'évolution altérée qui pourraient être considérés, on peut citer à titre d'exemple :

- le cas d'une fuite diffuse de saumure à travers le massif de sel suite à une forte dégradation du sel au toit qui amènerait la perméabilité du massif à chuter de plusieurs ordres de grandeur (par exemple passer de 10⁻¹⁹ à 10⁻¹⁷ m²) ;
- le cas d'une fuite concentrée le long du puits dont le ciment viendrait à être fortement dégradé et dont la perméabilité chuterait de plusieurs ordres de grandeur (par exemple en passant de 10⁻¹⁴ m² à 10⁻¹⁰ m²).

La démarche consisterait alors à :

- estimer les débits de fuite de saumure en dehors de la cavité ;

- supposer que ces fuites arrivent d'une manière diffuse (via le recouvrement) ou concentrée (via le puits) au mur d'un aquifère, comme indiqué sur la Figure 20;
- estimer la salinité à l'équilibre dans l'aquifère compte tenu de la vitesse d'écoulement, de l'épaisseur de celui-ci et de la distance à l'axe du puits ;
- comparer cette salinité avec le seuil réglementaire de potabilité (la référence de qualité de l'eau en Na et Cl est d'environ 0,5 g/l pour la somme de ces deux ions).

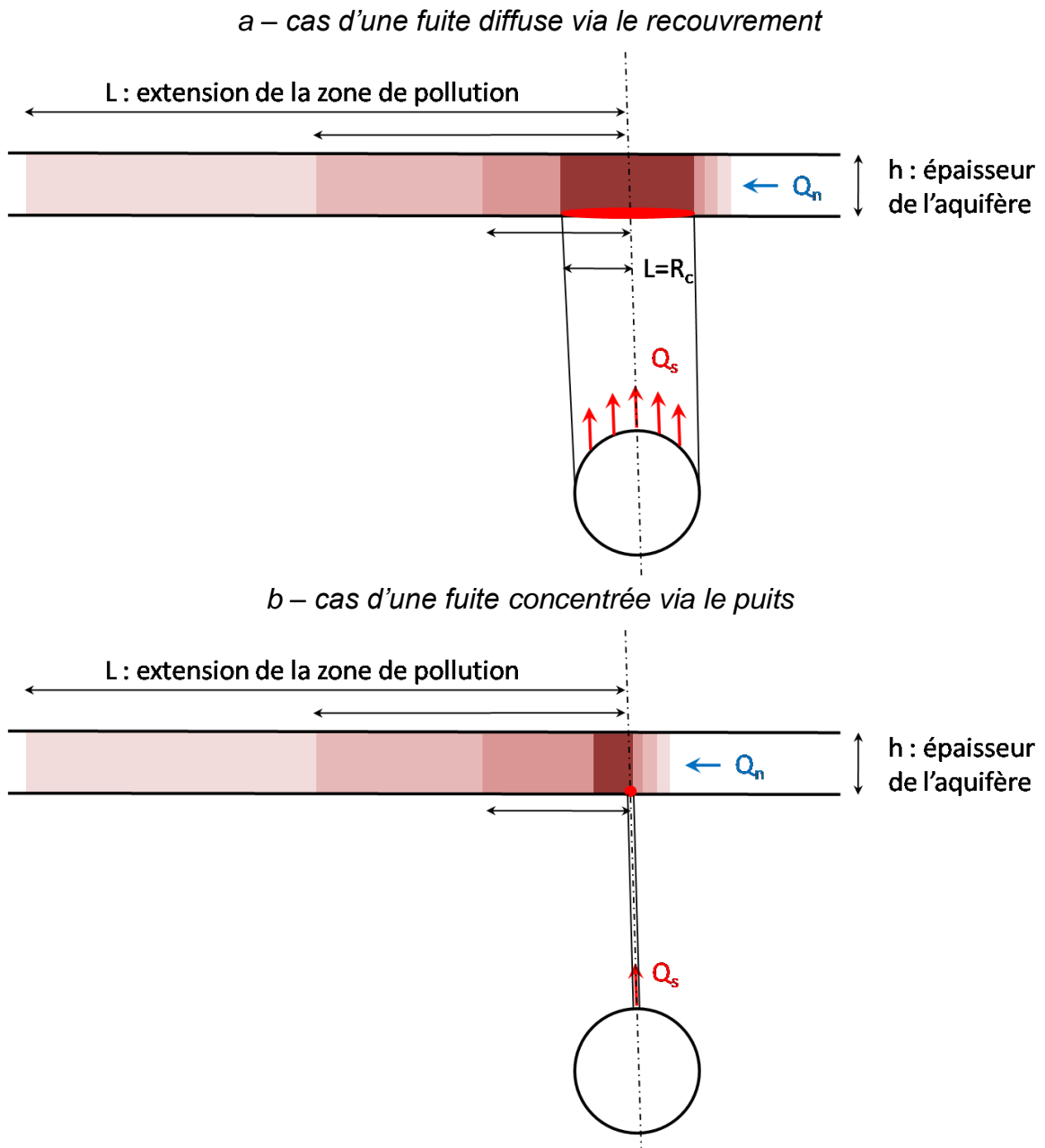


Figure 20 : Deux exemples de scénarios pouvant faire l'objet d'une analyse dans le cadre de l'étude d'impact

6. MESURES DE REDUCTION DES ALEAS ET STRATEGIES D'ABANDON ALTERNATIVES A LA METHODE « CLASSIQUE »

Après avoir procédé à une analyse générique des aléas liés à l'abandon d'une cavité lessivée de stockage et en avoir examiné les scénarios initiateurs, nous allons présenter un certain nombre de mesures destinées à la maîtrise de ces aléas. Dans un premier temps, nous nous intéresserons au risque de fracturation hydraulique de la cavité par réchauffement de la saumure et présenterons différentes stratégies permettant de limiter ce risque. Ensuite, nous présenterons des méthodes d'abandon alternatives, permettant pour certaines, de pallier certains aléas liés à la méthode « classique », mais présentant également un certain nombre d'inconvénients que nous évoquerons.

6.1 MESURES DE REDUCTION DU RISQUE DE FRACTURATION DE LA CAVITE PAR RECHAUFFEMENT DE LA SAUMURE

6.1.1 ATTENDRE LE RECHAUFFEMENT NATUREL DE LA SAUMURE

La première solution évidente consiste à attendre le réchauffement naturel de la saumure avant de fermer la cavité. Nous avons vu au § 4.3 que la cinétique de réchauffement pouvait être assez lente (notamment dans le cas des grandes cavités profondes) et mener à des délais d'attente importants (10-50 ans). Les stratégies évoquées ci-après sont destinées à limiter ce délai.

6.1.2 DIMINUER LA PRESSION INITIALE DE LA SAUMURE

Le fait de fermer la cavité avec une pression initiale inférieure à la pression halmostatique permet de réduire l'amplitude du pic de pression lié au réchauffement de la saumure ou autrement dit, de réduire le temps de réchauffement naturel nécessaire pour pouvoir fermer la cavité dans de bonnes conditions de sécurité. Nous montrons en Annexe B (§ B-7-1) que pour une cavité de 150 000 m³, le fait de baisser la pression initiale, par exemple à 1/3 de la pression halmostatique, permet de réduire le délai de fermeture de 17 ans à 10,5 ans, soit une réduction de près de 40%. L'inconvénient de cette solution est le faible soutènement qui va s'appliquer aux parois de la cavité pendant les premiers temps du réchauffement de la saumure. Il faut alors s'assurer que la cavité est dimensionnée pour accepter une faible pression interne pendant le temps nécessaire au retour à équilibre.

6.1.3 RECHAUFFER LA SAUMURE AVANT DE L'INJECTER EN CAVITE

Cette solution consiste à faire circuler la saumure dans un générateur-échangeur de chaleur avant de l'injecter en cavité, de manière à réduire l'écart initial de température entre la saumure et le massif. Son inconvénient majeur est son coût. Nous montrons sur la Figure 22 un exemple de calcul coût/bénéfice d'une telle opération en terme de réduction du délai de fermeture de la cavité par rapport à son coût en énergie. Les détails de ce calcul sont donnés en Annexe B (§ B-6). Dans l'exemple d'une cavité de 500 000 m³ située à 1000 m de profondeur, on constate que l'on peut réduire le délai de fermeture de 38,5 ans à, par exemple, 3 ans, en réchauffant la saumure de 15°C. Le coût de cette opération en énergie

est estimé à environ 625 k€. On peut calculer par ailleurs que l'opération durera environ 140 jours.

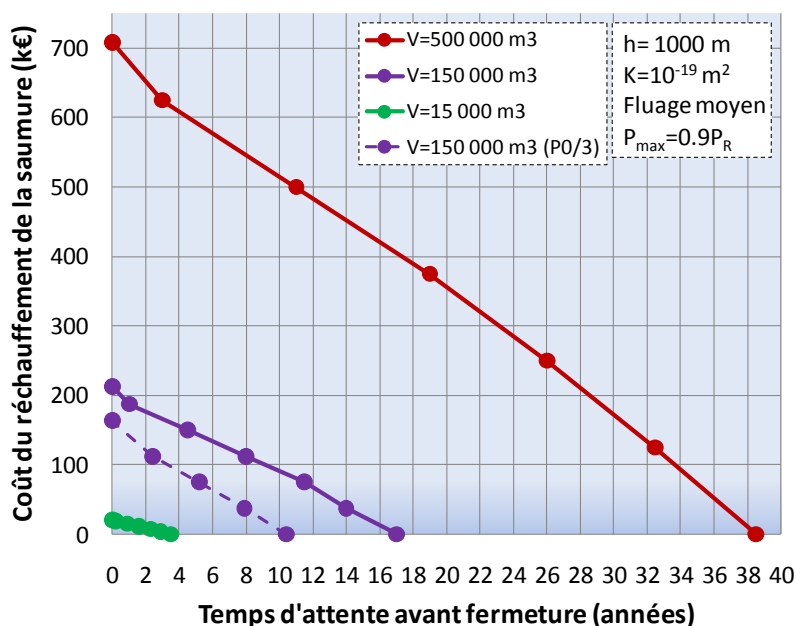


Figure 21 : Exemple de calcul de coût/bénéfice d'un réchauffement préalable de la saumure pour une petite, moyenne et grande cavité

6.1.4 INJECTER DU GAZ DANS LA CAVITE POUR EN AUGMENTER LA COMPRESSIBILITE

Cette solution consiste à ajouter à la saumure un petit coussin de gaz destiné à absorber les surpressions liées à la dilatation thermique. Cette solution est très efficace dans le principe. Pour illustration, nous montrons en annexe B (§ B-7-3) qu'une cavité de 150 000 m³ située à 1000 m de profondeur peut être fermée immédiatement après sa mise en saumure (au lieu d'attendre 17 ans) si on adjoint à la saumure une fraction volumique de 1,73% de gaz..

6.2 LES METHODES D'ABANDON ALTERNATIVES

Ce rapport a jusque là été consacré à la méthode d'abandon dite « classique » qui consiste, on le rappelle, à mettre la cavité en saumure et à fermer le puits définitivement par remplissage de ciment (Figure 22a). D'autres méthodes ont également été proposées (cf. Crotofino et Kepplinger 2006), qui permettent de pallier certains inconvénients de la méthode « classique », tout en en comportant d'autres. Nous les passons ici rapidement en revue.

6.2.1 FERMER LA CAVITE A PRESSION ATMOSPHERIQUE

Il s'agit ici de vider totalement la cavité et de la fermer à pression atmosphérique (Figure 22b). Sauf contexte exceptionnel, cette solution n'est pas envisageable sur le long terme du fait que les cavités de stockage dans le sel ne sont généralement pas conçues pour être opérées à pression atmosphérique. En revanche, utilisée de manière temporaire avant l'abandon de la cavité, cette mesure peut permettre d'accélérer le fluage et ainsi, de réduire significativement le volume de la cavité de manière à limiter les effets susceptibles d'apparaître une fois que la cavité sera définitivement bouchée. Il est nécessaire dans ce cas de bien contrôler l'évolution de la cavité et si nécessaire, de la remettre en pression en cas de détection de désordres à la périphérie de la cavité. Cette mesure a été rarement mise en œuvre du fait précisément de la difficulté de réaliser ce contrôle.

Notons que cet objectif d'accélérer le fluage avant l'abandon peut également être atteint en mettant la cavité en saumure et en diminuant la pression de saumure par rapport à la pression halmostatique (méthode exposée au § 6.1.2). Le fait d'utiliser un liquide (saumure) plutôt qu'un gaz (air) permet de réaliser plus facilement le contrôle évoqué précédemment et de remettre la cavité plus rapidement en pression en cas d'initiation d'une instabilité autour de la cavité.

6.2.2 REMBLAYER ET FERMER LA CAVITE

Pour réduire le risque d'instabilité de la cavité et d'affaissement en surface, une option consiste à remblayer la cavité (voir Figure 22c). Cette solution est simple dans le principe mais elle est généralement très coûteuse. D'autre part, les matériaux typiquement envisagés pour ce type d'opération nécessitent une compaction très importante (entre 15 et 20 %, soit l'équivalent d'environ 70 ans de convergence de la cavité, voir Figure 23) avant d'offrir une résistance suffisante pour stopper la convergence de la cavité. Il en résulte que dans les premiers temps après le remblayage, la convergence de la cavité est similaire à celle d'une cavité vide. Cette solution ne règle donc que partiellement les problèmes d'affaissement évoqués précédemment.

6.2.3 REMPLIR LA CAVITE DE SAUMURE EN LAISSANT LE Puits OUVERT

Il s'agit ici de prévoir une installation pérenne d'évacuation de la saumure expulsée du puits, pendant toute la durée du réchauffement de la saumure, voire au-delà. Cette solution permet d'éviter tout risque de surpression en cavité (puisque celle-ci est maintenue constamment à la pression halmostatique) et de maintenir la possibilité d'opérer, le cas échéant, un suivi de la cavité ou d'éventuels travaux de réfection (puisque le puits reste ouvert). En revanche, la nécessité de maintenir les installations d'évacuation de la saumure pendant une période potentiellement longue (plusieurs dizaines d'années après l'arrêt définitif du stockage) suppose que l'Etat prenne en charge cette maintenance et fasse procéder, au moment opportun, à la fermeture définitive du puits. Il faut alors envisager que la soulte versée à l'Etat par l'exploitant lors de la procédure d'abandon prenne en compte les coûts correspondants.

6.2.4 REMPLIR LA CAVITE DE SAUMURE ET DE REMBLAIS EN LAISSANT LE PUIT OUVERT

Il s'agit de la même option que la précédente, en ajoutant à la saumure du matériau de remblai. Cette option conserve l'avantage de l'option précédente, à savoir qu'elle évite toute surpression dans la cavité pendant la phase de réchauffement de la saumure (du fait que le puits reste ouvert) et permet de surcroît, du fait de la présence du matériau de remblai, de limiter l'affaissement en surface. Toutefois, comme dit précédemment, les matériaux de remblais typiquement envisagés pour ce type d'opération nécessitent une compaction très importante (15 à 20%) avant de bloquer efficacement la convergence. Dans ce cas, cela revient typiquement à attendre plus de 1000 ans avant que le remblai ne prenne sa pleine efficacité. Autant dire que l'avantage de cette solution par rapport à son coût (remblayage + maintenance des installations de surface) est peu évident.

6.2.5 REMPLIR LA CAVITE DE SAUMURE ET OUVRIR LE PUIT SUR UN AQUIFERE SALIN

Cette solution est séduisante dans le sens où elle permet une fermeture rapide du puits et donc, une procédure de d'arrêt des travaux limitée dans le temps, tout en évitant le risque de surpression en cavité (puisque celle-ci est maintenue à la pression de l'aquifère, c'est-à-dire à la pression hydrostatique). Il faut néanmoins que le contexte hydrogéologique s'y prête et que les rejets de saumure liés au réchauffement thermique (de l'ordre de 1-10 m³/j au début de la période de réchauffement, de 0,1-1 m³/j après 10 ans et de quelques litres/j après 1 siècle, voir Figures B10 à B12) cumulés à ceux liés à la convergence de la cavité (allant de quelques litres/j à 1-10 m³/j selon le contexte de la cavité, voir Figures B30 à B35) restent acceptables pour l'aquifère concerné. Par ailleurs, cette méthode comporte un risque de blocage du casing par cristallisation du sel due à la baisse de température lors de la remontée de la saumure dans le puits.

6.2.6 PROVOQUER L'EFFONDREMENT DE LA CAVITE

Comme cela est pratiqué pour certaines cavités d'exploitation de sel en Lorraine, l'effondrement provoqué d'une cavité de stockage peut être une option qui, dans certains contextes, a toute légitimité à être examinée. Cette option présente en effet l'intérêt d'éliminer a priori tout risque résiduel de mouvement de terrain en éliminant la source du risque en amont, de manière contrôlée et en présence de l'exploitant. Il convient bien entendu, avant d'entreprendre une telle opération, de réaliser une analyse de risque et une étude d'impact approfondies. Notons également que l'effondrement provoqué d'une cavité peut poser quelques difficultés techniques dans le sens où une cavité de stockage est généralement conçue pour rester stable même dans des conditions relativement extrêmes de pression. L'écroulement de la cavité peut donc nécessiter des dispositions techniques particulières (création de vide dans la cavité, reprise de lessivage, etc.), qui ont éventuellement un coût important. Une autre difficulté par rapport à cette option est que la cinétique de réajustement des terrains de recouvrement peut être relativement lente et faire qu'il peut se passer des années, voire des dizaines d'années, entre l'écroulement de la cavité et l'apparition de ses effets en surface.

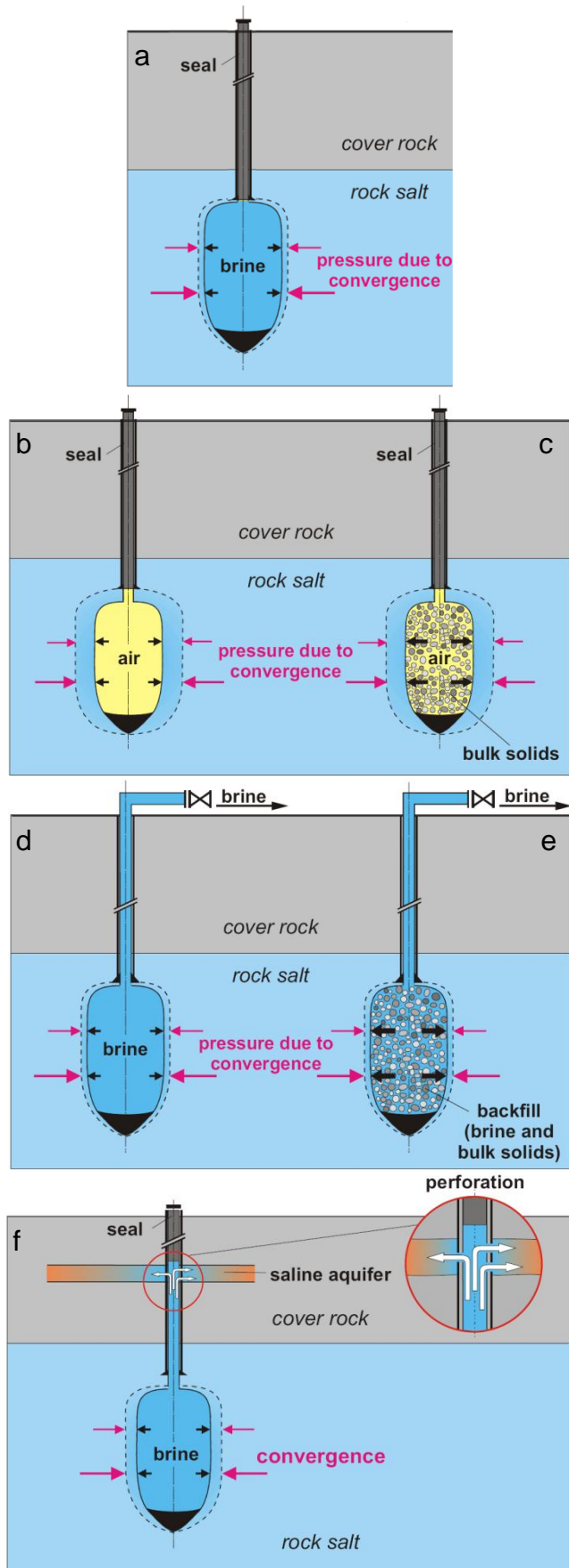


Figure 22 : Les principaux concepts d'abandon de cavités lessivées dans le sel (d'après Crotagino & Keplinger, 2006)

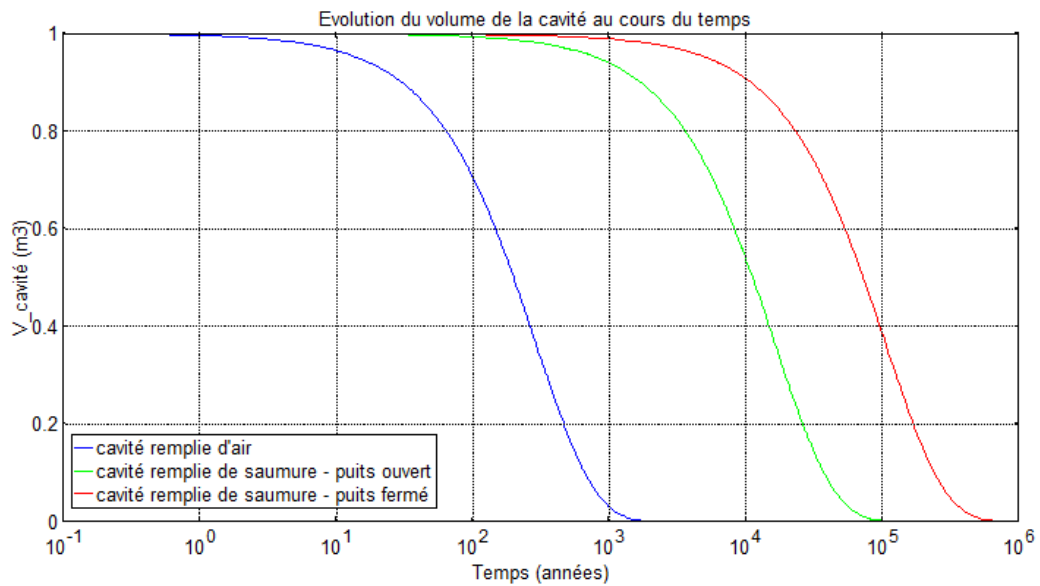


Figure 23 : Evolution de la convergence de la cavité selon la méthode d'abandon²⁰ dans le cas d'une cavité sphérique de volume initial $V_{(t=0)}=500\ 000\ m^3$ située à une profondeur $h=1000\ m$ dans le cas d'un sel moyennement fluant (fluage et percolation, dilatation thermique négligée)

²⁰ Pour chacune des 3 méthodes d'abandon, les variations de volume ont été calculées à partir de l'équation (B29) en annexe B

(B29)

On a supposé que le terme restait nul dans le cas de la cavité remplie d'air (courbe bleue), qu'il restait égal à la pression halmostatique dans le cas d'une cavité remplie de saumure puits ouvert (courbe verte). Dans le cas d'une cavité remplie de saumure puits fermé (courbe rouge) nous avons vu précédemment que la pression de saumure augmentait progressivement jusqu'à une valeur d'équilibre comprise entre la pression halmostatique et la pression lithostatique (14,7 MPa dans cet exemple).

6.3 PERTINENCE D'UNE SURVEILLANCE APRES L'ABANDON D'UNE CAVITE DANS LE SEL

Comme nous l'avons vu au § 0, deux types d'aléas peuvent potentiellement résider à long terme après l'abandon d'une cavité (ou d'un réseau de cavités) de stockage dans le sel :

- (1) des mouvements de la surface du sol, soit sous forme d'affaissement souple soit, dans le cas extrême, sous forme d'effondrement brutal ;
- (2) une pollution des eaux souterraines ou superficielles par la saumure.

Si l'étude des risques résiduels menée sur le site concerné met en évidence la réalité de ces aléas et la possibilité de conséquences sur des enjeux humains ou environnementaux, la surveillance peut, dans certains cas, se révéler comme une mesure adaptée de gestion des risques résiduels. Les techniques de surveillance qui peuvent être mises en œuvre dans ce cas sont principalement, pour l'aléa « mouvement de surface », les mesures topométriques et l'écoute microsismique et pour l'aléa « pollution », le suivi de la salinité des aquifères environnants à partir de mesures en forages ou en surface. A ce titre, un traçage isotopique peut être envisagé pour mieux identifier la saumure provenant de la cavité de celle présente naturellement dans les aquifères. Par ailleurs, si l'option d'abandon consiste à laisser le puits ouvert (les méthodes proposées aux § 6.2.3, 6.2.4 et 6.2.5), il est évident que cela ouvre un champ de possibilités beaucoup plus vastes en terme de surveillance puisque celle-ci peut être opérée directement en cavité : mesures de pression et de température, mesures sonar, log gamma-ray pour le puits, etc. Si le puits est bouché, une surveillance des paramètres de la cavité (pression, température) peut éventuellement continuer de se concevoir, par exemple en noyant une fibre optique dans le bouchon de ciment tel que cela se pratique dans d'autres domaines (stockage de déchets radioactifs par exemple), mais la faisabilité et le rapport intérêt/bénéfice d'une telle opération dans le contexte du sel sont loin d'être évidents.

De manière générale, les critères qui doivent guider à la mise en place (ou non) d'une surveillance et aider à en définir les moyens et le dimensionnement sont les suivants :

- la surveillance doit être efficace, c'est-à-dire permettre de détecter, d'alerter et de protéger les enjeux concernés avant qu'ils ne soient atteints par les effets du phénomène redouté. Pour cela, il faut s'assurer que :
 - la cinétique de détection-alerte-protection sera plus rapide que la cinétique du phénomène redouté ;
 - les grandeurs physiques surveillées soient représentatives du phénomène redouté et si possible, de ses événements initiateurs ;
 - les variations que l'on cherche à détecter dépassent la résolution des moyens d'observation déployés.
- la surveillance doit être proportionnée aux enjeux,
- la surveillance ne peut être opérée que sur une période de temps limitée.

Une des questions qui se posent quand on examine la pertinence d'une surveillance dans le contexte d'une cavité saline abandonnée est celle que l'on retrouve dans d'autres domaines touchant au « long terme » (stockage géologiques de déchets radioactifs, stockage du CO₂). A savoir, l'échelle de

temps de la surveillance qui peut être mise en place (qui ne peut se concevoir que sur quelques dizaines d'années à une centaine d'années tout au plus) est sans aucun rapport avec l'échelle de temps prévisible des aléas (qui pour la plupart perdureront toute la vie de la cavité, c'est-à-dire au moins des milliers d'années). Dès lors, on est en droit de se demander s'il est pertinent de mettre en place une surveillance alors que l'on sait qu'elle ne pourra couvrir qu'une portion infime de l'existence de ces aléas.

Notre point de vue est qu'à ce stade de l'état des connaissances et du retour d'expérience disponible sur le comportement des cavités dans le sel – qui a certes beaucoup progressé au cours des vingt dernières années mais qui ne s'appuie encore que sur des expérimentations de relativement courte durée (quelques années tout au plus) et qui sont loin d'avoir embrassé tous les types de contextes – il nous semble que les connaissances et les pratiques dans le domaine de l'abandon ne sont pas encore suffisamment matures pour que l'on puisse envisager aujourd'hui l'abandon de cavités dans le sel sans l'accompagnement d'une surveillance.

Cette surveillance peut être utile à plusieurs égards :

- elle est une occasion pour les parties prenantes (scientifiques, experts, exploitants, administration) d'enrichir le retour d'expérience sur le comportement des cavités salines abandonnées et de valider en conditions opérationnelles (et non seulement expérimentales) et sur des périodes longues (plusieurs dizaines d'années), le concept d'abandon classiquement proposé ;
- elle peut permettre de prévenir certains aléas de « court terme », tels que la possibilité d'un endommagement ou d'une rupture de la cavité par réchauffement de la saumure ;
- elle est l'occasion d'acquérir des données de référence (état zéro du site), qui pourra servir de base comparative aux générations futures si l'apparition de désordres à moyen terme (dans quelques dizaines ou centaines d'années) devait motiver la reprise d'une surveillance.
- elle est un élément rassurant pour les populations et favorise l'acceptabilité des projets d'abandon ;

Par conséquent, dès lors qu'il est établi, dans le contexte particulier d'un site, que des aléas résiduels subsisteront après l'abandon de la (des) cavité(s) concernée(s), nous recommandons d'opérer une surveillance relative à ces aléas pendant une période définie. La durée de cette surveillance pourrait être définie en fonction du contexte de chaque site et de l'importance des aléas redoutés mais l'ordre de grandeur nous semble devoir être de 20-30 ans. Cette durée est en accord avec les recommandations d'un groupe d'expert international sur la surveillance des cavités abandonnées de production de sel [Bérest et al., 2004] et rejoint également ce qui se pratique dans d'autres pays (les Pays-Bas par exemple où la période de surveillance pour les cavités de production de sel est de 30 ans) ou ce qui est envisagé dans d'autres domaines comme par exemple, le stockage du CO₂ (voir Directive Européenne 2009/31/EC du 29 avril 2009 relative au stockage géologique du dioxyde de carbone).

7. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

L'abandon des cavités dans le sel : problématique et enjeux

Les cavités creusées par dissolution dans le sel à des fins de stockage sont pour leur grande majorité encore en phase d'exploitation. Néanmoins, la problématique de l'abandon de ces cavités, ainsi que celles creusées à des fins de production de sel, a fait l'objet de nombreuses recherches depuis une vingtaine d'années, notamment au sein du SMRI. Le sujet intéresse également les pouvoirs publics, qui voient arriver les premières demandes d'arrêt définitif (le premier cas en France étant celui de Carresse-Cassaber actuellement en cours d'instruction) et qui doivent s'assurer que les méthodes d'abandon proposées par les exploitants sont garantes de la sécurité à long terme des personnes et des biens, ainsi que la protection de l'environnement autour des sites concernés.

Le concept d'abandon qui emporte aujourd'hui l'adhésion d'une majorité d'experts et vers lequel s'orientent la plupart des exploitants, en France et à l'étranger, consiste à remplir la cavité de saumure et, après une période éventuelle d'observation et d'attente de la mise à l'équilibre thermique de la saumure avec le massif de sel environnant, à obturer définitivement le puits par remplissage (partiel ou total) de ciment.

Ce concept repose sur le principe de stabilité à long terme de la cavité, c'est-à-dire qu'il prévoit que la cavité, une fois fermée, va atteindre une pression d'équilibre favorable au maintien de la stabilité mécanique de l'ouvrage. La cavité va alors se refermer lentement par fluage du sel sans provoquer de désordres majeurs dans son environnement, en dehors d'un affaissement de la surface du sol (d'ordre métrique au maximum), mais qui aura lieu sur une période de temps tellement longue (plusieurs milliers à dizaines de milliers d'années, temps nécessaire pour qu'une cavité se referme totalement) que les effets seront imperceptibles à l'échelle humaine. De même, ce concept prévoit une migration très lente de la saumure vers l'extérieur de la cavité (à travers les parois de la cavité et le long du puits) mais qui s'opérera avec des débits tellement faibles qu'il n'est pas attendu d'impact sur la qualité des eaux environnantes.

Ce rapport, qui se destine en premier lieu à l'Administration, vise à décrire précisément ce concept, à fournir des éléments quantitatifs sur l'évolution de la cavité (valeur de la pression d'équilibre, temps d'atteinte de l'équilibre thermique, débits de saumure expulsés de la cavité, temps de fermeture de la cavité), à faire ressortir les aléas qui peuvent en résulter et à fournir des recommandations destinées à favoriser la maîtrise de ces aléas. Les éléments clés que l'on peut retenir de cette étude sont récapitulés ci-après.

Le phénomène de réchauffement de la saumure

Un des phénomènes que l'exploitant doit veiller à maîtriser lors de l'abandon d'une cavité dans le sel est la dilatation thermique liée au réchauffement de la saumure injectée dans la cavité. Ce phénomène a été largement étudié ces dernières années et on en connaît assez bien les risques (surpression et donc fracturation hydraulique des parois de la cavité ou des cimentations du puits) et les moyens de

le maîtriser. Les estimations varient en fonction des hypothèses de modélisation (notamment l'importance relative des transferts de chaleur par conduction et par convection) mais on peut estimer globalement qu'une cavité dans laquelle on injecte une saumure à la température de la surface (12°C en moyenne annuelle) va mettre quelques années (1-10 ans) à atteindre l'équilibre thermique si elle est de petite dimension (15 000-50 000 m³) et de faible profondeur (300-500m) et plusieurs décennies (10-50 ans) si elle est de grande dimension (300 000-500 000 m³) et de grande profondeur (1000-1500m). En France, la majorité des cavités de stockage se situent dans le deuxième cas, ce qui laisse présager que des délais d'attente assez importants (plusieurs dizaines d'années après la mise en saumure) vont être nécessaires pour pouvoir fermer définitivement ces cavités. Plusieurs options peuvent alors être envisagées :

- l'exploitant attend le délai nécessaire (même s'il s'agit de plusieurs dizaines d'années) avant d'abandonner juridiquement la cavité. Cette option peut convenir si l'exploitant n'a pas d'urgence à réhabiliter le site (par exemple si la cavité mise en saumure fait partie d'un champ de cavités qui continuent d'être exploitées) ;

- l'exploitant met en œuvre des mesures particulières pour pouvoir fermer la cavité dans un délai plus rapide sans que cela engendre un risque de surpression de la cavité. Dans ce rapport, nous avons présenté trois stratégies possibles :

- diminuer la pression initiale en cavité : cette option permet de réduire significativement le délai de fermeture mais nécessite un contrôle strict de la stabilité de la cavité et de s'assurer préalablement que celle-ci est dimensionnée pour accepter une faible pression interne pendant le temps nécessaire au retour à équilibre,
- réchauffer la saumure avant de l'injecter en cavité : cette option a l'assurance d'être efficace mais peut requérir des coûts en énergie importants (voir les estimations fournies dans ce rapport), particulièrement pour les grandes cavités à grande profondeur,
- ajouter du gaz à la saumure pour en augmenter la compressibilité : c'est la solution la plus séduisante et la moins coûteuse dans le principe. Toutefois, à notre connaissance, il n'a pas encore été fait la preuve de sa faisabilité.

- l'exploitant abandonne la cavité en laissant le puits ouvert. Dans ce cas, c'est l'Etat qui doit assurer la maintenance nécessaire (purges régulières de la cavité) pendant la période de réchauffement de la saumure et qui doit procéder à terme à la fermeture définitive du puits. Cela nécessite une bonne évaluation des coûts correspondants et une prise en compte de ces coûts dans la soultte versée à l'Etat lors de la renonciation de la concession.

Le risque d'instabilité à long-terme et ses impacts en surface

Selon les hypothèses les plus vraisemblables, les cavités abandonnées dans le sel resteront des milliers voire des dizaines de milliers d'années avant de se refermer totalement par fluage du sel. Il est donc légitime de se demander si l'étanchéité et la stabilité de ces ouvrages pourra être assurée sur des échelles de temps aussi longues et quelles seraient les conséquences sur l'homme et sur l'environnement d'une perte d'intégrité de ces cavités.

Si le risque d'instabilité par mise en surpression de la cavité sous l'effet de la dilatation thermique de la saumure semble pouvoir être maîtrisé relativement

facilement (voir paragraphe précédent), il existe aussi un risque d'instabilité du fait d'une pression insuffisante en cavité. Ce risque est moins souvent relevé dans la littérature que celui lié, par exemple, à un excès de pression en cavité, alors qu'il nous semble au moins aussi plausible. En effet, nous avons vu dans ce rapport que la pression d'équilibre vers laquelle tend une cavité abandonnée en saumure est comprise entre la pression halmostatique (pression exercée par la colonne de saumure remontant jusqu'à la surface, soit environ 1,2 MPa/100m de profondeur) et la pression lithostatique (pression exercée par les terrains, soit environ 2,2 MPa/100m de profondeur). Toutefois, pour les configurations que nous avons étudiées (en terme de profondeur, de géométrie de la cavité, de nature et de perméabilité du sel), nous avons relevé une tendance claire à ce que la pression d'équilibre soit sensiblement inférieure à la pression lithostatique (et donc sans risque du point de vue de la fracturation des terrains). La pression d'équilibre ne devient proche de la pression lithostatique que pour de grandes cavités très profondes (> 2000 m) localisées dans des sels peu perméables et très fluants, ou pour des cavités de grande hauteur²¹.

Il s'ajoute à cela que nos simulations surestiment probablement la valeur de la pression d'équilibre dans la mesure où elles ne tiennent pas compte des fuites par le puits (dont nous avons montré que la contribution au débit de saumure sortant de la cavité était loin d'être négligeable, contrairement à ce qui est affirmé par certains auteurs, voir Crotochino & Kepplinger, 2006) et qu'elles ne tiennent pas compte non plus de la possibilité d'une dépressurisation accidentelle de la cavité suite par exemple, à un défaut d'étanchéité en paroi de la cavité (fracturation, ouverture de discontinuité au niveau d'un banc d'insoluble), au niveau du puits (vieillesse de la cimentation), à l'effet d'un séisme ou encore, à l'atteinte de la cavité par un forage tiers après la phase de « mémoire » (voir Figure 3). Dans ce type de scénario d'évolution « altérée », la pression en cavité redescendrait à la pression halmostatique et il n'est pas certain, selon le dimensionnement de la cavité, que celle-ci puisse rester stable à long terme dans ces conditions.

Sans aller jusqu'à envisager un scénario d'évolution altérée, nous avons montré qu'en considérant des paramètres « moyens » pour le sel (« standard creep ») et pour la cavité (150 000 m³ à 1000 m de profondeur), il suffit d'une perméabilité du sel de 10⁻¹⁸ m² pour que la pression d'équilibre soit quasiment au niveau de la pression halmostatique (voir Figure 12). Une telle perméabilité n'est pas exceptionnelle, surtout si l'on y intègre le phénomène de fuite par le puits, qui peut diminuer d'1 à 2 ordres de grandeur la perméabilité effective de la cavité (voir Figure 19).

Dès lors, dans une approche conservatrice, nous recommandons que l'étude des risques résiduels remise avec le dossier d'arrêt intègre le scénario d'une mise à la pression halmostatique de la (des) cavité(s) concernées par le projet d'abandon et en évalue l'impact sur la stabilité de ces cavités ainsi que sur les mouvements qui en résulteraient à la surface du sol. Le retour d'expérience des affaissements qui ont eu lieu suite à la convergence rapide et inattendue de certaines cavités de stockage dans le sel (Tersanne, Eminence) renforce à nos yeux la légitimité de cette préconisation.

²¹ Les cavités de très grande hauteur posent un problème particulier du fait de la différence de densité entre le sel et la saumure. On doit vérifier qu'au point le plus haut de la cavité, la pression d'équilibre reste bien inférieure à la pression lithostatique.

Le risque de pollution des eaux souterraines

Un autre point qu'il convient d'étudier avec attention lors de l'abandon d'une cavité dans le sel est l'évaluation de l'impact de la fermeture de la cavité sur la qualité des eaux souterraines. Les estimations que nous avons réalisées dans le cadre de ce rapport montrent que les débits de saumure qui vont traverser les parois du sel seront extrêmement faibles (quelques litres/an) dans les conditions les plus favorables (cavités peu profondes, sel peu fluant et peu perméable) mais qu'ils peuvent devenir plus significatifs (jusqu'à plusieurs centaines de m³/an) dans d'autres contextes (cavités profondes, sel fluant et perméable). Il faut ajouter à cela les fuites par le puits que l'on peut estimer, selon la qualité et l'âge des cimentations, entre quelques m³/an et plusieurs centaines de m³/an. Il est donc envisageable qu'en simples conditions « normales », plusieurs centaines de m³ de saumure soient rejetées chaque année de la cavité et se retrouvent dans les terrains environnants, c'est-à-dire en premier lieu dans le massif de sel et le cas échéant, dans les terrains sus-jacents et les nappes phréatiques qu'ils abritent.

Par ailleurs, comme pour la question de la stabilité mécanique, on ne peut exclure la possibilité d'un scénario d'évolution altérée, c'est-à-dire une fuite accidentelle de saumure due, par exemple, à une rupture de la cavité ou à un défaut majeur d'étanchéité au niveau du puits. Dans ce cas, une expulsion massive de saumure dans les terrains environnants aurait lieu, qui ne prendrait fin que lorsque la pression en cavité (qui est le moteur de l'écoulement) serait revenue à la pression halmostatique. En fonction de la pression initiale et du volume de la cavité, on peut alors envisager une expulsion de plusieurs milliers (voire dizaines de milliers de m³) de saumure dans l'environnement de la cavité en un temps assez court.

Dès lors, nous recommandons que l'étude des risques résiduels remise avec le dossier d'arrêt évalue l'impact potentiel sur la qualité des eaux environnantes de deux types de scénarios de fuite : (1) un scénario d'évolution « normale », à savoir la migration attendue de la saumure à travers les parois de cavité et le long du puits et (2) un ou plusieurs scénarios d'évolution « altérée ». Ces scénarios pourraient inclure à titre d'exemple :

- le cas d'une fuite diffuse de saumure à travers le massif de sel suite à une forte dégradation du sel au toit qui amènerait la perméabilité du massif à chuter de plusieurs ordres de grandeur (par exemple de 10⁻¹⁹ à 10⁻¹⁷ m²) ;
- le cas d'une fuite concentrée le long du puits dont le ciment viendrait à être fortement dégradé et dont la perméabilité chuterait de plusieurs ordres de grandeur (par exemple en passant de 10⁻¹⁴ m² à 10⁻¹⁰ m²).

La pertinence d'une surveillance post-abandon

Une autre question que nous avons abordée dans ce rapport est celle de la nécessité (ou non) d'opérer une surveillance après l'abandon d'une cavité (ou d'un champ de cavités) de stockage dans le sel. Sur ce sujet, il est utile de rappeler qu'une surveillance ne peut éventuellement se justifier que si l'étude des aléas résiduels met effectivement en avant la persistance d'aléas (concrètement on parle ici de pollution des eaux souterraines et/ou de mouvements de la surface du sol) au-delà de l'abandon de la cavité. Il existe probablement un certain nombre de contextes où, même dans les scénarios d'évolution altérée évoqués précédemment (instabilité majeure de la cavité ou fuite massive de saumure dans

les terrains encaissants), il n'y aurait pas d'effets dommageables sur la qualité des eaux ou sur les enjeux situés en surface et où par conséquent, l'aléa serait nul.

En revanche, pour les sites sur lesquels on ne saurait exclure des aléas à long terme, se pose la question de savoir si la surveillance peut être un outil de maîtrise des risques adapté. Le point qui fait principalement obstacle au principe de surveillance dans ce contexte est la courte échelle de temps sur laquelle la surveillance peut raisonnablement être opérée (quelques dizaines d'années à une centaine d'années tout au plus) par rapport à l'existence des aléas (qui perdureront toute la durée de vie de la cavité, c'est-à-dire plusieurs milliers à dizaines de milliers d'années). Dès lors, on est en droit de se demander s'il est pertinent de mettre en place une surveillance alors que l'on sait qu'elle ne pourra couvrir qu'une portion infime de l'existence des aléas.

Notre point de vue est qu'à ce stade de l'état des connaissances et du retour d'expérience disponible sur le comportement des cavités dans le sel – qui a certes beaucoup progressé au cours des vingt dernières années mais qui ne s'appuie encore que sur des expérimentations de relativement courte durée (quelques années tout au plus) et qui sont loin d'avoir embrassé tous les types de contextes possibles – il nous semble que les connaissances et les pratiques dans le domaine de l'abandon ne sont pas encore suffisamment matures pour que l'on puisse envisager aujourd'hui l'abandon de cavités dans le sel sans l'accompagnement d'une surveillance.

Cette surveillance peut être utile à plusieurs égards :

- elle est une occasion pour les parties prenantes (scientifiques, experts, exploitants, administration) d'enrichir le retour d'expérience sur le comportement des cavités salines abandonnées et de valider en conditions opérationnelles (et non seulement expérimentales) et sur des périodes longues (plusieurs dizaines d'années), le concept d'abandon classiquement proposé ;
- elle peut permettre de prévenir certains aléas de « court terme », tels que la possibilité d'un endommagement ou d'une rupture de la cavité par réchauffement de la saumure ;
- elle est l'occasion d'acquérir des données de référence (état zéro du site), qui pourra servir de base comparative aux générations futures si l'apparition de désordres à moyen terme (dans quelques dizaines ou centaines d'années) devait motiver la reprise d'une surveillance.
- elle est un élément rassurant pour les populations et favorise l'acceptabilité des projets d'abandon ;

Par conséquent, dès lors qu'il est établi, dans le contexte particulier d'un site, que des aléas résiduels subsisteront après l'abandon de la (des) cavité(s) concernées, nous recommandons d'opérer une surveillance relative à ces aléas pendant une période définie. La durée de cette surveillance pourrait être définie en fonction du contexte de chaque site et de l'importance des aléas redoutés mais l'ordre de grandeur pourrait être de 20-30 ans. Cette durée est en accord avec les recommandations d'un groupe d'expert international sur la surveillance des cavités abandonnées de production de sel [Bérest et al., 2004] et rejoint également la pratique d'autres pays (les Pays-Bas par exemple où la période de surveillance prescrite après l'abandon des cavités de production de sel est de 30 ans) ou ce qui est envisagé d'autres domaines comme par exemple, le stockage du CO₂ (voir Directive Européenne 2009/31/EC du 29 avril 2009).

