



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 213206 - 2761217 - v1.0

14/11/2023

Devenir post-exploitation des cavités salines

Pratique de remblayage en France et à l'international

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : ZAIER Imen

Vérification : GOUZY AURELIEN; VELLY NATHALIE; GOMBERT PHILIPPE

Approbation : Document approuvé le 14/11/2023 par DUPLANTIER STEPHANE

Table des matières

1	Introduction.....	6
2	Définitions.....	6
3	Généralités	8
3.1	Présence du sel dans le sous-sol.....	8
3.2	Exploitation du sel dans les gisements souterrains.....	8
3.2.1	Exploitation par voie minière.....	8
3.2.2	Exploitation par dissolution.....	9
3.3	Cavités salines dans le monde.....	10
4	Diversité de l'exploitation par dissolution.....	12
4.1	Cavités interconnectées	12
4.1.1	La méthode extensive.....	12
4.1.2	La méthode intensive ou par « pistes et sondages » :	13
4.2	Cavités isolées.....	14
5	Abandon des cavités salines	16
5.1	Phénomènes contribuant au changement de pression	17
5.2	Evolution de la pression dans une cavité fermée	18
5.3	Mesures de suivi de l'évolution de la cavité	20
5.4	Conséquences géotechniques et aspects environnementaux	21
6	Pratiques de remblayage dans les cavités salines abandonnées	23
6.1	Généralités	23
6.2	Méthodes de remblayage	23
6.3	Nature des produits de remblayage	25
6.3.1	En France	25
6.3.2	Dans le monde.....	25
6.4	Difficultés de mise en œuvre du remblayage	27
6.5	Importance de la pratique de remblayage à l'échelle mondiale	28
6.5.1	En France	28
6.5.2	En Europe.....	28
6.5.3	Dans le reste du monde.....	29
6.6	Synthèse des réponses au questionnaire envoyé.....	30
6.6.1	Préparation et envoi du questionnaire.....	30
6.6.2	Occurrence du traitement des cavités salines par remblayage	31
7	Conclusion.....	34
8	Références	35
9	Liste des annexes.....	39

Liste des Figures

Figure 1 : Les gisements de sel en France (© Ineris)	8
Figure 2 : Exploitation en chambres et piliers dans la mine de sel de Varangéville (Meurthe et Moselle) © Comité des Salines de France	9
Figure 3 : L'exploitation du sel par dissolution : un exemple d'un site minier © Novopro (photo à gauche) et un schéma de principe d'un type d'exploitation © SEQUENS (schéma à droite)	10
Figure 4 : Gisement de sel en Europe en 2006 avec les champs de cavités ©SMRI	11
Figure 5 : Les gisements salifères en France (https://cpdp.debatpublic.fr)	11
Figure 6 : Exploitation extensive d'un gisement peu profond (450 m) à Hengelo, Pays Bas	12
Figure 7 : Méthode intensive par pistes et sondages © Ineris	13
Figure 8 : Visualisation du résultat en surface des effondrements « contrôlés » des salins d'Haraucourt en Meurthe et Moselle (54) © Maison du sel	14
Figure 9 : Exemples d'effondrements localisés provoqués de cavités salines dans le monde : Preesall (Royaume-Uni) © PN Joan Martin et Ocnele Mari (Roumanie) © Orthophoto NACLR	14
Figure 10 : Exemple de technique d'exploitation du sel par dissolution par forage isolé en circulation directe ©CSME (modifié)	15
Figure 11 : Le principe standard (dit « principe SMRI ») d'abandon d'une cavité lessivée dans le sel (brine = saumure)	17
Figure 12 : Différents phénomènes agissant sur l'évolution de la cavité saline post-exploitation	18
Figure 13 : Test d'abandon sur une cavité peu profonde effectué à l'équilibre thermique	19
Figure 14 : Principales caractéristiques des cavités salines testées à l'abandon en France	19
Figure 15 : Résultats de simulation de l'infiltration de la saumure d'une cavité profonde dans le massif de sel sur le long terme (après 500, 2000, 6000 et 10000 ans)	20
Figure 16 : Effondrement au-dessus d'une cavité saline : a) la concession Twenthe-Rijn au Pays-Bas [50] et b) la concession de Yunmeng en Chine [51]	22
Figure 17 : Schéma illustratif du principe de remblayage dans les cavités salines	23
Figure 18 : Evolution de la fermeture de la cavité selon la méthode d'abandon	23
Figure 19 : Méthode de remblayage à partir d'une cavité vide à pression atmosphérique (cas de recherche)	24
Figure 20 : Méthode de remblayage à partir d'une cavité remplie de saumure	24
Figure 21 : Comparaison de : a) la convergence de volume et b) l'affaissement en surface entre une cavité non remblayée et une cavité remblayée (mélange déchet alcalin + saumure)	25
Figure 22 : Processus de remplissage d'une cavité saline abandonnée avec des déchets alcalins	26
Figure 23 : Schéma d'une cavité saline qui illustre la complexité du processus de remblayage en trois étapes : a) écoulement de la boue dans le puits, b) entrée de la boue dans la cavité et c) sédimentation des particules solides	27
Figure 24 : Conception du système de remplissage employé par Braskem à Maceió (Brésil) [67]	29
Figure 25 : Mélange du remblai : sable, mousse et saumure dans des camions boueurs	30
Figure 26 : Nombre de réponses d'organismes concrètement impliqués dans le remblayage au sein des pays contactés	31
Figure 27 : Classement hiérarchique des matériaux de remblayage employés	33

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Synthèse des retours d'expérience de la pratique de remblayage dans les cavités salines par pays	32
--	----

Résumé

La méthode d'exploitation du sel par dissolution est largement pratiquée en France et dans le monde. Cependant, elle peut entraîner des désordres tels que les affaissements ou les effondrements de terrain, en particulier lorsque les cavités salines créées par dissolution sont abandonnées et deviennent instables. La question de l'abandon de ces cavités suscite une attention croissante de la part des acteurs industriels et des pouvoirs publics. En réponse à cette préoccupation, des études et des expérimentations ont été menées en France et à l'échelle internationale dans le but d'améliorer la compréhension du comportement à long terme de ces cavités et de développer des méthodologies d'abandon sécurisées. L'administration veille à ce que ces méthodes garantissent la sécurité à long terme des personnes, des biens et de l'environnement autour des sites concernés.

Le recours au remblayage pour traiter les cavités salines abandonnées a été envisagé dans certains cas, mais il existe peu d'informations disponibles dans la littérature concernant la méthodologie mise en œuvre. Dans ce contexte, le présent rapport vise à établir un état des lieux des opérations de remblayage des cavités salines abandonnées en France et à l'international. L'objectif est de recueillir un éventail varié de situations et d'identifier les bonnes pratiques.

Après avoir exposé la technique d'abandon couramment utilisée, qualifiée de "méthode classique d'abandon" (consistant à remplir la cavité de saumure et à sceller définitivement le puits), le rapport explore la faisabilité du remblayage en tant que solution complémentaire pour garantir un abandon sécurisé et efficace. Il aborde également la nature des matériaux de remblayage les plus couramment utilisés à l'échelle mondiale. De plus, le rapport traite des aspects liés à l'évolution à long terme de ces cavités, notamment la pression, l'effet de compaction des matériaux de remblai et le délai nécessaire pour la fermeture de la cavité.