Propositions de pistes d'études et recherches

Enfin, quelques pistes d'étude ou de recherche nous semblent aujourd'hui faire défaut ou en tout cas, mériter d'être soutenues :

- la question de l'évaluation de l'aléa lié à l'abandon des cavités dans le sel, qui nous semble un domaine dans lequel il y a encore beaucoup à faire. Nous avons essayé dans ce rapport d'avancer quelques éléments de réflexion en examinant les scénarios de risques possibles (voir arbre en annexe C), en fournissant des éléments d'évaluation (pressions attendues en cavité, vitesses de convergence, rejets de saumure prévisibles dans les terrains encaissants) mais notre approche reste très générique et centrée essentiellement sur l'aléa « fond ». Nous pensons que des études d'aléas plus précises, menées sur des cas concrets et intégrant l'ensemble des composantes de l'aléa (de son initiation au fond jusqu'à l'atteinte de la cible) restent à entreprendre. Peut-on quantifier plus précisément, à partir du retour d'expérience (incidents/accidents), de l'état des connaissances sur le comportement du sel et des ciments et du contexte du site (géométrie et profondeur de la (des) cavité(s), nature du sel, épaisseur de la planche de sel, etc.) la probabilité pour que des événements tels que ceux que nous avons évoqués précédemment (écroulement de la cavité, fuite accidentelle de saumure hors de la cavité) se produisent cours de la vie d'une cavité ? S'ils se produisent, peut-on estimer plus précisément l'impact qu'ils auraient sur la qualité des aquifères ou sur les enjeux en surface (bâti, personnes, réseaux hydrographiques) ? En croisant la probabilité (ou la prédisposition) de ces événements avec l'intensité de leurs effets, à quel niveau d'aléa arrive t'on dans des exemples concrets (fort, moyen, faible, négligeable) ? Ce sujet, de notre point de vue, n'a pas encore été beaucoup exploré et mériterait d'être soutenu dans les années à venir, notamment au sein du SMRI.
- la question du vieillissement, qui se pose à la fois pour le puits et pour le sel. En ce qui concerne le puits, il nous semble important de progresser dans la compréhension des mécanismes d'altération des ciments, de manière à concevoir des ciments (et des protocoles de cimentation) qui permettent d'améliorer l'étanchéité à long terme d'un puits. Notons que cette problématique est au cœur de tous les domaines qui touchent au long terme, comme également le stockage de déchets radioactifs ou le stockage de CO₂. En ce qui concerne le sel, il nous semblerait intéressant d'étudier l'impact de l'imprégnation de la saumure sur les caractéristiques du sel à long terme (résistance, comportement de fluage) ;
- la question de l'impact éventuel d'un séisme sur la cavité ou sur le puits. Le séisme est souvent évoqué dans les études de sécurité comme une cause possible d'endommagement ou de rupture du puits ou de la cavité elle-même. Par souci d'exhaustivité, nous l'avons d'ailleurs placé dans l'arbre présenté en annexe C. Toutefois, à notre connaissance, il y a relativement peu d'éléments (retour d'expérience, études précises) qui permettent à ce jour de juger la pertinence d'un tel scénario dans le contexte d'une cavité saline. D'autre part, les études réalisées [You & Pecker, 2004, Aydan et al., 2010] aboutissent à des conclusions parfois diverses. Il nous semblerait donc intéressant de mener une étude plus complète sur ce sujet.

- l'élaboration d'un cahier des charges minimal à respecter lors de la fermeture d'une cavité saline. Il nous semble qu'un document de ce type, qui fournirait une liste minimale de données à collecter (voir une ébauche possible de cette liste au § 3.3), de tests à réaliser (notamment les tests d'étanchéité) et qui donnerait des prescriptions minimales sur la manière de collecter ces données et de réaliser ces tests, serait extrêmement utile aussi bien pour les exploitants que pour l'Administration, notamment les inspecteurs qui seront en charge d'instruire les futurs dossiers d'abandon.

8. REFÉRENCES

- Aydan, O., Ohta, Y., Genis, M., Tokashiki, N. & Okhubo, K. (2010) Response and stability of underground structures in rock mass during earthquakes, *Rock Mech. Rock. Eng.*, vol. 43, pp. 857-875.
- Bachu S., Watson T. (2007) Factors affecting or indicating potential wellbore leakage, 3rd Well Bore Integrity Network meeting, March 12-13, Santa Fe, USA.
- Berest P. Ledoux E. Legait B, De Marsily G. (1979) Effets thermiques dans les cavités en couche salifère, 4th Cong. Int. SIMR, Montreux, Vol.1, Balkema, pp.31-35.
- Berest P., T. You, C. Maisons, M. Valette (1995) Quelques travaux relatifs à l'abandon des cavernes dans le sel / Some studies related to the closure of solution mined caverns.
- Berest P., Brouard B. & Durup G. (1997) Abandon des cavités salines, *Revue Française de Géotechnique*, n° 82, 16 pages, 26 mai.
- Berest P. & Brouard B. (1998) A tentative classification of salts according to their creep properties, Proceeding of SMRI spring meeting, New Orleans, Louisiana, USA, April 19-22, pp. 18-38.
- Bérest, P., Diamond, B., Duquesnoy, A., Durup, G., Feuga, B. ans 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, November 16-17, Nancy (France).
- Berest P., Brouard B. & Karimi-Jafari M. (2005) Deep salt caverns abandonment, Post-Mining 2005, Novembre 16-17, Nancy, France.
- Berest P., Karimi-Jafari M. & Brouard B. (2008) Comportement mécanique à très long terme des mines ete cavernes dans le sel gemme : loi de Norton-Hoff ou loi de Lemaitre ?, *Revue Française de Géotechnique*, n°124, 3^e trimestre.
- Bérest P., Karimi-Jafari M., Brouard B., Durup G. (2006) Brine Warming in a Sealed Cavern: What can be done?, In Proc. S.M.R.I. Fall Meeting, Rapid City, USA, pages 61-80, 2006.
- Brouard, B. (2010) Using LOCAS software to predict the long-term behavior of salt caverns. *SMRI Technical Class.*: 91-124.
- Buffet, A. (1998) The collapse of Compagnie des Salins SG4 and SG5 drillings”, In Proc. S.M.R.I. Fall Meeting, Rome, pp. 79-105.
- Boucly P. (1982) Expériences in situ et modélisation du comportement des cavités salines utilisées pour le stockage de gaz, *Revue Française de Géotechnique*, n°18, pp. 49-57.
- Chaptal F. & Deroubaix M. (2008) Le stockage souterrain de gaz naturel : une activité stratégique soumise à un régime juridique complexe, *Bulletin de Droit de l'Environnement Industriel (BDEI)*, 01/07/2008, n°16, pp. 43-51.
- 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 Mechanic & Mininig Sciences*, N° 36, 1999, pp 509-526
- Crotogino, F. & Kepplinger, J. (2006) Cavern well abandonment techniques guidelines manual, Research Project Report N°. 2006-3-SMRI.

- de Laguerie P., J.Y. Heas, D. Fourmaintraux, B. Brouard, P. Berest (2004) Decommissioning and abandonment procedure of LPG caverns at Carresse (France), SMRI Fall 2004 Conference, Berlin Germany, 3 – 6 October.
- de Laguerie P., T. You, D. Fourmaintraux, B. Brouard, J.Y. Heas, P. Berest (2004) An in situ creep test in advance of abandoning a salt cavern, SMRI Fall 2004 Conference, Berlin Germany, 3 – 6 October.
- Duguid A. (2010) DOE funded wellbore survey investigations, IEAGHG 6th wellbore integrity network meeting, Noordwijk Ann See, The Netherlands, report n°2010/10, may 2010.
- Durup G. (1994) Long term tests for tightness evaluations with brine and gas in salt, Proceeding of SMRI fall meeting, Hannover.
- Ghoreychi M., Cosenza P., 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. (1992) Synthèse des études thermomécaniques sur le Sel, document édité par G.3S à l'occasion du Conseil Scientifique de G.3S, 25 Juin 1992.
- Héas, J.Y. (2004) Arrêt définitif de l'exploitation du stockage de propane liquéfié de Carresse-Cassaber (Pyrénées-Atlantiques), document TOTAL EP/F/SDAN JYH n°04-031.
- J.P. Holman (2010) Heat transfer, McGraw Hill Higher Education, Boston.
- J.B. Kazmierczak (2004) Meuse/Haute-Marne - EPG - Simulation numérique des effets du couplage hydromécanique sur les mesures de pressions interstitielles par EPG dans les argilites du Callovo-Oxfordien, rapport pour l'ANDRA référencé D RP 1INE 04-002/A (référence INERIS DRS0458224/R01)
- Nordbotten J.M., Kavetski D., Celia M.A., Bachu S. (2009) Model for CO2 leakage including multiple geological layers and multiple leaky wells, Environmental Science and Technology, 2009, 43 (3), 743-749.
- Prij J. (1991) On the design of a radioactive waste repository, Ph.D. Thesis, Twente University, 1991.
- Tijani M. (2008) Contribution à l'étude thermomécanique des cavités réalisées par lessivage dans des formations géologiques salines, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Pierre et Marie Curie, 24 avril.
- Vouille G., J. Bergues, G. Durup, T. You (1993) Etude de la stabilité des cavités lessivées dans le sel; proposition d'un critère de dimensionnement, Eurock'93, Lisbonne.
- You T. & Pecker (1994), Consequences of a seismic diagnosis on an underground storage facility in Manosque (France), 2ème symposium franco-italien de genie parasismique, Nice, 17-19 octobre 1994.
- You T., C. Maisons, M. Valette (1994) Experimental procedure for the closure of the brine production caverns on the "Saline de Vauvert" site, SMRI Fall Meeting 1994, Hannover, 25 sept - 1 oct.
- You T., H. Henrion, P. de Laguerie, S.M. Tijani, G. Vouille (1997) Some applications of GEO1D, New thermo-mechanical code, SMRI Spring 1997 Meeting, Cracow, Poland, May 11-14.

9. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe A	PRINCIPAUX ARTICLES REGLEMENTAIRES RELATIFS A L'ABANDON DES STOCKAGES SOUTERRAINS	7 A4
Annexe B	DETAILS DE L'APPROCHE UTILISEE POUR DETERMINER L'EVOLUTION A LONG TERME D'UNE CAVITE ABANDONNEE DANS LE SEL	75 A4
Annexe C	ARBRE DE SCENARIOS DE RISQUES POUR UN STOCKAGE EN CAVITES LESSIVEES ABANDONNE SELON LA METHODE CLASSIQUEMENT UTILISEE	2 A4+1.A3
Annexe D (rédigée par P. Bérest & B. Brouard)	ESSAIS D'ABANDON CONDUITS EN APPUI DE LA MODELISATION DE L'EVOLUTION A LONG TERME DES CAVERNES FERMEES	18 A4

ANNEXE A

**PRINCIPAUX ARTICLES 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 MINIERES 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'envoyage 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.

ANNEXE B

DETAILS DE L'APPROCHE UTILISEE POUR ETUDIER L'EVOLUTION A LONG TERME D'UNE CAVITE ABANDONNEE DANS LE SEL

B-1. HYPOTHESES DE MODELISATION

B-1-1. Hypothèses de base

- la cavité est assimilée à une sphère (de rayon R_c) ou un cylindre (de rayon R_c et de hauteur H_c) dont le centre est situé à une profondeur h (voir Figure B1) ;
- la cavité est totalement remplie de saumure. Toutefois, l'effet de la présence de gaz piégé dans la cavité et le puits sera étudiée par l'intermédiaire d'une augmentation de la compressibilité du fluide ;
- elle est entourée d'un massif de sel supposé homogène et isotrope. Le comportement du sel est supposé décrit par la loi de Norton-Hoff (largement admise à travers le monde) qui, pour une structure souterraine du type cavité, relie la vitesse de déformation du sel à la pression de saumure dans la cavité selon les relations présentées plus loin dans le § B-3-1a. Ces relations font intervenir les 3 paramètres suivants : exposant de contrainte déviatorique n [sans unité], le ratio énergie d'activation sur la constante de Boltzmann Q/R [K] et la vitesse de référence A [année⁻¹] ;
- l'évolution de la cavité au cours du temps est décrite par les variables globales suivantes :
 - T_S : température moyenne de la saumure dans la cavité,
 - P_S : pression moyenne de la saumure dans la cavité,
 - V : volume de la cavité ;
- les propriétés thermo-hydro-mécaniques du sel et de la saumure sont supposées constantes spatialement et au cours du temps, pour une modalité de simulation donnée. Ces propriétés sont données dans le Tableau B1. En revanche, plusieurs modalités de simulation seront réalisées afin d'étudier la sensibilité des résultats à certains de ces paramètres ;
- on s'intéresse à l'évolution à moyen et long terme de la cavité (typiquement quelques siècles à quelques dizaines de siècles) et on néglige la grande déformation de la cavité à très long terme. Cette hypothèse facilite la réalisation des calculs en petites déformations (Hypothèse de Petites Perturbations HPP dite déformation linéarisée : la variation du volume de la cavité se réfère à la configuration initiale et non à la configuration réactualisée après grande déformation). Cette hypothèse, qui revient à négliger les termes quadratiques dans l'expression de la grande déformation, reste valable typiquement jusqu'à 10% de déformation (erreur de négliger le terme quadratique est de 1%) mais n'est plus justifiée pour des cavités très déformées.

On suppose, par ailleurs :

- que l'état de contraintes initial dans le massif de sel est isotrope et sous pression lithostatique. Cette pression P_R , supposée constante au cours du temps, est donnée par :

(B1)

où $g=9,8 \text{ m}^2/\text{s}$ est l'accélération de la pesanteur.

- une variation de la température T_R du sel en fonction de la profondeur h selon un gradient thermique de 3°C par 100 m^{22} :

(B2)

	Sel	Saumure
Masse volumique	$\rho_R=2200 \text{ kg/m}^3$	$\rho_S=1200 \text{ kg/m}^3$
Facteur de compressibilité	$\beta_R=1.3 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ ⁽²³⁾	$\beta_S=2.7 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$
Paramètres de fluage (voir détails au § B-3-1)	$n=3, \mathbf{5}, 6$ [-]	-
	$Q/R=5000, \mathbf{7000}, 9000$ [K]	-
	$A= 1, \mathbf{1000}, 100000$ [année ⁻¹]	-
Perméabilité intrinsèque	$K=10^{-17}, 10^{-18}, \mathbf{10^{-19}}, 10^{-20}, 10^{-21} \text{ m}^2$	-
Viscosité dynamique	-	$\mu_S=1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$
Conductivité thermique	$\lambda_R=5-6 \text{ W/m/K}$	$\lambda_S=0,8-0,9 \text{ W/m/K}$
Chaleur massique	$C_R= 800-900 \text{ J/kg/K}$	$C_S=3.5-4 \text{ kJ/kg/K}$
Coefficient de dilatation thermique	-	$\alpha_S=4,4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

Les paramètres pour lesquelles plusieurs valeurs sont fournies sont ceux qui ont fait l'objet d'une étude de sensibilité (**en gras**, la valeur de référence).

Tableau B1 : Propriétés thermo-hydro-mécaniques du sel et de la saumure²⁴

B-1-2. Conditions initiales

Les valeurs initiales des 3 variables temporelles du modèle sont les suivantes :

- $T_S^{(t=0)}$: dans la plupart des cas elle sera prise égale à 12°C . L'impact de la valeur de la température initiale sera étudié au § 0 ;

²² Cette valeur moyenne globale est surestimée dans le sel, matériau dont la conductivité thermique ($\sim 5-6 \text{ W/m/K}$) est environ 3 fois supérieure à la moyenne des roches. Le gradient géothermique dans le sel est donc en principe inférieur à la valeur moyenne, sauf dans les bassins sédimentaires soumis à un fort flux géothermique, par exemple en Alsace.

²³ Il s'agit ici du facteur de compressibilité de la cavité remplie d'air et non du facteur de compressibilité intrinsèque du sel. On définit également le facteur de compressibilité de la cavité remplie de saumure : $\beta = \beta_R + \beta_S = 4 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$.

²⁴ Les valeurs précises des paramètres utilisés pour les simulations sont : $\rho_R=2164 \text{ kg/m}^3$, $\lambda_R=5,86 \text{ W/m/K}$, $C_R=879 \text{ J/kg/K}$, $\rho_S=1198 \text{ kg/m}^3$, $\lambda_S=0,84 \text{ W/m/K}$, $C_S=3766 \text{ J/kg/K}$, $\alpha_S=4,4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

- $P_S^{(t=0)}$: dans la plupart des cas, elle sera prise égale à la pression halmostatique (pression exercée par une colonne de saumure remontant jusqu'à la surface). Son expression est donnée par :

$$(B3)$$

L'impact de la valeur de la pression initiale sera étudié au § 0.

- $V^{(t=0)}$: trois valeurs seront considérées au cours de cette étude : 15 000 m³, 150 000 m³ et 500 000 m³.

B-1-3. Etudes de sensibilité

Afin de mettre en évidence l'impact des différents paramètres sur le comportement à long terme de la cavité, certains d'entre eux feront l'objet d'une étude de sensibilité. Les bornes de variation ont été déterminées de sorte à couvrir, autant que faire se peut, les disparités rencontrées d'un site à l'autre :

- h (profondeur moyenne de la cavité) : 300 m, 1000 m et 1500 m ;
- $V^{(t=0)}$ (volume initial de la cavité) : 15 000, 150 000 et 500 000 m³ ;
- n, Q/R, A (paramètres de fluage du sel) : voir détail au § B-3 et dans le Tableau B1 ;
- K (perméabilité du massif de sel) : 10^{-17} à 10^{-21} m² - voir détail au § B-4 et dans le Tableau B1 ;
- $P_S^{(t=0)}$ (pression initiale de la saumure) : voir détail au § 0 ;
- $T_S^{(t=0)}$ (température initiale de la saumure) : voir détail au § 0 ;
- β (facteur de compressibilité de la cavité remplie de saumure) : voir détail au § 0 .

B-2. EFFET DU RECHAUFFEMENT DE LA SAUMURE

B-2-1. Equations descriptives retenues dans le modèle et méthode de résolution

L'évolution de la température de la saumure au sein d'une cavité abandonnée résulte, d'une part, de la **conduction thermique** de la chaleur du massif vers la cavité et d'autre part, du brassage de la saumure au sein de la cavité par **thermoconvection**.

Une estimation du nombre de Rayleigh²⁵ montre que les transferts de chaleur dans la cavité se font essentiellement par convection (surtout dans le cas des grandes cavités). Les données expérimentales sont également très convaincantes sur ce point²⁶.

Dans le cadre de ce travail, nous avons fait le choix (pour ne pas trop compliquer la modélisation) de ne pas prendre en compte explicitement la convection mais d'encadrer son impact en réalisant à la fois des calculs purement conductifs (où les effets convectifs sont négligés) et des calculs supposant une conductivité infinie²⁷ de la saumure, ce qui revient à considérer une parfaite homogénéisation de la température dans la cavité par convection.

On se ramène donc dans tous les cas à un calcul conductif. Dans ce cas, la température en tout point du milieu (sel ou saumure) est régie par l'équation de la chaleur, qui s'écrit en coordonnées polaires :

²⁵ Afin d'évaluer l'importance des phénomènes convectifs, nous avons calculé le nombre de Prandtl P_r (rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement et la diffusivité thermique), le nombre de Grashof G_r (rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses) et le nombre de Rayleigh R_a (il caractérise le transfert de chaleur au sein d'un fluide : inférieur à une valeur critique de 2000, le transfert s'opère essentiellement par conduction, tandis qu'au-delà de cette valeur c'est la convection libre ou naturelle qui devient importante). Ils s'expriment comme suit :

- $P_r = (C_s \cdot \mu_s) / \lambda_s = 3700 \text{ [J/kg/K]} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s} / 0,9 \text{ [W/m/K]} = 5$
- $G_r = g \cdot \alpha_s \cdot (T_i - T_\infty) \cdot L_c^3 \cdot \rho_s / \mu_s = 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]} \cdot 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ [K}^{-1}\text{]} \cdot 25 \text{ [K]} \cdot (100 \text{ [m]})^3 \cdot (1200 \text{ kg/m}^3)^2 / (1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s})^2 = 10^{17}$
- $R_a = G_r \cdot P_r = 5 \cdot 10^{17} \gg 2000$

Les transferts thermiques se font donc bien essentiellement par convection thermique.

²⁶ La figure D6 de l'annexe D le montre clairement. En l'absence de convection, le gradient vertical dans la saumure devrait être plus grand que le gradient géothermique naturel, car la conductivité de la saumure est plus faible que celle du sel. C'est le contraire qu'on observe. Il faut noter que la cavité est petite, ce qui n'est pas favorable au développement d'une convection intense. Pourtant le gradient vertical dans la saumure est clairement très petit en comparaison du gradient géothermique.

²⁷ J.P. Holman [2010] propose une évaluation de la valeur de la conductivité « équivalente » aux transferts thermiques par conduction et convection libre (pour $R_a > 10^8$) :

$$\lambda_e = \lambda_s c (R_a)^{1/3} \text{ avec } c=0.057$$

L'application numérique ($\lambda_s = 0,85 \text{ W/m/K}$) donne $\lambda_e = 38400 \text{ W/m/K}$.

Des calculs d'évolution de la cavité réalisés avec cette valeur de conductivité ont montré que les résultats étaient très proches de ceux obtenus avec une conductivité infinie. On peut donc considérer que les résultats de calculs obtenus dans l'hypothèse de conductivité infinie sont les plus réalistes.

(B4)

où :

- T est la température [K] ;
- λ est la conductivité thermique du milieu [W/m/K] (en considérant 2 valeurs extrêmes de conductivité pour la saumure : $\lambda_S = 0,84$ W/m/K (conductivité thermique de la saumure) et $\lambda_S = \infty$: cas extrême visant la convection) ;
- ρ est la masse volumique du milieu [kg/m³] ;
- C est la chaleur spécifique massique du milieu [J/kg/K].

On peut ré-écrire l'équation (B4) de manière adimensionnelle en introduisant les variables suivantes : ξ et τ , où ξ est une grandeur caractéristique de la dimension du corps étudié (on peut prendre ici le rayon R_c de la cavité) et τ est un temps adimensionnel :

$$\text{---} (\xi, \tau) = \text{---} (\xi, \tau) \quad (\text{B5})$$

Afin de déterminer l'évolution de la température moyenne $T_s(t)$ de la saumure dans la cavité, nous nous sommes appuyés sur un modèle 2D axisymétrique que nous avons réalisé à l'aide du code de calcul COMSOL²⁸. Deux géométries de cavité, sphérique et cylindrique, ont été considérées (voir Figure B1). L'équation de la chaleur (B4) est résolue tout d'abord en tout point de la cavité. La température moyenne $T_s(t)$ dans la cavité est ensuite calculée à partir de la distribution des températures $T(t,r,\theta)$ précédemment calculée en tout point de la cavité.

²⁸ Le logiciel COMSOL est dédié à la simulation en 1D, 2D ou 3D de tout phénomène physique à base d'équations aux dérivées partielles (www.comsol.com). COMSOL est conçu pour résoudre des problématiques multiphysiques : l'utilisateur sélectionne les équations nécessaires à la description de son application (en modifiant à son gré les termes des équations retenues), puis choisit de résoudre simultanément (couplage fort) ou l'un après l'autre (couplage faible) les différents processus. La résolution des équations se fait en régime stationnaire ou transitoire par la méthode des éléments finis. Le choix du solveur et du préconditionneur et des paramètres de convergence se fait en fonction du type de problèmes (linéaire / non linéaire ; statique / dynamique).

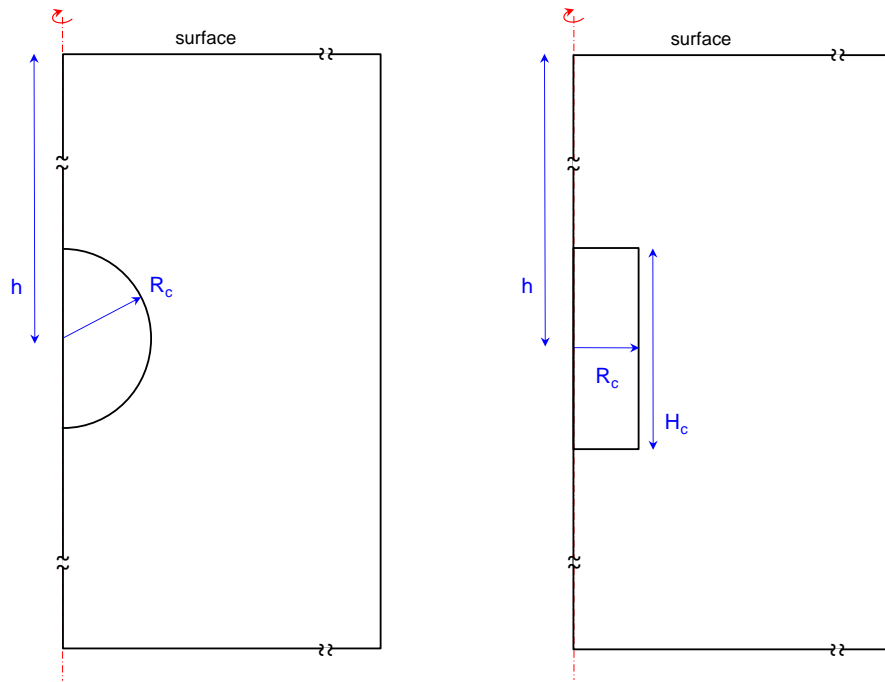


Figure B1 : Modèles sphérique et cylindrique réalisés pour déterminer l'évolution de la température moyenne T_s de la saumure dans la cavité

L'augmentation de température de la saumure va générer un phénomène de dilatation thermique qui va se traduire, selon que la cavité est ouverte ou fermée, par un débit de saumure Q sortant du puits (dans le premier cas) ou par une augmentation de la pression P_s dans la cavité (dans le deuxième cas). Ceux-ci sont donnés par les expressions suivantes [Bérest et al., 1997] :

Cas d'une cavité ouverte :

(B6)

Cas d'une cavité fermée :

(B7)

soit²⁹ :

(B8)

²⁹ Dans ce cas, l'intégration de l'équation (B7) est simple (équation B8). Toutefois, d'autres équations différentielles, présentées plus loin dans cette annexe, sont plus complexes et ne peuvent pas être résolues de manière explicite. Dans cette étude, l'ensemble des équations différentielles ont été résolues à l'aide un module fourni dans COMSOL et qui permet de résoudre des équations générales du type :

— — (B9)

où :

- α est le coefficient de dilatation thermique de la saumure
- $V^{(t=0)}$ est le volume initial de la cavité³⁰
- T_s est la température moyenne de la saumure dans la cavité
- β est le facteur de compressibilité de la cavité remplie de saumure. Celui-ci est la somme du facteur de compressibilité de la saumure β_s et du facteur de compressibilité de la cavité β_R .

Des valeurs typiques proposées par Boucly [1982] sont : $\beta_s = 2.7 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, $\beta_R = 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, et par suite $\beta = 4 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$. Le facteur de compressibilité peut être plus important si la cavité contient une certaine quantité de gaz. En pratique, il peut s'agir soit de gaz piégé qui n'a pas pu être récupéré lors de la vidange de la cavité, soit de gaz volontairement injecté lors de l'abandon afin d'éviter une mise en surpression de la cavité par dilatation thermique de la saumure (voir Annexe B, § 0).

B-2-2. Simulations élémentaires illustrant le phénomène

B-2-2a. Evolution de la température de la saumure

On représente sur la Figure B2a, dans le cas d'une cavité sphérique, l'évolution modélisée de la température de la saumure T_s au cours du temps, pour différentes profondeurs et dimensions de la cavité. La température initiale de la saumure, $T_s^{(t=0)}$, est considérée ici égale à 12°C et la convection n'est pas prise en compte. La Figure B4 présente le même équivalent dans l'hypothèse d'une parfaite convection (conductivité infinie de la saumure).

On constate que le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique varie selon le volume de la cavité et l'écart de température initial entre la saumure et le massif. Plus le volume de la cavité est important et l'écart de température initial élevé (il augmente avec h), plus la saumure met logiquement du temps à atteindre l'équilibre thermique avec le massif de sel.

La Figure B3 montre le graphe équivalent à celui de la Figure B2a en fonction du temps adimensionnel . On note que dans ce mode de représentation, l'ensemble des courbes se superposent.

Si l'on définit le temps caractéristique t_c^T de mise à l'équilibre thermique de la cavité comme le temps nécessaire pour que 95% de l'écart initial de température entre la saumure et le massif soit résorbé, on obtient, dans l'hypothèse d'échanges purement conductifs, un temps caractéristique de 15 ans, 75 ans et 170 ans pour une cavité sphérique de 15 000, 150 000 et 500 000 m³, respectivement (voir Figure B2b). Exprimé en temps caractéristique adimensionnel, cela revient à 6,95 (voir Figure B3b). Les temps caractéristiques équivalents obtenus dans l'hypothèse d'échanges purement convectifs sont deux fois plus courts environ (voir Figure 4b et Tableau B2), traduisant le fait que la saumure se réchauffe plus vite dans ce cas.

Dans l'exemple de l'équation (B7), celle-ci peut se reformuler sous cette forme en posant :

et _____

³⁰ Le volume de la cavité est considéré ici comme constant. On verra en effet qu'à l'échelle de temps de la phase de réchauffement de la saumure, la variation de volume de la cavité peut être considérée comme négligeable.

	Modèle conductif pur ($\lambda_s = 0.84 \text{ W/m/K}$)			Modèle convectif pur ($\lambda_s = \text{infini}$)		
	15000	150000	500000	15000	150000	500000
Volume de la cavité (m^3)	15000	150000	500000	15000	150000	500000
Temps t_c^T d'atteinte de l'équilibre de température (années)	15	75	170	6	30	70
Temps t_c^P d'atteinte de l'équilibre de pression ³¹ (en puits fermé) (années)	24	110	245	12	60	130
Débit maximum Q_{max} de saumure expulsée en tête de puits (en puits ouvert) pour une cavité située à 1500m de profondeur (m^3/j)	1,4	3,4	5,4	6,4	15,1	24,7

Tableau B2 : Impact du modèle de transfert thermique (conductif ou convectif) sur les caractéristiques d'évolution d'une cavité

La forme de la cavité joue également un rôle, comme on peut le constater sur la Figure B5, où nous avons représenté les résultats de simulations obtenus pour une cavité cylindrique de $150\,000 \text{ m}^3$ (localisée à une profondeur moyenne $h=1000 \text{ m}$) dont nous avons fait varier le facteur de forme $f=H_c/2R_c$ entre $1/3$ et 10 . Nous constatons que plus la cavité est élancée (soit par ordre croissant : $f=1, 1/3, 5$ et 10), plus l'équilibre thermique est atteint rapidement (soit respectivement : $t_c^T=70$ ans, 56 ans, 43 ans et 30 ans). Ceci s'explique simplement par le fait que la surface d'échange entre la saumure et le massif est plus grande dans le cas d'une cavité allongée que dans le cas d'une cavité de forme isotrope. Ceci a pu être vérifié expérimentalement, en particulier dans le cas de la cavité de Stassfurt décrite en annexe D (§ D-7) de ce rapport.

B-2-2b. Conséquence sur les variations de pression ou de débit

La manière dont va se traduire le réchauffement de la saumure sur l'évolution de la pression P_s en cavité (dans le cas d'une cavité fermée) ou du débit Q de saumure expulsé en tête de puits (dans le cas d'une cavité ouverte) est illustrée sur les Figures B6, B7 et B9 (dans le cas purement conductif) et B8, B11 (dans le cas purement convectif).

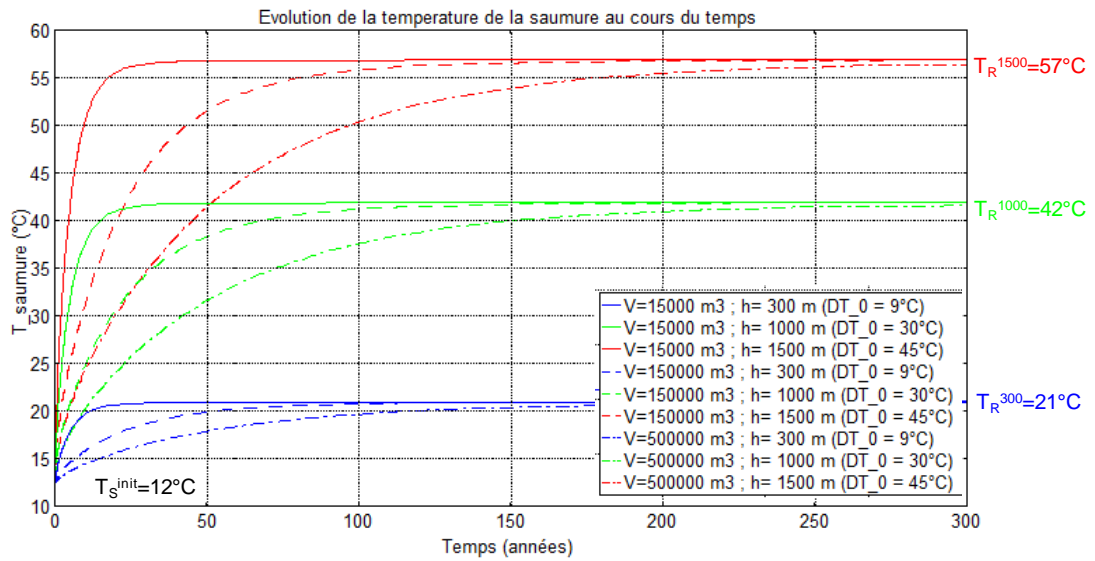
³¹ Le temps caractéristique t_c^P est le temps nécessaire pour que 95% de l'écart initial entre la pression de saumure et la pression d'équilibre soit résorbé.

En ce qui concerne la pression P_s en cavité, l'équation (B8) indique que celle-ci va simplement varier de manière proportionnelle à la température T_s ; on retrouve donc logiquement la même forme d'évolution pour la pression que pour la température (comparer avec les Figures B2, B3 et B5). Quantitativement, compte tenu des valeurs de α et β dans l'équation (B8) (respectivement $4,4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ et $4,0 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, voir Tableau B1) on peut estimer qu'un réchauffement de 1°C de la saumure engendre une augmentation de pression de l'ordre de 1 MPa dans la cavité. Ce gradient de pression lié au réchauffement de la saumure est relativement élevé et peut mener rapidement à ce que la pression en cavité dépasse la pression lithostatique (voir Figures B6a et B9a) et occasionne un risque de fracturation des parois de la cavité si des mesures préventives ne sont pas mises en œuvre au moment de l'abandon (voir § B-7).

Notons que dans le cas théorique présenté ici, où seule la dilatation thermique de la saumure serait à l'œuvre, c'est-à-dire où il n'y aurait ni fluage du sel, ni perméation de la saumure à travers le massif (cavité rigide et parfaitement étanche), la pression finale P_{inf} atteinte à l'équilibre thermique n'est pas réaliste. En effet, on constate par exemple sur les Figures B6a, B7a, B8a, et B9a que cette pression est située au dessus de la pression lithostatique P_R , ce qui n'est évidemment pas le cas dans la réalité. En effet, la perméation, même faible, de la saumure à travers le massif de sel, permet à la pression d'équilibre P_{inf} d'être toujours inférieure ou égale à la pression lithostatique, comme nous le verrons au § B-4. Ces courbes ne sont donc présentées ici que dans un but pédagogique.

En ce qui concerne le débit Q sortant du puits dans le cas d'une cavité ouverte, l'équation (B6) indique que celui-ci va être proportionnel au gradient de l'évolution de la température. Plus la saumure approche de sa température d'équilibre, plus ce débit va diminuer (voir Figures B10 à B12). Quantitativement, celui-ci varie en fonction du volume de la cavité et de l'écart de température initial entre la saumure et le sel (qui varie avec h) mais globalement, il est de l'ordre de $1\text{-}10\text{m}^3/\text{jour}$ au début du processus de réchauffement, décroît à environ $0,1\text{-}1 \text{ m}^3/\text{jour}$ après 10 ans et n'est plus que de quelques litres/jour après une centaine d'années.

- a -



- b -

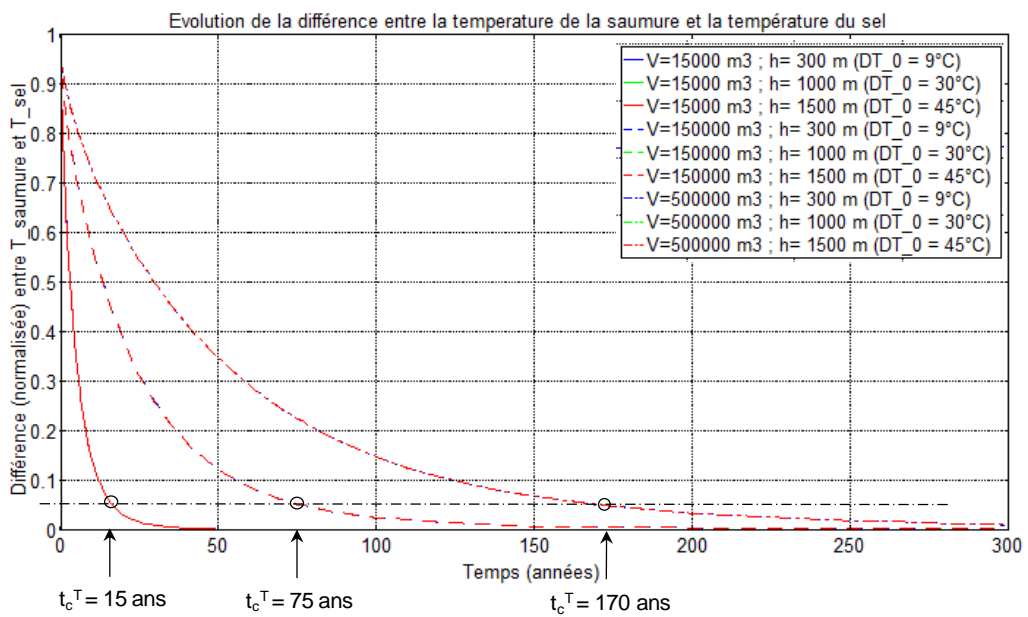
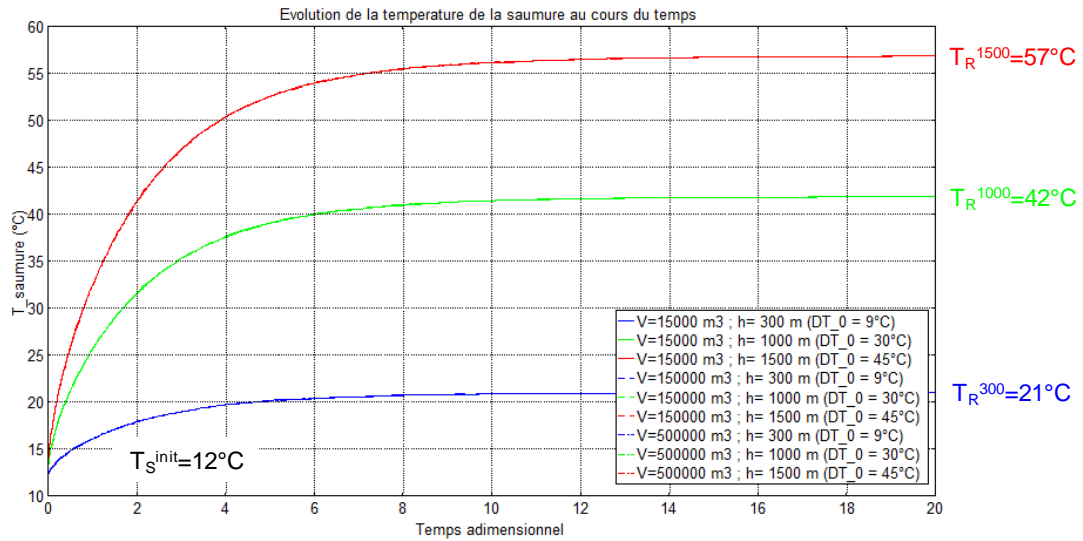


Figure B2 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h (soit de la différence de température initiale ΔT entre la saumure et le sel) sur l'évolution de la température de la saumure T_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique (dilatation thermique seule – convection négligée)

- a -



- b -

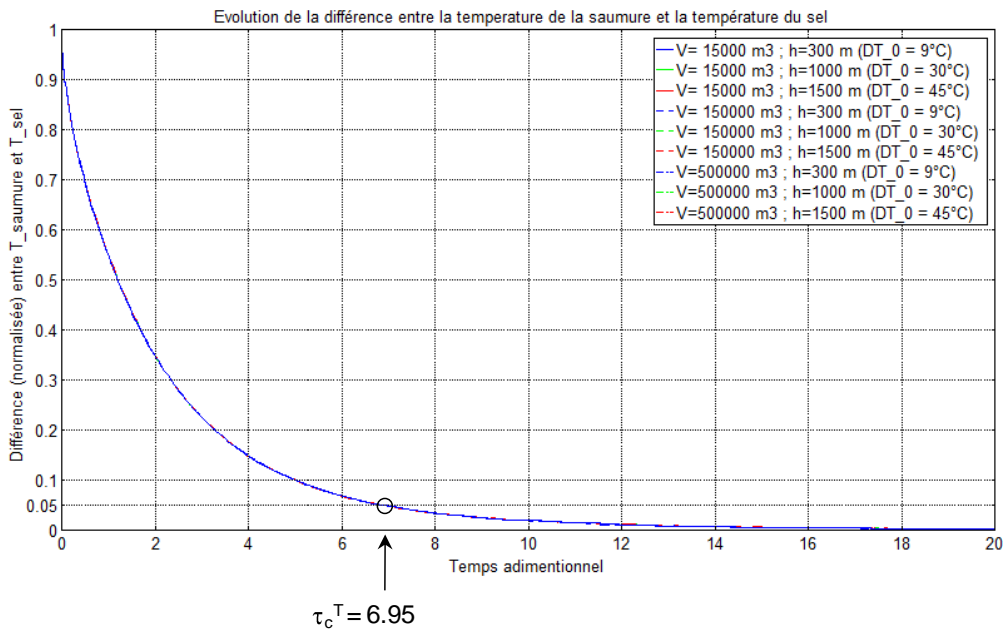
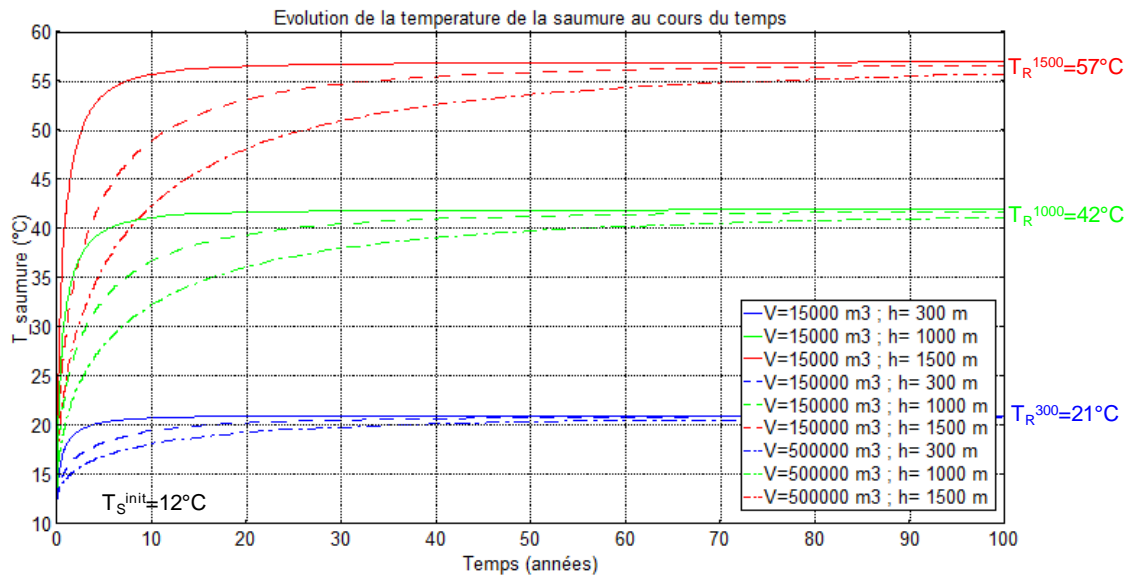


Figure B3 : Impact du volume de la cavité V et de la profondeur h (soit de la différence de température initiale ΔT entre la saumure et le sel) sur l'évolution de la température de la saumure T_s en fonction du temps adimensionnel dans le cas d'une cavité sphérique (dilatation thermique seule – convection négligée)

- a -



- b -

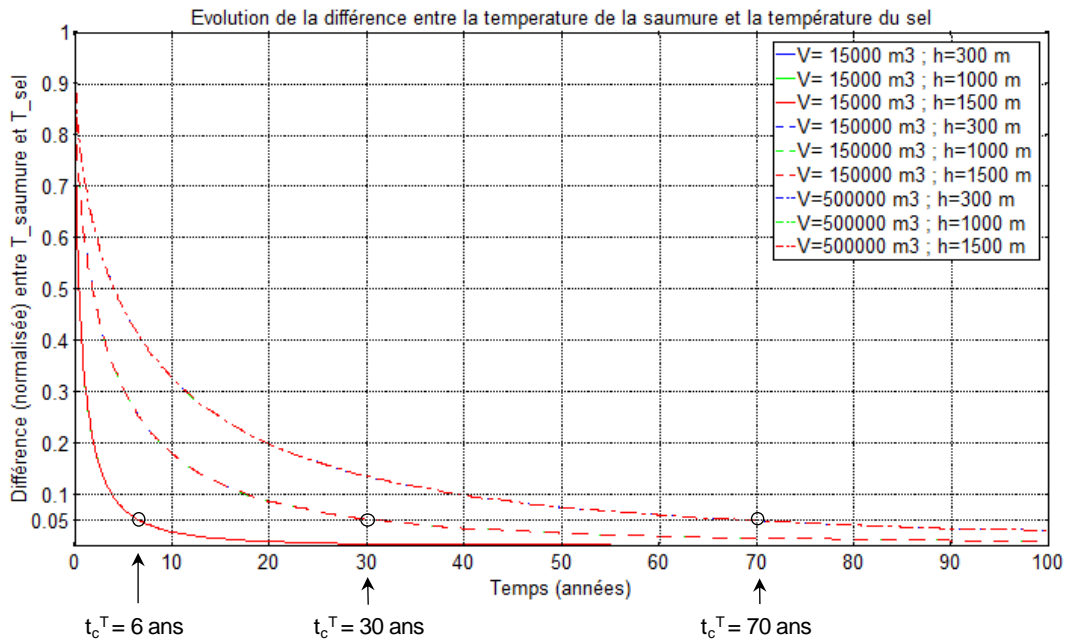


Figure B4 : *Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution de la température de la saumure T_{S} au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique (dilatation thermique seule – convection pris en compte en supposant que la conductivité de la saumure est infinie)*

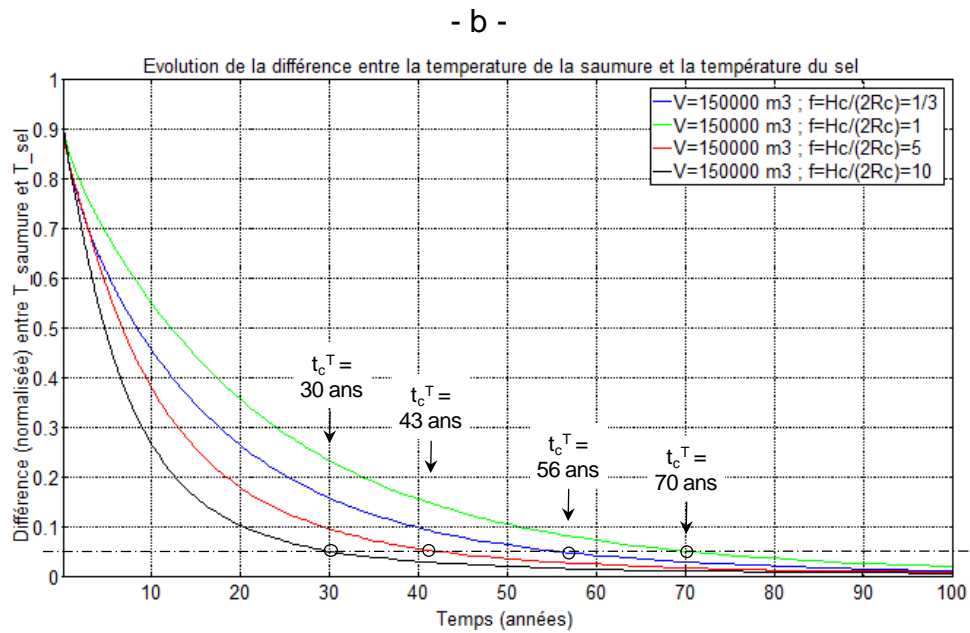
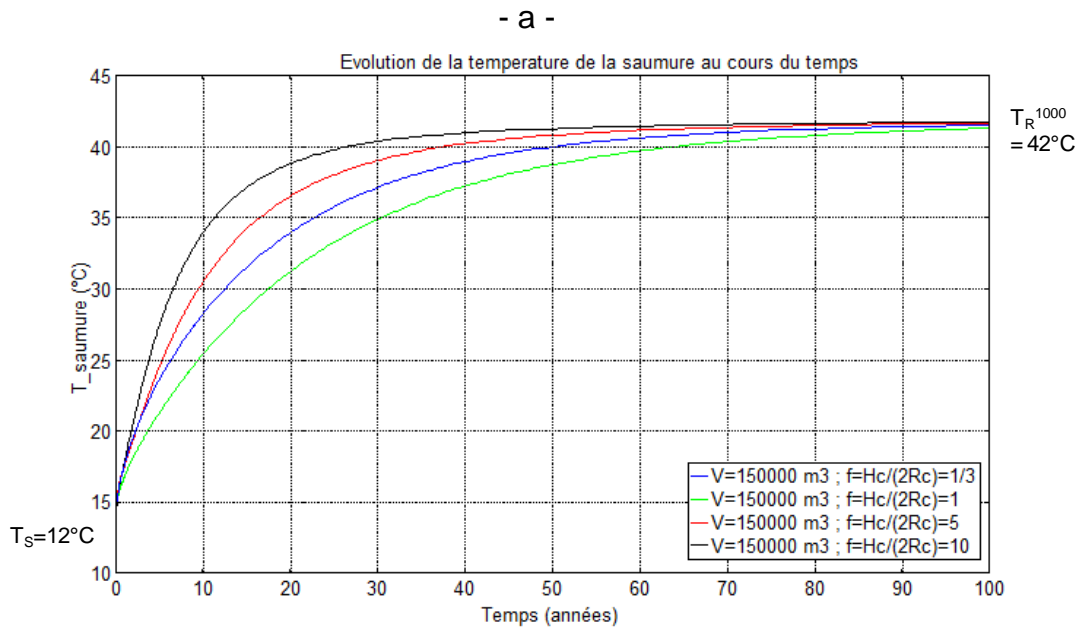
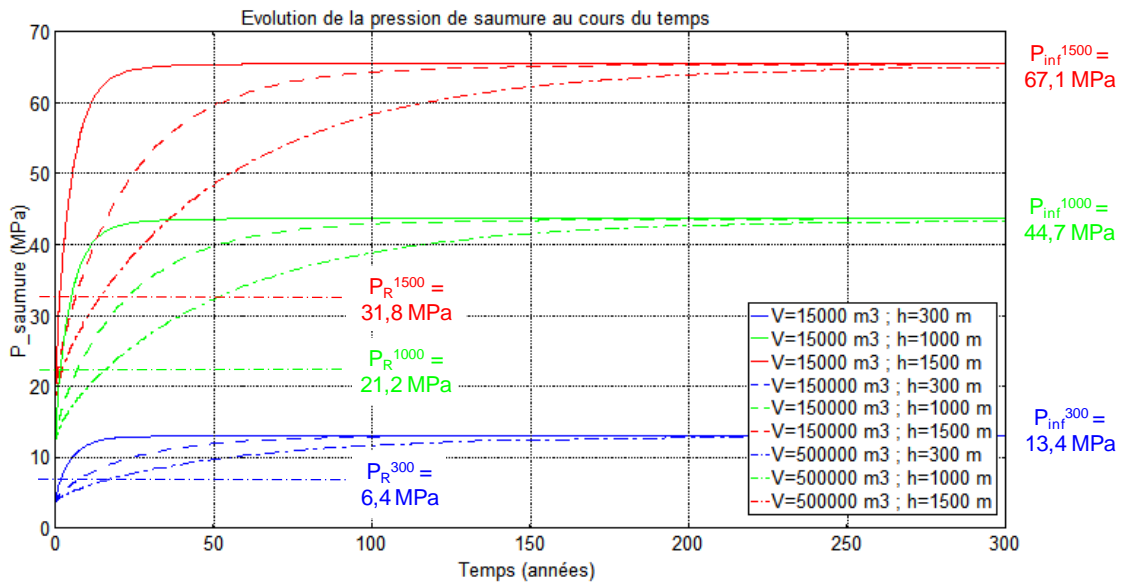


Figure B5 : Impact du ratio F entre la hauteur de la cavité et son diamètre sur l'évolution de la température de la saumure T_s au cours du temps dans le cas d'une cavité cylindrique de volume $V = 150000 \text{ m}^3$ (dilatation thermique seule – convection négligée)

- a -



- b -

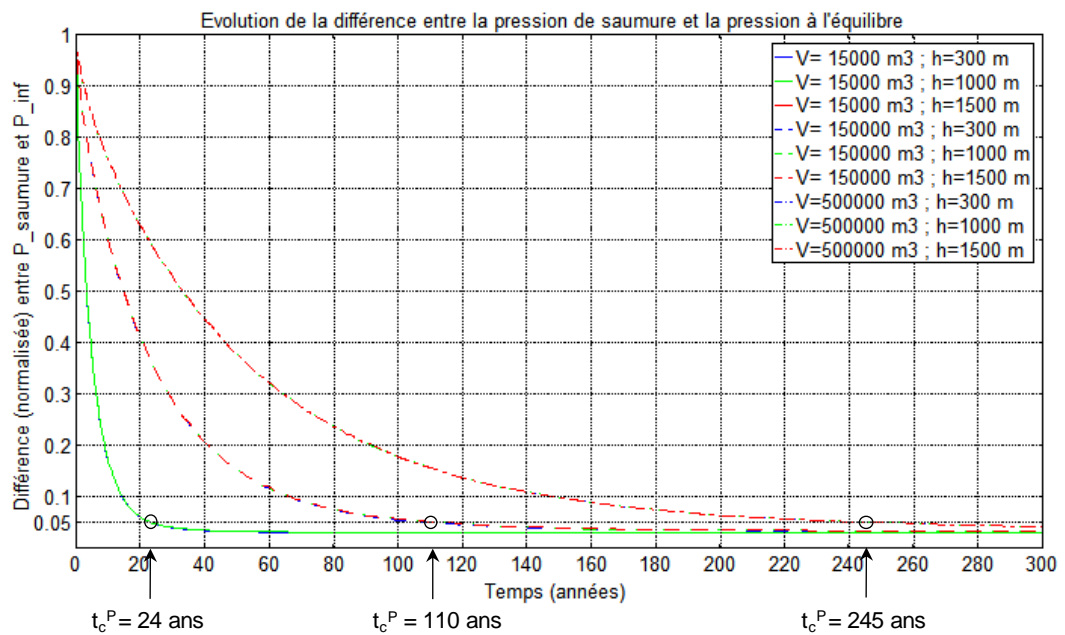
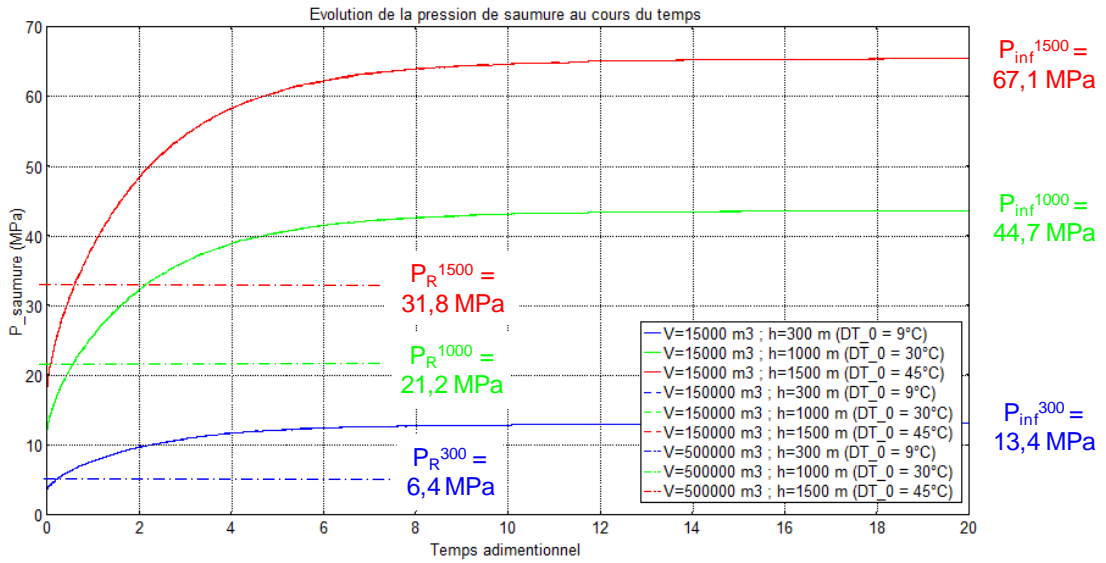


Figure B6 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique (dilatation thermique seule – convection négligée)

- a -



- b -

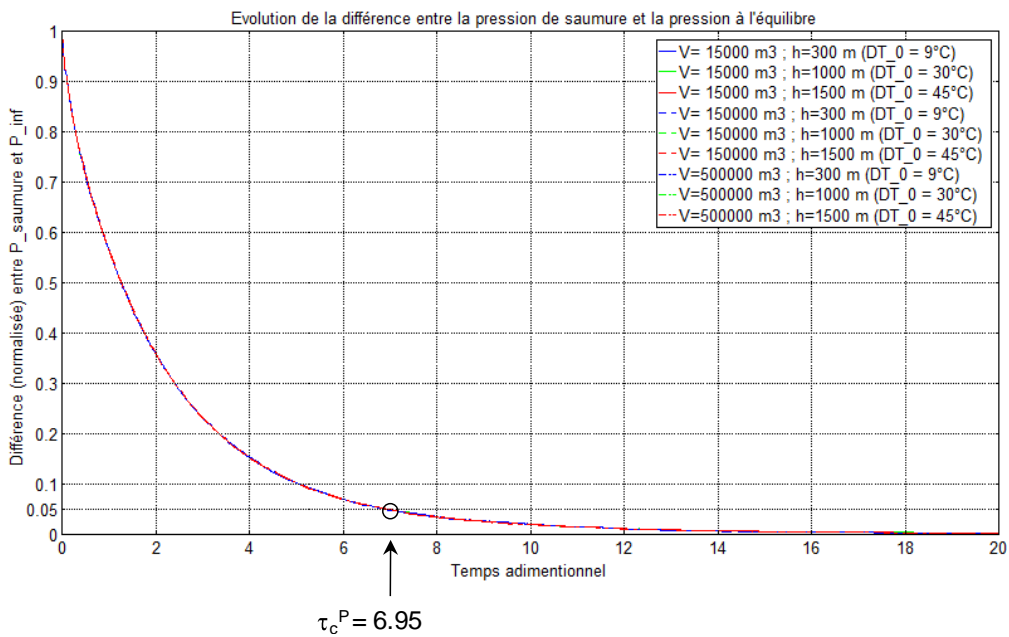
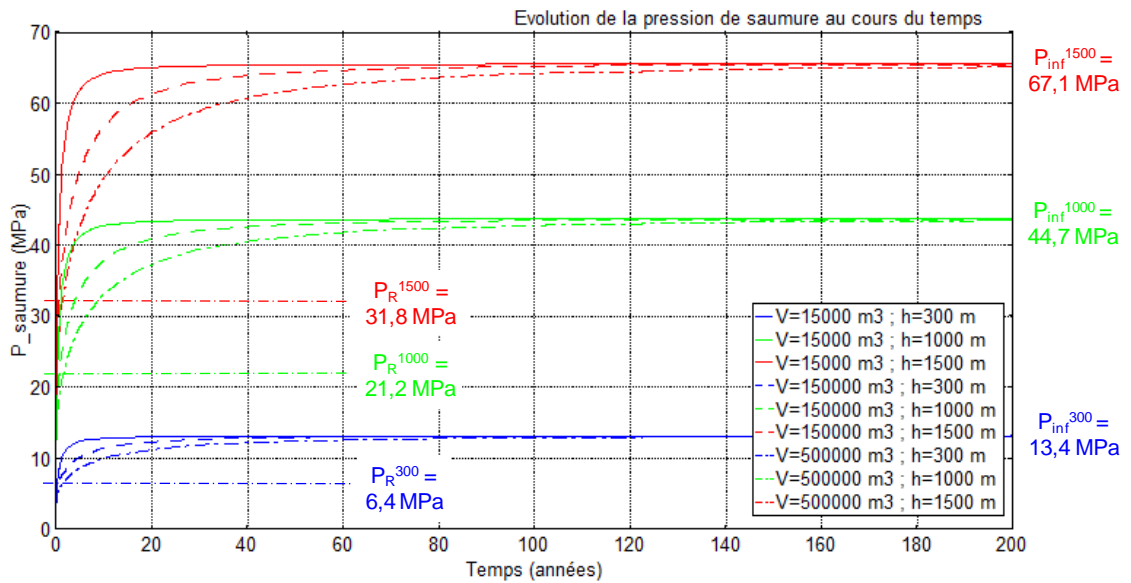


Figure B7 : Impact du volume de la cavité V et de la profondeur h (soit de la différence de température initiale ΔT entre la saumure et le sel) sur l'évolution de la pression de saumure P_s en fonction du temps adimensionnel dans le cas d'une cavité sphérique (dilatation thermique seule – convection négligée)

- a -



- b -

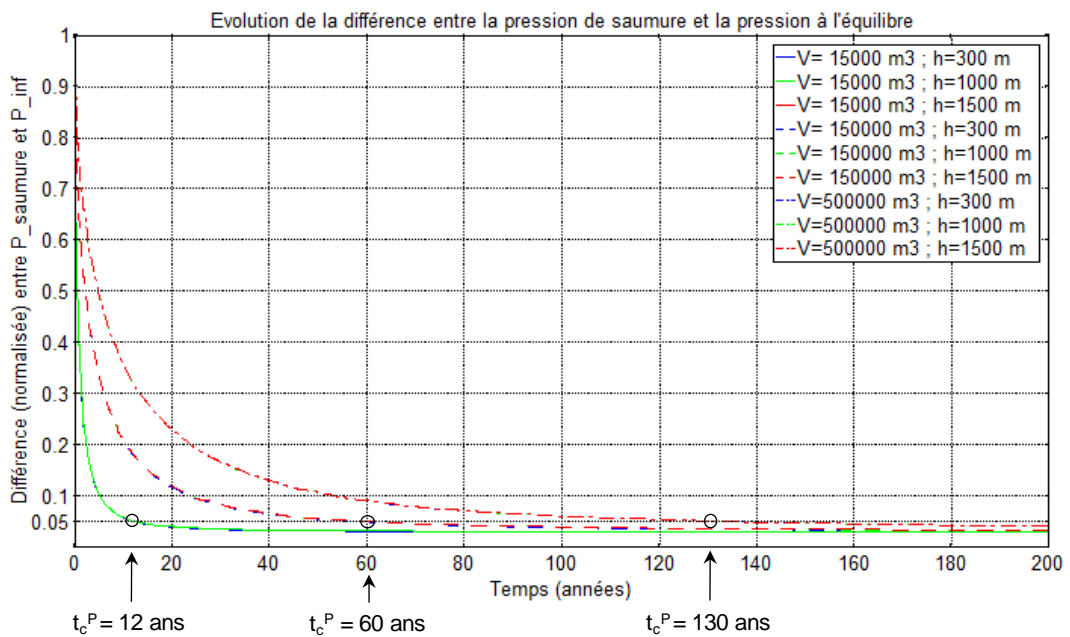
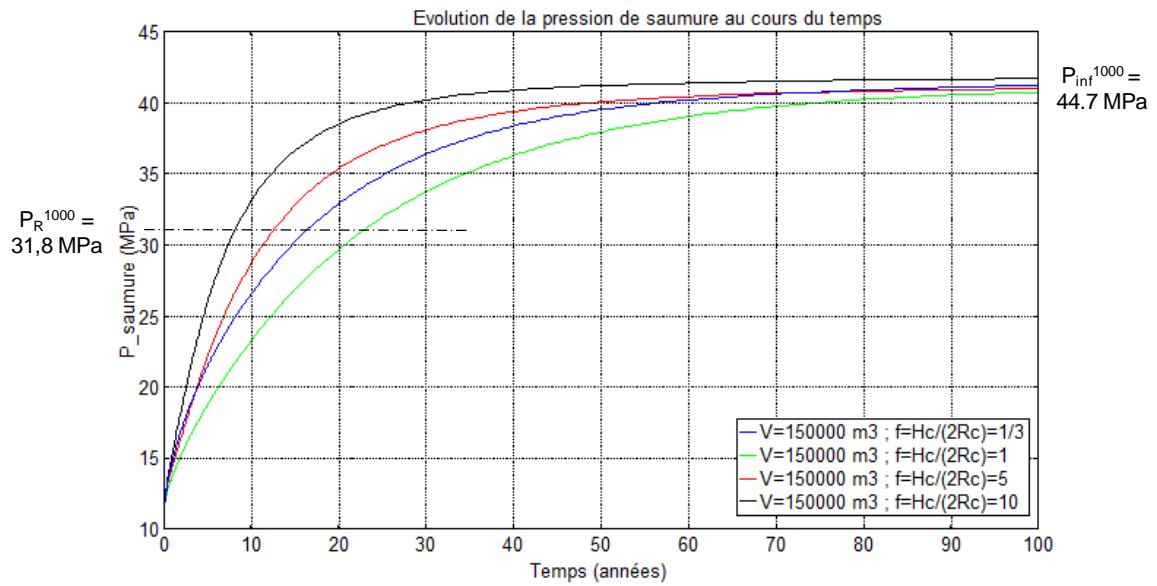


Figure B8 : *Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique (dilatation thermique seule – convection pris en compte en supposant que la conductivité de la saumure est infinie)*

- a -



- b -

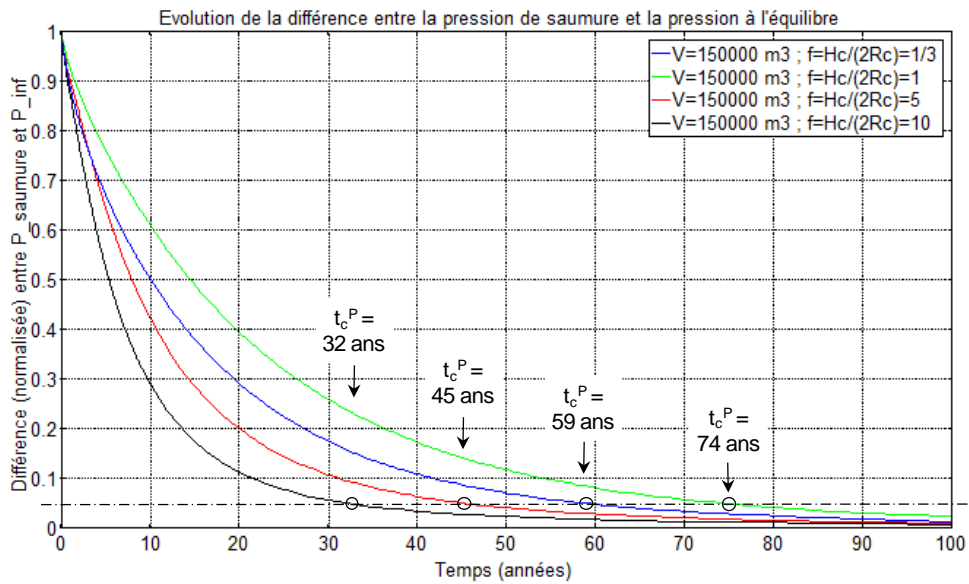


Figure B9 : Impact du ratio f entre la hauteur de la cavité et son diamètre sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité cylindrique de volume $V = 150000 \text{ m}^3$ (dilatation thermique seule – convection négligée)

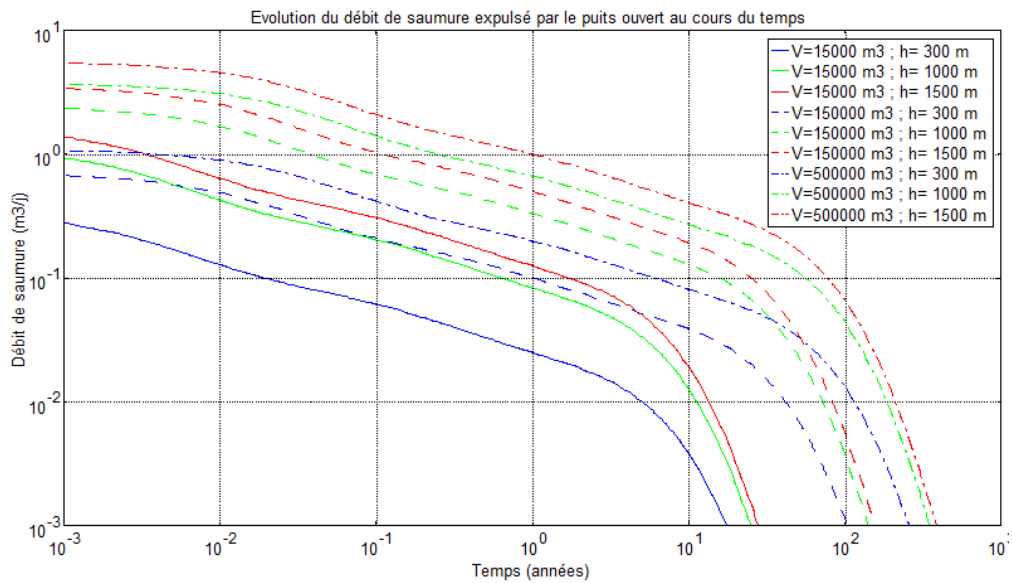


Figure B10 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution du débit de saumure Q sortant du puits au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique (dilatation thermique seule – convection négligée)

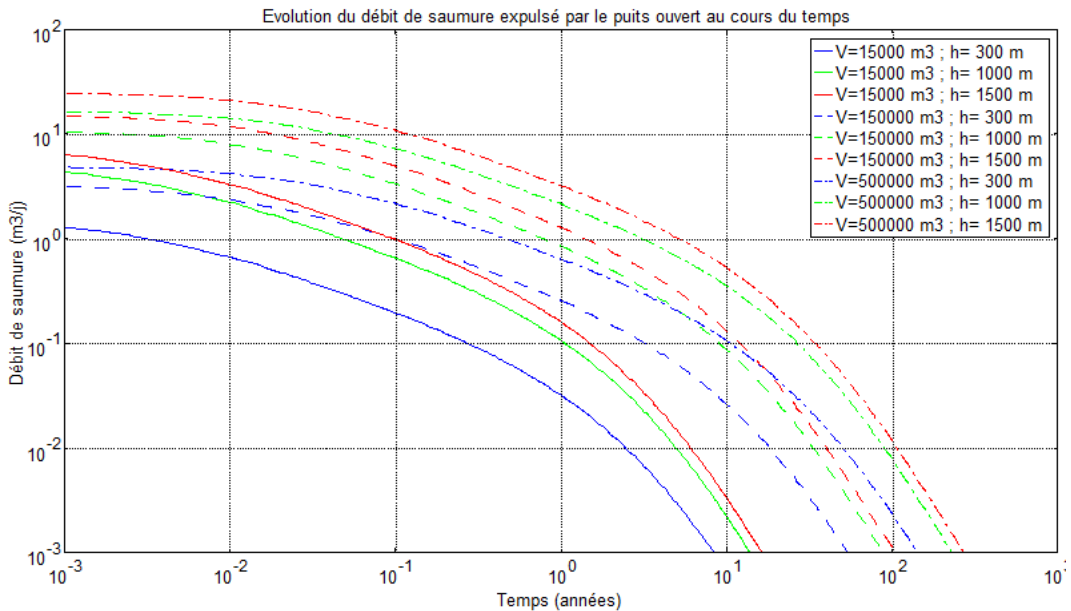


Figure B11 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution du débit de saumure Q sortant du puits au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique (dilatation thermique seule – convection pris en compte en supposant que la conductivité de la saumure est infinie)

Evolution du débit de saumure expulsé par le puits ouvert au cours du temps

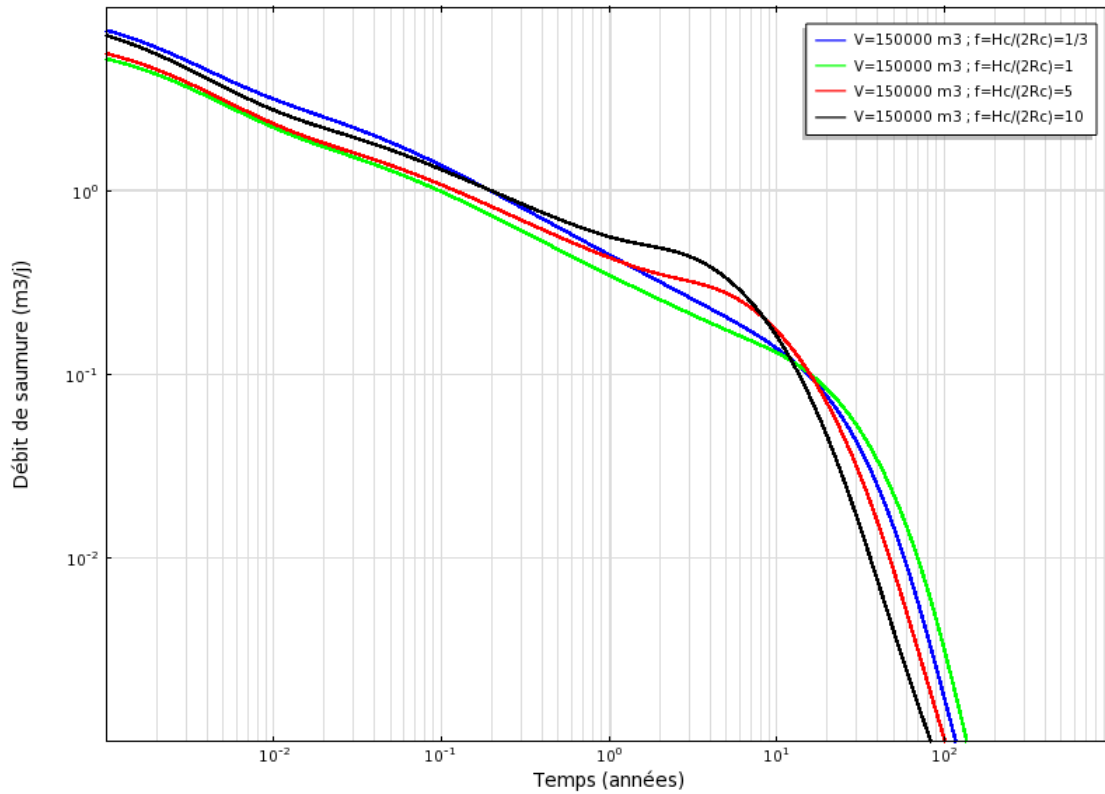


Figure B12 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution du débit de saumure Q sortant du puits au cours du temps dans le cas d'une cavité cylindrique de volume $V = 150000 \text{ m}^3$ (dilatation thermique seule – convection négligée)

B-3. EFFET DU FLUAGE DU SEL

B-3-1. Equations descriptives retenues dans le modèle

B-3-1a. Description du fluage du sel

Le sel est un matériau qui a la particularité de fluer sous très faible contrainte déviatorique. Sa vitesse de déformation :

- est proportionnelle à une puissance (entre 3 et 6) de la contrainte déviatorique appliquée. Dans le cas d'une cavité saline, la contrainte déviatorique est proportionnelle à la différence entre la pression de saumure en cavité et la pression lithostatique ;
- est fortement influencée par la température ; elle s'accroît d'environ 2 ordres de grandeur quand la température augmente de 100°C.

Ces deux effets ont pour conséquence que les cavités situées à grande profondeur tendent à se refermer beaucoup plus rapidement.

Pour rendre compte du comportement du sel, deux modèles de comportement sont couramment utilisés : le modèle de Lemaitre-Menzel-Schreiner et le modèle de Norton-Hoff. Le premier suppose que la vitesse de déformation sous chargement constant décroît indéfiniment au cours du temps, alors que le second admet que cette vitesse tend vers une valeur constante. D'après Berest et al. [2008], l'analyse des micromécanismes à l'origine des déformations penche en faveur de la loi de Norton-Hoff. Toutefois, les essais de laboratoire ne permettent pas de trancher entre les deux hypothèses du fait que les incertitudes deviennent au bout d'un certain temps supérieures aux vitesses mesurées. En revanche, les écarts peuvent devenir qualitativement et quantitativement importants lors de l'utilisation des lois pour des modélisations à grande échelle. L'auteur stipule de retenir celui des modèles qui donne les résultats les plus pessimistes et montre que, dans le cas de l'abandon d'une cavité saline, c'est le modèle de Norton-Hoff (NH) qui doit être retenu.

La formulation uniaxiale du modèle de Norton-Hoff (NH) est la suivante³² :

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sigma^n + \frac{b}{TD^3} \exp\left(-\frac{\bar{Q}}{RT}\right) \sigma \quad (\text{B10})$$

où :

³² Uraï et Spiers [2007] montrent que pour de faibles déviateurs de contraintes (inférieurs à quelques MPa) l'exposant de la loi puissance diminue et devient proche de 1. Ils proposent de modifier l'équation B10 comme suit :

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sigma^n + \frac{b}{TD^3} \exp\left(-\frac{\bar{Q}}{RT}\right) \sigma$$

où D est le diamètre des grains.

Le premier terme du membre de droite est prépondérant aux contraintes élevées, le second aux faibles contraintes. Or précisément dans une cavité fermée (pas trop profonde) les déviateurs de contrainte en régime permanent sont faibles. Donc les vitesses de fermeture pourraient être bien plus rapides que celles obtenues avec la loi puissance qui, surtout quand l'exposant n est élevé, sous-estimerait ces vitesses.

- est la vitesse de déformation axiale d'un échantillon cylindrique soumis à une contrainte initiale et une contrainte de confinement (saumure) , sachant que . Si on exprime σ en MPa, on considère que σ_0 est égale à 1 MPa ;
- T est la température de l'échantillon en Kelvin ;
- les paramètres A [1/année], Q/R [K] et n sont les paramètres de la loi.

Cette loi peut être généralisée en 3D en écrivant :

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{R T}\right) \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0}\right)^n \quad (B11)$$

avec $\dot{\epsilon}$ — — — — — (B12)

où :

- est le tenseur des vitesses de déformation
- est le tenseur des contraintes
- est le tenseur des contraintes déviatoriques, avec
- J_2 est le deuxième invariant du tenseur des contraintes déviatoriques :
—

Dans le cas d'une cavité sphérique, le modèle de Norton-Hoff s'exprime comme suit [Prij, 1991, Berest et al. 1998] :

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{R T}\right) \left(\frac{P_s - P_R}{P_s}\right)^n \quad (B13)$$

où :

- P_R est la pression lithostatique à la profondeur h moyenne de la cavité
- P_s est la pression moyenne de la saumure dans la cavité
- T_R est la température du sel à la profondeur h
- n, Q/R et A sont les 3 paramètres qui définissent la loi de fluage

Dans le cas d'une cavité cylindrique, la loi est modifiée comme suit [Van Sambeek, 1993] :

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{R T}\right) \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0}\right)^n \quad (B14)$$

Ces lois peuvent être reformulées comme suit :

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{R T}\right) \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0}\right)^n \quad (B15)$$

où :

- T_0 est la température à 1000 m de profondeur ;
- est défini par l'expression suivante :

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{R T}\right) \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0}\right)^n \quad (B16)$$

avec $\frac{1}{n}$ pour une cavité sphérique et $\frac{1}{2n}$ pour une cavité cylindrique.

Bérest et Brouard (1998) ont proposé une classification des sels en trois catégories selon la valeur de ϵ_{1000} :

- $\epsilon_{1000} > 10^{-3}$: sel très fluant (« severe creep »),
- $10^{-5} < \epsilon_{1000} < 10^{-3}$: sel standard (« standard salt »),
- $\epsilon_{1000} < 10^{-5}$: sel peu fluant (« low creep »)

Le tableau B3 donne quelques valeurs des paramètres de fluage issues de la bibliographie. On note une très forte variabilité de ces paramètres : n variant de 3,1 à 6,25 [sans unité] ; Q/R de 4100 à 10766 [K] ; A de 0,64 à 277520 [année⁻¹]. On verra plus loin (Figure B16), comment ces 3 paramètres impactent le comportement à long terme de la cavité.

n°	Provenance du sel	n [-]	Q/R [K]	A [année ⁻¹]	ϵ_{1000} [année ⁻¹]
1	Avery Island	3,14	6495	13000	2,94E-03
2	WIPP	5	5035	1,04	4,33E-05
3	Salado	5,09	8333	36700	4,38E-05
4	Asse	6,25	9969	25100	1,61E-07
5	West Hackberry WH1	4,73	6606	452,31	1,24E-04
6	West Hackberry WH2	4,99	10766	0,94	4,91E-13
7	Bryan Mound BM3C	4,54	7623	1320	1,39E-05
8	Bryan Mound BM4C	5,18	8977	104000	1,62E-05
9	Bayou Choctaw BC1	4,06	5956	64,03	1,19E-04
10	Etrez	3,1	4100	0,64	2,83E-04
11	Avery Island (S, et al)	4	6565	2081	5,49E-04
12	Salina	4,1	8715	277520	8,19E-05
13	Palo Duro – Unit 4	5,6	9760	180600	2,36E-06
14	Palo Duro – Unit 5	5,3	9810	252000	2,80E-06
16	Carresse-Cassaber set 1	2,5	4100	2,5	7,36E-04
17	Carresse-Cassaber set 2	5	4100	7,8	6,33E-03
18	Carresse-Cassaber set 3	3	4100	10,61	4,43E-03
19	MDPA	4	4700	1,8	1,77E-04
20	Bresse	3,4	4800	15,7	8,83E-04

Tableau B3 : Paramètres de fluage pour différents types de sel (d'après [Berest et Brouard, 1998], Héas [2004] et Ghoreychi [1992]). Les couleurs rouge, jaune et verte indiquent respectivement les sels très fluants, standards et peu fluants (au sens de la classification de Bérest et Brouard, 1998)

B-3-1b. Effet du fluage sur la pression de la saumure

Ce phénomène de fluage va avoir pour conséquence une convergence des parois de la cavité qui, dès lors que la cavité est fermée, va se traduire par une augmentation de la pression de saumure.

Si l'on considère uniquement ce phénomène, sans prendre en compte le réchauffement de la saumure ou la perméation de la saumure à travers le massif de sel, on peut établir que la pression P_s en cavité est gouvernée par l'équation suivante :

$$\text{---} \quad (B17)$$

avec :

$$\text{---} \quad (B18)$$

où :

- — pour une cavité sphérique
- — pour une cavité cylindrique

L'équation (B17) peut-être résolue explicitement par intégration. On obtient :

$$\text{---} \quad (B19)$$

B-3-2. Simulations élémentaires illustrant le phénomène

On représente sur la Figure B13, l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150\,000\text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000\text{ m}$ et qui serait soumise uniquement au phénomène de fluage, décrit par l'équation (B17). Les paramètres de fluage utilisés ici ($n=5$; $Q/R=7000\text{ K}$; $A=1000\text{ année}^{-1}$, soit $\text{---}=8,1\,10^{-5}$) peuvent être considérés comme représentatifs d'un sel « standard », au sens de la classification de Bérest et Brouard (1998).

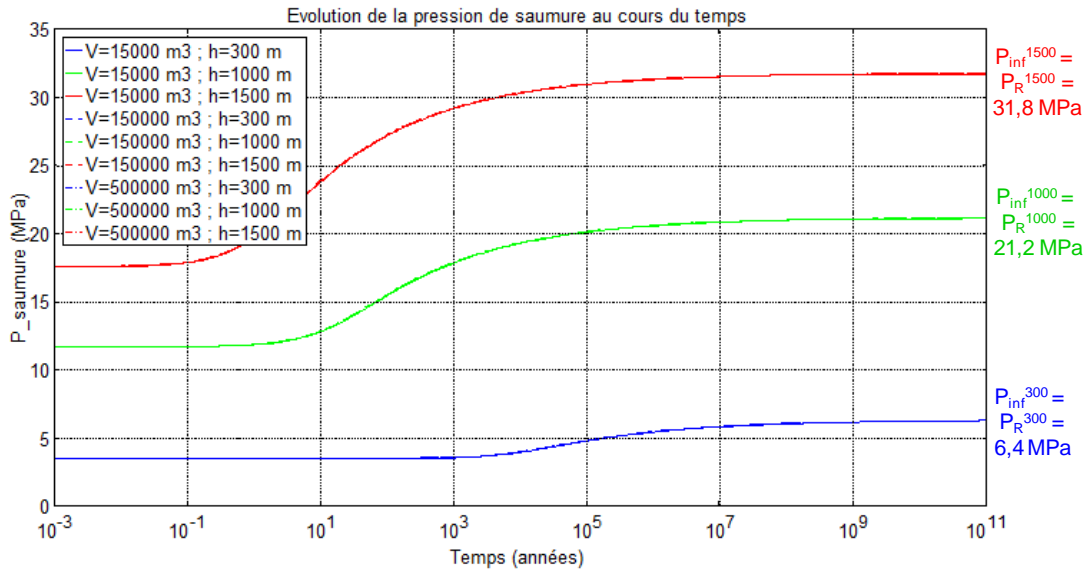
Nous constatons tout d'abord que dans ce cas théorique où la cavité est considérée comme totalement étanche (aucune perméation de la saumure n'est autorisée), la pression de saumure tend, à long terme, vers la pression lithostatique P_R (Figure B13a). Le temps d'atteinte de cette pression lithostatique est extrêmement long, allant de 10^5 ans pour une cavité à 1500 m de profondeur à 10^9 ans pour une cavité à 300 m de profondeur. Notons que ces temps de mise à l'équilibre sont beaucoup plus courts lorsque l'on prend en compte la perméation (voir § B-4). Il est intéressant également de constater, comme le prévoit l'équation (B17), que l'évolution de la pression de saumure au cours du temps est indépendante du volume de la cavité. En revanche, elle dépend de la profondeur : plus la cavité est profonde, plus la vitesse de fluage est élevée et plus l'équilibre de pression entre la saumure et le massif est rapide à s'établir.

Nous avons étudié la sensibilité de ces résultats au type de sel considéré. Les courbes présentées sur la Figure B16 représentent l'évolution de la pression en cavité pour différents triplets de paramètres de fluage (m , Q/R et A). Ceux-ci ont

été choisis de manière à représenter au mieux la variabilité des types de sel présentés dans le Tableau B3. On peut vérifier que les positions des courbes obtenues à partir des paramètres de fluage réels des sels du Tableau B3 (repérées par les étoiles 1 à 20 sur la Figure B16) sont bien encadrées par les courbes obtenues à partir de nos triplets génériques de paramètres de fluage.

On constate sur ces courbes, ainsi que sur les Figures B14 et B15 que les paramètres du sel influent grandement sur le comportement à long terme de la cavité. Le temps caractéristique t_c^P de mise à l'équilibre de pression entre la cavité et le massif environnant peut en effet aller, dans le cas d'une cavité de $150\,000\text{ m}^3$ et de profondeur 1000m, de 40 ans pour un sel très fluant ($n=3$; $Q/R=5000\text{ K}$; $A=1000\text{ année}^{-1}$) à plus d'un milliard d'années pour un sel peu fluant ($n=6$; $Q/R=9000\text{ K}$; $A=100\text{ année}^{-1}$). Notons encore une fois que ces résultats n'ont qu'une vertu pédagogique puisqu'ils considèrent pour l'instant une cavité parfaitement étanche, ce qui n'est évidemment pas le cas dans la réalité.