En raison du nombre limité de cas documentés dans la littérature, une compilation des techniques de remblayage émergentes a été réalisée en interrogeant les principaux acteurs industriels mondiaux du domaine et les gestionnaires des situations d'après-mine. Cela a permis de recueillir les bonnes pratiques ainsi que les mesures de contrôle mises en place.

Enfin, il est souligné que chaque cas d'abandon doit faire l'objet d'une analyse individuelle et approfondie, étant donné les nombreux paramètres susceptibles d'influer sur l'intégrité mécanique à long terme des cavités salines. Parmi ces paramètres figurent la profondeur, la taille de la cavité, la perméabilité, les propriétés mécaniques du sel, ainsi que l'historique de la cavité avant son abandon. La question de l'abandon demeure une préoccupation actuelle et des études en cours de développement visent à préciser les méthodologies optimales pour garantir la stabilité à long terme des cavités salines.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Devenir post-exploitation des cavités salines, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 213206 - 2761217-v1.0, 14/11/2023.

Mots-clés :

Exploitation du sel par dissolution, cavité saline, pression, stabilité, remblayage, produits de remblayage

1 Introduction

Le chlorure de sodium (de formule chimique NaCl), couramment appelé sel, est l'un des minéraux les plus abondants sur Terre. Il se trouve naturellement dans l'eau de mer, les aquifères salins profonds et les saumures géothermales sous sa forme dissoute et dans les formations sédimentaires sous sa forme cristallisée.

L'exploitation du sel du sous-sol s'effectue principalement soit par voie minière classique (extraction de sel cristallisé) soit par dissolution (méthode de « solution mining »). Aujourd'hui, en France, à l'exception de la mine de Varangéville (Meurthe-et-Moselle) située à proximité de Nancy, les gisements de sel sont tous exploités par dissolution. Cette méthode permet d'atteindre des gisements localisés à de grandes profondeurs (jusqu'à quelques milliers de mètres) et de produire davantage de sel qu'avec la méthode minière classique tout en restant économiquement rentable [1].

La méthode d'exploitation du sel par dissolution est répandue en Europe et dans le monde. Cependant, elle peut entraîner des phénomènes non souhaités, tels que les affaissements ou les effondrements du terrain. Celle-ci peut, par exemple, résulter de l'instabilité des cavités créées par la dissolution du sel – appelées ici « cavités salines » – notamment pour celles qui ont été abandonnées après l'exploitation.

Dans certains cas, les cavités salines peuvent être sécurisées post-exploitation par des opérations de remblayage mais ces pratiques sont peu renseignées dans la littérature. Dans ce contexte, ce document vise à dresser un état des lieux de la pratique du remblayage des cavités salines abandonnées en France et à l'international, afin de disposer d'un large échantillon de situations et d'en identifier les bonnes pratiques.

Le présent travail est subdivisé en deux grandes phases :

- La première phase, consiste en une analyse bibliographique¹ visant à dresser un panorama des connaissances disponibles dans le monde sur les techniques de mise en place des remblais en milieu souterrain et leur impact sur la stabilité des cavités à court et long terme, à lister les principaux matériaux de remplissage employés et à identifier l'importance de cette pratique en France et à l'international ;
- la seconde phase consiste à synthétiser les résultats d'un questionnaire qui a été envoyé en février 2023 aux principaux acteurs industriels du domaine et aux gestionnaires des situations d'après-mine à l'échelle mondiale. L'objectif de ce questionnaire était de recueillir des informations sur les bonnes pratiques, étant donné le faible nombre de cas recensés dans la bibliographie. Les résultats obtenus ont été enrichis en interrogeant des experts à l'occasion de la conférence SMRI (Solution Mining Research Institute) d'avril 2023, dont l'une des thématiques abordées concernait l'abandon des cavités salines et notamment les techniques émergentes à l'échelle internationale².

2 Définitions

Ces quelques définitions et abréviations, organisées par ordre alphabétique, pourront s'avérer utiles pour la bonne compréhension de la suite du rapport.

Aquifère : un milieu poreux ou fissuré dans les formations souterraines, suffisamment perméable pour permettre d'emmagasiner et de faire circuler les eaux souterraines en fonction des caractéristiques physiques et structurales des terrains.

Chambres et piliers abandonnés : méthode d'exploitation minière qui consiste à ouvrir des galeries en laissant entre elles des masses de roche non exploitée appelées piliers.

Concession : acte par lequel l'État accorde à une personne le droit d'exploiter une substance de la classe des mines. En effet, d'après l'article L131-1 du Code Minier "*les mines ne peuvent être exploitées qu'en vertu d'une concession ou par l'Etat*" Une concession est accordée par décret en conseil d'État,

¹ Principalement basée sur la consultation de sites web, dont en particulier celui du SMRI (Solution Mining Research Institute), de revues internationales et de rapports disponibles sur cette thématique. La liste des références consultées est reprise au § 8.

² <https://smri.memberclicks.net/historical-conferences> (site web consulté en septembre 2023).

au terme d'une procédure définie par le décret n° 2006-648 du 2 juin 2006. Elle porte sur un périmètre donné et sur une liste de substances.

Cuvelage : action de cuveler un puits, d'étayer ses parois par une construction.

Déchet : « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (Code de l'environnement - Article L541-1-1).

Déchets alcalins : déchets ayant un pH élevé (basiques). Ils se distinguent généralement par leur capacité à réagir chimiquement avec d'autres substances. Si ces déchets ne sont pas gérés de manière adéquate, ils peuvent devenir corrosifs au contact de certaines matières, ce qui peut entraîner une pollution environnementale ou nuire à la santé humaine.

Dissolution : processus chimique par lequel les matériaux solubles d'un sol, d'une roche se dissout dans un liquide (solvant) pour former une solution homogène.

Dôme de sel ou **diapir** : structure géologique débouchant ou non à la surface du sol, formée en profondeur par la montée par gravité de roches salines, moins denses que les couches géologiques avoisinantes.

Fontis : expression en surface d'un effondrement brutal et localisé, généralement pseudo-circulaire et pouvant atteindre quelques mètres de diamètre.

Gisement : accumulation naturelle, locale, de matière minérale solide, liquide, ou gazeuse susceptible d'être exploitée.

Impuretés ou insolubles : dans le contexte de la dissolution, les impuretés sont des substances solides d'un sol, d'une roche soluble, qui ne se dissolvent pas dans le solvant.

Injection : dans notre contexte, il s'agit du comblement de cavités mis en œuvre depuis la surface et pratiqué avec des produits faisant prise (coulis de ciment, stériles miniers, etc.).

Lessivage : désigne la dissolution et la mobilisation des matières solubles d'un sol, d'une roche par les eaux d'infiltration, voire des eaux de ruissellement.

Marais salants : des étangs et bassins où de l'eau de mer salée est introduite pour produire du sel grâce à l'évaporation sous l'effet du soleil et du vent.