- a -



- b -

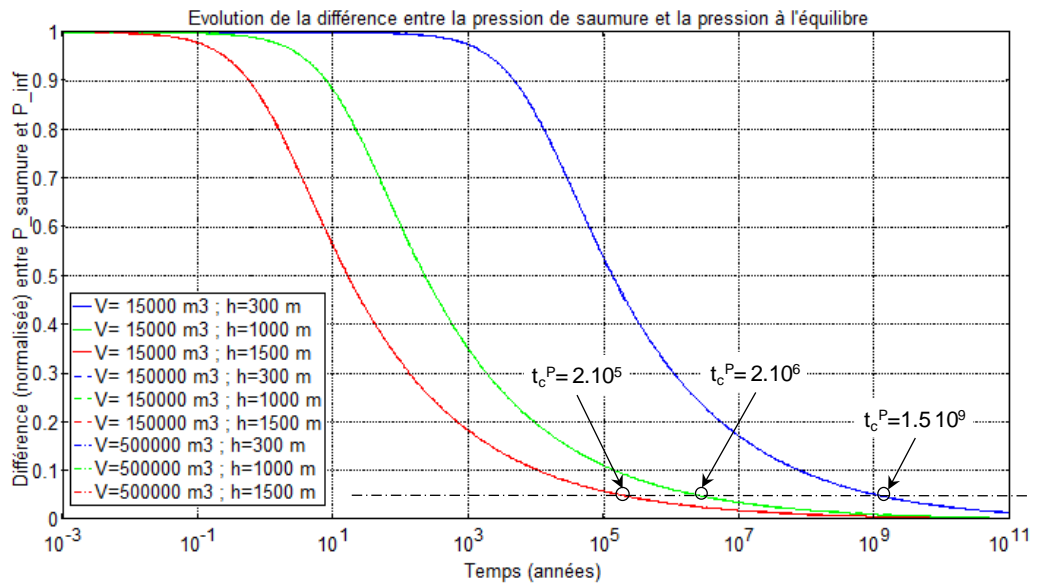
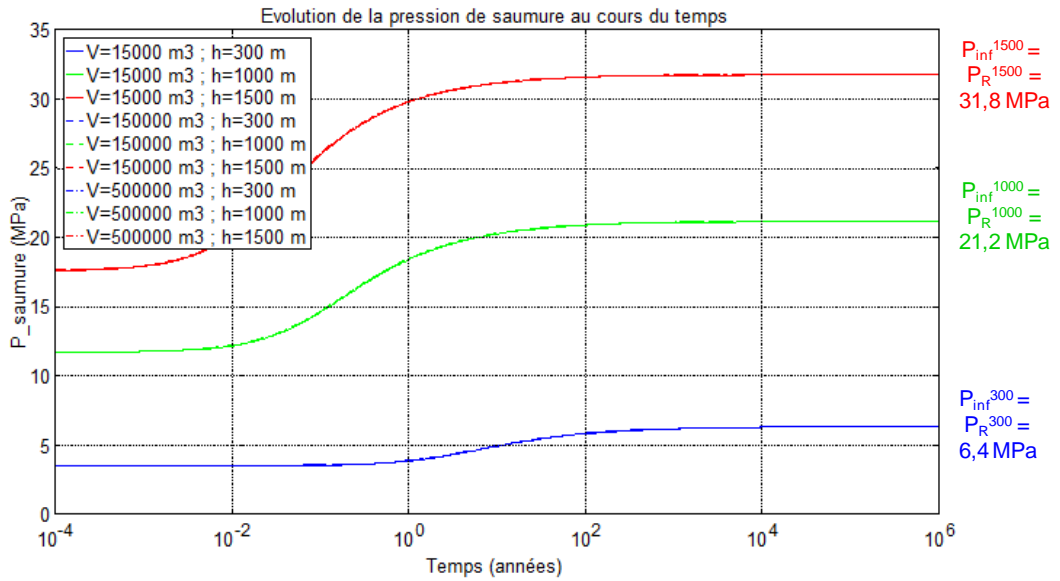


Figure B13 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'un sel standard ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage seul – cavité sphérique)

- a -



- b -

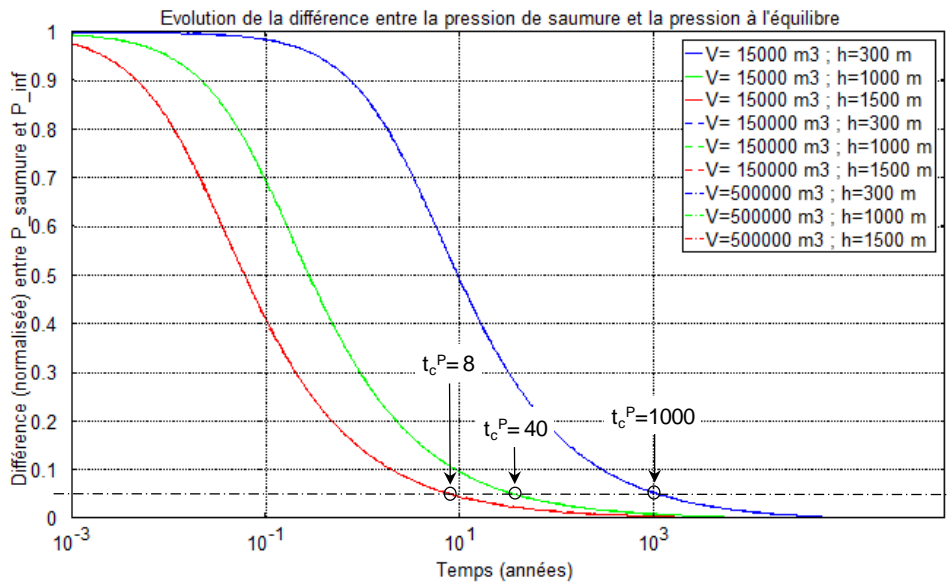
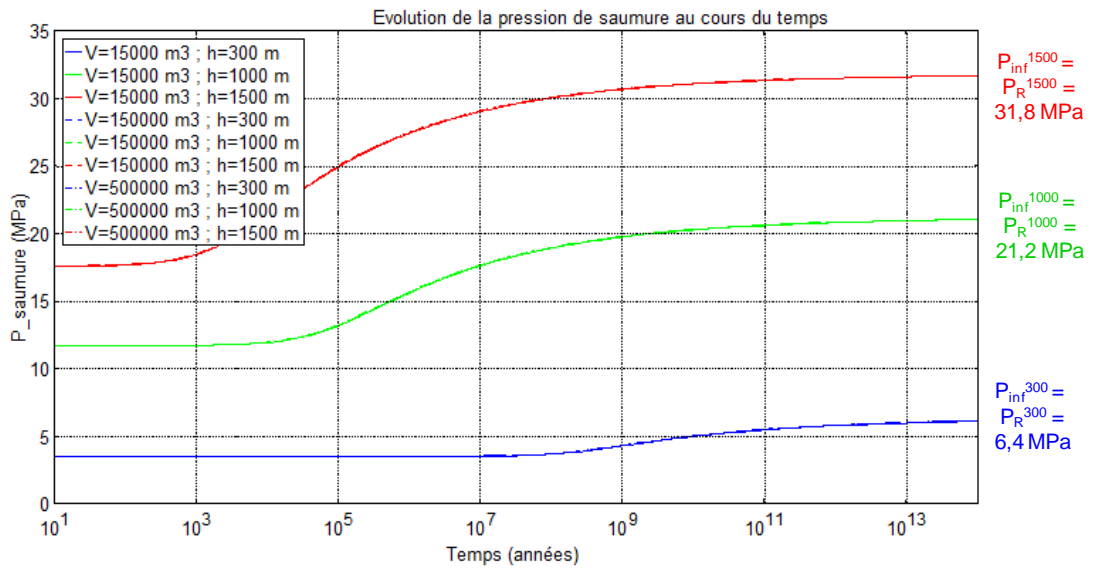


Figure B14 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'un fluage fort ($n=3$; $Q/R=5000$ K ; $A=1000$ année⁻¹) (fluage seul – cavité sphérique)

- a -



- b -

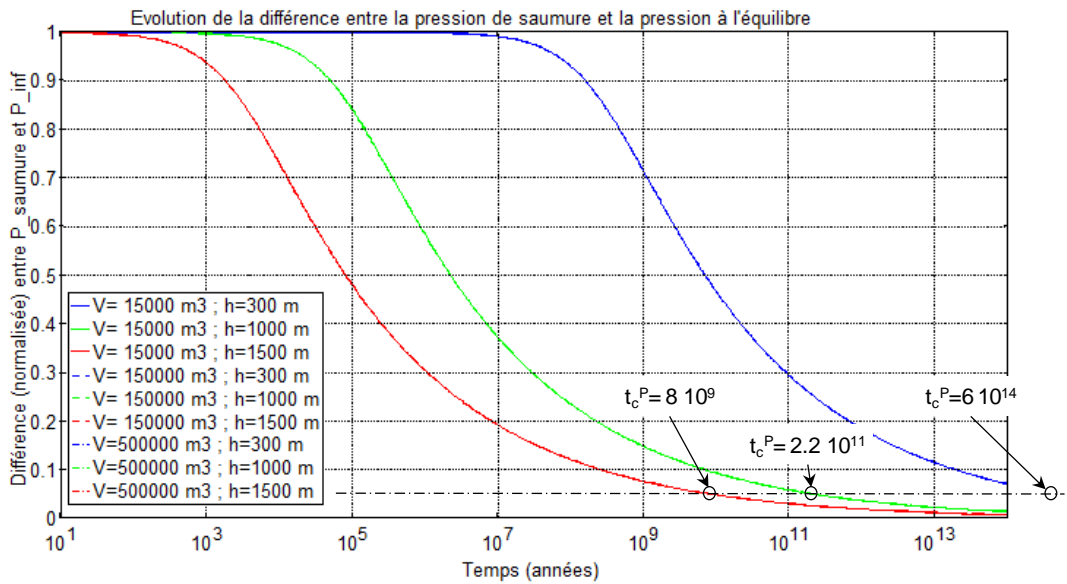


Figure B15 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'un fluage faible ($n=6$; $Q/R=9000$ K ; $A=100$ année⁻¹) (fluage seul – cavité sphérique)

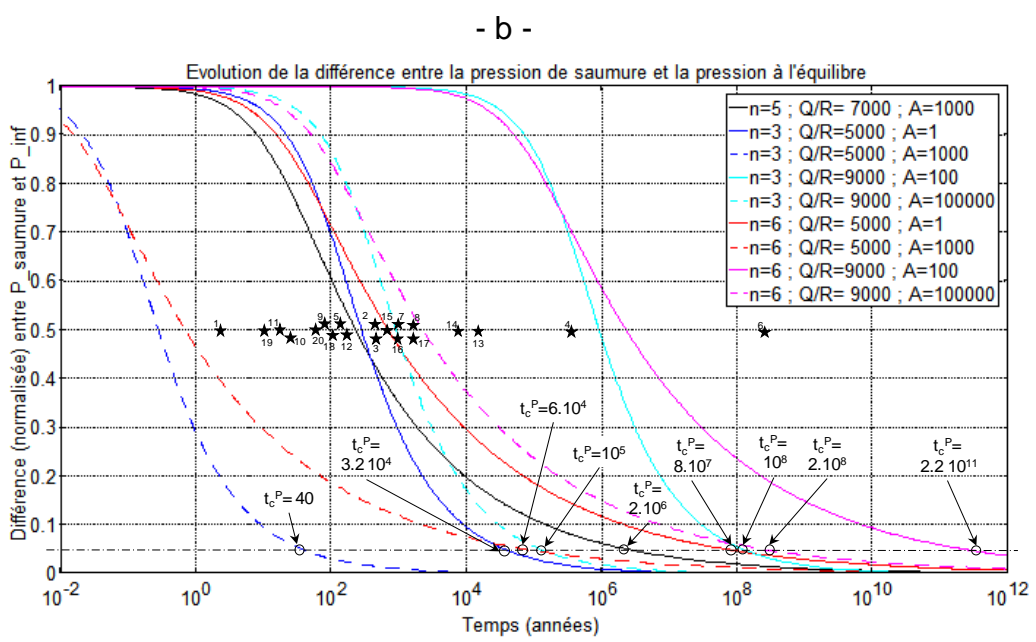
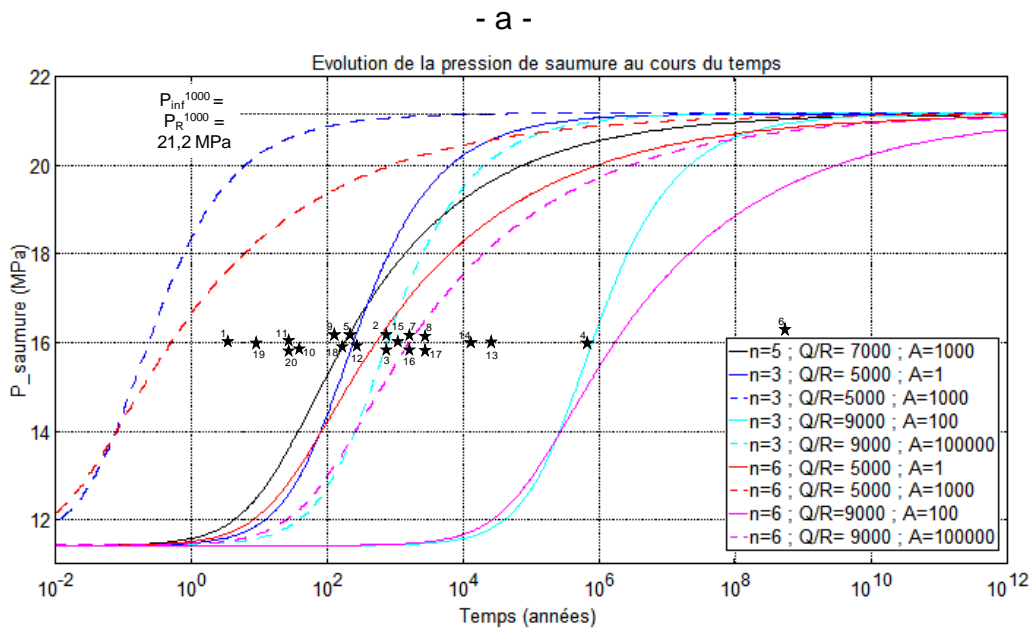


Figure B16 : Impact des paramètres de fluage (m [-], Q/R [K] et A [année⁻¹]) sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ (fluage seul)

B-4. EFFET DE LA PERMEATION DE LA SAUMURE

B-4-1. Equations descriptives retenues dans le modèle

B-4-1a. Description du phénomène de percolation

Bien que très faible, la perméabilité intrinsèque du sel n'est pas nulle (en particulier dans la zone décomprimée en paroi des cavités), ce qui permet une migration très lente de la saumure vers l'extérieur de la cavité.

Une valeur typique de perméabilité pour un sel intact est 10^{-21} m^2 soit 10^{-14} m/s ou encore 10^{-6} millidarcy. Néanmoins, la perméabilité du sel peut varier de plusieurs ordres de grandeur ($10^{-21} \text{ m}^2 < K < 10^{-17} \text{ m}^2$) 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 (sel microfissuré ou non).

Le gradient hydraulique nécessaire à l'écoulement est maintenu au cours du temps par les processus de fluage du sel et de dilatation thermique de la saumure, qui tendent à maintenir une pression dans la cavité supérieure à la pression de pore dans le massif environnant (généralement considérée comme étant halmostatique, bien qu'il soit très difficile de l'estimer en pratique).

Durup [1994] cité par Bérest et al. [1997] a montré, à partir de mesures réalisées sur le site d'Etrez, que l'on peut globalement décrire ce processus de percolation par la loi de Darcy. Ainsi, dans le cas d'une cavité sphérique, on considère que le débit de saumure sortant de la cavité peut être décrit par l'expression suivante³³ :

$$- \text{ ————— } \quad (B20)$$

où :

- K est la perméabilité intrinsèque de la saumure [m^2]
- μ est la viscosité dynamique de la saumure [Pa.s]

Si l'on transpose cette approche au cas d'une cavité cylindrique, on peut établir que :

$$- \text{ ————— } \quad (B21)$$

³³ Cette expression constitue une approche simplifiée dans la mesure où elle suppose l'instauration immédiate d'un régime stationnaire à chaque modification de la pression P_s . Une prise en compte plus rigoureuse des effets transitoires nécessiterait le recours à des calculs semi-explicites ou numériques. Un exemple de tel calcul a été réalisé par l'INERIS dans un autre contexte pour interpréter les pressions de fluide mesurées dans les forages abandonnés soumis au fluage de la paroi [Kazmierczak et al, 2004].

B-4-1b. Effet combiné du fluage et de la percolation sur la pression en cavité

Dans le cas où les phénomènes fluage et de percolation sont combinés, le principe de conservation de masse permet d'écrire que la perte de masse liée à la réduction de volume de la cavité par fluage du sel est égale à la masse de saumure sortant de la cavité par percolation :

$$\frac{dV}{dt} = -Q \quad (B22)$$

où :

- ρ est la masse volumique de la saumure [kg/m^3] ;
- V est le volume de la cavité [m^3] ;
- Q est le débit de saumure sortant de la cavité [m^3/s].

L'équation (B22) peut être réécrite de la façon suivante :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{dV}{dt} = -Q \quad (B23)$$

Par ailleurs :

- la variation de volume liée au fluage est :

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{dV}{dt} \quad (B24)$$

- la variation de la masse volumique de la saumure est liée à la variation de pression de saumure comme suit :

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{d\rho}{dt} \quad (B25)$$

On peut à nouveau réécrire l'équation (B23) à partir des équations (B24) et (B25) et de l'expression des débits de saumure sortant d'une cavité sphérique (B20) ou cylindrique (B21) :

- dans le cas d'une cavité sphérique :

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{dV}{dt} \quad (B26)$$

- dans le cas d'une cavité cylindrique :

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{dV}{dt} \quad (B27)$$

Ces équations ne peuvent être résolues explicitement ; nous les avons résolues à l'aide du code de calcul COMSOL. En revanche, la valeur de la pression d'équilibre entre le fluage de la cavité et la percolation de la saumure dans le sel peut être déterminée analytiquement en écrivant l'expression à la limite des équations (B26) et (B27) :

$$(B28)$$

En posant :

- _____ ,
- _____ ,

on obtient une équation du type : (voir schéma ci dessous) dont la solution correspond à l'intersection de deux courbes.

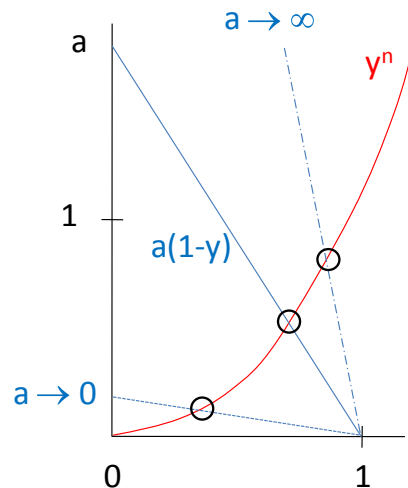


Figure B17 : Schéma permettant de déterminer analytiquement la valeur de la pression de saumure à l'équilibre

A partir de cette formulation, on peut remarquer :

- que la solution est comprise entre 0 et 1 ou autrement dit, que la pression d'équilibre est comprise entre la pression halmostatique et la pression lithostatique ;
- que lorsque a tend vers 0, la solution tend vers 0. Autrement dit la pression à l'équilibre se rapproche de la pression lithostatique lorsque : la perméabilité K du sel diminue, que la vitesse de fluage augmente et que la cavité est de grande taille ;
- que lorsque a augmente, la solution tend vers 1. Autrement dit, la pression à l'équilibre se rapproche de la pression halmostatique lorsque : la perméabilité du sel augmente, la vitesse de fluage diminue et que la cavité est de petite taille.

En ce qui concerne le volume de la cavité, celui-ci va diminuer lentement jusqu'à ce que la cavité se referme totalement. On peut décrire l'évolution du volume de la cavité au cours du temps à partir de l'équation (B24)³⁴, soit :

$$(B29)$$

Cette équation a également été résolue à l'aide du logiciel COMSOL.

B-4-2. Simulations élémentaires illustrant le phénomène

Nous avons vu au § B-2 qu'une cavité fermée qui ne serait soumise qu'au phénomène de fluage verrait sa pression interne augmenter très lentement jusqu'à atteindre la pression lithostatique. La prise en compte de la percolation de la saumure à travers le massif de sel va avoir quatre effets principaux :

1. La pression d'équilibre $P_{inf}=P_s(t=\infty)$ atteinte par la saumure sur le long terme, va être inférieure à la pression lithostatique P_R . Comme on l'a vu précédemment, celle-ci est en effet comprise entre la pression halmostatique P_0 et la pression lithostatique P_R et tend à se rapprocher de la deuxième (et s'éloigner de la première) lorsque la perméabilité du sel est faible, que la vitesse de fluage est élevée et que la cavité est de grande dimension. Les résultats de simulation présentés sur les Figures B18 à B23 confirment graphiquement ces résultats. On remarque de surcroît que de manière générale, la pression d'équilibre tend à être plus proche de la pression halmostatique que de la pression lithostatique.
2. le temps nécessaire pour atteindre la pression d'équilibre est fortement réduit par rapport au cas où seul le fluage est considéré. Pour prendre l'exemple d'une cavité sphérique de volume initial $150\,000\text{ m}^3$ située à 1000 m de profondeur dans un sel moyennement fluant ($n=5$; $Q/R=7000\text{ K}$; $A=1000\text{ année}^{-1}$), nous avons vu sur la B13 que le temps caractéristique d'atteinte de l'équilibre de pression dans ce cas était de 2 millions d'années. Par correspondance, on peut voir sur la B18 que lorsque la perméation est prise en compte, ce temps caractéristique est ramené à 800 ans pour un sel peu perméable ($K=10^{-21}\text{ m}^2$), 60 ans pour un sel moyennement perméable ($K=10^{-19}\text{ m}^2$) et jusqu'à 5 ans pour un sel très perméable ($K=10^{-17}\text{ m}^2$) ;
3. le volume de la cavité, qui n'avait pas d'influence dans le cas où seul le fluage était considéré, devient également un paramètre de contrôle de la valeur de la pression d'équilibre et du temps d'atteinte de l'équilibre. Ceci est illustré dans les Figures B20 à B22, B26 à B28 et B32 à B34, qui présentent respectivement l'impact du volume initial V et de la profondeur h d'une cavité sphérique sur l'évolution au cours du temps de la pression de saumure, du volume de la cavité et du débit de saumure percolant à travers le sel, pour un sel standard ($n=5$; $Q/R=7000\text{ K}$; $A=1000\text{ année}^{-1}$) et pour des sels de perméabilités différentes (10^{-17} , 10^{-19} et 10^{-21} m^2). Pour illustration, si l'on prend le cas d'une cavité de $150\,000\text{ m}^3$ à 1000 m de profondeur réalisée

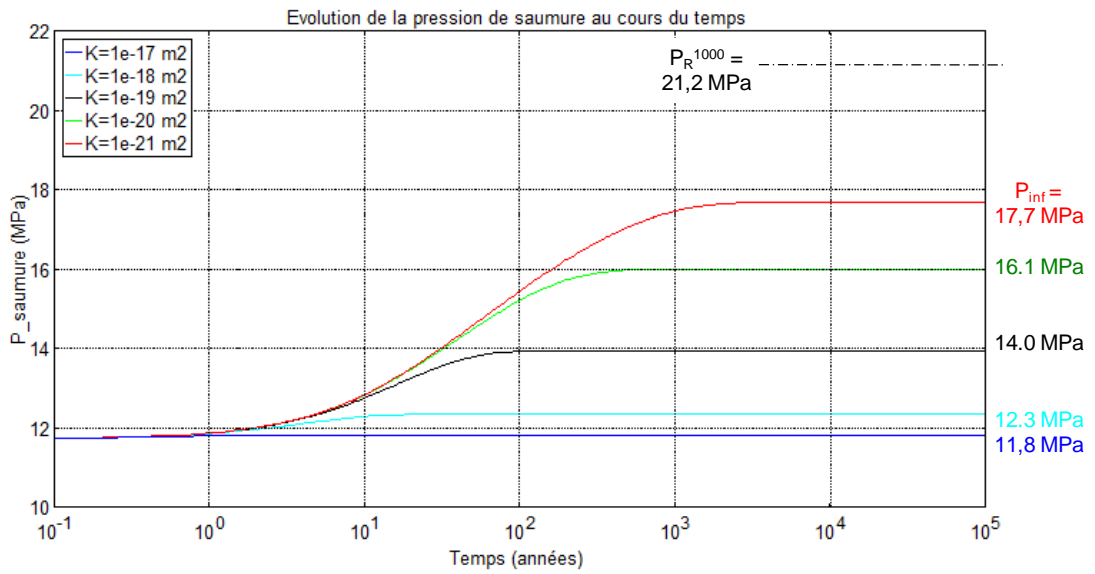
³⁴ Cette équation différentielle ayant été établie sur la base de l'hypothèse classique des petites déformations, son application mène à des erreurs croissantes au fur et à mesure que l'on tend vers les grandes déformations. Il convient donc de considérer avec précaution les résultats obtenus aux temps longs (notamment lorsque l'on mène la simulation jusqu'à la fermeture totale de la cavité).

dans un sel standard en termes de fluage et de perméabilité (Figure B21, courbes vertes), on constate que la valeur d'équilibre passe de 12,8 à 14,7 MPa et que le temps d'atteinte de cet équilibre passe de 22 ans à 90 ans lorsque l'on passe d'une petite cavité (15 000 m³) à une grande cavité (500 000 m³). De la même manière, la forme de la cavité va également jouer sur l'efficacité de la perméation et donc influencer sur la valeur de la pression d'équilibre et le temps de mise à l'équilibre (voir Figures B23, B29 et B35) ;

4. contrairement au cas où seul le fluage était considéré, la cavité va ici converger sans discontinuer jusqu'à se refermer totalement. Le temps caractéristique de fermeture de la cavité, noté t_c^V ou t_{95}^V et défini comme le temps nécessaire pour que 95 % du volume de la cavité soit perdu, va dépendre d'une part de la profondeur et des paramètres de fluage (qui vont contrôler la vitesse de fluage), et d'autre part de la dimension, de la forme de la cavité et de la perméabilité du sel (qui vont contrôler l'efficacité de la perméation). A titre d'exemple, on illustre sur la Figure B24 l'impact de la perméabilité du sel sur le temps caractéristique de fermeture d'une cavité sphérique, en considérant des paramètres « moyens » pour le fluage, le volume et la profondeur de la cavité. On note que le temps de fermeture varie entre 42 000 ans (pour une perméabilité de 10^{-17} m²) et 6 millions d'années (pour une perméabilité de 10^{-21} m²). De la même manière, on peut apprécier l'impact des paramètres de fluage du sel (Figure B25), du volume initial et de la profondeur de la cavité (Figures B26 à B28) ainsi que de la forme de la cavité (Figure B29), sur le temps de fermeture de la cavité. Globalement, on retient de ces éléments que le temps caractéristique de fermeture d'une cavité dans le sel s'échelonne entre 10^4 - 10^5 ans et 10^8 - 10^9 ans lorsque l'on va d'une cavité profonde (1000-1500 m), de forme élancée ($f=3$ - 10), de faible volume initial (15 000-150 000 m³), dans un sel perméable (10^{-17} - 10^{-19} m²) et relativement fluant ($n=3$; $Q/R=5000$ K ; $A=1000$ année⁻¹) à une cavité peu profonde (300-500 m), peu élancée ($f=1$ - 3), de grand volume initial (500 000 m³) dans un sel peu perméable (10^{-19} - 10^{-21} m²) et relativement peu fluant ($n=6$; $Q/R=9000$ K ; $A=100$ année⁻¹). Les trois paramètres qu'il faut retenir comme étant les plus influents sont : les paramètres de fluage, la profondeur de la cavité et la perméabilité du sel.

Puisque la cavité finit dans tous les cas par se refermer, la saumure initialement contenue dans la cavité va être expulsée dans les terrains encaissants. Dans une optique d'évaluation de l'impact environnemental que pourrait avoir une telle migration de saumure, il est intéressant d'estimer avec quel débit cette saumure s'échappera de la cavité. Celui-ci est très variable et dépend à nouveau des paramètres cités précédemment. Les estimations réalisées dans cette étude (voir Figures B30 à B35) aboutissent à des débits compris entre quelques litres/an (pour des cavités peu profondes, avec un sel peu fluant et peu perméable) et quelques centaines de m³/an (dans le cas inverse). L'impact potentiel de ces rejets de saumure sur la qualité des eaux environnantes est à analyser en fonction du contexte hydrogéologique local.

- a -



- b -

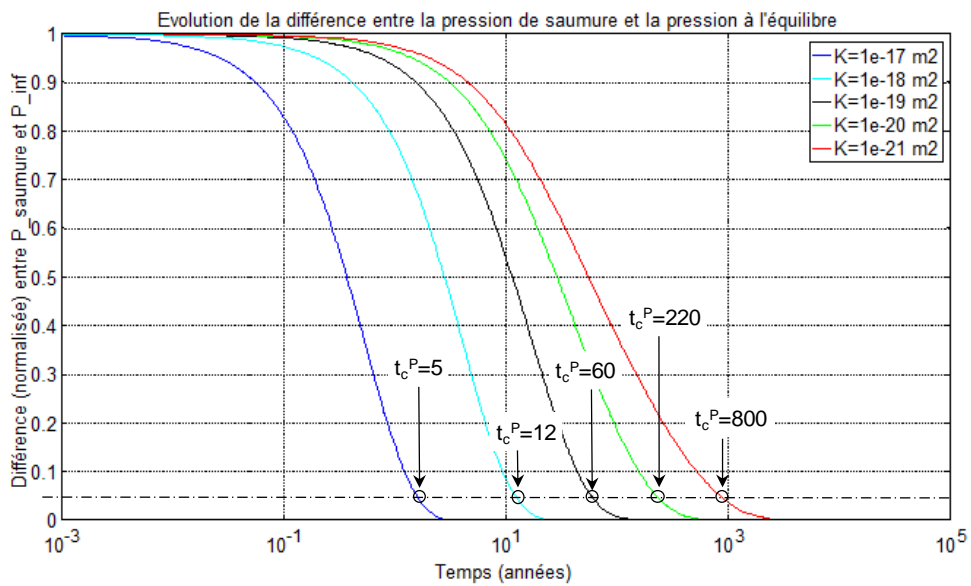
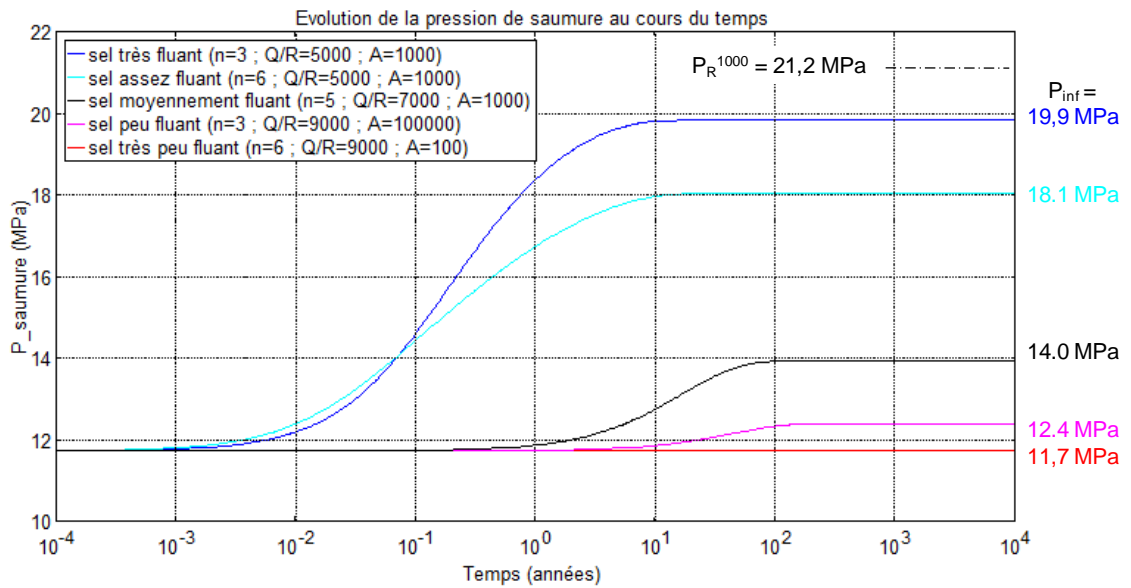


Figure B18 : Impact de la perméabilité du sel K sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage + percolation)

- a -



- b -

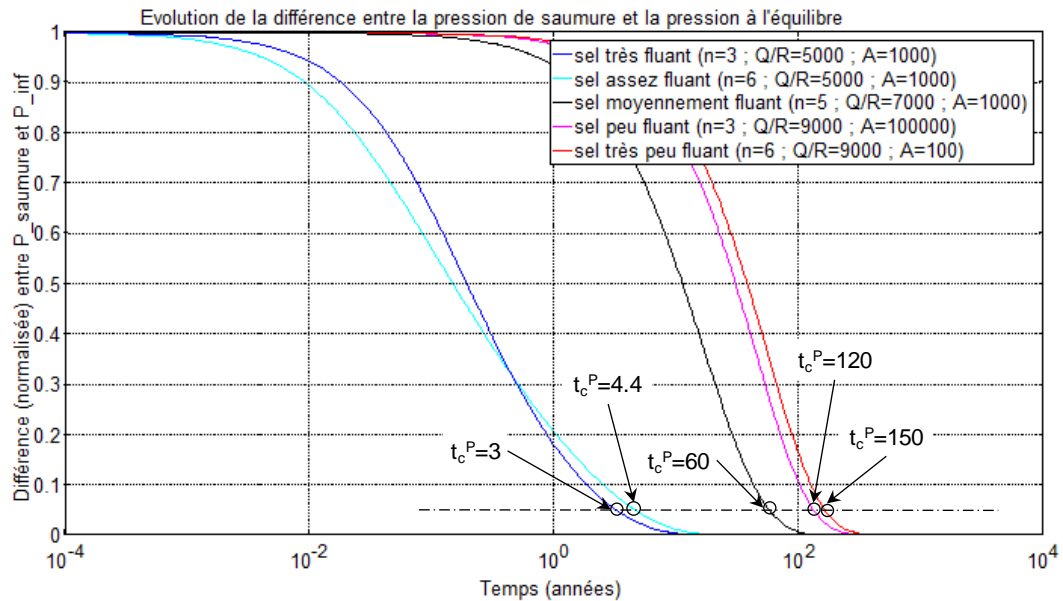
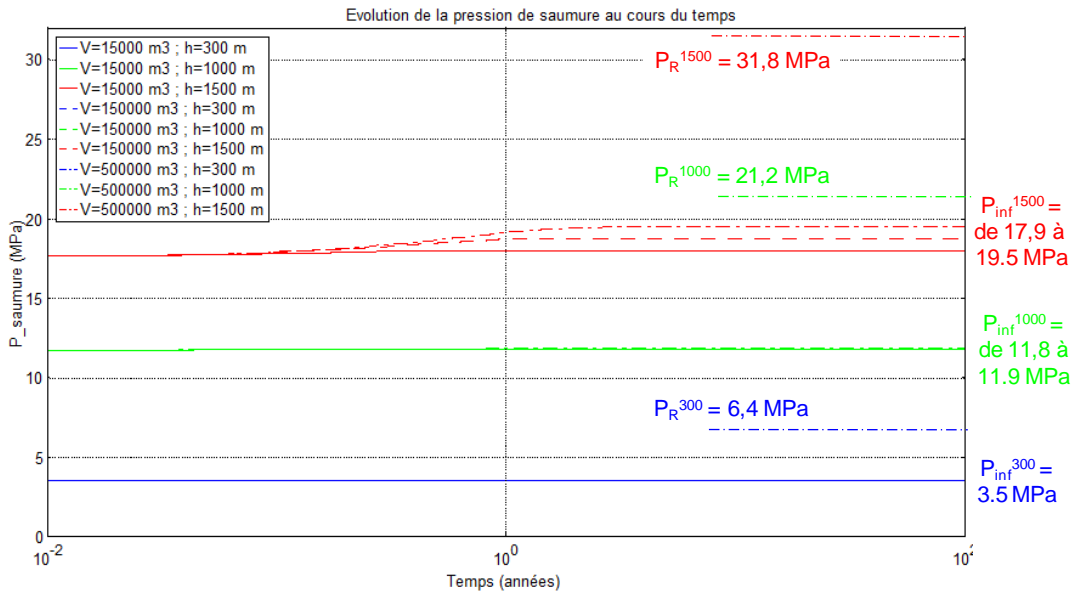


Figure B19 : Impact des paramètres de fluage du sel (m [-], Q/R [K] et A [année⁻¹]) sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ pour une perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$ (fluage + percolation)

- a -



- b -

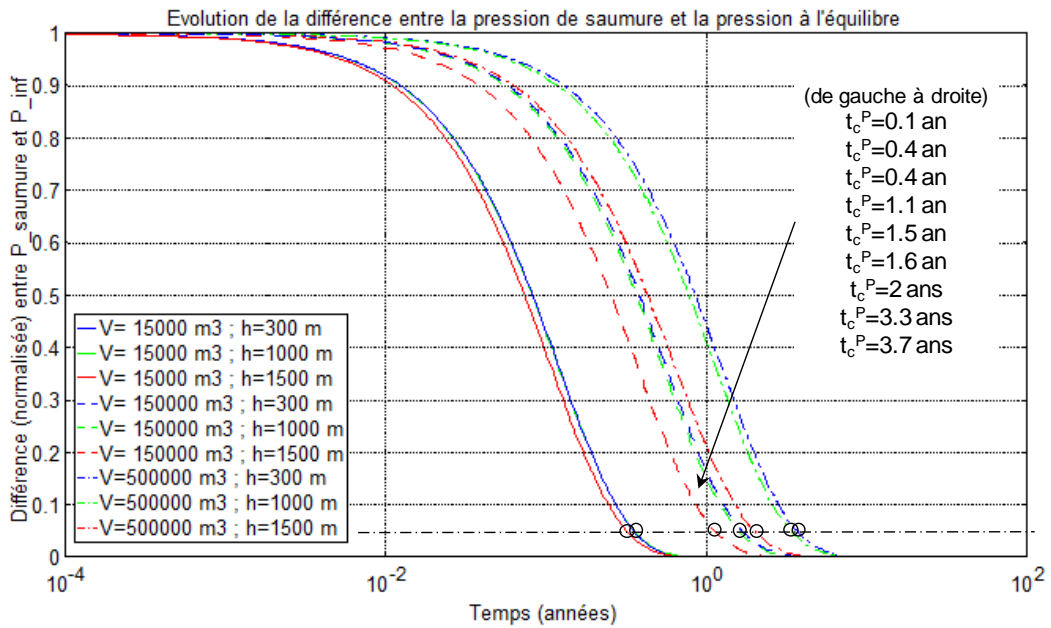
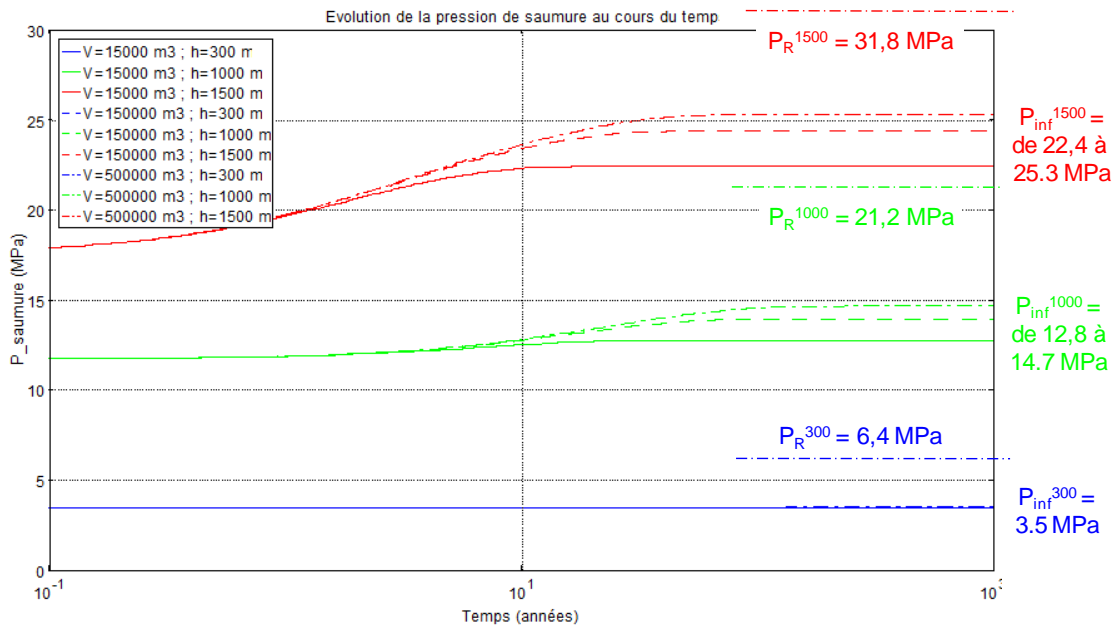


Figure B20 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une perméabilité forte du sel ($K=10^{-17} \text{ m}^2$) (fluage et percolation – paramètre de fluage : $n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$)

- a -



- b -

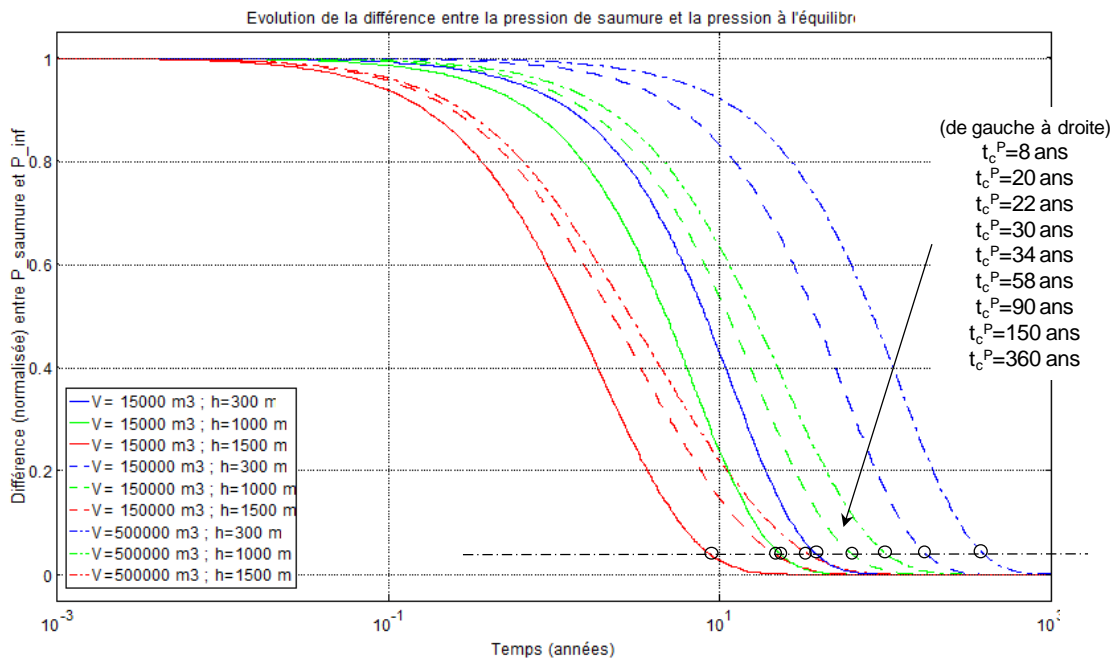
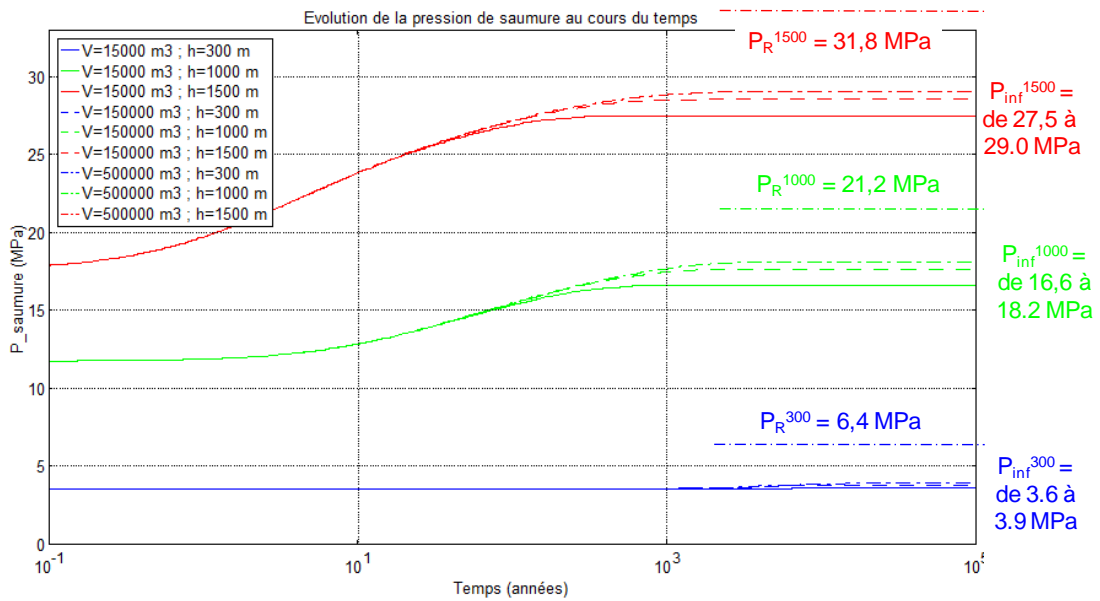


Figure B21 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une perméabilité moyenne du sel ($K=10^{-19} \text{ m}^2$) (fluage et percolation – paramètre de fluage : $n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$)

- a -



- b -

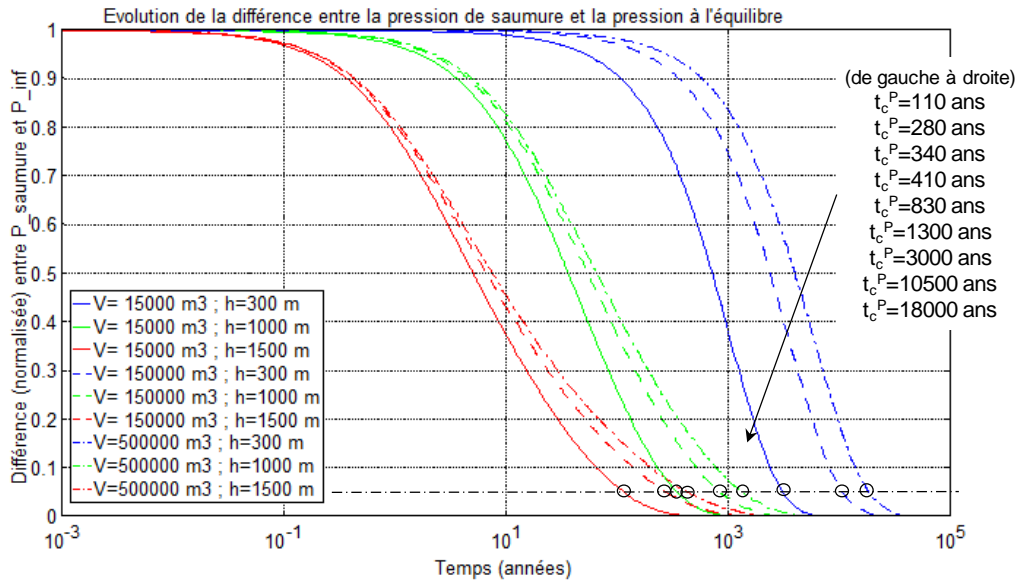
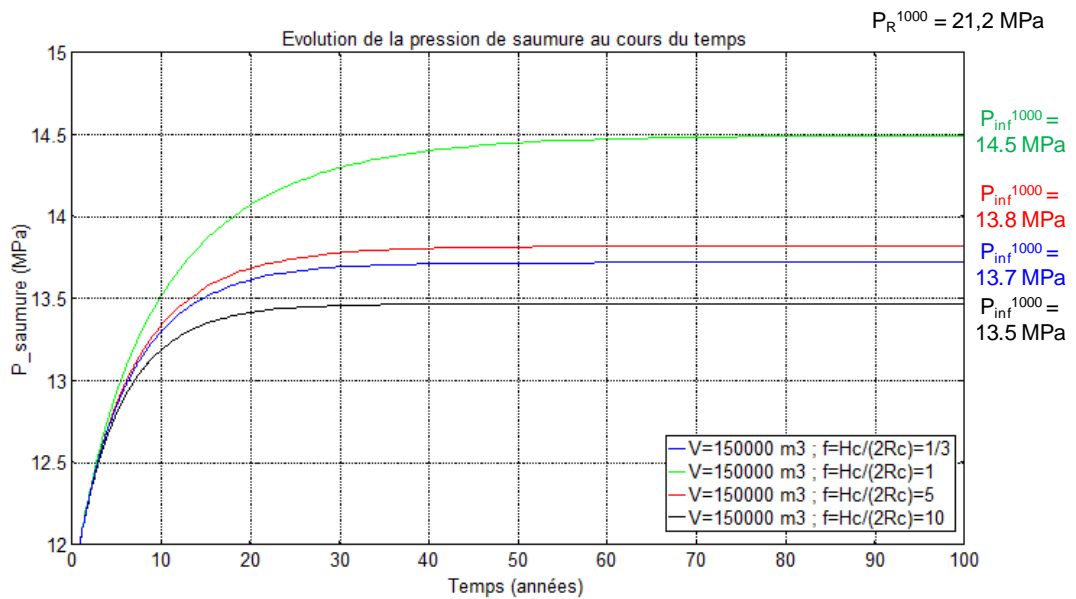


Figure B22 : Impact du volume de la cavité V et de sa profondeur h sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une faible perméabilité du sel ($K=10^{-21} \text{ m}^2$) (fluage et percolation – paramètre de fluage : $n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$)

- a -



- b -

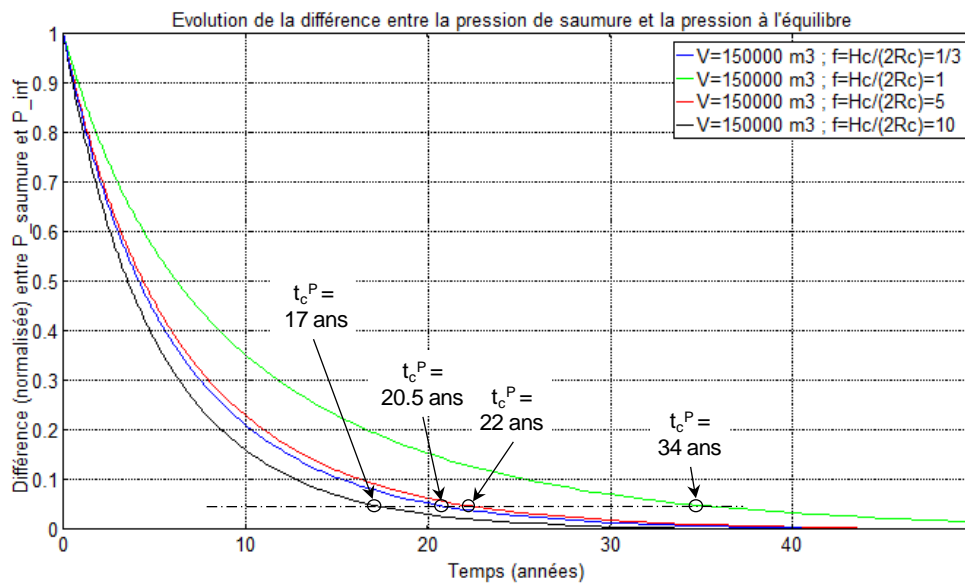


Figure B23 : Impact du ratio f entre la hauteur de la cavité et son diamètre sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité cylindrique de profondeur $h=1000 \text{ m}$, de volume $V = 150000 \text{ m}^3$, de perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$ creusée dans un sel moyennement fluant ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage et percolation)

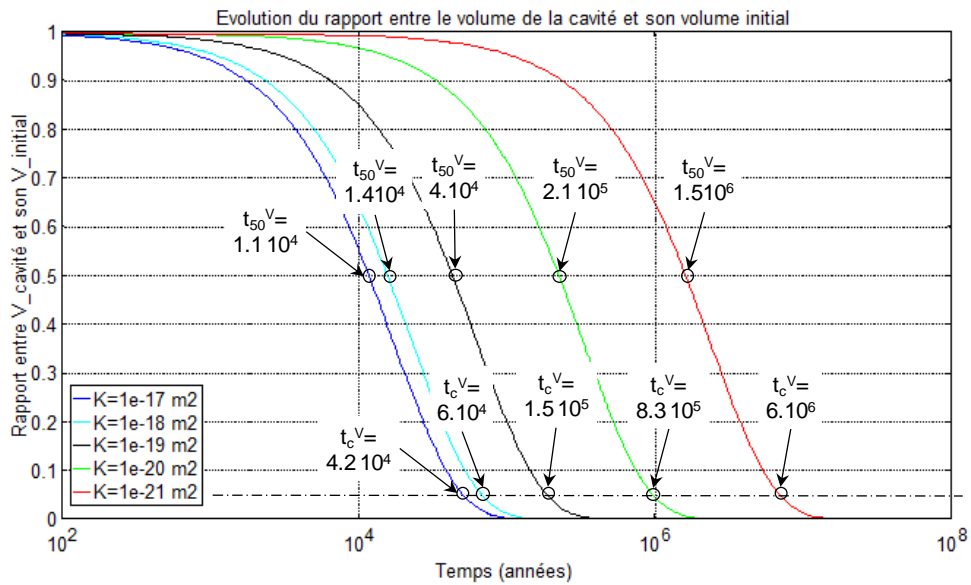


Figure B24 : Impact de la perméabilité du sel K sur l'évolution du volume de la cavité V au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume initial $V_{(t=0)}=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage + percolation)

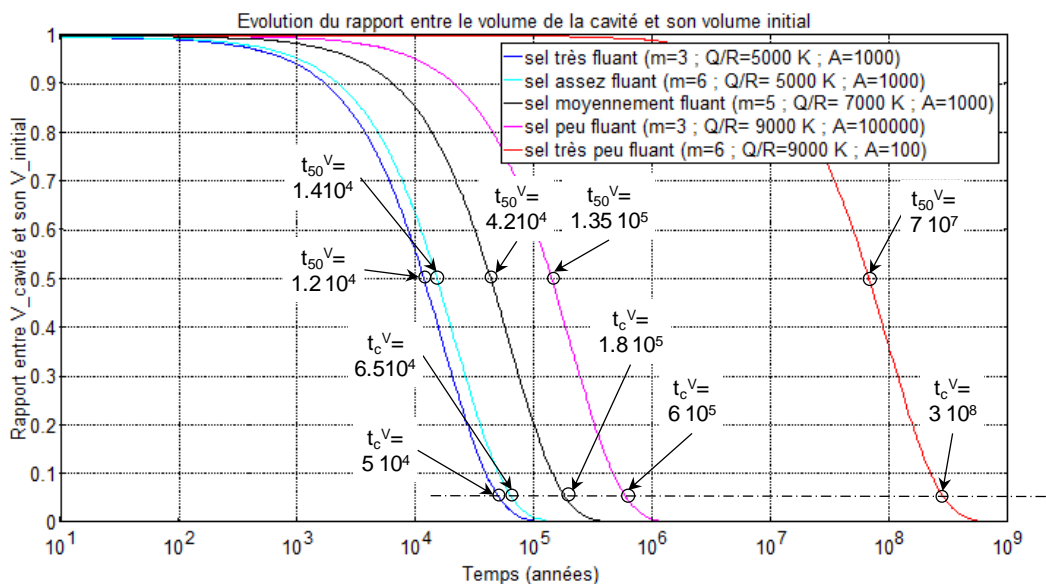
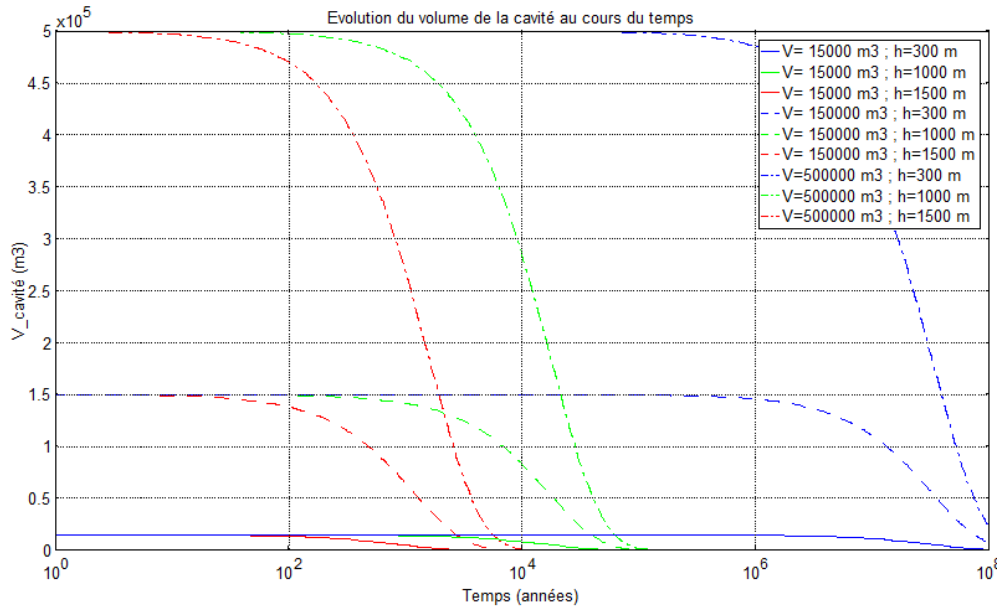


Figure B25 : Impact des paramètres de fluage du sel (m [-], Q/R [K] et A [année⁻¹]) sur l'évolution du volume de la cavité V au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ pour une perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$ (fluage + percolation)

- a -



- b -

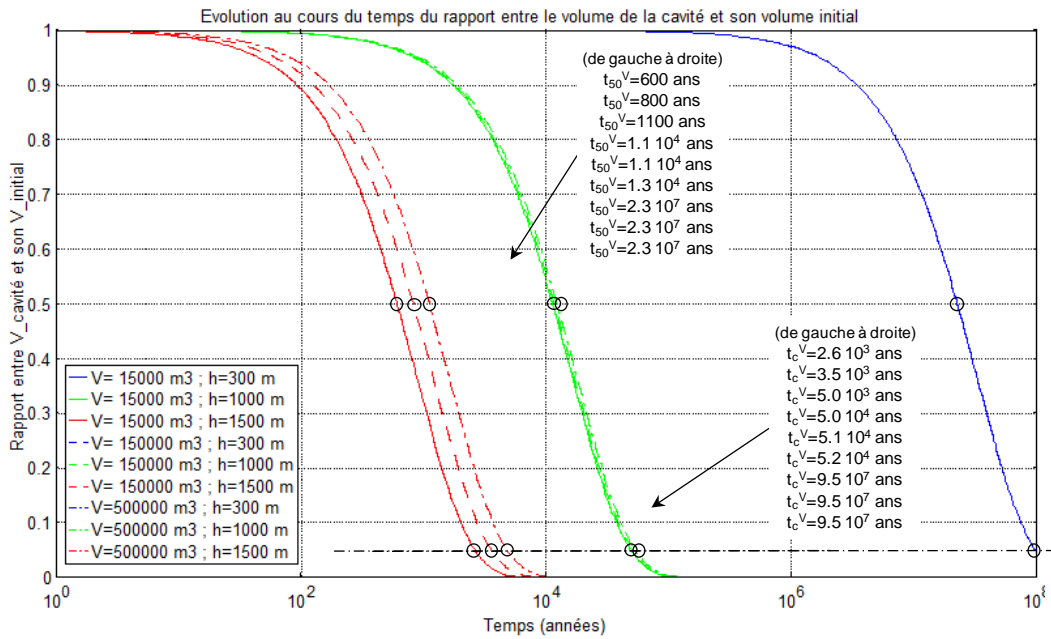
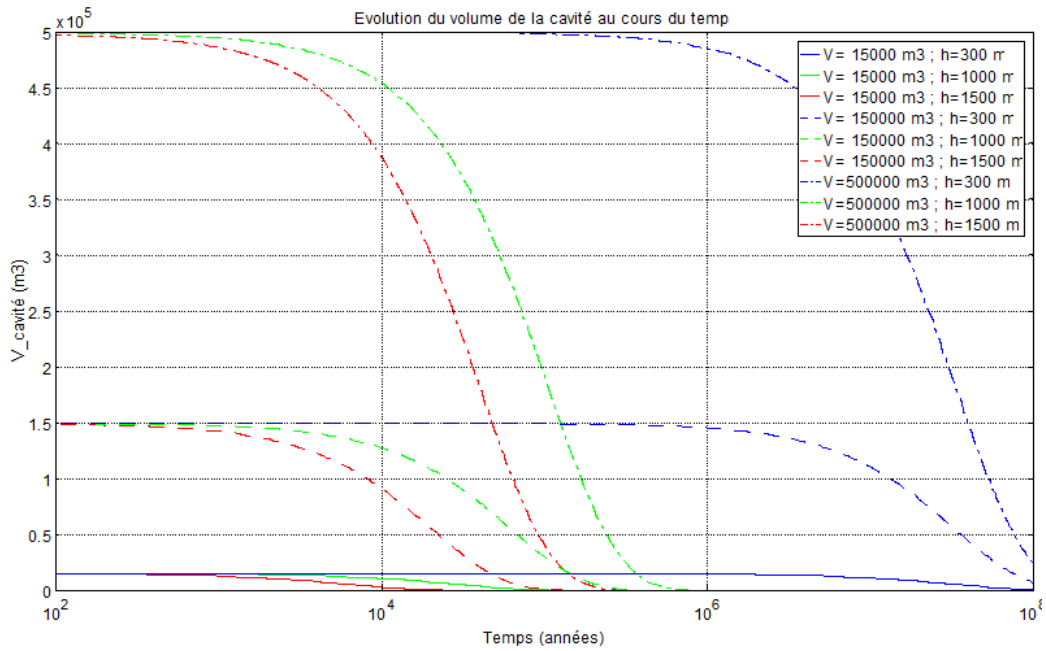


Figure B26 : Impact du volume initial de la cavité V_{init} et de sa profondeur h sur l'évolution du volume de la cavité V au cours du temps dans le cas d'une perméabilité forte du sel ($K=10^{-17} m^2$) et de paramètres de fluage standards : $n=5$; $Q/R=7000 K$; $A=1000$ année⁻¹ (fluage et percolation)

- a -



- b -

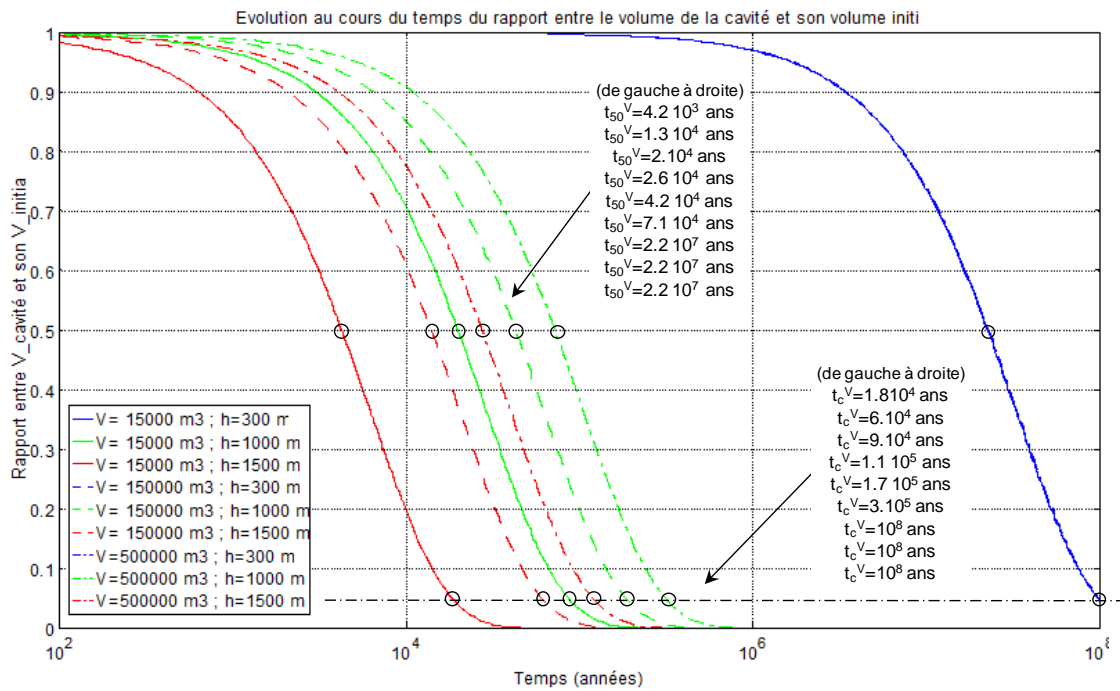
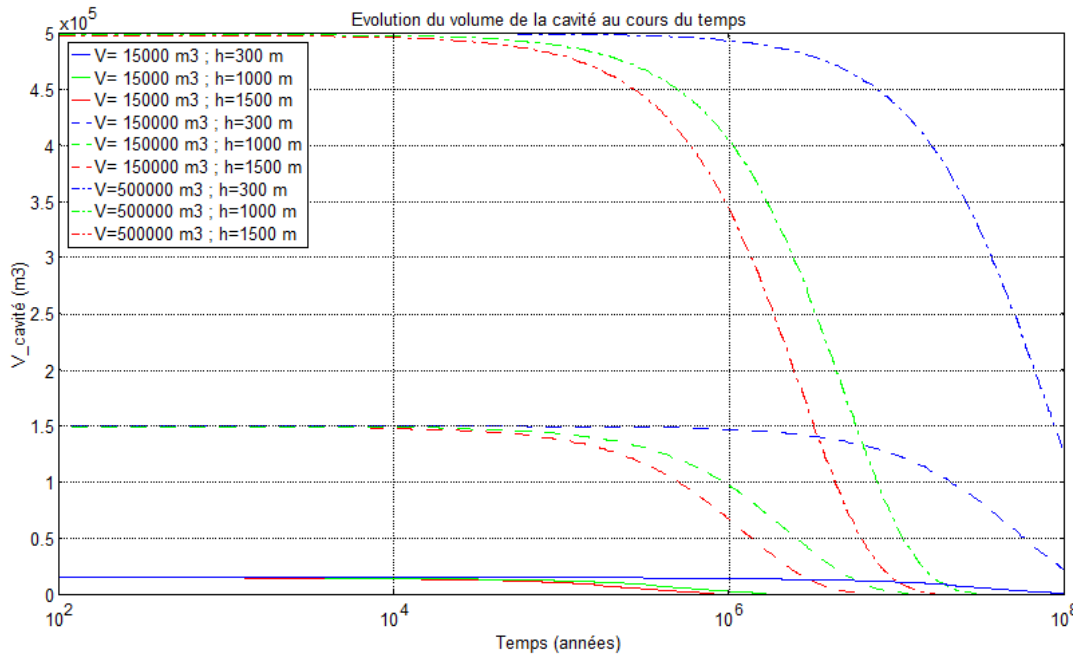


Figure B27 : Impact du volume initial de la cavité V_{init} et de sa profondeur h sur l'évolution du volume de la cavité V au cours du temps dans le cas d'une perméabilité moyenne du sel ($K=10^{-19} m^2$) et de paramètres de fluage standards : $n=5$; $Q/R=7000 K$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$ (fluage et percolation)

- a -



- b -

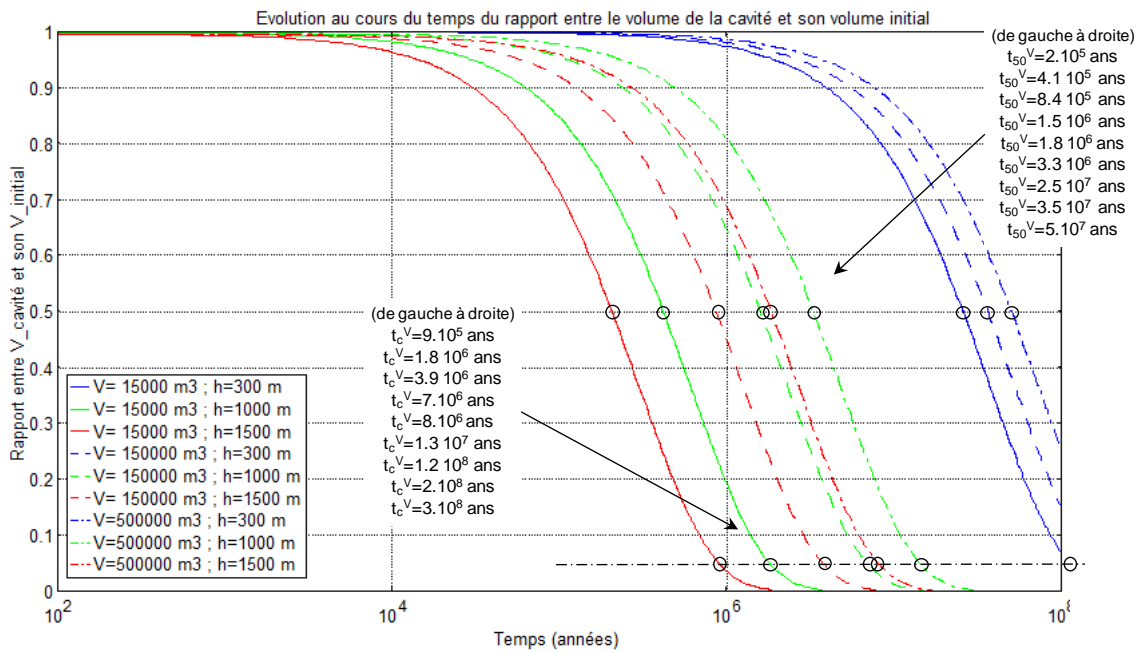


Figure B28 : Impact du volume initial de la cavité V_{init} et de sa profondeur h sur l'évolution du volume de la cavité V au cours du temps dans le cas d'une faible perméabilité du sel ($K=10^{-21} m^2$) et de paramètres de fluage standards : $n=5$; $Q/R=7000 K$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$ (fluage et percolation)

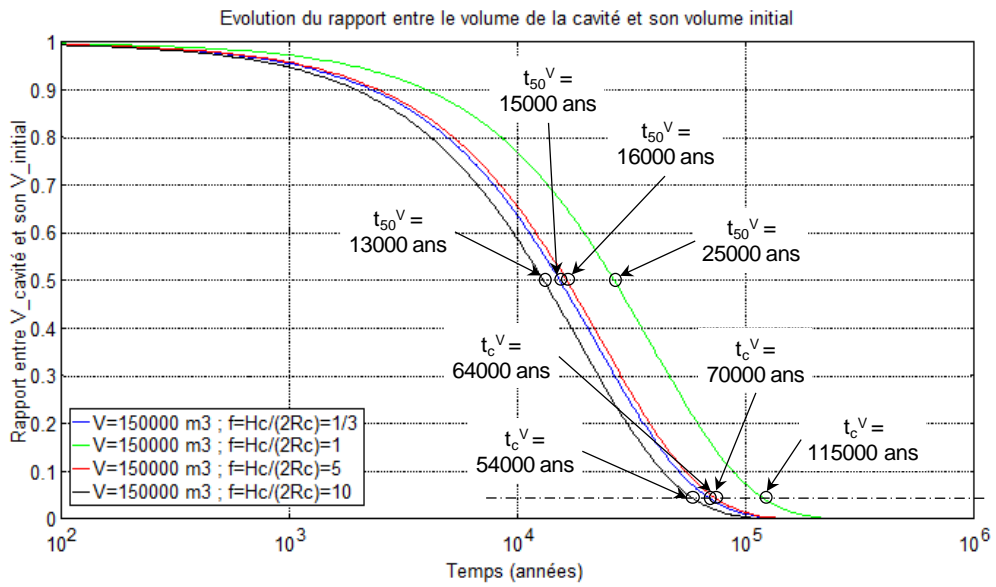


Figure B29 : Impact du ratio f entre la hauteur de la cavité et son diamètre sur l'évolution du volume de la cavité V au cours du temps dans le cas d'une cavité cylindrique de profondeur $h=1000$ m, de volume $V = 150000$ m^3 creusée dans un sel moyennement fluant ($n=5$; $Q/R=7000$ K ; $A=1000$ année $^{-1}$) et de perméabilité $K=10^{-19}$ m^2 (fluage et percolation)

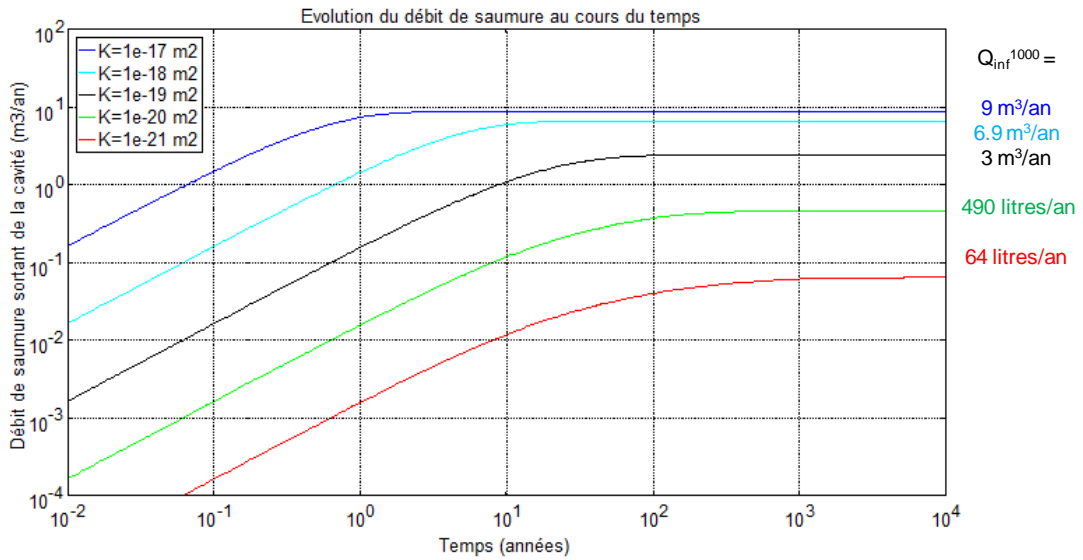


Figure B30 : Impact de la perméabilité du sel K sur l'évolution du débit de saumure Q percolant dans le sel au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume initial $V_{(t=0)}=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage + percolation)

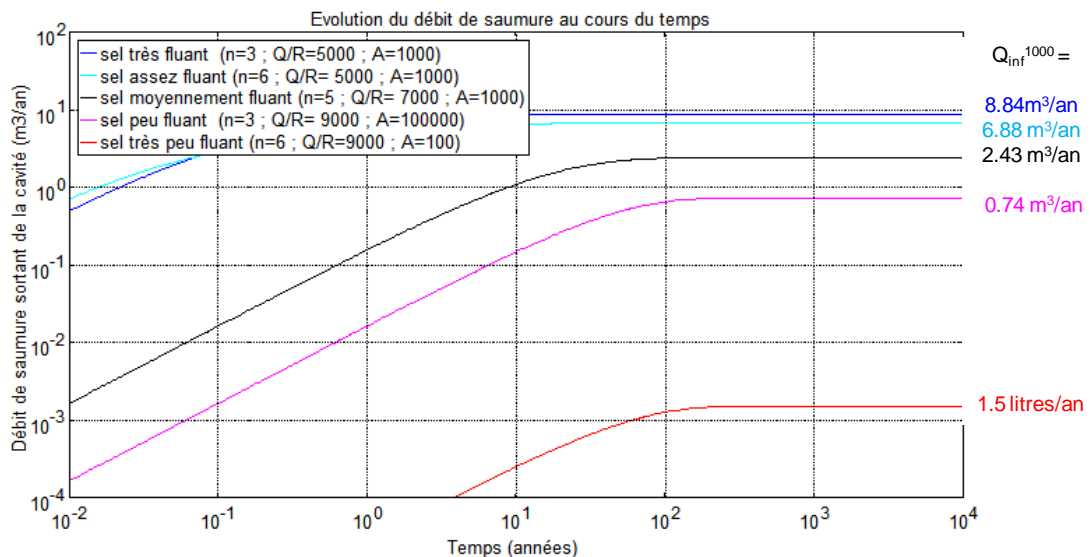


Figure B31 : Impact des paramètres de fluage du sel (n [-], Q/R [K] et A [année⁻¹]) sur l'évolution du débit de saumure Q percolant dans le sel au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ pour une perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$ (fluage + percolation)

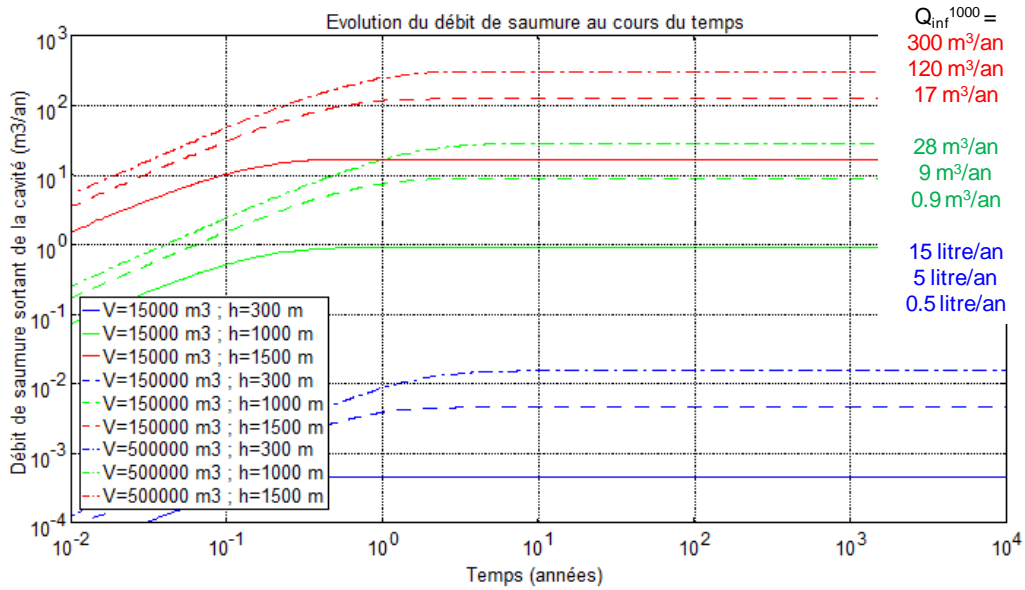


Figure B32 : Impact du volume initial de la cavité V_{init} et de sa profondeur h sur l'évolution du débit de saumure Q percolant dans le sel au cours du temps dans le cas d'une perméabilité forte du sel ($K=10^{-17} \text{ m}^2$) dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage et percolation)

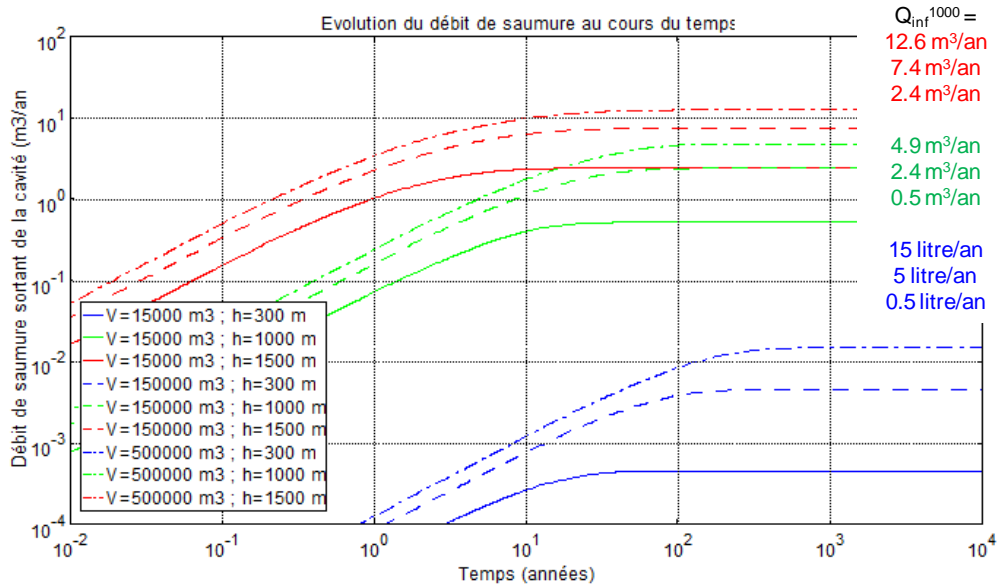


Figure B33 : Impact du volume initial de la cavité V_{init} et de sa profondeur h sur l'évolution du débit de saumure Q percolant dans le sel au cours du temps dans le cas d'une perméabilité moyenne du sel ($K=10^{-19} \text{ m}^2$) dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage et percolation)

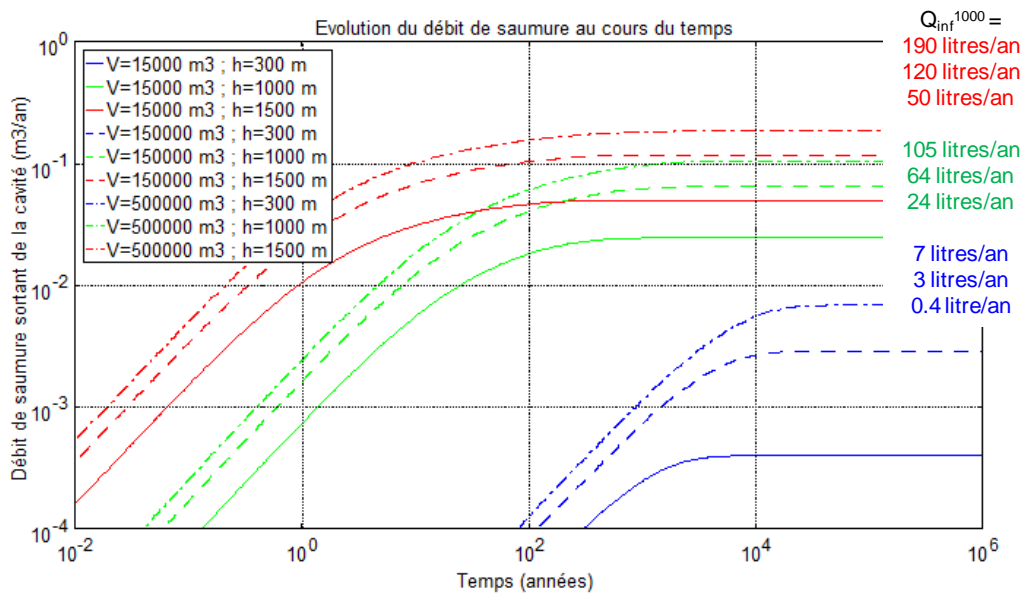


Figure B34 : Impact du volume initial de la cavité V_{init} et de sa profondeur h sur l'évolution du débit de saumure Q percolant dans le sel au cours du temps dans le cas d'une faible perméabilité du sel ($K=10^{-21} \text{ m}^2$) dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage et percolation)

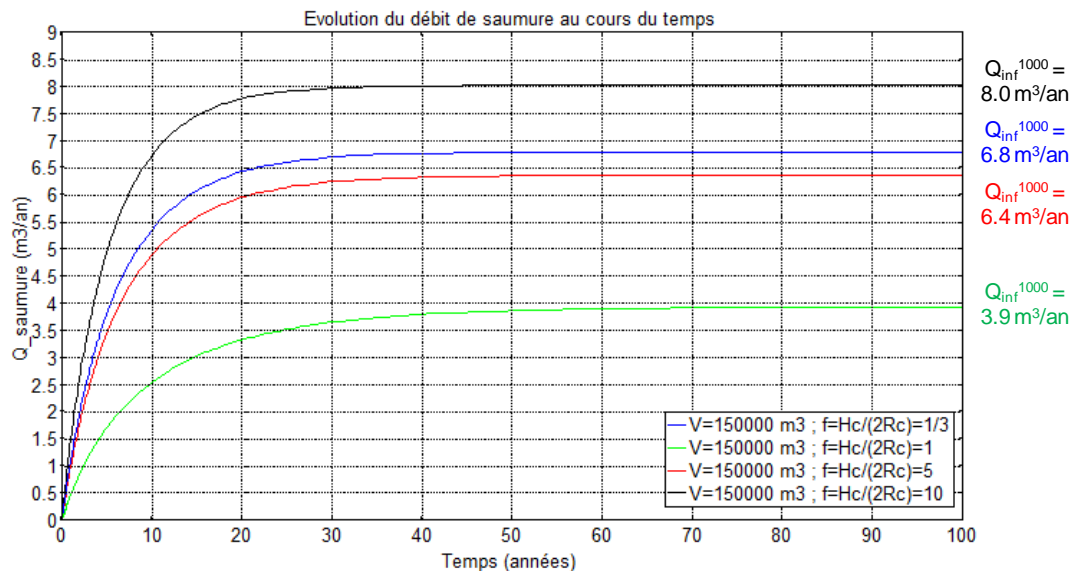


Figure B35 : Impact du ratio f entre la hauteur de la cavité et son diamètre sur l'évolution du débit de saumure Q au cours du temps dans le cas d'une cavité cylindrique de profondeur $h=1000 \text{ m}$, de volume $V = 150000 \text{ m}^3$ creusée dans un sel moyennement fluant ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) et de perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$ (fluage et percolation)

B-5. EFFETS COMBINES DE LA DILATATION THERMIQUE, DU FLUAGE ET DE LA PERCOLATION

B-5-1. Equations descriptives retenues dans le modèle

Nous abordons ici le cas où l'ensemble des phénomènes décrits précédemment, à savoir la dilatation thermique de la saumure, le fluage du sel et la percolation de la saumure dans le massif de sel, sont pris en compte dans la simulation. En revanche, on considère qu'il n'y a pas de fuite significative de la saumure au niveau du puits et qu'on a laissé la saumure se saturer totalement en sel avant de fermer la cavité de sorte que tous les phénomènes éventuels de dissolution complémentaire du sel puissent être négligés. Dans ces conditions, les évolutions du débit sortant du puits (dans le cas d'une cavité ouverte) ou de la pression en cavité (pour une cavité fermée) vont être gouvernées par les équations suivantes.

Cas d'une cavité ouverte :

L'expression du débit de saumure expulsé de la caverne par le puits ouvert s'exprime à nouveau selon l'équation (B6), sachant qu'à présent le volume de la cavité varie au cours du temps du fait du fluage de la cavité.

Cas d'une cavité fermée :

Si l'on prend en compte simultanément les 3 effets que sont la dilatation, le fluage et la percolation, les équations (B26) et (B27) sont modifiées de la façon suivante :

- dans le cas d'une cavité sphérique :

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (B30)$$

- dans le cas d'une cavité cylindrique :

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (B31)$$

Ces équations ne peuvent être résolues explicitement. Nous les avons résolues à l'aide du code de calcul COMSOL.

Le terme --- a été estimé de la même façon qu'au § B-2-1, c'est-à-dire à partir de 2 modèles 2D axisymétriques (réalisés à l'aide du code de calcul COMSOL) permettant de résoudre l'équation de la chaleur respectivement pour une cavité sphérique de rayon R_c et pour une cavité cylindrique de rayon R_c et de hauteur H_c . Par ailleurs, le volume de la cavité est à nouveau solution de l'équation (B29).

B-5-2. Résultats de simulation obtenus dans les conditions de référence

L'évolution de la pression de saumure dans une cavité où l'ensemble des phénomènes décrits précédemment sont pris en compte (dilatation + fluage + percolation) est représentée par la courbe rouge sur la Figure B36. Afin d'apprécier la contribution de chaque phénomène sur l'évolution obtenue, nous comparons ce résultat avec les évolutions obtenues dans les cas où ces phénomènes sont pris en compte séparément ou deux à deux. Les paramètres de simulation sont ceux d'une cavité « moyenne », à savoir :

- volume initial $V_{init}=150\,000\text{ m}^3$;
- profondeur $h=1000\text{ m}$;
- paramètres de fluage caractéristiques d'un sel « standard » : $n=5$; $Q/R=7000\text{ K}$; $A=1000\text{ année}^{-1}$;
- perméabilité du sel : $K=10^{-19}\text{ m}^2$

Par ailleurs, on se place ici dans les conditions que nous appellerons conditions de référence :

- température moyenne initiale de la saumure : $T_S^{(t=0)}=12^\circ\text{C}$
- pression moyenne initiale de la saumure : halmostatique $P_S^{(t=0)}=11,7\text{ MPa}$
- compressibilité de la cavité remplie de saumure : $\beta = 4 \cdot 10^{-4}\text{ MPa}^{-1}$

Ces conditions de référence sont celles que nous ferons varier lorsque nous en viendront à étudier des stratégies d'abandon alternatives (§ B-7).

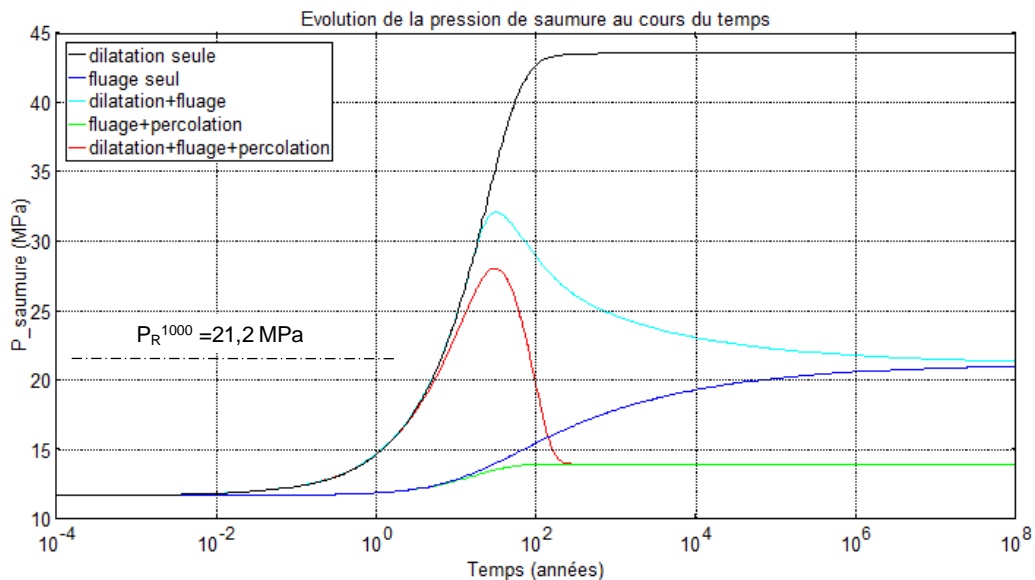


Figure B36 : Evolution de la pression de saumure P_s en fonction du temps obtenue suivant que l'on prenne en compte séparément ou conjointement les différents phénomènes (dilatation, fluage, percolation – convection négligée)

On retrouve sur la Figure B36 les éléments essentiels suivants, dont certains on déjà été mis en avant aux paragraphes précédents :

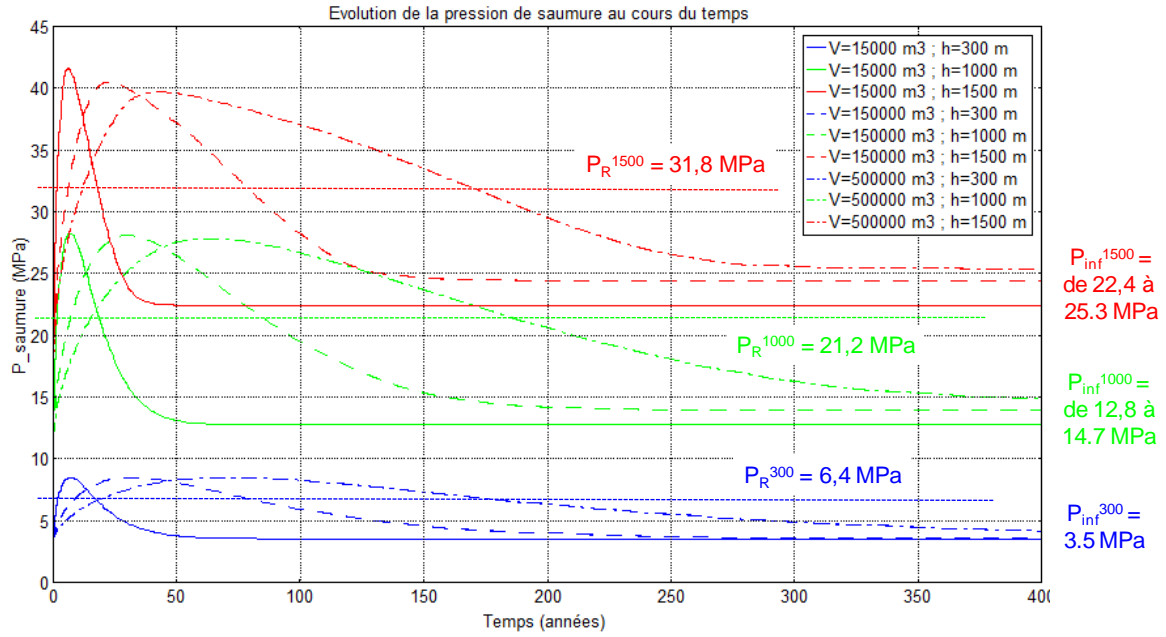
- le phénomène de fluage, en conditions de cavité fermée, a pour effet de générer une augmentation de la pression en cavité. S'il n'y a aucune percolation de la saumure à travers le massif de sel (ou le long du puits), la pression en cavité finit par rejoindre, après un temps extrêmement long, la pression lithostatique (voir courbes bleues) ;
- l'ajout du phénomène de percolation (courbe verte) a pour effet de réduire le temps d'atteinte de l'équilibre et la valeur de la pression d'équilibre, qui va alors se situer entre la pression halmostatique et la pression lithostatique ;
- l'ajout supplémentaire de la dilatation thermique (courbe rouge) ne va pas avoir d'impact sur la pression d'équilibre à long terme mais va avoir pour effet de générer une augmentation transitoire de la pression en cavité qui peut aisément dépasser la pression lithostatique ($P_R=21,2$ MPa dans l'exemple de la Figure B36). Par ailleurs, le temps nécessaire pour atteindre la pression d'équilibre sera sensiblement augmenté. Si l'on prend l'exemple d'une cavité « moyenne » ($h=1000$ m, $V=150\,000$ m³, paramètres de fluage moyens), celui-ci est de 210 ans lorsque la dilatation thermique est prise en compte (Figure B37) alors qu'il n'est que de 60 ans dans le cas inverse (Figure B17).