Nivellement : ensemble d'opérations consistant à mesurer des différences de niveaux pour déterminer des altitudes.

Recouvrement : dans notre contexte, un recouvrement désigne les terrains présents au-dessus d'une exploitation souterraine.

Remblayage (ou Comblement) : remplissage d'une cavité au moyen de matériaux d'apport (remblais) par action manuelle, pneumatique ou hydraulique visant à combler les vides laissés par l'exploitation.

Saumure : eau chargée en sel. Cette eau peut avoir une origine marine ou bien résulter de la dissolution de sel gemme.

Sel gemme : désigne les minéraux de NaCl (halite). Les gisements ont pour origine l'évaporation d'eaux marines ou celles issues de lacs salés.

Solution mining : méthode d'extraction minière par dissolution, qui implique l'injection de solutions chimiques dans les formations souterraines pour dissoudre les minéraux, avant d'être pompées vers la surface pour être traitées.

Subsidence (ou affaissement) : « anglicisme » désignant un affaissement progressif d'une surface (on parlera ici dans ce rapport de subsidence ou d'affaissement de terrain, notamment au droit de cavités de dissolution).

Toit (ou ciel) : banc rocheux laissé au toit du gisement exploité en souterrain formant le plafond naturel de l'exploitation.

3 Généralités

Ce chapitre se propose d'exposer quelques généralités quant à la présence de sel dans le sous-sol, et aux méthodes d'exploitation de ce sel. Il vise notamment à présenter les mécanismes de création de cavités salines d'origine anthropique dans les gisements souterrains de sel.

3.1 Présence du sel dans le sous-sol

Le chlorure de sodium (NaCl) est communément appelé « sel ». Il peut être présent dans le sous-sol après s'être formé à différentes périodes géologiques par évaporation intense d'eau de mer sous un climat chaud (entraînant des dépôts à une vitesse pouvant dépasser 10 cm/an) [1]. On le trouve aujourd'hui en abondance dans la nature, soit à l'état de roche, le sel gemme, soit dissous dans l'eau de mer ou de certaines eaux continentales profondes (aquifères salins profonds, fluides géothermaux ou hydrothermaux) [2].

En France, les gisements de sel gemme (Figure 1) se sont essentiellement formés au Trias, à l'ère Secondaire, il y a 250 à 200 millions d'années, et à l'Oligocène, à l'ère Tertiaire, il y a 33 à 23 millions d'années. Cinq grands bassins salifères en sont issus : le Bassin aquitain, le Bassin subalpin, la région de Comté-Bresse, la Lorraine-Champagne et l'Alsace [2].

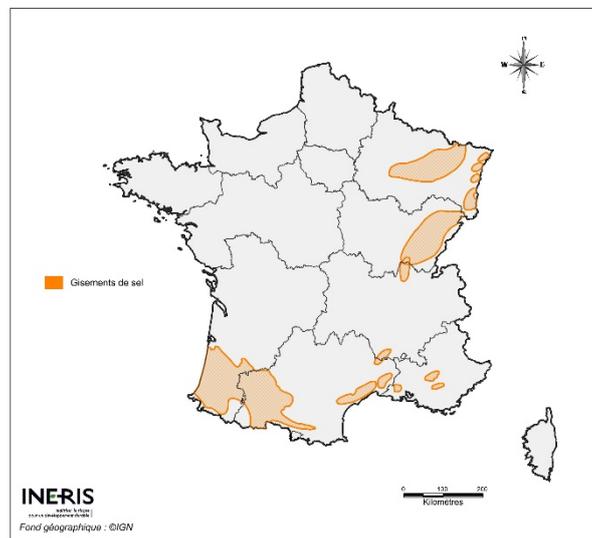


Figure 1 : Les gisements de sel en France (© Ineris)

Les gisements de sel gemme, atteignant la surface ont été exploités dès le Néolithique, entre 6000 et 2300 avant notre ère environ, puis à l'âge du Fer (1000 à 500 avant notre ère), à l'époque romaine, au Moyen-âge, etc. En Europe, ces gisements se trouvent à l'ouest à Cardona en Catalogne (Espagne), en France (Vosges, Lorraine) [3], ainsi qu'au centre et au sud-est du continent (Autriche³, Pologne, Serbie, Croatie, Bosnie, Roumanie, Bulgarie) [4].

3.2 Exploitation du sel dans les gisements souterrains

L'extraction souterraine de sel s'effectue principalement selon deux méthodes : soit par voie minière classique, soit par dissolution. Ces deux méthodes d'extraction seront détaillées dans ce chapitre.

3.2.1 Exploitation par voie minière

L'exploitation du sel par voie minière classique ne constitue pas le cœur de ce rapport : nous la mentionnons ici à des fins informatives. Il s'agit le plus souvent d'une exploitation par la méthode des chambres et piliers abandonnés, similaire à celle utilisée pour d'autres types de minerais. L'extraction du minerai se réalise généralement par foration horizontale puis tirs de mine pour fragmenter et ébouler la partie à extraire. Des vides (ou chambres) sont ainsi créés et séparés par des piliers de minerai

³ Avec la plus vieille mine de sel au monde à Hallstatt (5000 ans avant notre ère).

laissés en place, espacés régulièrement avec des dimensions calculées pour soutenir, au moins temporairement, le poids des terrains sus-jacents et assurer la stabilité globale de la mine [5]. Le sel extrait peut être utilisé directement sans traitement pour le salage des routes, pour des blocs à lécher destinés aux animaux d'élevage et sous forme de granulats pour les industries des cuirs et peaux [1]. En France, cette méthode n'est actuellement utilisée que dans la mine de Varangéville (Figure 2

Figure 2), qui produit en moyenne 500 mille tonnes chaque année.



Figure 2 : Exploitation en chambres et piliers dans la mine de sel de Varangéville (Meurthe et Moselle)
© Comité des Salines de France

3.2.2 Exploitation par dissolution

La méthode d'extraction du sel par dissolution est largement utilisée en France et dans le monde, en raison de sa capacité à atteindre de grandes profondeurs allant jusqu'à plusieurs milliers de mètres, ce qui permet une production de sel plus importante par rapport à la technique minière tout en préservant une rentabilité économique. La Figure 3 montre un schéma de principe d'un type d'exploitation du sel par dissolution (avec un doublet de puits dans le cas illustré). Plusieurs variantes de ce principe existent (sondages uniques, doublets ou piste de sondage, au mur au toit du sel...détaillées plus avant) mais le processus reste le même. Ce processus consiste à réaliser un ou plusieurs puits ou sondages verticaux dans les couches de sel dans lesquels de l'eau douce est injectée. La solution salée ainsi formée (saumure) est pompée vers la surface, entraînant la formation de cavités souterraines par dissolution : la saumure peut être séchée sur place ou envoyée vers une usine de traitement pour produire des sels hydrosolubles, tels que le chlorure de potassium, le chlorure de sodium et le sulfate de sodium, d'une très grande pureté. Ces sels peuvent ensuite être utilisés comme matières premières dans diverses industries chimiques [6]. Un exemple de procédé industriel est la fabrication de carbonates de sodium à l'ammoniaque, développée par le groupe Solvay depuis 1861. Ce procédé utilise du chlorure de sodium, issu de l'exploitation du sel gemme, ainsi que du carbonate de calcium, provenant de carrières de calcaire [7]. C'est ainsi que le groupe a établi sa première usine française sur le site de Dombasle-sur-Meurthe (Meurthe-et-Moselle) en 1873.