La dilatation thermique de la saumure ayant un effet extrêmement transitoire et s'opérant sur quelques centaines d'années tout au plus, elle n'aura aucune incidence notable sur le volume de la cavité, dont l'évolution s'opère sur des échelles de temps beaucoup plus grandes (temps de fermeture entre 10^3 - 10^4 ans et 10^7 - 10^8 ans selon les conditions). Ceci est illustré sur la Figure B48, où l'on remarque que l'évolution du volume de la cavité est la même selon que l'on prend en compte ou non la dilatation thermique dans la simulation. On note également, à titre anecdotique, que pendant la phase où la pression dépasse la pression lithostatique du fait de la dilatation thermique de la saumure, la cavité s'ouvre et augmente de volume de manière transitoire.

Les paramètres impactant la durée du pic de pression liée à la dilatation thermique vont être ceux qui influent sur la durée de l'augmentation de température dans la cavité, à savoir principalement la dimension et la forme de la cavité. On peut voir sur la Figure B37 que le pic de pression lié à l'effet thermique est beaucoup plus étalé dans le temps, dans le cas d'une grande cavité ($500\,000$ m³) que dans le cas d'une petite cavité ($15\,000$ m³), conformément au fait que la saumure met beaucoup plus de temps à se réchauffer dans le premier cas que dans le deuxième (voir Figure B2). Pour les mêmes raisons, le pic de pression est plus étalé dans le temps dans le cas d'une cavité peu élancée ($f=1$) que dans le cas d'une cavité très élancée ($f=5-10$) (voir Figure B49). En revanche, l'amplitude du pic de pression, c'est-à-dire la valeur maximum P_{max} atteinte au cours du temps, n'a pas de corrélation systématique avec le volume de la cavité (voir Figure B37).

Enfin, en ce qui concerne le débit de saumure sortant de la cavité, celui-ci étant déterminé, conformément aux équations (B20) et (B21), par le différentiel de pression $P_S(t)-P_0$ entre la cavité et le massif environnant, il va suivre une évolution qui aura la même forme que celle de la pression. L'évolution du débit au cours du temps est présentée sur les Figures 50 et 51. On y retrouve un pic de débit, identique à celui observé pour la pression, puis une stabilisation sur un débit d'équilibre identique à celui correspondant au cas où le fluage et la percolation sont considérés.

- a -



- b -

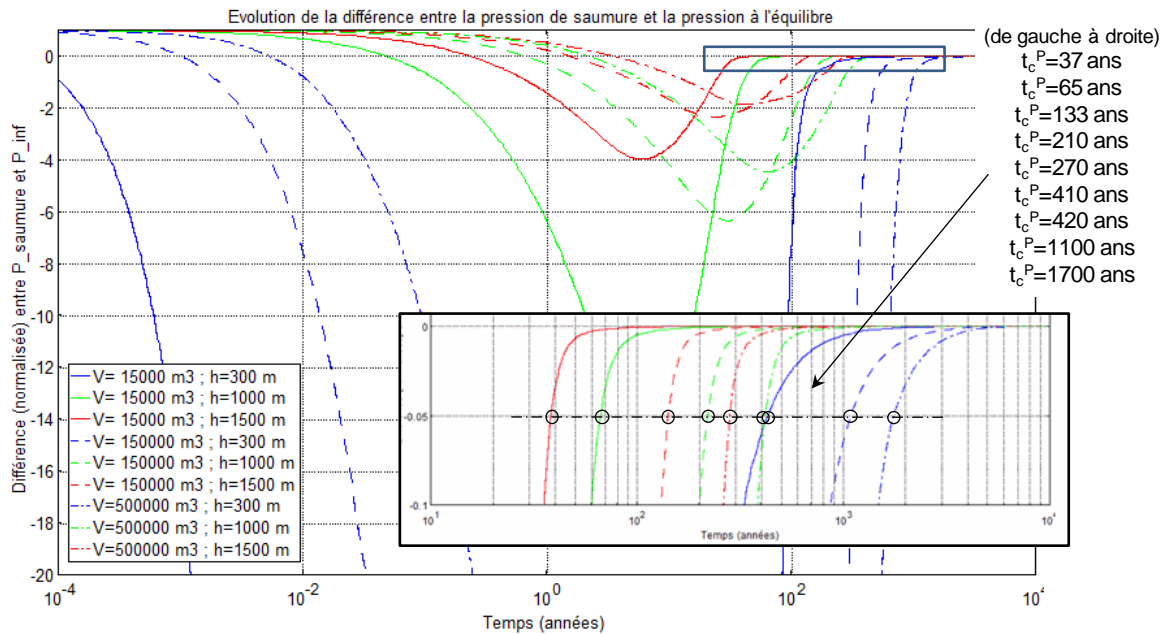
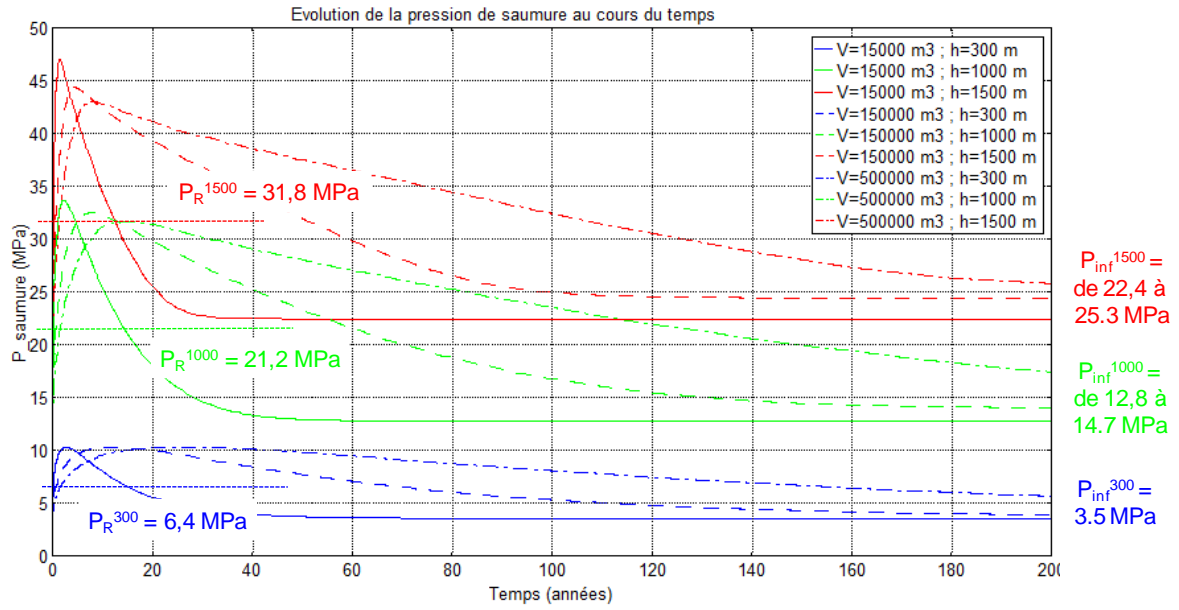


Figure B37 : Impact du volume initial de la cavité $V_{(t=0)}$ et de sa profondeur h sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) et pour une perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$ (dilatation thermique, fluage et percolation – convection négligée)

- a -



- b -

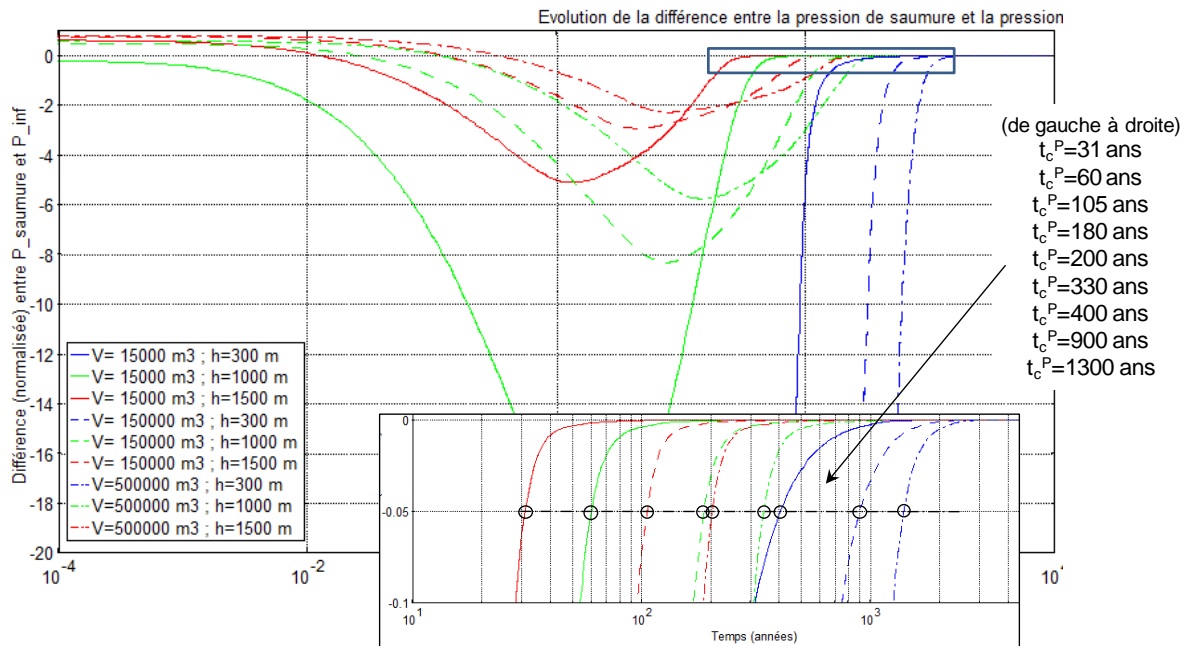


Figure B38 : Impact du volume initial de la cavité $V_{(t=0)}$ et de sa profondeur h sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'un fluage moyen ($m=5$; $Q/R=7000$ K ; $A=1000$ année⁻¹), d'une perméabilité du sel $K=10^{-19}$ m² (dilatation thermique, fluage et percolation – convection pris en compte en supposant que la conductivité de la saumure est infinie)

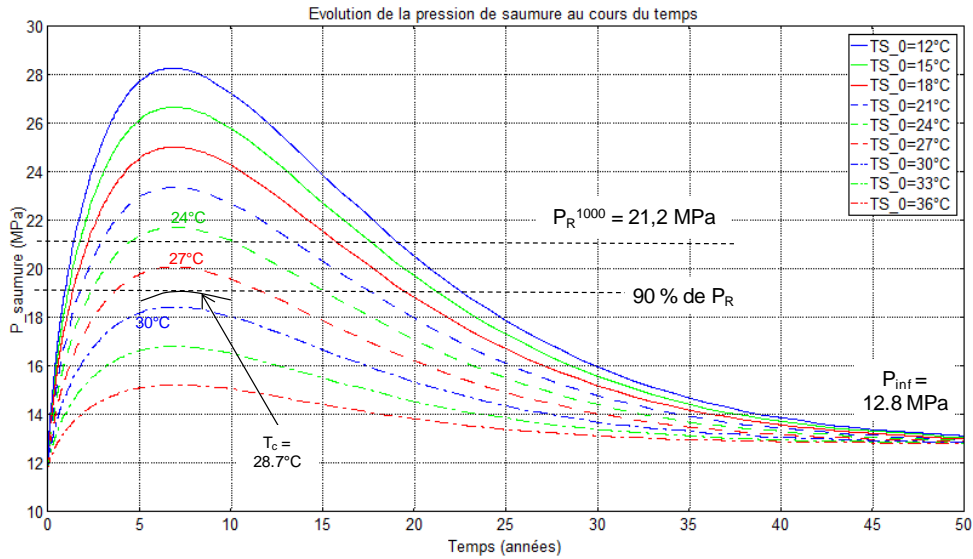


Figure B39 : Impact de la température initiale de la saumure sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=15000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage + percolation + dilatation thermique – convection négligée)

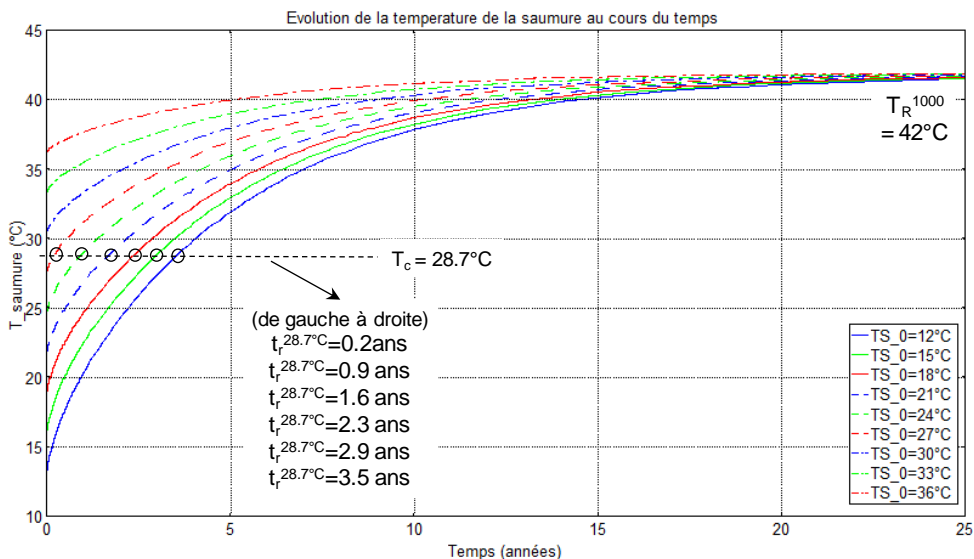


Figure B40 : Impact de la température initiale de la saumure sur l'évolution de la température de la saumure T_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=15000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) et d'une perméabilité du sel de $K=10^{-19} \text{ m}^2$ (fluage + percolation + dilatation thermique – convection négligée)

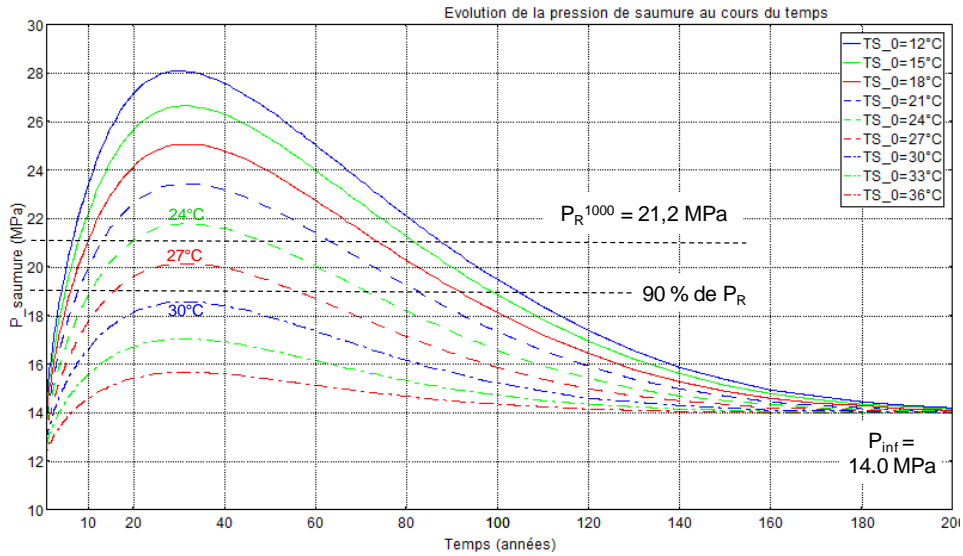


Figure B41 : Impact de la température initiale de la saumure sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage + percolation + dilatation thermique – convection négligée)

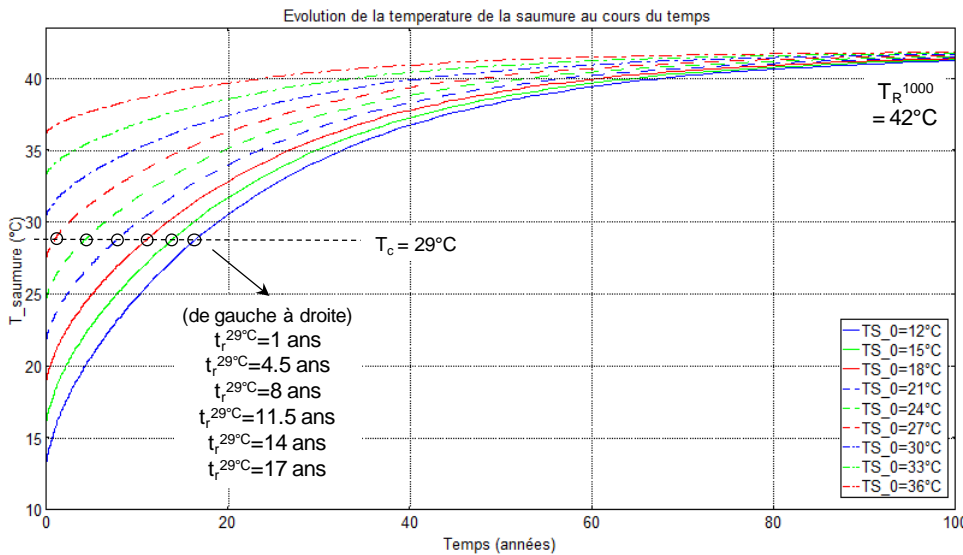


Figure B42 : Impact de la température initiale de la saumure sur l'évolution de la température de la saumure T_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ et pour un sel de fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) et de perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$ (fluage + percolation + dilatation thermique – convection négligée)

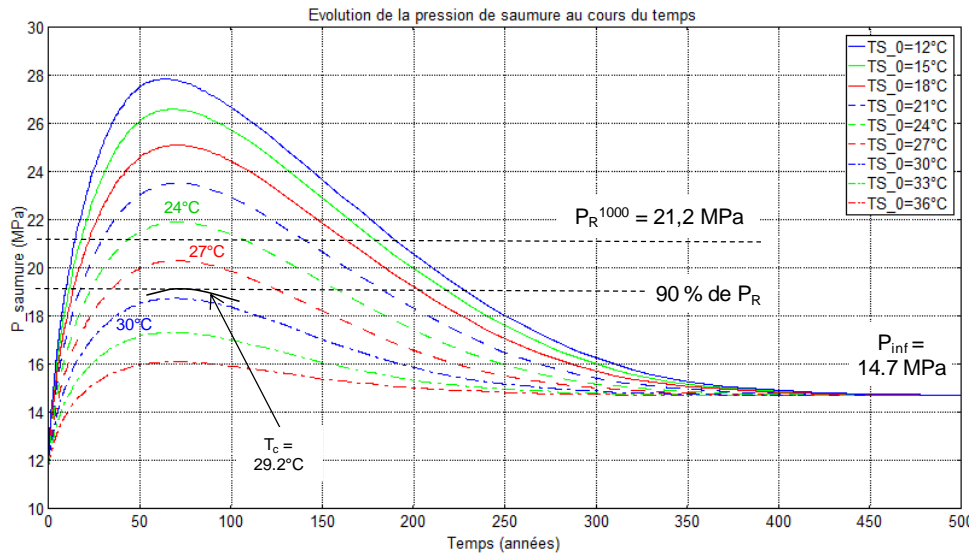


Figure B43 : Impact de la température initiale de la saumure sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=500000\text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000\text{ m}$ et pour un sel de fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000\text{ K}$; $A=1000\text{ année}^{-1}$) (fluage + percolation + dilatation thermique – convection négligée)

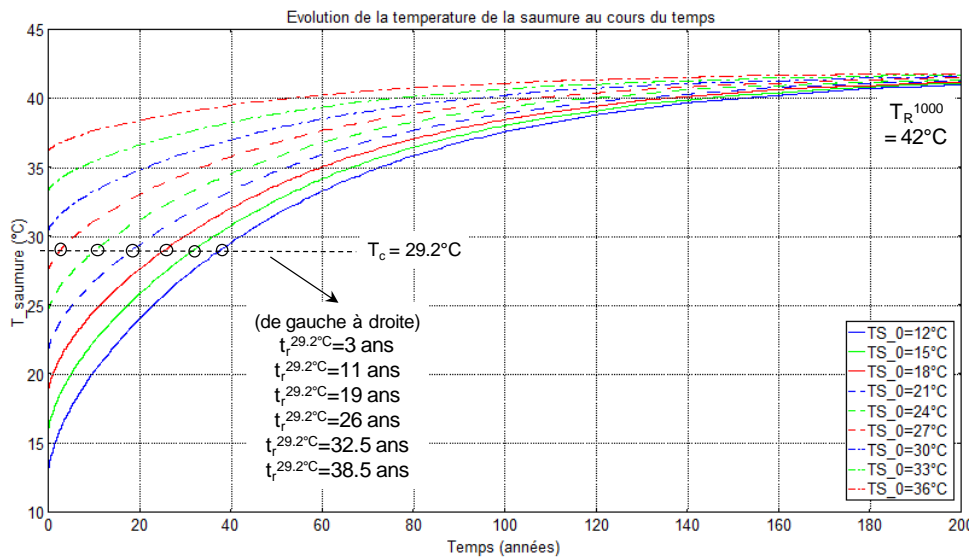


Figure B44 : Impact de la température initiale de la saumure sur l'évolution de la température de la saumure T_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=500000\text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000\text{ m}$ et pour un sel de fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000\text{ K}$; $A=1000\text{ année}^{-1}$) et de perméabilité $K=10^{-19}\text{ m}^2$ (fluage + percolation + dilatation thermique – convection négligée)

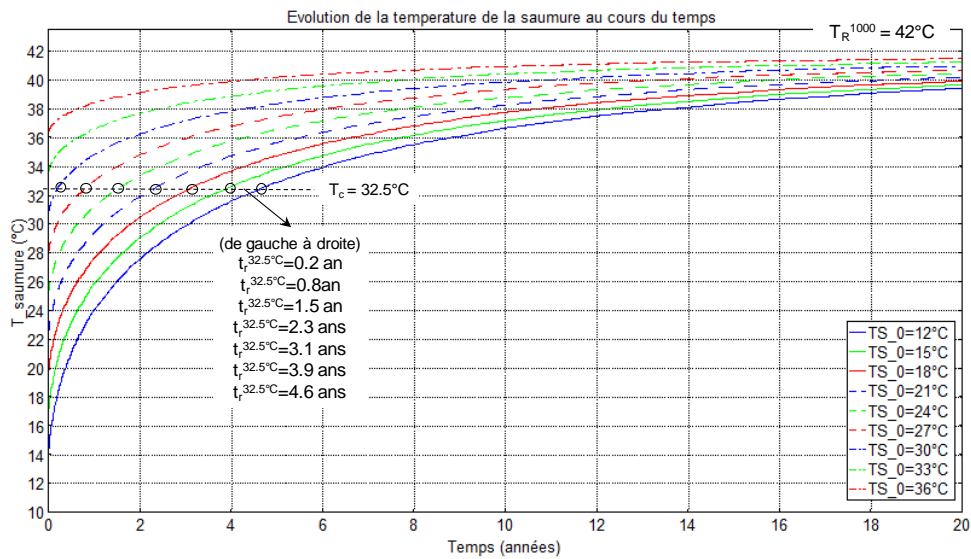


Figure B45 : Impact de la température initiale de la saumure sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ pour un sel de fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage + percolation + dilatation thermique – convection pris en compte en supposant que la conductivité de la saumure est infinie)

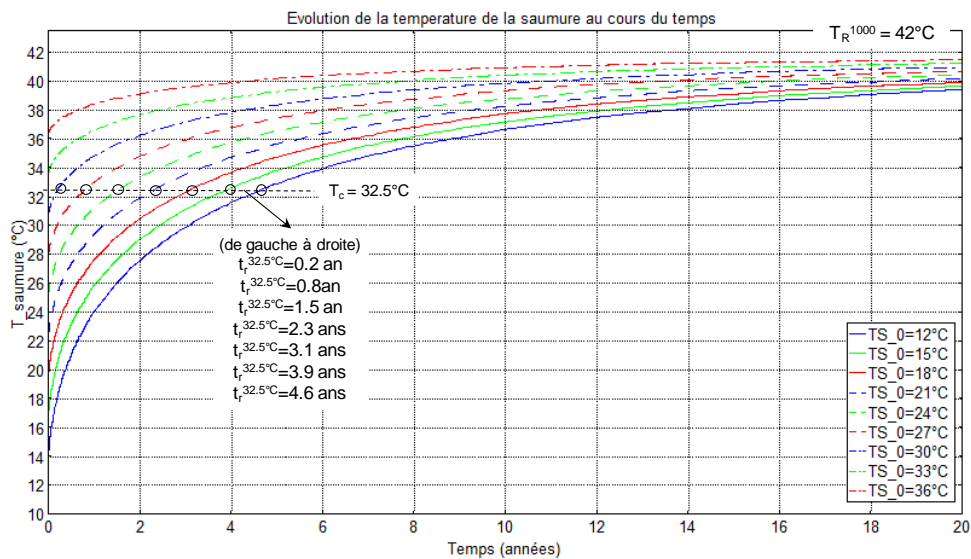
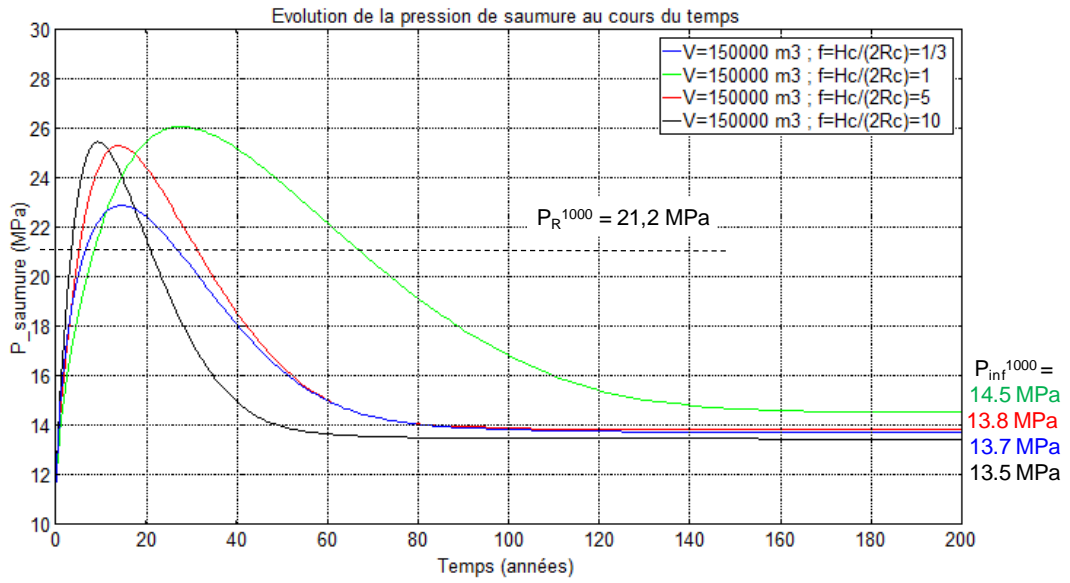


Figure B46 : Impact de la température initiale de la saumure sur l'évolution de la température de la saumure T_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$, pour un sel de fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) et de perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$ (fluage + percolation + dilatation thermique – convection pris en compte en supposant que la conductivité de la saumure est infinie)

- a -



- b -

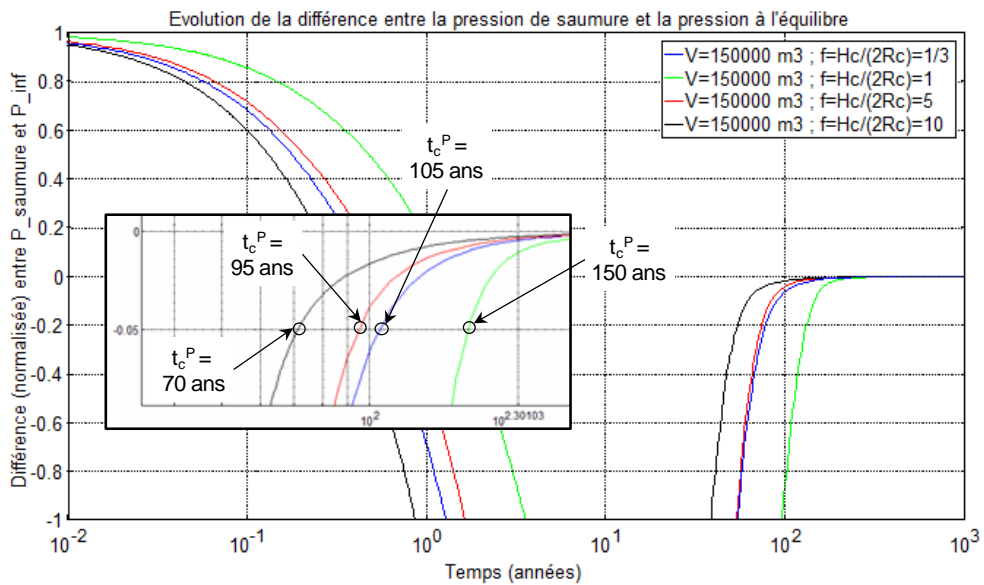


Figure B47 : Impact du ratio f entre la hauteur de la cavité et son diamètre sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité cylindrique de volume $V = 150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ et pour un sel de fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) et de perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$ (dilatation thermique, fluage et percolation – convection négligée)

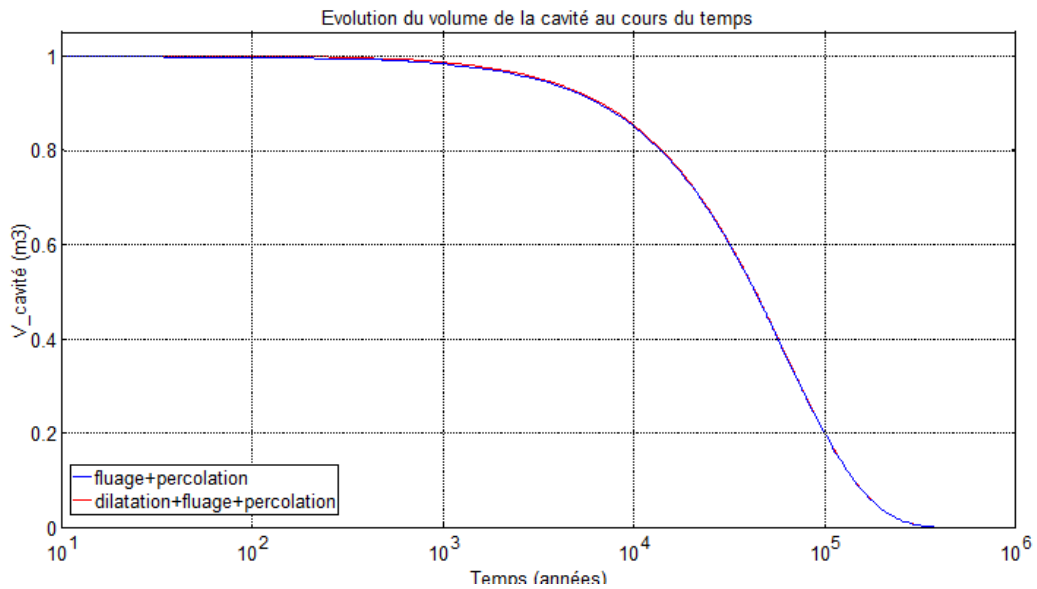


Figure B48 : Evolution du volume V de la cavité en fonction du temps suivant que l'on prenne en compte ou non la dilatation thermique

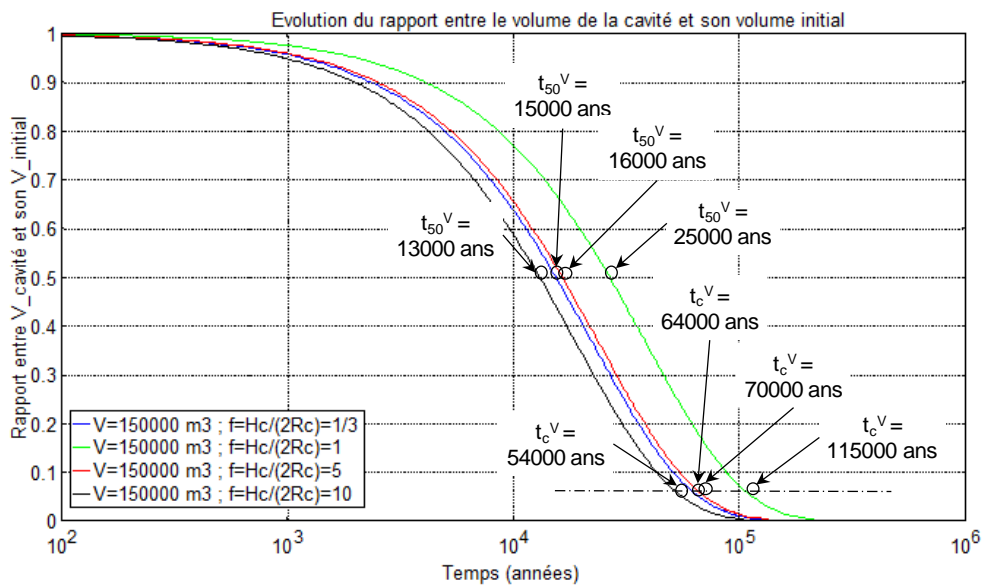


Figure B49 : Impact du ratio f entre la hauteur de la cavité et son diamètre sur l'évolution du volume de la cavité V au cours du temps dans le cas d'une cavité cylindrique de volume $V_{init} = 150000 m^3$ (dilatation thermique, fluage et percolation – convection négligée)

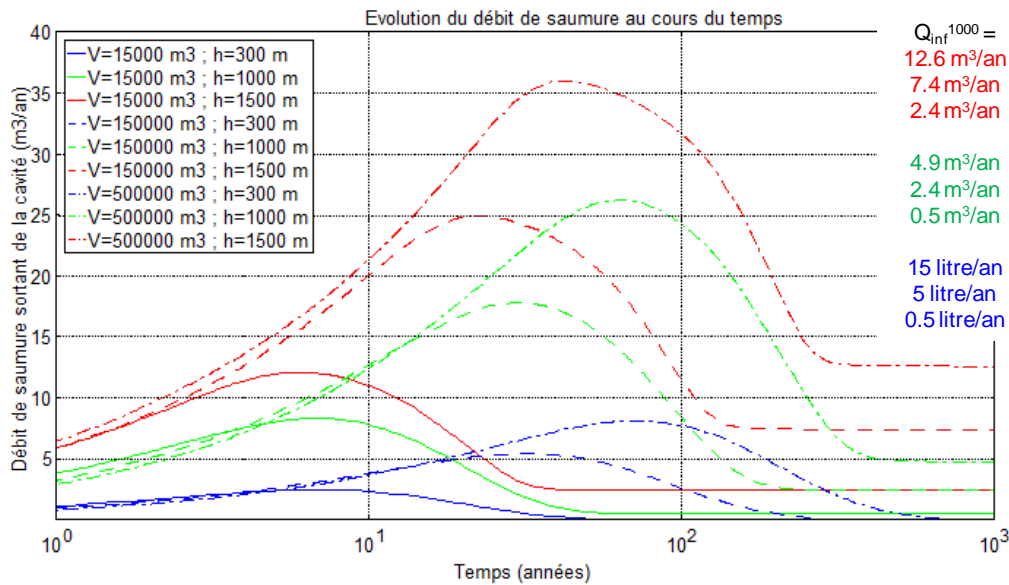


Figure B50 : Impact du volume initial de la cavité $V_{(t=0)}$ et de sa profondeur h sur l'évolution du débit de saumure Q au cours du temps dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000$ K ; $A=1000$ année⁻¹) pour une perméabilité $K=10^{-19}$ m² (dilatation thermique, fluage et percolation – convection négligée)

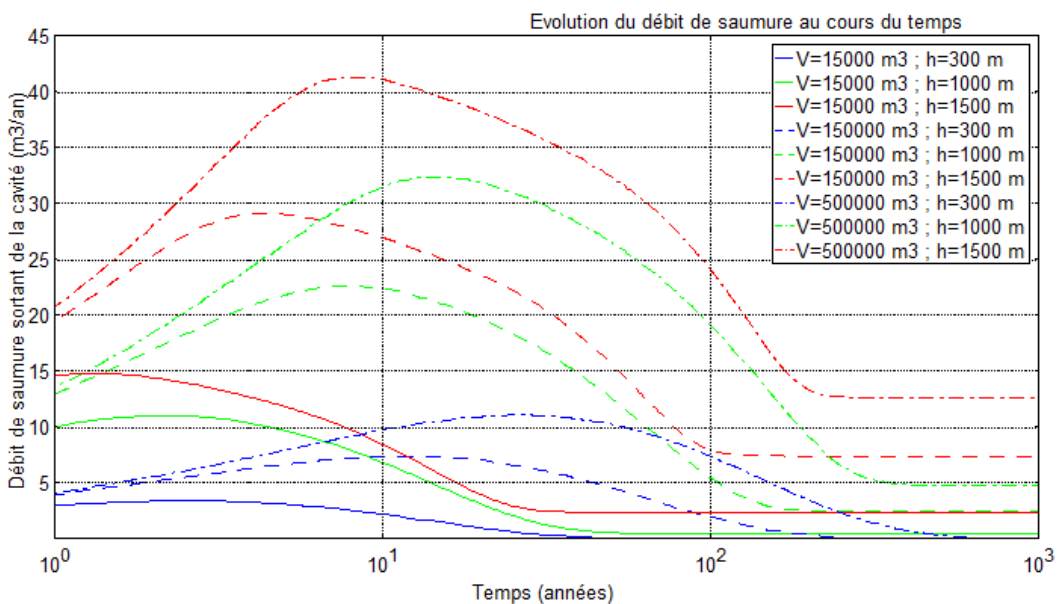


Figure B51 : Impact du volume initial de la cavité $V_{(t=0)}$ et de sa profondeur h sur l'évolution du débit de saumure Q au cours du temps dans le cas d'un fluage moyen ($m=5$; $Q/R=7000$ K ; $A=1000$ année⁻¹), d'une perméabilité du sel $K=10^{-19}$ m² (dilatation thermique, fluage et percolation – convection pris en compte en supposant que la conductivité de la saumure est infinie)

B-6. EFFET DES FUITES PAR LE PUIITS

La question du vieillissement et de l'étanchéité à long terme des puits abandonnés est une question prégnante dans un grand nombre de domaines : sécurité à long terme du stockage géologique de déchets radioactifs, abandon des forages pétroliers, sécurité et efficacité du stockage géologique du CO₂, etc.

La problématique de l'abandon des cavités de stockage dans le sel n'échappe pas à cette question dans la mesure où les cavités abandonnées seront amenées, dans la plupart des cas, à perdurer dans le sous-sol à des échelles de temps géologiques. Il est donc légitime de vouloir évaluer l'impact, tant sur le plan du comportement mécanique de la cavité que de celui de la qualité des eaux environnantes, que pourrait avoir une perte d'étanchéité du puits sur le long terme.

B-6-1. Equations descriptives retenues dans le modèle

Certains auteurs considèrent que la contribution des fuites par le puits au débit total de saumure sortant de la cavité est négligeable du fait que la section du puits est extrêmement faible par rapport à la surface totale de la cavité (par ex. Crotagino et Kepplinger, 2006).

Une première estimation du débit de fuite par le puits d'injection peut être réalisée en supposant :

- que la saumure percole à travers une section correspondant à la section du bouchon de ciment mis en place dans le puits après abandon ;
- que le bouchon a une perméabilité homogène K_{puits} constante égale à la perméabilité à long terme du bouchon de scellement (donc celle d'un ciment dégradé).

Dans ce cas le débit sortant à travers le bouchon est :

$$\text{---} \quad (B32)$$

en supposant, comme précédemment pour l'estimation du débit de saumure percolant dans le sel (voir equation 11), que le gradient de pression peut être estimé comme suit :

$$\text{-----} \quad (B33)$$

Dans ce cas le ratio entre le débit de fuite par le puits et le débit de saumure percolant dans la couche de sel est :

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (B34)$$

avec :

- (où est le rayon du puits) ;
- (dans le cas d'une cavité sphérique de rayon R_c)

B-6-2. Simulations élémentaires illustrant le phénomène

Si on raisonne uniquement en ordres de grandeurs, on peut considérer que le rayon d'un puits est de l'ordre de 10^{-1} m à sa base et que le rayon équivalent d'une cavité est de l'ordre de 10 m pour une petite cavité et de 100m pour une grande cavité. Le rapport s/S est donc de l'ordre de 10^{-5} pour une petite cavité et de 10^{-7} pour une grande cavité. La Figure B52 présente ainsi l'ordre de grandeur du rapport $Q_{\text{puits}}/Q_{\text{sel}}$ en fonction des valeurs de K_{puits} et de K_{sel} . Et pour une petite et une grande cavité, respectivement.

On considère en général qu'un ciment sain a une perméabilité de 10^{-14} m² et que lorsqu'il se dégrade, sa perméabilité peut augmenter de plusieurs ordres de grandeur jusqu'à atteindre des perméabilités de 10^{-10} m², voire plus. L'axe des abscisses (K_{puits}) peut donc aussi être vu comme l'axe du temps.

Globalement, on constate que les fuites par le puits sont rarement négligeables par rapport à celles liées à la percolation dans le sel. Il faut pour cela que le ciment soit relativement sain ($K_{\text{puits}}=10^{-14}$ - 10^{-13} m²) et que la perméabilité du sel soit relativement importante ($K_{\text{sel}}=10^{-17}$ - 10^{-18} m²). Les fuites par le puits sont même le plus souvent prédominantes (notamment dans le cas d'une petite cavité) ou tendent à le devenir avec le temps au fur et à mesure que le ciment se dégrade.

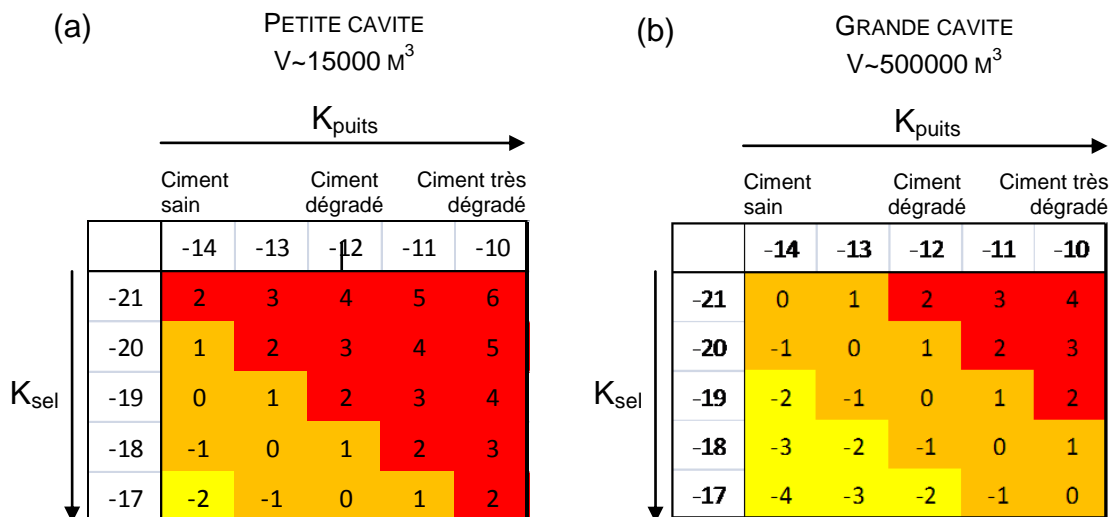


Figure B52 : Rapport $Q_{\text{puits}}/Q_{\text{sel}}$ entre le débit de fuite par le puits et le débit de saumure sortant de la cavité par le sel en fonction des valeurs de perméabilité respectives du puits et du sel (a) pour une petite cavité ($V\sim 15000$ m³) et (b) une grande cavité ($V\sim 500000$ m³). Les chiffres correspondent à des puissances de 10. Les cases rouges indiquent les situations où les fuites par le puits dominent, les cases jaunes indiquent celles où les fuites par le puits sont négligeables et les cases oranges indiquent celles où Q_{puits} et Q_{sel} sont du même ordre.

Afin de prendre en compte les fuites par le puits dans l'évolution à long terme de la cavité, une approche simple consiste à utiliser les mêmes formulations que précédemment (équations (B20) et (B21)), en remplaçant la perméabilité K par la perméabilité équivalente K_{eq} du puits et du sel définie par :

La Figure B53 représente l'ordre de grandeur de la perméabilité équivalente de l'ensemble puits+massif en fonction des perméabilités respectives du puits et du massif de sel. On constate que lorsque la perméabilité du sel est grande (10^{-17} m²), la présence du puits modifie assez peu la perméabilité globale (sauf si le puits est très dégradé). En revanche, lorsque la perméabilité du sel est faible, le puits a un impact très important sur la perméabilité globale. Pour illustration, dans le cas d'une petite cavité et pour un sel de perméabilité 10^{-20} m², l'effet d'un puits dégradé (10^{-11} m²) revient à augmenter de 4 ordres de grandeur la perméabilité globale qui se trouve alors être de 10^{-16} m².

L'impact des fuites par le puits sur l'évolution de la pression en cavité, du débit de saumure sortant de la cavité ou de la vitesse de convergence de la cavité peut être évaluée en comparant l'évolution de ces grandeurs pour une valeur croissante de la perméabilité (voir par exemple Figure B17). Comme on peut le voir, l'impact de ces fuites est de faire tendre la pression d'équilibre de la cavité vers la pression halmostatique (Figure B17), d'accélérer la convergence de la cavité (Figure B24) et d'augmenter le débit de saumure sortant de la cavité et (Figure B30).

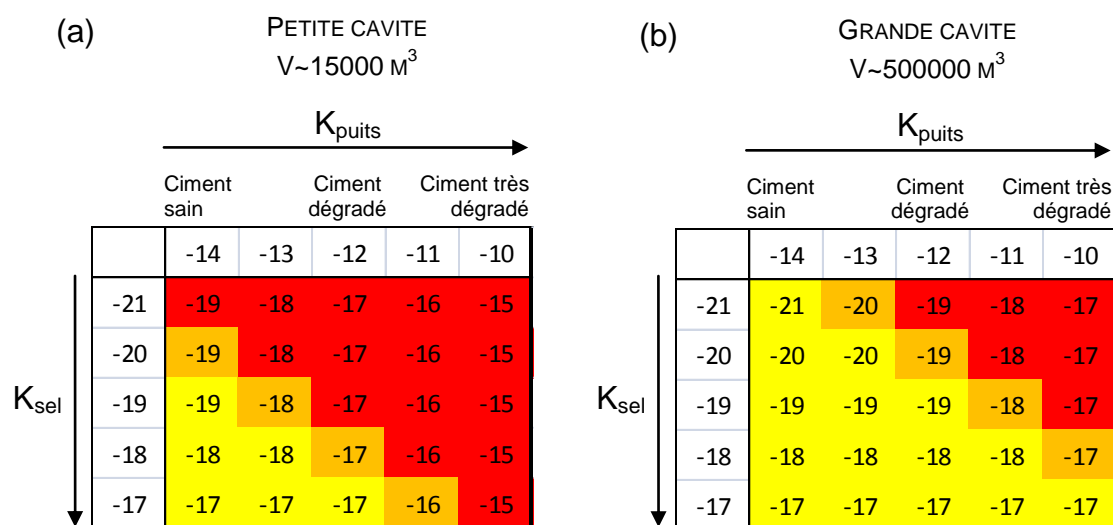


Figure B53 : Perméabilité équivalente K_{eq} en fonction des perméabilités respectives du sel et du puits (a) pour une petite cavité ($V \sim 15000$ m³) et (b) une grande cavité ($V \sim 500000$ m³). Les chiffres correspondent à des puissances de 10. Les cases jaunes indiquent les cas où la perméabilité équivalente est la même que celle du sel, les cases oranges celles où elle est supérieure d'1 ordre de grandeur à celle du sel et les cases rouges celles où elle est supérieure de 2 ordres de grandeur et plus à celle du sel.

B-7. STRATEGIES PERMETTANT DE REDUIRE LE DELAI DE FERMETURE D'UNE CAVITE DANS LE SEL

B-7-1. Diminuer la pression initiale de la saumure

Afin d'éviter que la pression de saumure ne dépasse la pression lithostatique sous l'effet de la dilatation thermique de la saumure, une première idée qui vient logiquement à l'esprit consiste à fermer la cavité avec une pression initiale inférieure à la pression halmostatique. L'inconvénient de cette solution est le faible soutènement qui va s'appliquer aux parois de la cavité pendant les premiers temps du réchauffement de la saumure. Il faut alors s'assurer que la cavité est dimensionnée pour accepter une faible pression interne pendant le temps nécessaire au retour à équilibre³⁵.

Afin d'apprécier le bénéfice que l'on peut attendre d'une telle opération, nous avons simulé l'évolution de la pression en cavité pour des valeurs décroissantes de la pression initiale (en partant de la pression halmostatique et en allant jusqu'à une pression nulle). Pour cette simulation, nous nous sommes placés dans un contexte « moyen » de cavité :

- cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$
- profondeur $h=1000 \text{ m}$
- sel moyennement fluant ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$)
- perméabilité du sel : $K=10^{-19} \text{ m}^2$
- température initiale de saumure de 12°C

Nous constatons sur la Figure B54 que la différence, en terme de pression maximale atteinte en cavité, entre un cas où la pression initiale est halmostatique et un cas où celle-ci est nulle, est de 3,4 MPa.

Cette solution peut donc se révéler relativement intéressante puisqu'elle permet de réduire le temps de réchauffement naturel nécessaire pour pouvoir fermer la cavité dans de bonnes conditions de sécurité. Nous montrons en effet sur les Figures B56 et B57 que pour une cavité de $150\,000 \text{ m}^3$, baisser la pression initiale, par exemple à 1/3 de la pression halmostatique, permet de réduire le délai de fermeture de 17 ans à 10,5 ans, soit une réduction de près de 40%.

A titre anecdotique, on peut remarquer sur la courbe d'évolution du débit (Figure B55) que cette solution s'accompagne de débits négatifs les premières années, du fait que la pression initiale est inférieure à P_0 .

³⁵ D'après P. Berest (communication personnel) : « cette méthode n'est pas facile à mettre en œuvre. Pour diminuer la pression jusqu'au tiers de la pression halmostatique, il faut descendre l'interface air-saumure dans le puits jusqu'aux 2/3 de la profondeur du puits (avec une pompe immergée par exemple) puis, soit poser un bouchon au dessus de l'interface, soit laisser l'interface remonter (cela revient à augmenter un peu la compressibilité de la caverne tant que l'interface n'est pas au niveau de la surface). Tant qu'à faire, il faudrait donc enlever dès l'origine avec une telle pompe une grande quantité de saumure et imposer une pression nulle dans la cavité. L'exploitant répugnera souvent à une telle solution qui présente des risques pour la stabilité de la caverne. Enfin la réduction initiale de pression déclenche un fluage transitoire assez violent qui n'est pas pris en compte par les formules utilisées qui sont relatives au fluage établi. »

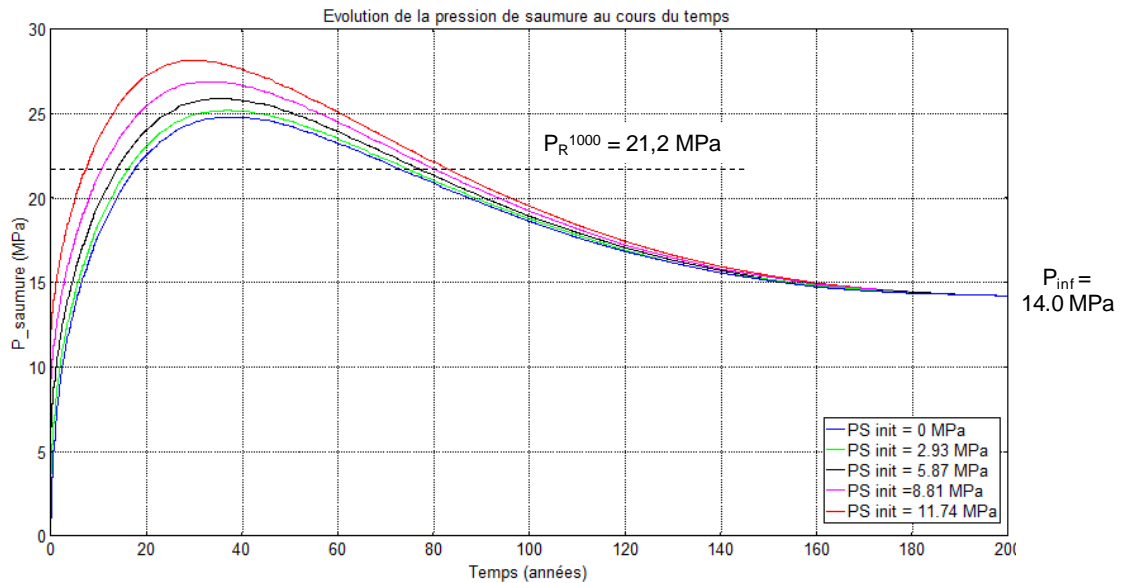


Figure B54 : Impact de la pression de saumure initiale sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume initial $V_{(t=0)}=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage + percolation + dilatation thermique – convection négligée)

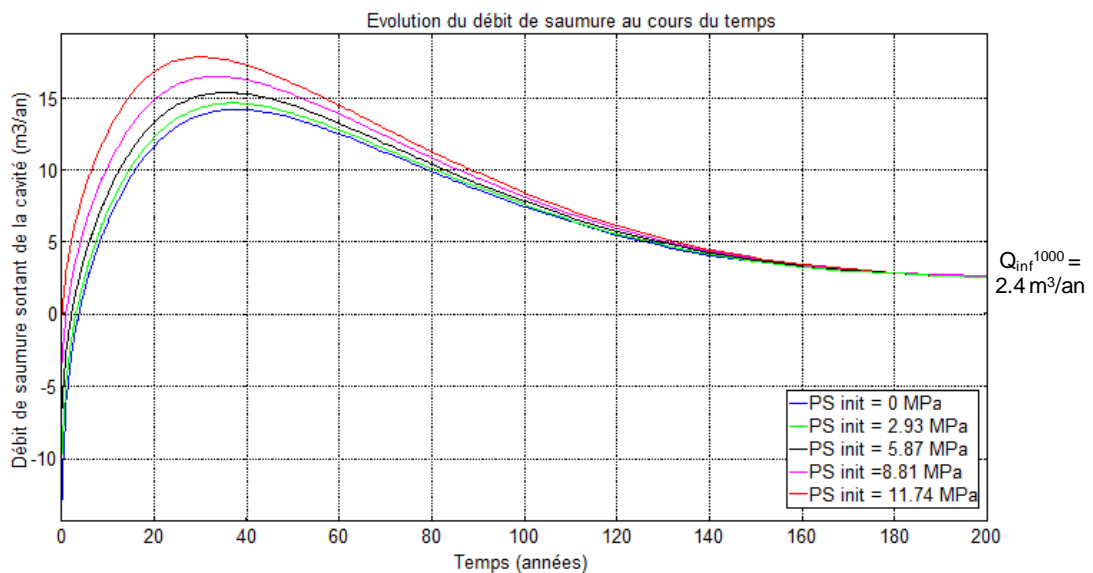


Figure B55 : Impact de la pression de saumure initiale sur l'évolution du débit de saumure Q percolant dans le sel au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume initial $V_{(t=0)}=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (fluage + percolation + dilatation thermique – convection négligée)

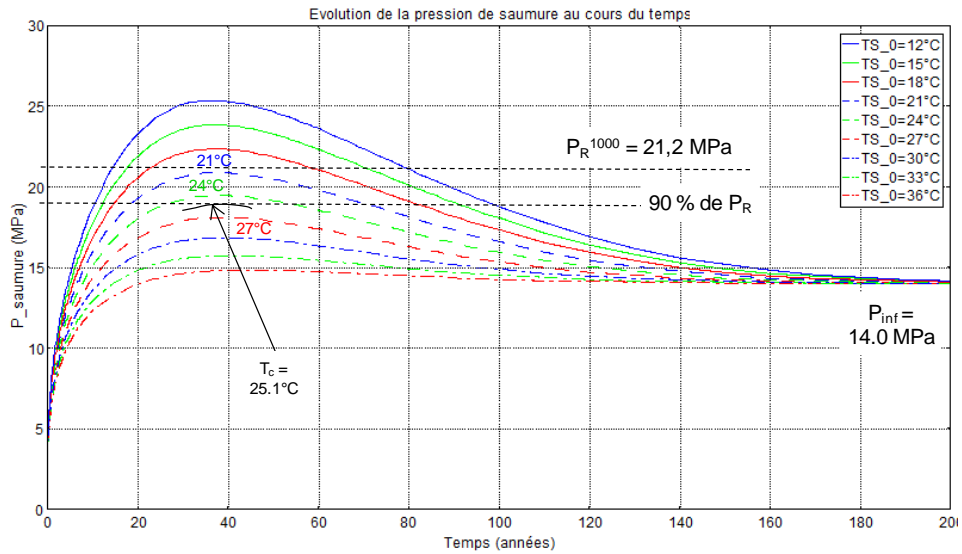


Figure B56 : Impact de la température initiale de la saumure sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume initial $V_{init}=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ pour un fluage moyen ($m=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) et d'une pression initiale égale à $P_0/3$ (fluage + percolation + dilatation thermique – convection négligée)

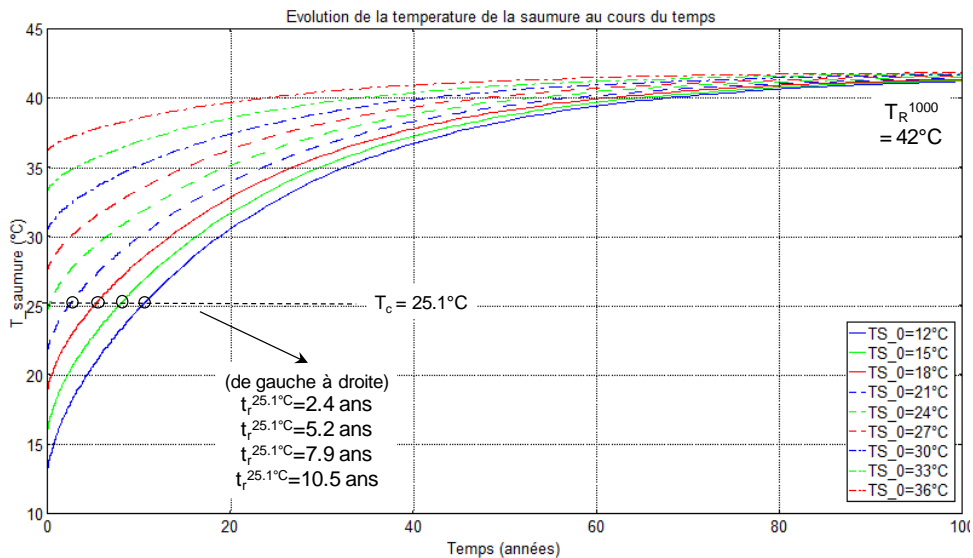


Figure B57 : Impact de la température et pression initiale de la saumure sur l'évolution de la température de la saumure T_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ pour un fluage moyen ($m=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) et d'une pression initiale égale à $P_0/3$ (fluage + percolation + dilatation thermique – convection négligée)

B-7-2. Réchauffer la saumure avant de l'injecter en cavité

Une stratégie évidente, mais assez coûteuse, pour réduire le délai de fermeture de la cavité consiste à réchauffer la saumure avant de l'injecter dans la cavité [Bérest et al., 2006].

Pour donner un ordre de grandeur du coût lié au réchauffement de la saumure, l'énergie ΔW (kWh) nécessaire à un générateur-échangeur de chaleur pour réchauffer de ΔT (°C) un volume V de saumure peut être estimée comme suit (d'après Crotogino, 2006) :

$$\text{-----} \quad (B36)$$

avec :

- η l'efficacité du pré-chauffeur
- $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ la densité de l'eau
- $C_w=4200 \text{ J/kg}$ la chaleur spécifique de l'eau

Le coût correspondant, sur la base d'un prix du kWh à $5\text{€}/100 \text{ kWh}^{36}$ est donné par :

$$\text{-----} \quad (B37)$$

Afin d'illustrer sur un exemple le bilan coût/bénéfice d'un réchauffement préalable de la saumure, nous présentons sur les Figures B41 et B42 l'évolution de la pression en cavité pour différents choix de température initiale de la saumure. Nous nous plaçons ici dans le cas d'une cavité « moyenne » de profondeur $h=1000 \text{ m}$, de volume $150\,000 \text{ m}^3$, dans un sel de perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$ et de paramètres de fluage « moyens » ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$). Par ailleurs, nous considérons dans cet exemple que la pression maximale P_{max} à ne pas dépasser est $0.9 \cdot P_R$.

³⁶ Valeur minimale basée sur le prix 2010 du kWh, qui est de 6,12 € pour le gaz de réseau et de 7,12 € pour le fioul domestique (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-energie-et-climat>)

Nous constatons sur la Figure B41 que la température minimale à laquelle la saumure doit être pour pouvoir boucher le puits dans de bonnes conditions de sécurité (c'est-à-dire pour le pic de pression ne dépasse pas $0.9 P_R$) est de 29°C. Si l'on se reporte sur la Figure B42, on peut voir que cette température peut être obtenue de différentes manières :

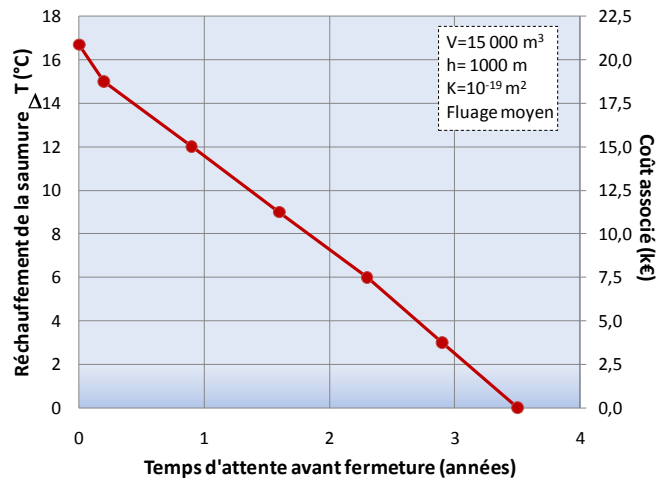
- ne pas réchauffer la saumure et attendre 17 ans pour fermer la cavité.
- réchauffer totalement la saumure jusqu'à 29°C. Dans ce cas, la fermeture de la cavité pourra intervenir rapidement mais le coût estimé en énergie est important : de l'ordre de 215 k€ d'après l'équation (B37).
- toutes les solutions intermédiaires qui consistent à réchauffer partiellement la saumure. Celles-ci sont représentées sur la Figure B58b.

Afin d'illustrer la sensibilité de ces résultats au volume de la cavité, nous avons réalisé des calculs similaires dans le cas de petites cavités ($V=15000 \text{ m}^3$) et de grandes cavités ($V=500000 \text{ m}^3$). Les sorties correspondantes sont fournies sur les et sur les Figures B58a et c. Ces résultats font apparaître que dans les mêmes conditions que celles considérées auparavant (cavité sphérique située à 1000 m de profondeur, sel moyennement fluant, perméabilité de 10^{-19} m^2 , $P_{\max}=0.9 P_R$), le temps nécessaire pour assurer une fermeture de la cavité sans risque que la pression interne ne dépasse $0.9 P$ est seulement de 3,5 ans dans le cas d'une petite cavité alors qu'il faut attendre 38,5 ans dans le cas d'une grande cavité. Dans ce dernier cas, le délai peut être réduit à 3 ans, par exemple, en réchauffant la saumure de 15°C. Mais le coût de ce réchauffement est estimé à 625 k€.

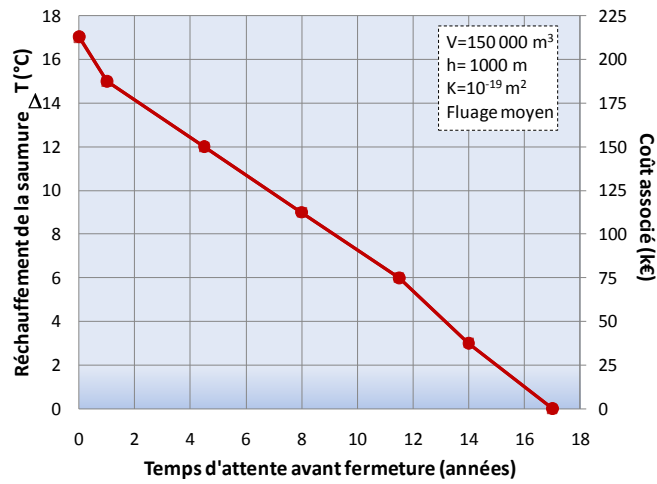
Nous avons également réalisé des calculs en combinant la solution de réchauffement de la saumure avec celle qui consiste à diminuer la pression initiale de la saumure à une valeur équivalente au tiers de la pression halmostatique. Les résultats obtenus pour une cavité de volume $V=150\ 000 \text{ m}^3$ sont fournis sur les Figures B56 et B57 et comparés sur la Figure B59 aux résultats obtenus dans le cas où la pression initiale est halmostatique. On constate que le fait de partir d'une pression initiale de la saumure égale seulement au tiers de la pression halmostatique permet de fermer la cavité (sans réchauffement préalable de la saumure) après 10,4 ans au lieu de 17 ans, soit une réduction du délai de fermeture de près de 40 %.

La pertinence d'un réchauffement préalable de la saumure doit donc être évaluée au regard du contexte du site, du nombre de cavités à traiter, des ressources de l'exploitant et du coût que représenterait le fait de maintenir la cavité ouverte pendant tout le processus de réchauffement naturel de la saumure.

- a -



- b -



- c -

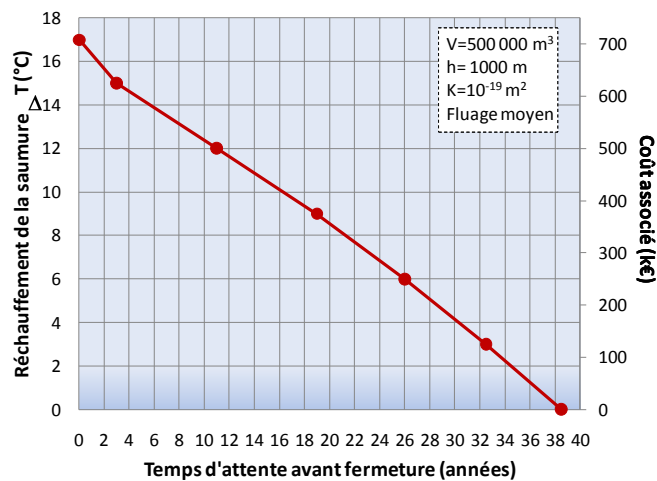


Figure B58 : Exemples de calculs destinés à comparer le coût d'un réchauffement préalable de la saumure par rapport à son bénéfice en terme de réduction du délai de fermeture de la cavité. a : petite cavité, b : moyenne cavité, c : grande cavité

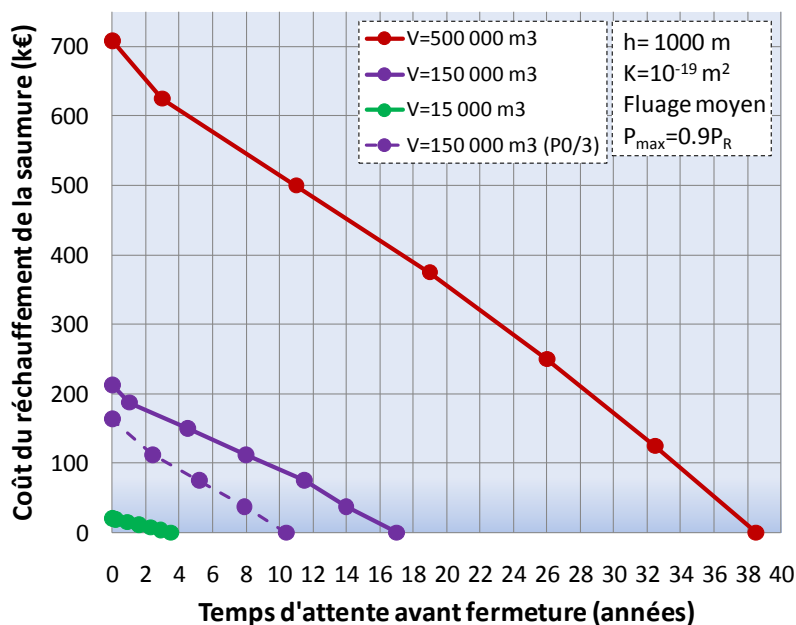


Figure B59 : Exemples de calculs destinés à comparer le coût d'un réchauffement préalable de la saumure par rapport à son bénéfice en terme de réduction du délai de fermeture de la cavité. a : petite cavité, b : moyenne cavité, c : grande cavité

B-7-3. Injecter du gaz dans la cavité pour en augmenter la compressibilité

Il s'agit ici d'augmenter la compressibilité β de la cavité et donc de diminuer l'impact du réchauffement de la saumure sur la pression en cavité, en adjoignant à la saumure une certaine quantité de gaz [Bérest et al., 2006]. Le gaz joue alors un rôle de coussin, qui absorbe l'effet de la dilatation thermique. Notons que cette solution n'a pas encore été testée in situ. Certains auteurs relèvent qu'elle est a priori délicate à mettre en œuvre et n'est pleinement efficace que si le gaz injecté ne s'échappe pas trop vite de la cavité [Crotagino et Kepplinger, 2006].

Afin d'apprécier l'impact de cette solution sur l'évolution de la pression en cavité, nous avons simulé cette évolution dans le cas « moyen » présenté précédemment : cavité sphérique de volume $V=150000 \text{ m}^3$, de profondeur $h=1000 \text{ m}$, de perméabilité $K=10^{-19} \text{ m}^2$, dans un sel moyennement fluant ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$). La température initiale de la saumure est de 12°C et la pression initiale est halmostatique (11,7 MPa).

Nous voyons sur la Figure que la baisse du facteur de compressibilité β de la cavité a un impact très significatif sur le pic de pression. Pour éviter que la pression de saumure ne dépasse $0.9 P_R$, on doit augmenter le facteur de compressibilité β (en injectant du gaz dans la cavité) de la valeur initiale $\beta = 4 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ (sans gaz) à une valeur critique $\beta_c = 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$. D'après Berest et al. [1997], le lien entre la fraction du volume x de la cavité occupé par le gaz et le facteur de compressibilité β est :

$$\beta = 4 \cdot 10^{-4} (1-x) + x/P_s \quad (\text{B38})$$

où P_s est la pression de saumure en MPa.

En prenant $P_s = 0.9 P_R = 19.1 \text{ MPa}$, on obtient : $x = 1.73 \%$.

On conçoit que si la température initiale de la saumure est supérieure ou si la pression initiale de la saumure est inférieure à la pression halmostatique, la quantité de gaz nécessaire pour limiter la pression de saumure au dessous de $0.9 P_R$ sera inférieure.

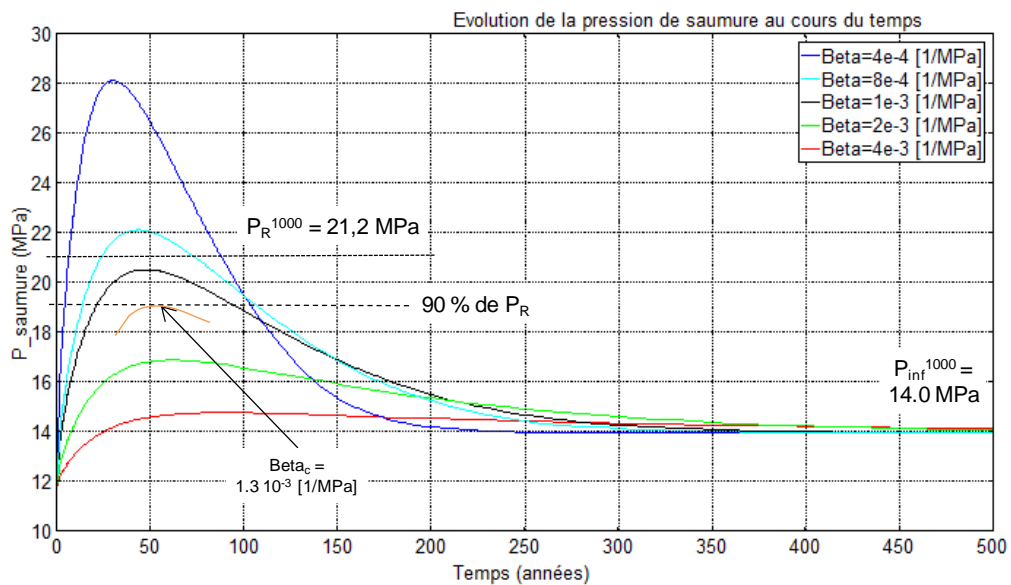
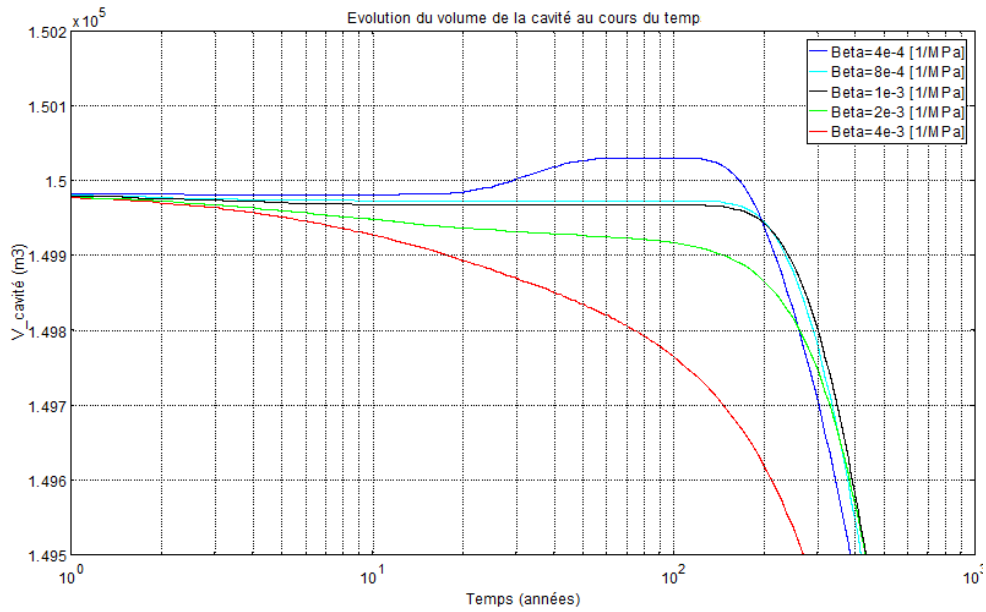


Figure B60 : Impact du facteur de compressibilité β de la cavité sur l'évolution de la pression de saumure P_s au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume initial $V_{(t=0)} = 150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h = 1000 \text{ m}$ dans le cas d'un fluage moyen ($n = 5$; $Q/R = 7000 \text{ K}$; $A = 1000 \text{ année}^{-1}$) (dilatation thermique, fluage et percolation – convection négligée)

Notons que l'évolution du volume de la cavité n'est que temporairement affectée par la valeur du facteur de compressibilité β (Figure B61a).

- a -



- b -

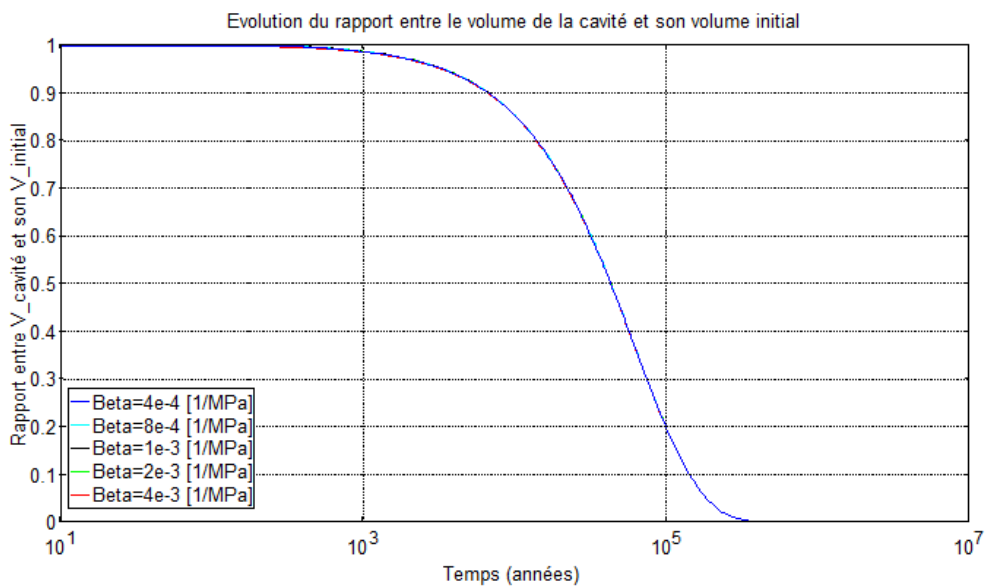
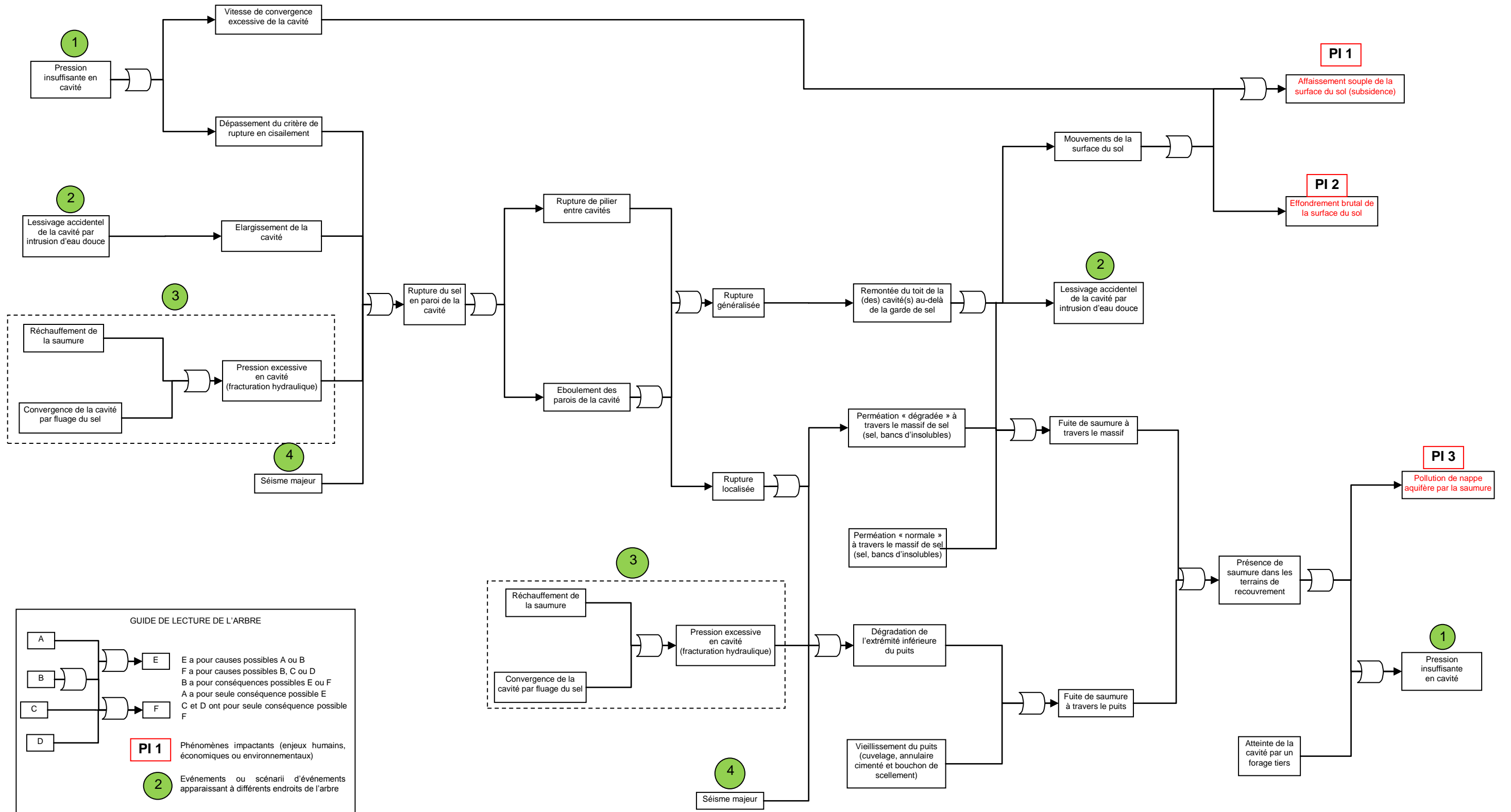


Figure B61 : Impact du facteur de compressibilité β de la cavité sur l'évolution du volume de la cavité V au cours du temps dans le cas d'une cavité sphérique de volume initial $V_{(t=0)}=150000 \text{ m}^3$ située à une profondeur $h=1000 \text{ m}$ dans le cas d'un fluage moyen ($n=5$; $Q/R=7000 \text{ K}$; $A=1000 \text{ année}^{-1}$) (dilatation thermique, fluage et percolation – convection négligée)

ANNEXE C

ARBRE DE SCENARIOS DE RISQUES POUR UN STOCKAGE EN CAVITES LESSIVEES ABANDONNE SELON LA METHODE CLASSIQUEMENT UTILISEE

ARBRE DE SCENARIOS DE RISQUES POUR UN STOCKAGE EN CAVITES LESSIVEES ABANDONNE SELON LA METHODE CLASSIQUE



ANNEXE D
(REDIGEE PAR : P. BEREST ET B. BROUARD)

**ESSAIS D'ABANDON CONDUITS EN APPUI DE LA MODELISATION DE
L'EVOLUTION A LONG TERME DES CAVERNES FERMEES**

NOTE LIMINAIRE

Au cours d'une réunion consacrée au présent rapport et préparée par la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS, P. Bérest et B. Brouard ont proposé de rédiger une note sur des essais d'abandon de cavités salines réalisés dans divers pays. Ces essais contribuent à conforter la modélisation théorique de l'évolution à long terme d'une caverne fermée et abandonnée présentée dans le rapport. Ils fournissent des pistes de réflexion pour la mise en œuvre concrète d'une stratégie d'abandon.

Cette modélisation, comme expliqué dans le § 5.2 du présent rapport, associe quatre phénomènes principaux : d'une part, la perte de volume de la caverne sous l'effet du fluage du sel et l'expansion thermique de la saumure, qui tendent tous deux à faire croître la pression dans la caverne ; d'autre part, la perméation de la saumure à travers les parois de la caverne et les fuites par le puits, qui tendent toutes deux à faire chuter cette pression.

Il faut mentionner d'autres phénomènes, dits « transitoires », qui jouent un rôle pendant les essais, mais n'influent pas sur les évolutions de long terme. Ces phénomènes sont déclenchés par toute augmentation ou diminution rapide de la pression consécutive à une injection ou un soutirage de liquide. Ces phénomènes, fluage transitoire, perméation transitoire, dissolution complémentaire, variation adiabatique de la température, compliquent l'interprétation des essais (Bérest et al., 2007). Leurs effets se résorbent en quelques semaines ou mois ; ils ne modifient pas la conclusion principale : à très long terme, les effets de l'expansion thermique disparaissent (§ 4.3 du rapport) et les trois autres phénomènes principaux conduisent à maintenir la pression dans la caverne à une valeur constante, dite pression d'équilibre (§ 4.4 du rapport). La pression d'équilibre est sensiblement inférieure à la pression géostatique, et donc sans risque du point de vue de la fracturation des terrains (§ 5.2.2 du rapport), sauf peut-être pour les cavités très profondes (2000 m et au-delà) et les cavités de grande hauteur.

Les essais décrits dans la suite mettent bien en évidence la notion de pression d'équilibre mais montrent que cette pression d'équilibre est plus difficile à déterminer précisément quand la caverne n'a pas atteint l'équilibre thermique avec le massif environnant.

D-1. INTRODUCTION

Les modèles et calculs relatifs aux phénomènes mécaniques, thermiques et hydrauliques sont indispensables pour effectuer des prévisions du comportement à long terme. Mais, surtout en matière de sous-sol, leur pouvoir de prédiction doit être discuté soigneusement car ils peuvent être affectés de nombreuses sources d'incertitude : effet d'échelle, hétérogénéités, ou même absence de prise en compte de certains phénomènes.

Le risque d'erreurs importantes est moindre dans le cas des cavités salines car il s'agit de volumes fermés au sein d'un milieu très peu perméable dont les propriétés thermiques sont le plus souvent très homogènes ; de plus, en raison entre autres de son intérêt comme milieu hôte possible d'un stockage de déchets radioactifs, le sel a donné lieu, sans doute plus que toute autre roche, à un volume considérable d'essais de laboratoire. Enfin beaucoup d'expériences ont été accumulées depuis des dizaines d'années dans les milliers de cavernes réalisées dans le monde.

Néanmoins des confirmations expérimentales obtenues au cours d'essais en vraie grandeur sont indispensables pour atteindre une conviction complète quant à la validité des modèles. De ce point de vue, un organisme de recherche, le Solution Mining Research Institute (SMRI), qui rassemble l'essentiel de la communauté mondiale intéressée par l'exploitation du sous-sol par dissolution, a mis le problème de l'abandon des cavernes au centre de son programme de recherche depuis une quinzaine d'années (Ratigan, 2003) et a financé plusieurs essais en place consacrés à ce thème. Parallèlement, plusieurs entreprises ont conduit des essais de même nature dont les résultats ont été publiés. On dispose donc d'un volume de données important. On décrit dans la suite plusieurs de ces essais mais il est important de noter d'emblée :

- ces essais confirment, souvent de manière très précise, la description des phénomènes fournie par les équations ;
- ils ont permis d'améliorer progressivement les techniques d'essai ;
- ils ont permis de dégager un consensus international, puisque des essais ont été conduits en France, en Allemagne, aux Pays-Bas, aux Etats-Unis avec un cadre méthodologique et une interprétation communs pour l'essentiel.

D-2. ESSAI A ETREZ (EZ53) (FRANCE, 1997–1998)

Le premier essai d'abandon financé par le SMRI a été réalisé en 1997–1998 sur la cavene EZ53 du site d'Etrez aujourd'hui exploité par Storengy (Bérest et al., 2001). Il a été complété en 2009 par de nouvelles observations (Bérest et al., 2010). Il s'agit d'une petite cavene (8000 m³ environ) lessivée en 1982 à 950 m de profondeur et laissée au repos depuis. La cavene étant à la fois petite et ancienne, l'équilibre thermique était atteint lors de l'essai, conduit quinze ans après la fin du lessivage. L'expansion thermique de la saumure pouvait être négligée. Cet essai a permis de définir une procédure « française » d'essai d'abandon qui comporte deux originalités, souvent reprises par la suite :

- un dispositif permettant de mesurer séparément les fuites par le cuvelage du puits et donc de les distinguer des fuites de saumure traversant les parois de la cavene. Ce dispositif consiste à descendre une colonne d'hydrocarbure liquide léger dans l'espace annulaire jusqu'un peu en dessous du sabot du dernier cuvelage. En cas de fuite, l'interface entre hydrocarbure et saumure monte dans l'espace annulaire, la composition de la colonne de liquide y est donc modifiée, et la fuite se détecte par l'observation d'une évolution différente des deux pressions mesurées en tête, respectivement du côté de l'annulaire et du côté du tube central. Ce dispositif est très précis lorsque les pressions sont mesurées précisément. Les fuites par le puits se sont avérées extrêmement faibles dans le cas d'EZ53. Ainsi, au cours de cet essai particulier, des quatre « phénomènes principaux » mentionnés, deux seulement (perte de volume de la cavene sous l'effet du fluage du sel et perméation de la saumure à travers les parois de la cavene) jouent un rôle, ce qui simplifie l'interprétation (§ 4.4 du présent rapport) ;
- une stratégie d'essais et erreurs pour estimer la pression d'équilibre (Figure D1), permise par l'absence d'effet thermique : ayant fermé la cavene et imposé une pression initiale, on observe l'évolution ultérieure de la pression. Si celle-ci augmente pendant plusieurs mois, c'est qu'on était sous la pression d'équilibre (le fluage l'emporte sur la perméation) et on essaye une pression plus forte. Inversement si la pression chute durablement (la perméation

l'emporte sur le fluage), on essaye alors une pression moins élevée. L'avantage de cette stratégie est de fournir assez rapidement un encadrement de la pression d'équilibre finale, que l'on n'obtiendrait pas en se contentant de suivre une évolution monotone de la pression. On a ainsi pu déterminer que la pression d'équilibre finale (comptée à la profondeur de la caverne) serait de l'ordre de 13 MPa – un peu moins que prédit avant l'essai, et beaucoup moins que la pression géostatique à la profondeur de la caverne (21 MPa environ), écartant ainsi tout risque de fracturation à long terme.

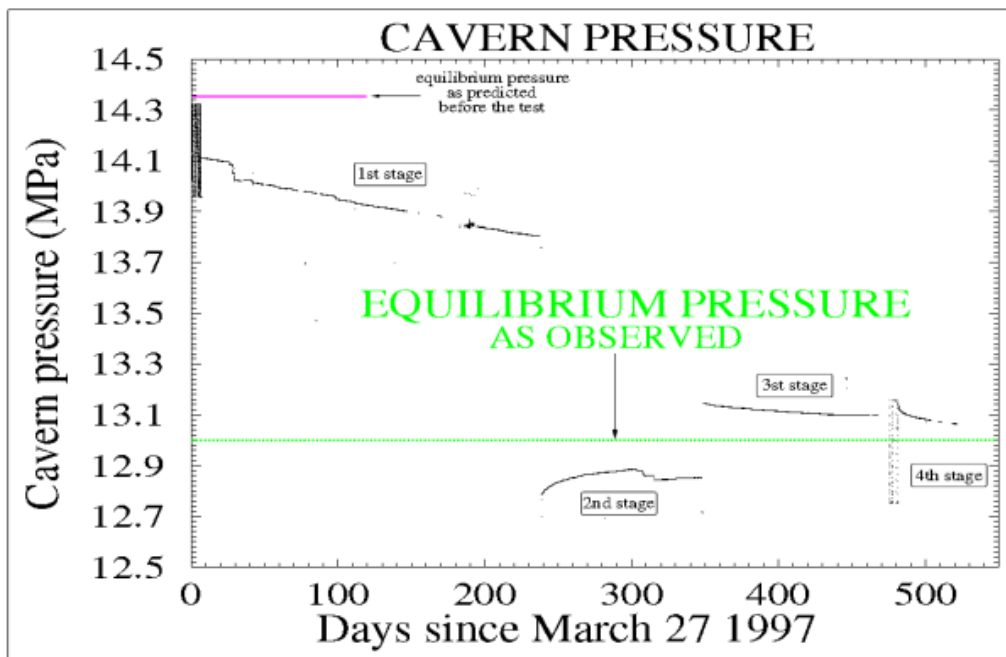


Figure D1 : Essai d'abandon d'une durée de 18 mois sur la caverne EZ53 à Etrez, exploitée par Storengy, illustrant la stratégie « d'essais et erreurs ». Pendant chaque palier l'évolution de pression est monotone, croissante si on est sous 13 MPa, décroissante si on est au dessus de 13 MPa (sauf à partir du jour 293 et pendant quelques semaines, suite à une fuite de saumure en tête de puits qui a pu ainsi être détectée et réparée). Ainsi dans ce cas la pression d'équilibre est de 13 MPa, sensiblement inférieure à la pression géostatique de 21 MPa, voir Figure D2.