En France, la production de sel par dissolution est largement dominante, représentant environ 60 % de la production totale de sel en 2006, soit environ 1 468 000 tonnes [8]. Pour les 40 % restants, 24 % provenaient des travaux miniers classiques et 16 % des marais salants.

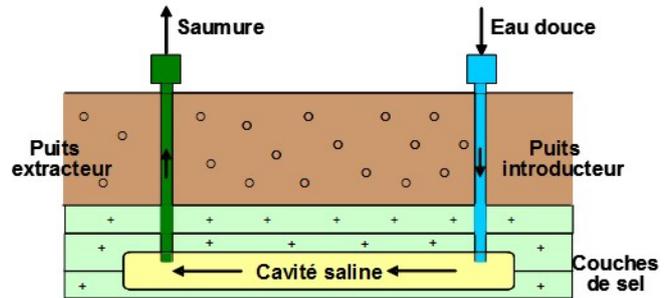


Figure 3 : L'exploitation du sel par dissolution : un exemple d'un site minier © Novopro (photo à gauche) et un schéma de principe d'un type d'exploitation © SEQUENS (schéma à droite)

3.3 Cavités salines dans le monde

Les cavités salines d'origine anthropique sont entièrement creusées dans la couche géologique de sel et se créent facilement en raison de la grande solubilité du sel dans l'eau (environ 358 g/L). Ces cavités peuvent atteindre des dimensions considérables, pouvant s'étendre sur plusieurs dizaines de mètres de diamètre et parfois de quelques centaines de mètres de hauteur [9]. Elles sont généralement créées soit pour l'extraction de sel en elle-même, soit pour le stockage des hydrocarbures liquides ou du gaz naturel, et peuvent remplir ces deux fonctions successivement au cours de leur existence [10]. Cependant, pour pouvoir être utilisées comme sites de stockage après leur formation, les cavités doivent être exploitées dans les règles de l'art, avec une géométrie contrôlée et stable, de manière à rester étanches. En général, les cavités salines de stockage sont créées à dessein, car il existe peu de cas de conversion de sites de production de sel en sites de stockage⁴. Les différentes méthodes d'exploitation par dissolution seront présentées plus en détail dans le chapitre suivant.

Depuis les années 1950, l'extraction du sel par dissolution a connu un développement important dans le monde entier, avec les États-Unis, le Canada, l'Australie et la Chine en tête des régions productrices. Au total, plus de 430 champs de cavités sont documentés dans le monde, avec une grande majorité en Amérique (69 %), suivie de l'Europe (25 %), de l'Asie (6 %) et de l'Afrique (<1 %) [11]. Aux États-Unis, la majorité des champs de cavités creusées dans les dômes de sel servent à stocker du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) et du pétrole brut (réserve stratégique de pétrole du pays). En 2006, ces stockages sont localisés dans 37 installations avec plus de 300 cavités. D'autre part, 30 installations en Amérique du Nord sont connues pour produire de la saumure, dont deux se trouvent au Canada. D'autres installations de production de saumure ont déjà été abandonnées [11].

En Europe, le sel extrait par dissolution (les pastilles bleues sur la Figure 4) représentait en 2006 60 % de la production totale du sel [12]. Ces activités ont conduit à la création de cavités dans les couches de sel, qui représentent 37 % de toutes les cavités salines du continent (Figure 4) et sont principalement situées en France, aux Pays-Bas, en Espagne, en Pologne, en Roumanie et en Bulgarie. En 2006, l'Europe comptait plus de 270 cavités salines, dont plus de 70 sont dédiées au stockage de gaz naturel : plus de 70 % d'entre elles se trouvent en Allemagne [11]. L'Allemagne possède également 90 % des cavités (environ 100) utilisées pour le stockage de pétrole brut et de produits pétroliers et exploite un site de stockage d'énergie sous forme de CAES (Compressed Air Energy Storage) avec de l'air comprimé stocké dans 2 cavités salines [13].

⁴ Cela est dû à la géométrie inadaptée des cavités pour le stockage ou à la technique d'exploitation employée, qui vise avant tout la production de sel plutôt que la conservation de la cavité intacte pour un usage ultérieur (par exemple, méthode par pistes et cavités effondrées).

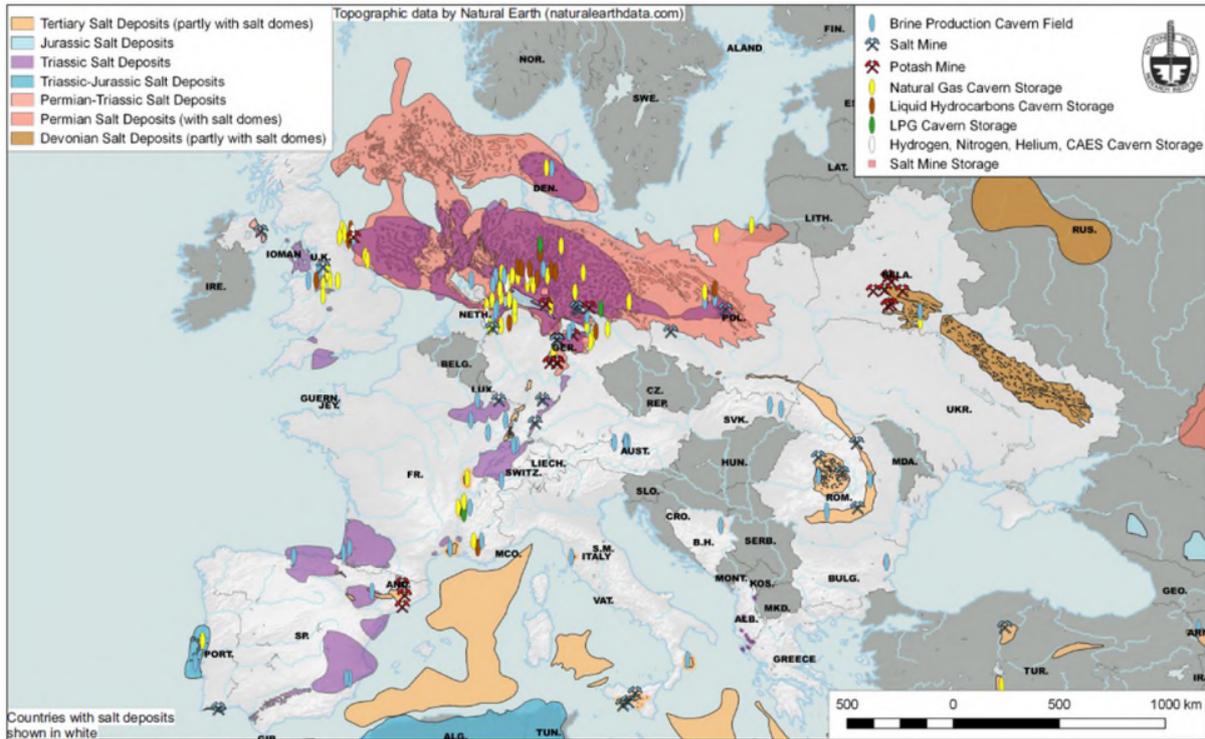


Figure 4 : Gisement de sel en Europe en 2006 avec les champs de cavités ©SMRI

En France, les principales régions productrices de sel par dissolution sont le Grand Est, la Bourgogne-Franche-Comté, la Nouvelle-Aquitaine et la Provence-Alpes-Côte d'Azur (Figure 5).

En 2023, il existe 6 sites de stockage de gaz naturel, d'hydrocarbures et de produits chimiques liquéfiés (GPL, propylène, éthylène) en cavité saline localisés⁵ dans 3 gisements principaux : celui d'Étrez et de Viriat (Ain), celui de Tersanne et d'Hauterives (Drôme) et celui de Manosque (Alpes-de-Haute-Provence) [10]. Au total, sur le territoire national, on trouve 78 cavités salines stockant environ 14 millions de m³ d'hydrocarbures et de produits chimiques liquides ou liquéfiés et 2 milliards de m³ de gaz naturel [14].

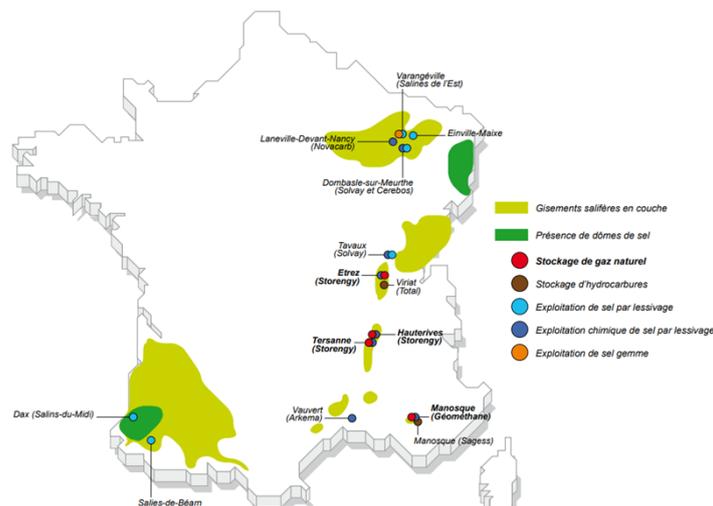


Figure 5 : Les gisements salifères en France (<https://cpdp.debatpublic.fr>)

⁵ La Nouvelle-Aquitaine est l'une des rares régions françaises où d'importantes épaisseurs de sel existent sans être encore exploitées pour le stockage souterrain.

4 Diversité de l'exploitation par dissolution

L'exploitation par dissolution crée une ou plusieurs cavités dont la forme, les dimensions et l'évolution dépendent de la méthode utilisée : cavités interconnectées ou isolées. Ces cavités peuvent être classées en fonction de leur géométrie ou de la profondeur du gisement. Chaque méthode présente une combinaison d'avantages et d'inconvénients, et le choix de la méthode appropriée dépend des caractéristiques spécifiques du gisement, ainsi que des considérations économiques, environnementales et de sécurité.

4.1 Cavités interconnectées

L'exploitation par dissolution peut créer des cavités interconnectées. Cette méthode est employée dans les gisements peu profonds, situés à environ 200-1000 m de profondeur, où les conditions géologiques sont favorables à la création de cavités. Deux méthodes d'exploitation modernes : extensives et intensives (ou « piste et sondages »), sont généralement employées pour ce type de gisement [5].

4.1.1 La méthode extensive

Cette méthode d'exploitation commence généralement par la création de cavités isolées dans la masse de sel par dissolution (Figure 6 gauche), mais faute de maîtrise du processus de dissolution et des outils développés pour gérer et suivre leur évolution, ces cavités finissent par s'étendre et se connecter hydrauliquement (Figure 6 droite) [15]. Avec le temps, cette méthode d'exploitation a évolué vers une configuration où au moins deux puits donnaient accès à une cavité de dimensions elliptique. L'injection de l'eau douce et le pompage de la saumure s'effectuent alors à partir de deux sondages différents (Figure 6 droite). Ce réseau de cavités interconnectées est généralement espacé d'environ 40 à 80 m, et une épaisseur de sel d'au moins 5 m est généralement maintenue au toit du gisement pour assurer la stabilité et l'étanchéité des cavités à long terme [1, 15].

Parmi les exemples de cavités initialement isolées mais qui ont fini par être interconnectées, on cite la cavité de Schoenebeck en Allemagne, exploitée entre 1974 et 1983 jusqu'à une profondeur de 476 m [16], ainsi que les cavités d'Hengelo aux Pays-Bas, exploitées dès 1933 à une profondeur de 350 à 500 m [15]. En France, on peut mentionner l'exemple de la cavité de Gellenoncourt (Meurthe-et-Moselle), située à 250 m de profondeur, résultant de la coalescence de deux cavités, chacune équipées d'un puits.

Cette méthode d'extraction minière, bien qu'elle présente certains inconvénients majeurs, tels qu'un développement lent et des problèmes de contrôle du toit et du diamètre, a été maintenue jusqu'à la fin du siècle dernier. Elle est susceptible de provoquer des mouvements de terrain en surface. À Hengelo, aux Pays-Bas, l'exploitation extensive dans une partie du champ de saumure a entraîné des affaissements en surface de forme circulaire [15]. En Russie, le bassin de Perm Kraï est un important gisement de sel exploité depuis de nombreuses années, présentant également des cavités interconnectées qui ont provoqué des incidents tels que des effondrements et des mouvements de terrain [17]. En France, les cavités interconnectées situées dans le bassin de Lorraine, le plus grand gisement de sel exploité dans le pays depuis le début du XX^{ème} siècle [18], ont également entraîné des incidents similaires à ceux précédemment mentionnés [19, 20].