Après ce premier essai on a laissé la caverne sous pression et on a démonté le système de mesure en laissant toutefois en place deux manomètres en tête de puits, l'un côté annulaire, l'autre côté tube central. En 2003 on a injecté une petite quantité d'hydrocarbures dans le puits (pour éviter le risque de gel) ce qui a fait augmenter la pression (Figure D2). Les données – de moins bonne qualité car les capteurs de pression étaient plus rustiques que pendant l'essai initial d'un an et demi – ont été analysées en 2009. L'évolution de 2003 à 2009 confirme la valeur de la pression d'équilibre trouvée auparavant (Figure D2) : après l'accroissement de 2003, la pression chute lentement pour tendre vers 13 MPa. Au total il s'agit ainsi de l'essai d'abandon le plus long jamais réalisé (12 ans).

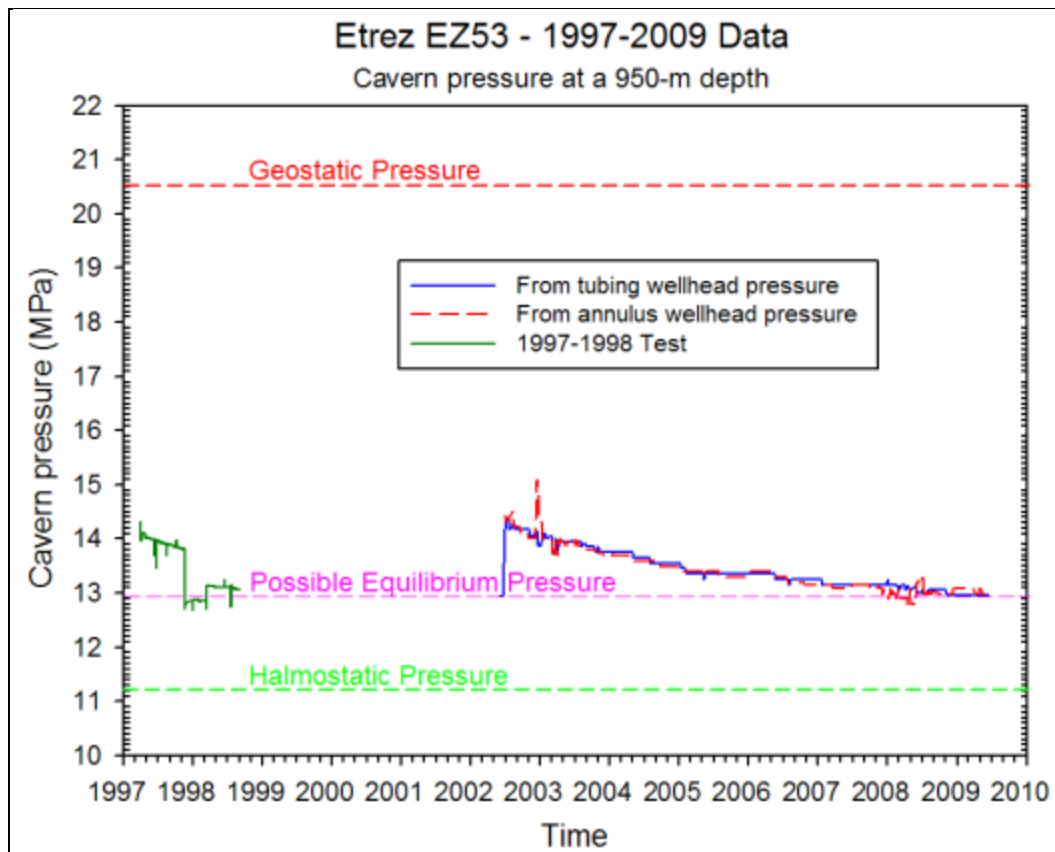
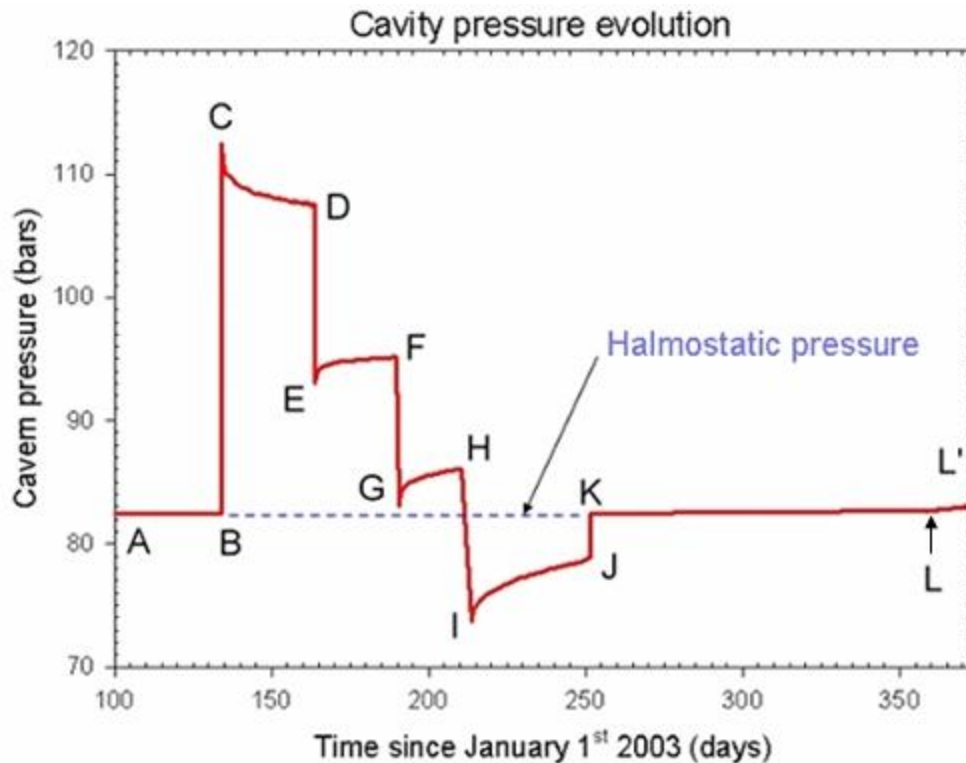


Figure D2 : Evolution de la pression dans la cavité EZ53 d'Etrez entre 1997 et 2010.

La pression halmostatique est la pression dans la caverne quand le puits, rempli de saumure saturée, est ouvert en tête. La pression géostatique est égale au poids des terrains à la profondeur de la caverne. Les capteurs de pression sont plus rustiques pendant la période 2002-2009.

D-3. ESSAI A CARRESSE (SPR3) (FRANCE, 2003–2004)

Un second essai (non financé par le SMRI) a été réalisé sur la caverne SPR3 du site de Carresse exploité par TOTAL. Les conditions étaient moins favorables car la complétion particulière de ce puits interdisait la mise en place d'un dispositif d'évaluation des fuites par le sabot du cuvelage. La cavité avait un volume de 10 000 m³ environ, à une profondeur de 700 m. Tout mouvement de saumure avait cessé depuis 1998, donc 5 ans avant l'essai d'abandon, de sorte qu'une partie significative du réchauffement de la saumure était certainement acquise. La stratégie d'essai était la même que pour SPR3 : divers niveaux de pression ont été essayés pour encadrer progressivement la pression d'équilibre. La Figure D3 paraît mettre en évidence une pression d'équilibre (de l'ordre d'une dizaine de MPa, valeur de la pression de fond, à comparer à une pression géostatique de 15,5 MPa environ) mais les paliers et l'essai dans son ensemble sont un peu trop courts pour permettre de porter un jugement définitif, comme le montre la description de l'essai suivant.



*Figure D3 : Essai d'abandon sur la cavité SPR3 de Carresse.
 Avant la phase au cours de laquelle la pression est inférieure à la pression halmostatique (IJ), l'espace annulaire rempli d'huile avait été ouvert (HI) et l'interface air/saumure était descendue dans le tube central ; cette interface remonte pendant la phase (IJ).*

D-4. ESSAI A CARRESSE (SPR2)

Un troisième essai (soutenu par le SMRI) a été conduit sur la caverne SPR2 de Carresse (Brouard et al., 2006 ; de Laguerie, 2006). La cavité a un volume de 9000 m³ environ, à une profondeur de l'ordre de 315 m. Cet essai était un peu plus délicat que l'essai d'Etrez car, en 2002, il subsistait un léger écart de température entre les terrains et la saumure dans la caverne (la vitesse d'échauffement de la saumure, mesurée au fond pendant 6 mois environ, était alors de 0,58°C/an) ; cet écart s'est résorbé progressivement au cours des années qui suivirent, mais le dé-piégeage de 44 tonnes de propane par vaporisation, à l'été 2003, a dû diminuer la température moyenne des 9000 m³ de saumure de 0,5°C environ. On ne peut donc appliquer une stratégie simple « d'essais et erreurs » : si par exemple la pression de la cavité est un peu au dessus de la pression d'équilibre, en l'absence d'effet thermique, la pression devrait chuter ; mais, en présence d'effet thermique, la pression augmentera pendant quelques temps (plusieurs années éventuellement) avant d'atteindre un maximum puis de décroître vers la pression d'équilibre. Dans un tel contexte la stratégie consiste plutôt à tenter de cerner de la manière la plus précise la valeur de tous les paramètres du problème, puis à faire une prévision sur l'évolution du système qui puisse être vérifiée assez rapidement, disons une à quelques années plus tard. En 2006 on a prédit que la pression atteindrait un maximum vers la mi-2008. En fait la pression a continué à croître très lentement.

L'explication la plus vraisemblable est une erreur de quelques centièmes de °C dans les estimations faites en 2006 de la température de la saumure dans la caverne ou de la température finale de la saumure dans la caverne (si la forme de la caverne n'est pas symétrique par rapport à un plan horizontal passant par son milieu, la température finale d'équilibre n'est pas égale à la température géothermique à la profondeur moyenne de la caverne). On doit maintenant être proche de l'équilibre thermique. De telles incertitudes, de quelques centièmes de °C, sont difficilement évitables. Une méthode simple pour lever l'incertitude qui subsiste consisterait à appliquer la stratégie d'essais et erreurs utilisée à Etrez : augmenter sensiblement la pression par injection d'une petite quantité de saumure et vérifier que la pression chute durablement. Considérant qu'il n'y avait pas urgence à abandonner cette caverne, Total a préféré laisser l'évolution actuelle se poursuivre.

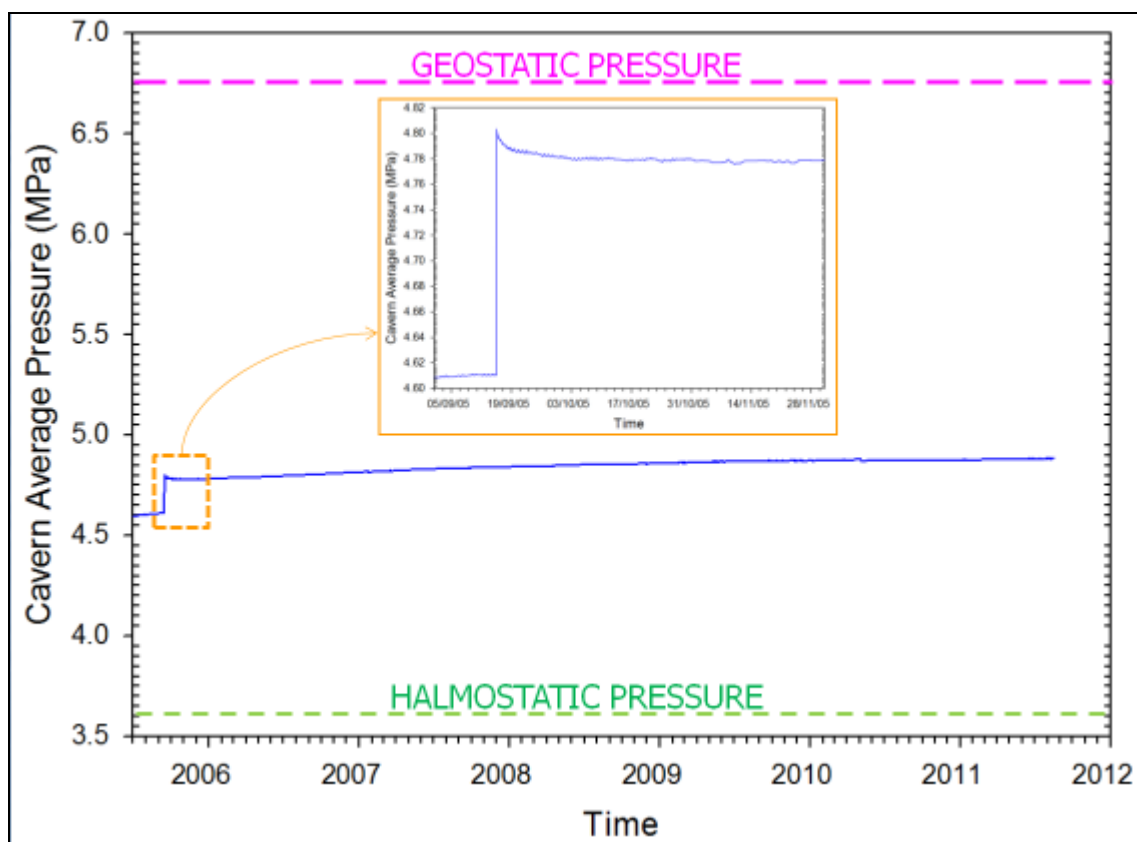


Figure D4 : Evolution mesurée de la pression dans la cavité SPR2.

La pression augmente lentement de fin 2006 à 2011 mais elle avait diminuée pendant quelques semaines au tout début du palier, suite à l'accroissement de pression de 4,61 à 4,80 MPa qui déclenche des effets transitoires.

Cet essai illustre d'ailleurs une autre difficulté, visible sur la Figure D4 : quelle que soit la stratégie adoptée, il faut ménager des paliers assez longs entre deux modifications de pression. En octobre 2006, on avait augmenté la pression dans la caverne jusqu'à 4,8 MPa. Par la suite, cette pression chute pendant quelques semaines mais il ne faudrait pas en tirer la conclusion qu'on est au-dessus de la pression d'équilibre : en effet, ultérieurement, la pression augmente.

De fait, quand on augmente rapidement la pression dans la cavité à l'occasion d'un changement de palier, on observe (pratiquement toujours) que la pression commence par chuter pendant quelques jours ou semaines, même si on est en dessous de la pression d'équilibre (Bérest et Brouard, 2009). La raison en est qu'une cavité est le siège de multiples équilibres physiques (mécanique, hydraulique, thermique et chimique – saturation de la saumure) ; la modification d'un paramètre d'état (pression ou température) déclenche donc des réactions qui tendent, suivant le principe de Le Chatelier, à rétablir les équilibres antérieurs : fluage inverse, perméation transitoire de la saumure vers le massif, refroidissement de la saumure après son échauffement adiabatique, dissolution additionnelle de sel. Ces effets transitoires ne durent que quelques jours ou semaines et après un certain temps la pression reprend une évolution de long terme : par exemple elle augmente si elle est inférieure à la pression d'équilibre. Les paliers doivent être assez longs (plusieurs mois) pour qu'on sorte de cette période d'évolution transitoire.

D-5. ESSAI D'ABANDON DANS UNE MINE A BERNBURG (ALLEMAGNE, 2001–2003)

Ces phénomènes transitoires sont bien visibles dans un essai présenté par Brückner et al. (2007). L'essai a été réalisé dans une petite cavité (22 m³) lessivée à une profondeur de 420 m au moyen d'un puits creusé depuis une galerie minière située quelques dizaines de mètres au-dessus de la cavité. La cavité étant très petite, on peut attendre que les effets thermiques soient très rapidement dissipés. Un packer en élastomère, testé par un essai à l'azote, permettait d'estimer que les fuites à travers le puits étaient très faibles. Deux phénomènes seulement, la perméation et le fluage, jouent alors un rôle, comme dans l'essai d'Étrez. La Figure D5 donne l'évolution de la pression au cours du temps.

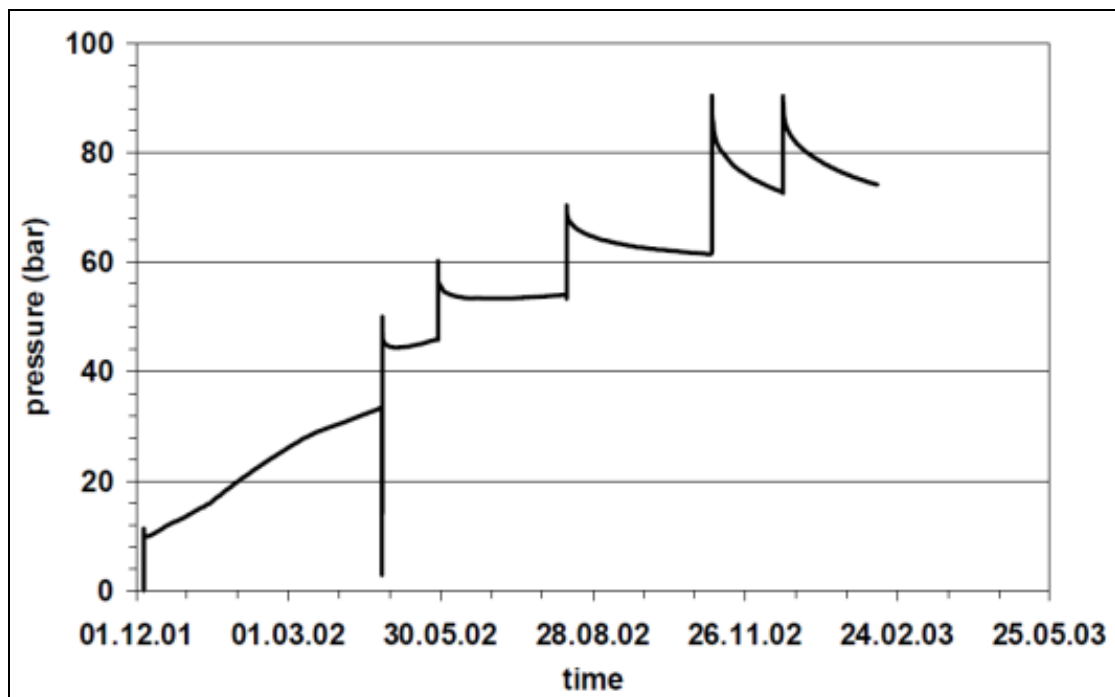


Figure D5 : Essai d'abandon dans une petite cavité creusée depuis une galerie minière à Bernburg.

La notion de pression d'équilibre paraît ressortir nettement : elle pourrait être ici d'une soixantaine de bars ; on note néanmoins après chaque augmentation de pression, au début du palier qui suit, une chute transitoire de pression, qui doit être attribuée aux divers effets transitoires décrits plus hauts. Les paliers sont un peu trop courts pour qu'on puisse estimer précisément la pression d'équilibre.

A la fin de l'essai une galerie a été tracée en direction de la caverne ; la saumure avait été colorée, et des traces de perméation étaient suspectées au voisinage de la caverne, surtout au toit qui contient un banc d'anhydrite.

D-6. ABANDON D'UNE CAVITE A STADE-SÜD [ALLEMAGNE, 2006]

La même équipe allemande (Brückner et Wekenborg, 2006) a présenté les résultats principaux contenus dans un dossier d'abandon préparé à la demande de l'administration des mines allemandes pour un ensemble de cavernes d'exploitation de la saumure à Stade-Süd. En simplifiant, ces cavités sont de deux types : des cavernes de $1,6 \times 10^6 \text{ m}^3$, de profondeur comprise entre 450 et 790 m ; et des cavernes de $1,73 \times 10^6 \text{ m}^3$, de profondeur comprise entre 690 et 1270 m.

La modélisation de l'évolution après fermeture prend en compte le fluage du sel (loi de Norton-Hoff), la perméation avec une perméabilité de $K = 10^{-20} \text{ m}^2$ mais avec, comme souvent en Allemagne, une loi assez compliquée d'apparition/développement de la perméation. Le calcul de l'expansion thermique était effectué de façon assez rustique, en prenant en compte, en complément de l'expansion thermique de la saumure, une expansion thermique de la caverne. En fait les calculs numériques montrent que, dans la plupart des cas, cette dernière est négligeable.

D-7. ESSAI D'ABANDON A STASSFURT (ALLEMAGNE, 2004-2009)

Le SMRI a soutenu un essai d'abandon réalisé dans deux cavernes en Allemagne, sur le site de Stassfurt (Banach et Klafki, 2009). Les deux cavernes, S101 et S102, étaient peu profondes (toit à 421 m et 436 m de profondeur, respectivement), de volume réduit ($10\,100 \text{ m}^3$ et $13\,600 \text{ m}^3$ respectivement) et de forme allongée (hauteur de 60 m et 125 m, respectivement). Au début de l'essai elles étaient au repos depuis une trentaine d'années ; compte tenu de leur faible diamètre (19 m et 15 m, respectivement) on peut attendre qu'après une telle durée l'équilibre thermique soit pratiquement atteint, ce qui a été confirmé par une mesure de température effectuée dans le puits S101 avant l'essai (Figure D6). Les puits ne comportaient pas de tube central de sorte qu'il était impossible de réaliser un dispositif de détection des fuites par le puits ; c'est une faiblesse de l'essai. Les puits étaient fermés depuis juillet 2001 et la pression mesurée en tête augmentait graduellement (avec une vitesse de 0,15 à 0,2 MPa par an). Après 2005, on a laissé la pression croître sur S101 et on a porté la pression en tête de puits de S102 à une valeur de 3,42 MPa (Figure D7).

Suite à cet accroissement, la pression dans la caverne S102 a chuté, de plus en plus lentement jusqu'en octobre 2007, où elle valait alors environ 3,15 MPa ; une fuite (non détectée immédiatement) est alors intervenue en tête de puits ; elle a fait chuter la pression de 0,3 MPa en une vingtaine de jours. Cette fuite s'est avérée avantageuse en ceci qu'on a réalisé sans l'avoir recherché une séquence d'essai et erreur : après la fuite la pression a augmenté jusqu'à la fin de l'essai. La pression d'équilibre (calculée en tête de puits) apparaît donc ainsi (sauf contribution importante des fuites par le puits, que l'on ne sait malheureusement pas estimer) comprise entre 2,85 et 3,15 MPa.

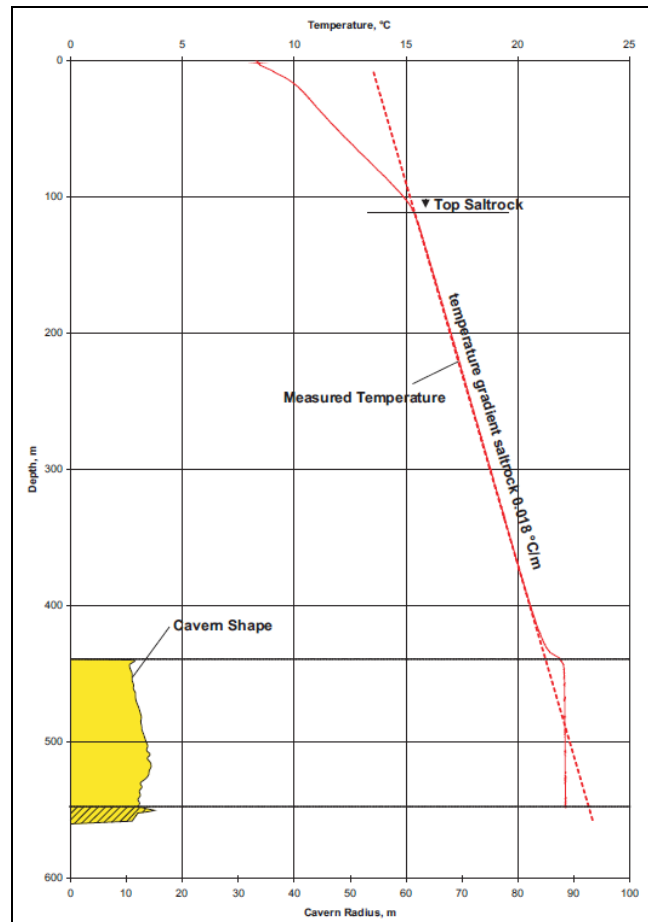


Figure D6 : Profil de température dans la cavité S101 de Stassfurt.

Le gradient géothermique est constant dans le sel (sous le « Top Saltrock»). Il est plus grand et moins régulier au voisinage de la surface du sol (jusqu'à 100 m de profondeur) car la conductivité des terrains y est plus grande que celle du sel et que les variations saisonnières de température à la surface du sol s'y font sentir. On note que la température est presque constante dans la saumure contenue dans la caverne elle-même, entre 440 et 550 m de profondeur, preuve de l'efficacité du brassage permanent engendré par la convection naturelle. Source : ESK GmbH, Freiberg, Andreas Banach.

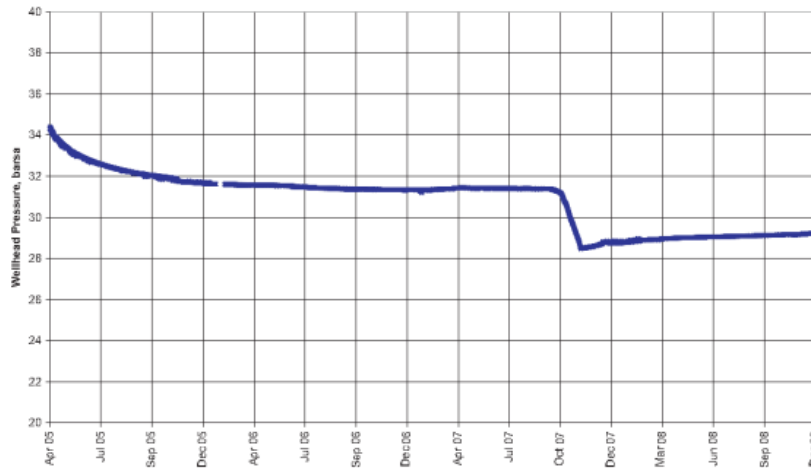


Figure D7 : Essai sur la caverne S102 de Stassfurt, source : ESK GmbH, Freiberg. La pression mesurée est la pression en tête de puits; la « pression géostatique », ligne pointillée rouge, est la pression en tête de puits pour laquelle la pression de fond est géostatique si le puits est rempli de saumure saturée. La chute de pression d'octobre 2007 est due à une fuite imprévue en tête de puits, qui a toutefois permis de mettre en œuvre une stratégie d'essais et erreurs et d'encadrer la pression d'équilibre.

D-8. ESSAI D'ABANDON A TERSANNE (FRANCE, 2007)

Hévin et al. (2007) décrivent la préparation d'un essai d'abandon sur une caverne profonde (1500 m). Exploitée par Storengy sur le site de Tersanne. Les auteurs, qui avaient contribué très significativement aux études promues par le SMRI, se placent évidemment dans le même cadre théorique (prise en compte de l'effet du fluage, de l'expansion thermique, de la dissolution additionnelle et de la perméation).

D-9. ABANDON D'UNE CAVITE A BARRADEEL (PAYS-BAS, 2009)

Van Heekeren et al. (2009) ont présenté une étude d'abandon accompagnée d'un essai sur une caverne très profonde (2600 à 2850 m). Le fluage est extrêmement rapide : en exploitation, la caverne ne change pas de volume car le gain de volume associé à l'exploitation du sel est compensé par la perte de volume due au fluage du sel. De même les écarts de température initiaux entre saumure et massif sont très grands (plusieurs dizaines de °C) ; toutefois ils se résorbent relativement vite car, si la caverne a un grand volume, elle est aussi très élancée (rayon de 12 m environ) et le temps caractéristique thermique est court. Quand on ferme la caverne, la pression atteint assez rapidement des niveaux élevés (malheureusement les auteurs ne donnent pas d'échelle) puis un plateau ; ultérieurement la pression n'augmente plus que lentement (voir Figure D8). Les auteurs interprètent l'essai par un calcul qui prend en compte le fluage, l'expansion thermique et la perméation. Toutefois dans cet essai il vaudrait probablement mieux parler de « fracturation hydraulique plus ou moins diffuse » que de « perméation ». En effet, à la différence des essais décrits précédemment, le niveau de pression d'équilibre est proche de la pression géostatique de sorte que l'échauffement et la dilatation de la saumure – qui sont indépendants du niveau de pression atteint – font vraisemblablement passer la pression de la saumure au-delà de la pression géostatique.

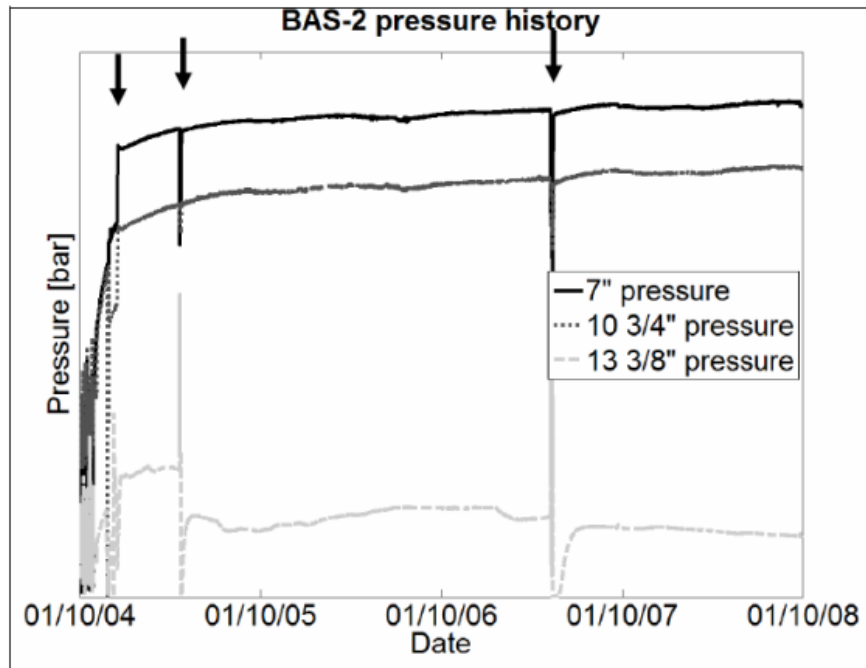


Figure D8 : Essai d'abandon à Barradeel (Pays-Bas).

Remarque sur l'interprétation de la perméation

Il est classique, lors des essais de fracturation hydraulique, d'estimer que la fracturation survient quand la pression de fluide est un peu supérieure à la plus petite contrainte compressive à la paroi – dans le cas du sel, où l'état de contrainte est en principe isotrope, cela revient à dire que la fracturation survient quand la pression de liquide est un peu supérieure à la pression géostatique, ou poids des terrains. De fait, dans les essais de détermination de l'état de contraintes en place par micro-fracturation dans un massif de sel, la montée en pression se fait assez rapidement et la fracturation apparaît pour une pression un peu supérieure à la pression de fracturation (Rummel, 1996).

Toutefois lorsque la montée en pression est un peu plus lente, on observe, toujours dans le cas du sel, que les choses sont plus compliquées car la fracturation apparaît souvent de manière précoce, pour une valeur de la pression proche de, ou même un peu inférieure, à celle de la pression géostatique. Un exemple remarquable, dans l'histoire des essais consacrés à l'abandon des cavernes dans le sel, est l'essai d'Etzel en Allemagne (Rokhar et al., 2000). Deux arguments ont été avancés pour expliquer cette apparition précoce ; l'un est de nature rhéologique, l'autre tient à la distribution de contraintes au voisinage d'un ouvrage réalisé dans le sel :

- plusieurs auteurs (Kenter, 1990 ; Fokker, 1995 ; Bérest et al., 2001) ont montré que, lorsque la pression s'approche de la pression de fracturation, il y a déjà une augmentation progressive mais significative de la perméabilité – même si aucune fracture discrète ne s'ouvre encore, de sorte que la distinction perméation–fracturation est un peu brouillée. Cette propriété pourrait être caractéristique des milieux naturellement très peu perméables ;

- par ailleurs, quand une caverne est restée longtemps au repos à pression halmostatique, ou plus généralement à pression constante, une redistribution en partie pérenne des contraintes s'est opérée, en raison des caractéristiques particulières de fluage du sel ; notamment les contraintes tangentielles au voisinage de la paroi des cavernes sont beaucoup moins « compressives » que dans le cas des matériaux au comportement plus classique, proche de l'élasticité. De ce fait, lors d'une remontée rapide en pression, la fracturation peut être atteinte pour une valeur de la pression inférieure à la pression géostatique.

Faute de données chiffrées qui précisent notamment la valeur de la pression géostatique, il est difficile de se faire une idée précise des mécanismes qui conduisent à l'apparition du « plateau » de pression de la Figure D8. Plus généralement, cet essai illustre la difficulté de l'abandon de cavernes très profondes (au-delà de 2000 m) : le fluage du sel est très rapide et la pression d'équilibre est proche de la pression géostatique. Pour ces cavernes, une meilleure stratégie d'abandon, si elle est praticable, consiste à rechercher une fermeture la plus complète possible de la caverne avant son abandon soit en laissant la tête de puits ouverte (pour permettre l'expulsion de la saumure) soit en pratiquant des purges fréquentes.

D-10. ESSAI D'ABANDON D'UNE CAVITE A MONT BELVIEU, TEXAS (USA, DEPUIS 2007)

Le SMRI soutient actuellement un essai d'abandon réalisé dans quatre cavernes sur le site de Barbers Hill à Mont Belvieu, Texas. (Le rapport correspondant est pour l'instant confidentiel). Les quatre cavernes ont pour volume, profondeur du toit, profondeur du fond : **n°10**, 1 234 000 bbls, 3016 ft, 4359 ft ; **n°11**, 2 372 000 bbls, 2748 ft, 4239 ft ; **n°14**, 2 474 000 bbls, 2840 ft, 3983 ft ; **n°15** : 1 123 000 bbls, 2985 ft, 3910 ft, c'est-à-dire environ 200 à 400 000 m³ et des profondeurs de 900 à 1200 m. L'espace annulaire a été rempli de diesel, ce qui permet de détecter les fuites éventuelles. En fait l'écart de pression entre annulaire et tubing paraît croître au cours du temps (fuite « négative » !) ce que les auteurs interprètent comme la présence de gaz ou de GPL piégé dans la cavité qui est drainée vers l'annulaire, dans lequel il remonte pour s'accumuler en tête de puits (de fait il n'est pas rare que les cavités réalisées dans les dômes de sel du Golfe du Mexique « produisent » du gaz mais d'autres interprétations sont possibles). L'évolution de la température a été mesurée, mais avec quelques déboires ; elle serait de l'ordre de 2°F par an (1,1°C/an) environ. C'est une valeur logique pour des cavités assez grosses, pour lesquelles la résorption de l'écart de température est lente. Elle implique une importante contribution de l'expansion thermique à l'évolution de la pression dans la caverne. On s'est donc contenté jusqu'ici de laisser la pression croître. L'essai a été interrompu provisoirement en 2011 suite à un incendie qui a affecté des installations de surface.

D-11. ESSAI D'ABANDON A GELLENONCOURT (FRANCE, DEPUIS 2008)

Cet essai concerne une cavité peu profonde (250 m) de volume 240 000 m³ résultant de la coalescence de deux cavernes équipées chacune d'un puits. Hormis l'essai de compressibilité, un essai de dégorgeement (comptage du débit expulsé par la cavité ouverte) de 8 mois, suivi d'un essai de montée en pression de 6 mois, ont été effectués. Un essai de mesure d'évolution de la pression à partir d'une valeur initiale élevée est en cours. La température et la pression au fond ont été mesurées pendant un an et demi ; la température est très stable (certainement moins de 0,02°C de variation en un an et demi et peut être beaucoup moins). Cet essai a permis d'évaluer la vitesse relative de fermeture de la caverne sous pression halmostatique. Le débit de saumure qui serait susceptible de migrer après abandon de la caverne est donc très faible (2 m³/an) d'autant que les niveaux aquifères au-dessus du massif de sel contiennent manifestement déjà du sel. Un article de revue a été soumis (Brouard et al. 2011). Cet essai montre que l'on peut déduire un majorant du débit expulsable à long terme de la vitesse d'augmentation de pression immédiatement après la fermeture du puits. C'est un renseignement facile à obtenir et très utile quand on sait que l'effet de l'expansion thermique est faible.

D-12. CONCLUSION SUR LES ESSAIS D'ABANDON

Il existe quelques différences entre les auteurs dans la modélisation de chaque phénomène individuel. Néanmoins pour l'essentiel, l'interprétation de l'évolution de la pression dans une cavité fermée et abandonnée est la même dans tous les pays où des essais ont eu lieu : cette évolution résulte du fluage du sel, de l'expansion thermique de la saumure tant que celle-ci n'est pas à l'équilibre thermique avec les terrains, de la perméation d'origine naturelle ou induite et des fuites. A très long terme, quand l'équilibre thermique est atteint, la pression tend vers une pression d'équilibre qui est inférieure à la pression géostatique, et même sensiblement inférieure (sauf dans les cavités très profondes), écartant ainsi tout risque de fracturation (sauf peut-être si la cavité est très élancée, Wallner et Paar, 1997). Pour préparer un abandon il est donc nécessaire de :

- rassembler les informations déjà disponibles sur le comportement mécanique, thermique et hydraulique des cavernes obtenues au moyen d'essais en place. Les résultats d'essais au laboratoire sur échantillons peuvent aussi apporter des informations utiles mais ils peuvent ne pas être représentatifs des conditions en place, surtout pour les propriétés hydrauliques ;
- conduire un essai d'abandon en suivant l'évolution de la pression de la caverne fermée. Il est indispensable, pour interpréter un tel essai, de mettre en place un dispositif permettant de distinguer les fuites par le puits de la perméation par les parois et de mesurer, idéalement en continu, la température de la saumure dans la caverne ;
- par ailleurs le dispositif de suivi des fuites par le puits permet de détecter l'apparition de micro-fuites en tête de puits, dont l'expérience montre qu'elle peut survenir pendant un essai de plus d'un an ;
- si les phénomènes thermiques sont pratiquement dissipés, on peut mettre en évidence directement la pression d'équilibre par essais et erreurs en ménageant plusieurs paliers à des niveaux de pression différents. Les paliers doivent être suffisamment longs ;

- les paliers menés en imposant initialement une pression plus élevée que la pression d'équilibre estimée sont particulièrement utiles car, si la pression chute durablement pendant ces paliers, on obtient un majorant de la pression d'équilibre : on peut ainsi apprécier facilement, même si on ne l'a pas mesurée précisément, si la pression d'équilibre est nettement inférieure à la pression géostatique. Il faut évidemment qu'un dispositif de détection des fuites par le puits ait été mis en place. Toutefois cette méthode s'applique moins facilement s'il subsiste un déséquilibre thermique important, car la pression risque d'augmenter sous l'effet de l'expansion thermique même quand on est au dessus de la pression d'équilibre ;
- si les phénomènes thermiques ne sont pas dissipés - c'est souvent le cas dans des cavernes assez profondes, de grande taille et qui ne sont pas depuis longtemps au repos - ces phénomènes tendent à faire croître la pression et la technique précédente par essais et erreurs doit être adaptée. L'effet de la température est important : on peut retenir comme ordre de grandeur que 1°C de réchauffement peut engendrer 1 MPa (10 bars) d'augmentation de pression de la saumure dans une cavité fermée. Si on cherche à déterminer la pression d'équilibre finale, avec une précision de 0,1 MPa (1 bar), par exemple, il faut mesurer la température de la saumure et calculer sa température d'équilibre finale avec une précision de 0,05°C pour chacune de ces deux températures, ce qui n'est pas facile. Heureusement on peut souvent se contenter d'une précision moindre si la pression d'équilibre finale est suffisamment inférieure à la pression géostatique ;
- si les phénomènes thermiques ne sont pas dissipés, il faut effectuer un ou quelques paliers préliminaires suffisamment longs, en déduire les valeurs in situ des paramètres importants, vérifier qu'ils sont cohérents avec les valeurs déduites d'essais antérieurs en place (par exemple, essais d'étanchéité). On dispose alors d'un modèle crédible qui permet de faire une prévision de l'évolution ultérieure au moyen de calculs par ordinateur. Des logiciels actuellement disponibles permettent de tenir compte de la forme réelle de la caverne et des effets mécaniques, hydrauliques et physico-chimiques transitoires. On peut ensuite vérifier au cours d'un nouveau palier si cette prévision s'avère correcte. Le modèle peut alors être considéré comme validé et on peut calculer une pression d'équilibre, avec une barre d'incertitudes réduite, et la comparer avec la pression géostatique ;
- la mesure de la vitesse de montée en pression immédiatement après la fermeture de la caverne (donc avec pression initiale en tête nulle) permet d'obtenir un majorant du débit expulsable à long terme (sauf si la température de la saumure est supérieure à celle des terrains, ce qui arrive parfois). Dans certains cas ce majorant est faible et montre que le risque de pollution des ressources en eau est absent ;
- dans les cavernes très profondes, la pression d'équilibre est proche de la pression géostatique et il vaut mieux tenter de réduire le volume de la caverne avant de l'abandonner ;
- les cavités de très grande hauteur posent un problème particulier ; la condition de pression d'équilibre inférieure à la pression géostatique doit être vérifiée au point le plus haut de la caverne.

D-13. RÉFÉRENCES

- Bannach A., Klafki M. 2009. Stassfurt Shallow Cavern abandonment Field Tests. Report 2009-1 for the SMRI, (unpublished).
- Bérest P., Bergues J., Brouard B., Durup J.G., Guerber B. 2001. A salt-cavern abandonment test. *Int J Rock Mech Min Sci* 2001;38:343-55.
- Bérest P., Brouard B., de Greef V. 2001. Salt Permeability Testing – The Influence of Permeability and Stress on Spherical Hollow Salt Samples. SMRI Project Report n°2001-8, prepared by Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique, France & Brouard Consulting, Paris, France, for the Solution Mining Research Institute, 25 pages, 2001.
- Bérest P., Brouard B., Karimi-Jafari M., Van Sambeek L. 2007. Transient behaviour of salt caverns. Interpretation of Mechanical Integrity Tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sc.* 44, pp. 767-786, 2007.
- Bérest P., Brouard B. 2009. Why MITs interpretation can be wrong: Apparent Leak and Actual Leak. Proc 9th World symposium, Beijing, Sha Zuoliang ed., 548-567.
- Bérest P., Brouard B., Hévin G. 2010. A 12-year pressure monitoring in an idle salt cavern. The 1997-1998. Etrez abandonment test revisited. *Int. J. Rock Mech. Min. Sc.*, 2010;45(7):1025-43.
- Brouard B, Bérest P, Karimi-Jafari M, Rokahr RB, Staudtmeister K, Zander-Schiebenhöfer D, Fourmaintraux D, de Laguerie P, You T. 2006. Salt-Cavern Abandonment Field Test in Carresse, Report 2006-1 for the SMRI, 2006 (unpublished).
- Brückner D, Wekenborg H. 2006. Abandonment of Caverns at the Brine Field Stade–Süd, Germany, Geomechanical Concept, Geotechnical Procedures and the Proof of Long–term Safety by Numerical Modeling. Proceedings SMRI Fall Meeting, Rapid City, South Dakota, 81-103.
- Brückner D., Lindert A., Wiedeman M. 2007. The Bernburg test cavern – in situ investigations and model studies on cavern abandonment. Proceedings sixth Conference on Mechanical Behavior of Salt. London: Taylor & Francis Group, 417-26.
- de Laguerie P., T. You, P. Berest, B. Brouard, D. Fourmaintraux, J.Y. Heas, 2006. A salt-cavern abandonment test in an LPG storage facility, Eurock 2006, Liège, 9-12 may.
- Fokker P.A. 1995. The behavior of salt and salt caverns. PhD thesis, Delft University of Technology, the Netherlands.
- Hévin G., Caligaris C., Durup G., Pichayrou O., Rolin C. 2007. Deep salt cavern abandonment. A pilot experiment. Proceedings sixth Conference on Mechanical Behavior of Salt. London: Taylor & Francis Group, 427-34.
- Kenter C.J., Doig S.J., Rogaar H.P., Fokker P.A., Davies D.R. 1990. Diffusion of brine through rock salt roof of caverns. SMRI Fall Meeting, Paris, France.
- Rokhar R.B., Hauck R., Staudtmeister K, Zander-Schiebenhöfer D. 2000. The Results of the Pressure Build-Up Test in the Brine Filled Cavern Etzel K102. Proceedings SMRI Fall Meeting, San Antonio, Texas, 89-103.
- Ratigan J. 2003. The SMRI Cavern Sealing & Abandonment Research Program Summary. In: Proceedings SMRI Spring Meeting, Houston, Texas, 141-64.

Rummel F., Benke K., Denzau H. 1996. Hydraulic Fracturing Stress Measurements in the Krummhörn Gas Storage Field, Northwestern Germany, Proc. SMRI Spring Meeting, Houston.

Van Heekeren H., Bakker T., Duquesnoy T., de Ruiten V., Mulder L. 2009. Abandonment of an extremely deep Cavern at Frisia Salt. Proceedings, SMRI Spring Meeting, Krakow, Poland, 30-42.

Wallner M., Paar WA. 1997. Risk of progressive pressure build up in a sealed cavity. In: Proceedings SMRI Fall Meeting, El Paso, Texas, 177-88.