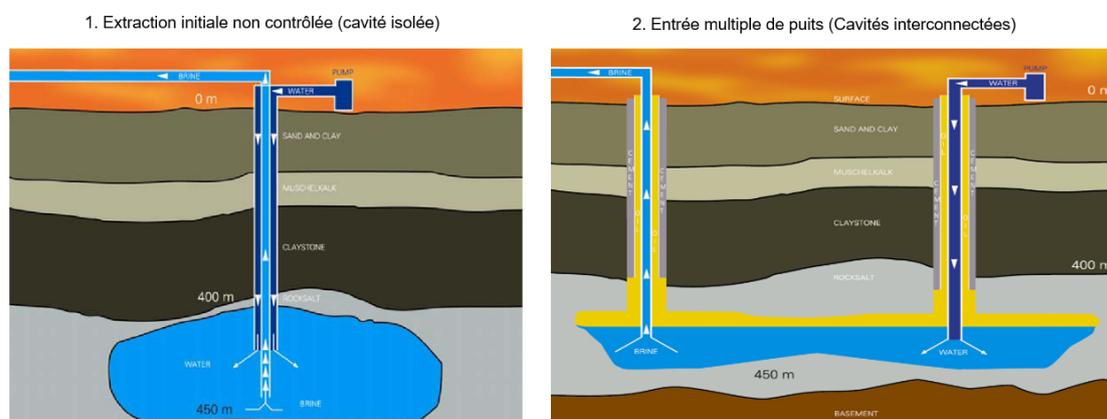


Figure 6 : Exploitation extensive d'un gisement peu profond (450 m) à Hengelo, Pays Bas [15]

4.1.2 La méthode intensive ou par « pistes et sondages » :

Cette méthode d'exploitation consiste à créer par dissolution un chenal de communication reliant un alignement (piste) de sondages forcés jusqu'au mur du gisement [5]. L'injection de l'eau douce et l'extraction de la saumure sont ensuite réalisées respectivement à l'amont et à l'aval de la piste, permettant un lessivage complet et une exploitation quasi-totale de l'épaisseur du gisement (Figure 7). Cette méthode permet un taux d'extraction élevé, mais elle rend les cavités instables, susceptibles de s'écrouler et d'entraîner d'importants mouvements de terrain en fonction la nature des couches de recouvrement et des dimensions des cavités créées [5]. Afin de maîtriser l'évolution exponentielle d'un tel mécanisme, l'effondrement est provoqué volontairement par l'exploitant en permettant un développement contrôlé de la taille des cavités en amont des pistes jusqu'à provoquer l'effondrement de recouvrement (Figure 7) [19].

La formation d'un cratère d'effondrement en fin d'exploitation crée une barrière à toute utilisation économique future de la surface exploitée, en dehors des aspects de sécurité, d'hydrogéologie et d'environnement. Lorsque cette méthode est autorisée, plusieurs exigences doivent être prises en compte, telles que la prédiction précise de l'effondrement de la cavité, l'absence de préjudice futur pour les ressources en eau potable régionales ou la dissolution incontrôlée favorisée par l'existence du cratère, et l'absence de mesures de remédiation permanentes nécessaires [20].

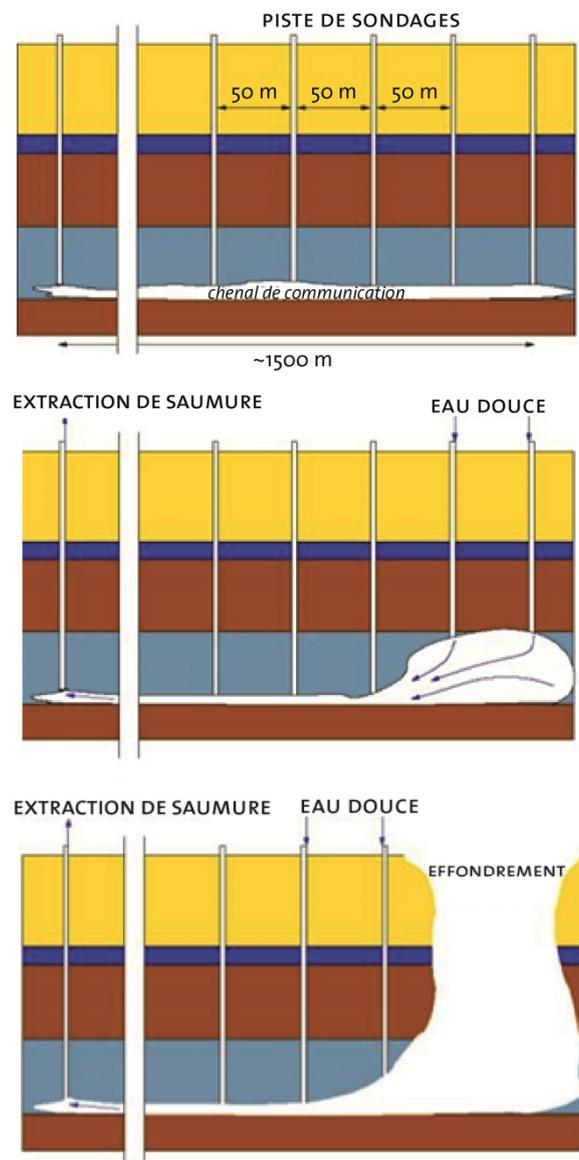


Figure 7 : Méthode intensive par pistes et sondages © Ineris

La méthode par pistes et sondages n'est pas toujours applicable au cas des gisements de sel profonds car le creusement serait trop coûteux et/ou techniquement difficile à réaliser. De plus, la qualité et la teneur en sel peuvent varier considérablement dans les gisements de sel, ce qui rend difficile la détermination précise de l'emplacement et de l'étendue de la zone de minerai de haute qualité à l'aide de sondages.

En France, cette méthode d'exploitation est utilisée dans de nombreuses régions, et elle est d'ailleurs toujours employée dans les sites salins de Cerville-Buissoncourt et d'Haraucourt (Figure 8), situés dans le bassin salifère de Nancy (Meurthe-et-Moselle) [21].

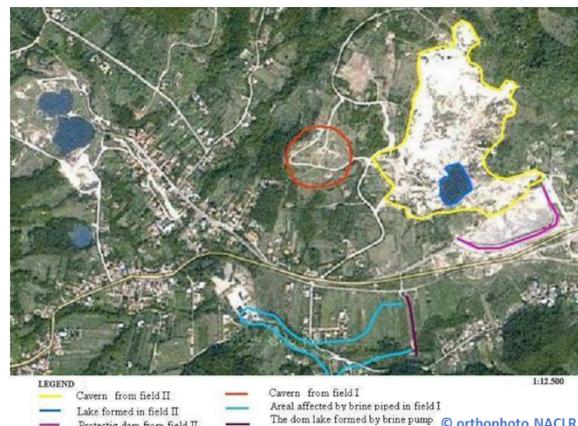


Figure 8 : Visualisation du résultat en surface des effondrements « contrôlés » des salins d'Haraucourt en Meurthe et Moselle (54) © Maison du sel

Parmi les exemples de cratères d'effondrement de cavités salines dans le monde [22], on peut citer celui de Preesall au Royaume-Uni et de Ocnele Mari en Roumanie (Figure 9).



Preesall (RU)



Ocnele Mari (Roumanie)

Figure 9 : Exemples d'effondrements localisés provoqués de cavités salines dans le monde : Preesall (Royaume-Uni) © PN Joan Martin et Ocnele Mari (Roumanie) © Orthophoto NACLR.

4.2 Cavités isolées

La méthode de la cavité isolée ou « stable » est largement utilisée dans le monde entier, notamment pour les gisements profonds (> 1000 m). Cependant, il existe également des exemples de cavités peu profondes, notamment en France, telles que la cavité de stockage de Caresse (Pyrénées-Atlantiques), située à une profondeur d'environ 315 m [23] et celle d'Art-sur-Meurthe (Meurthe-et-Moselle), située à 115 m de profondeur [24].

D'après le Groupe International des Experts (IEG), cette méthode est considérée comme une option d'exploitation sûre et efficace, à condition que les cavités souterraines soient conçues, exploitées et abandonnées en appliquant les meilleures pratiques [20]. D'ailleurs, cette méthode est la seule option considérée dans certains pays, tels que l'Allemagne ou les Pays-Bas depuis la réglementation minière

mise en place à partir de 2005. Cependant, il est important de souligner que, bien que ces pays puissent être comparables à la France du point de vue des risques de mouvements de terrain liés à l'exploitation minière et de la protection de l'environnement, des différences significatives existent. : Par exemple, dans le nord de l'Allemagne, le sel peut être trouvé dans des dômes de sel où des cavités plus profondes peuvent être créées, alors qu'aux Pays-Bas, la conservation du niveau du sol est, en général, une obligation plus stricte que celle en vigueur en France [15].

La méthode d'exploitation consiste à introduire un double tubage dissolution/pompage dans un sondage isolé. La géométrie de la cavité dépend des paramètres d'injection d'eau douce et de pompage de la saumure. Deux méthodes de circulation peuvent être utilisées : la méthode de circulation directe, dans laquelle l'eau douce est injectée par le tubage interne et la saumure est retirée par le tubage externe, favorisant ainsi l'expansion de la partie inférieure de la cavité (comme illustré sur la Figure 10). D'un autre côté, la méthode de circulation inverse consiste à injecter l'eau douce par le tubage externe et à retirer la saumure par le tubage interne, ce qui favorise l'expansion de la partie supérieure de la cavité. Des combinaisons de ces deux méthodes ou d'autres méthodes plus complexes peuvent être utilisées pour obtenir la géométrie de cavité souhaitée [25, 26]. Le contrôle et la limitation de l'extension verticale des phénomènes de dissolution du sel au toit de la cavité dépendent de la mise en place d'un matelas de fluide, gaz ou liquide inerte de densité inférieure à celle de la saumure, tel que de l'air (Figure 10), de l'azote, du fioul ou de l'huile [27].

Pendant le processus de dissolution, des particules insolubles telles que de l'anhydrite (CaSO_4) ou des argiles, présentes dans le sel, s'accumulent au fond de la cavité formant ainsi un dépôt qui peut atteindre jusqu'à 15 m d'épaisseur, en fonction de la taille du gisement et de la quantité d'impuretés présentes [5]. Ce dépôt contribue en continu au remplissage partiel de la cavité. Le niveau de ce dépôt d'insolubles peut atteindre les tubes d'injection, obligeant ainsi l'exploitant à les remonter progressivement au fur et à mesure de l'entassement de ces dépôts. Par exemple, l'exploitation des gisements de sel par Salinen Austria en Autriche, qui se situe entre 300 et 700 m de profondeur, est limitée par leur forte teneur en insolubles, généralement comprise entre 30 et 50 % [26]. Ceci a entraîné une limitation de la hauteur maximale résiduelle des cavités salines de 5 à 20 m environ.

Comme pour la méthode extensive, une garde ou planche de sel d'épaisseur suffisante est maintenue au toit de la cavité pour en assurer sa stabilité. Il est possible de créer un champ de cavités isolées les unes des autres en répétant ces opérations à partir de plusieurs sondages.

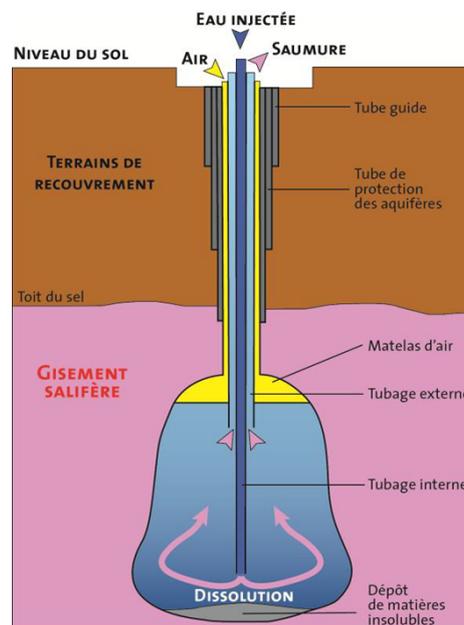


Figure 10 : Exemple de technique d'exploitation du sel par dissolution par forage isolé en circulation directe ©CSME (modifié)

Les gisements profonds de sel gemme sont exploités non seulement pour leur contenu en substance, mais également pour leur capacité de stockage. En effet, les cavités artificielles créées dans ces gisements peuvent servir ultérieurement de réservoirs pour les hydrocarbures et le gaz naturel, grâce à la faible perméabilité de l'encaissant [28] et à la possibilité de contrôler la taille des cavités en ajustant les positions et les débits d'injection. Par exemple, la cavité de sel de Schoenebeck en Allemagne a été

utilisée à des raisons diverses au cours de ses 35 années d'histoire, allant de la production de saumure à un stockage temporaire de déchets souterrains de dichloropropane (DCP) [16]. En Pologne, 12 cavités exploitées à Góra depuis 1960 jusqu'à une profondeur de 1750 m ont été converties en 2002 pour le stockage de pétrole et de carburant [29]. En France, une expérimentation de conversion d'une cavité saline en stockage d'hydrogène vert est prévue en 2023 à Etrez (Ain) dans le cadre du projet "HyPSTER" [30].

La finalité des cavités de sel gemme artificielles créées pour l'extraction de la substance ou pour le stockage d'hydrocarbures est d'être abandonnées en fin d'exploitation. Bien que la méthode par cavités isolées ou stables présente moins d'inconvénients que celles pouvant conduire à un effondrement délibéré des cavités, il n'est pas exclu que des déformations et des affaissements, conduisant à des mouvements de terrain en surface, puissent se produire et entraîner des dommages sur les infrastructures environnantes. De plus, des eaux souterraines peuvent s'accumuler dans les cavités, ce qui peut causer des problèmes environnementaux tels que la contamination des eaux et une dissolution parasite du sel. Le chapitre suivant a ainsi pour objectif de présenter les connaissances disponibles et les traitements appropriés à la gestion dans le temps de ces cavités abandonnées.

5 Abandon des cavités salines

Depuis quelques années, la question de l'abandon des cavités salines 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), depuis plus de vingt ans [31]. Ces travaux ont permis d'établir des fondements scientifiques pour garantir un abandon sécurisé et durable des cavités salines. Un guide pratique a été publié à cet effet par Crostogino & Kepplinger (2006) [32], et des expérimentations ont été menées - par exemple en France à Carresse-Cassaber, Tersanne, Etrez ou Vauvert - dans le but d'améliorer les connaissances sur le comportement à long terme des cavités salines et de mettre au point les méthodologies d'abandon qui prévaudront dans les années à venir [33, 34, 35].

Plusieurs problèmes sont susceptibles de se poser après l'exploitation et lors de l'abandon des cavités salines, principalement en raison du changement de la pression à l'intérieur de la cavité. Les problèmes les plus importants sont [34] :

- le risque de rupture ou de perte excessive du volume de la cavité (effondrement), en particulier lorsque la cavité est profonde et que sa pression interne est très basse ;
- le risque de fuite à travers la cimentation autour du puits, notamment suite à une mise en pression de la cavité ou lorsque le puits d'accès n'est pas correctement scellé ;
- le risque de micro-fracturation ou de fracturation de l'encaissant, surtout lorsque la pression est élevée, ce qui peut mettre en péril la stabilité de la cavité.

Le concept d'abandon le plus étudié ces dernières années, notamment documenté dans le guide de 2006 [32], consiste à remplir la cavité de saumure et à obturer définitivement le puits d'accès en injectant (partiellement ou totalement) du ciment, tout en mettant en place un bouchon métallique spécial au niveau du cuvelage (Figure 11). C'est cette stratégie qui a, par exemple, été choisie pour la fermeture du site de Carresse-Cassaber [36].

Selon les avis émis par les experts et les exploitants [37], ce concept est actuellement considéré comme offrant le plus de garanties de sécurité à long terme, tout en restant relativement pragmatique et économiquement acceptable pour l'exploitant⁶. Fondamentalement, cette approche vise à préserver l'intégrité mécanique et l'étanchéité de la cavité à long terme. Une fois fermée, la cavité 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 géostatique (pression exercée par le poids des terrains encaissants) [34].

⁶ Cette méthode est préconisée pour l'abandon des cavités de production de sel ou de stockage.

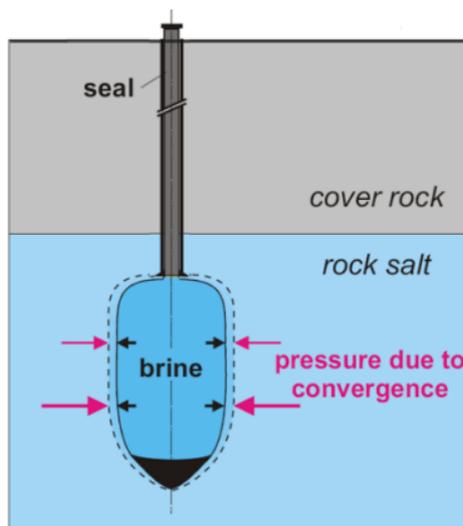


Figure 11 : Le principe standard (dit « principe SMRI ») d'abandon d'une cavité lessivée dans le sel (brine = saumure) [32]

Dans la suite de ce chapitre, nous examinerons en détail la validité de cette méthode d'abandon à long terme, ainsi que le programme d'observation et de contrôle de l'évolution de la cavité qui devrait être mis en œuvre tout au long du processus. Toutefois, dans un premier temps, nous proposons de décrire les phénomènes qui influencent l'évolution de la pression à l'intérieur de la cavité.

5.1 Phénomènes contribuant au changement de pression

Il existe quatre phénomènes principaux qui peuvent interagir à différentes phases et qui peuvent exercer une influence prépondérante sur l'évolution de la pression dans une cavité abandonnée [36, 38] (Figure 12) :

- l'expansion thermique de la saumure ;
- le fluage du sel gemme ;
- la perméation de la saumure ;
- la fuite dans le cuvelage à travers la cimentation.

L'expansion thermique de la saumure est considérée comme le phénomène prédominant dans l'augmentation de la pression. Lors du processus d'abandon de la cavité saline, la saumure injectée est généralement à la température de la surface (autour de 12°C en moyenne annuelle) [36]. Sa mise en contact avec le massif de sel beaucoup plus chaud (entre 20-70°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). Il est donc nécessaire d'attendre que la saumure atteigne une température suffisante (température appelée « critique » ou « de sécurité ») pour stabiliser la pression avant de procéder à l'obturation définitive de la cavité.

Le fluage du sel est un phénomène physique naturel qui entraîne une convergence des parois de la cavité, tendant à refermer la cavité et à augmenter la pression du fluide qu'elle renferme.

La perméation de la saumure permet "la fuite" de la saumure à travers la roche encaissante. Elle crée un débit très faible mais, compte tenu du volume de la cavité, son impact n'est pas négligeable. Il tend à réduire la pression dans la cavité et à contrer les effets du fluage du sel et de l'expansion thermique de la saumure.

La fuite de la saumure à travers la cimentation autour du puits est considérée comme un phénomène important quand le puit est ouvert et contribue à libérer la saumure, et à diminuer la pression pour qu'elle ne dépasse pas l'état d'équilibre. Une fois que le puits est bouché, ce phénomène devient presque négligeable.

Outre ces phénomènes, la pression dans la cavité peut également être influencée, dans une moindre mesure, par [39, 34, 40] (Figure 12) :

- **la dissolution/cristallisation du sel** qui tend à modifier le volume de la cavité ;
- **les variations de la pression et de la température atmosphérique** provoquant de larges fluctuations irrégulières du débit de saumure libérée ;
- **les effets de la marée terrestre**⁷, en particulier pour les cavités qui se trouvent près des zones côtières où les marées sont plus importantes ; ils sont généralement de faibles amplitudes tels que des fluctuations de la pression à la tête du puits.

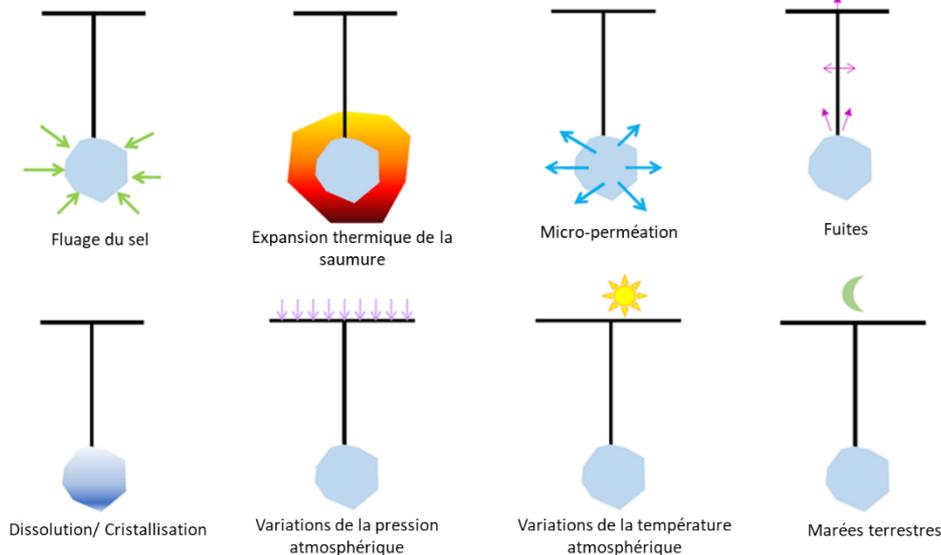


Figure 12 : Différents phénomènes agissant sur l'évolution de la cavité saline post-exploitation [41]

5.2 Evolution de la pression dans une cavité fermée

Les quatre effets dominants mentionnés dans le chapitre précédent doivent être pris en compte pour simuler la pression d'équilibre de la cavité, située entre la pression halmostatique et la pression géostatique [34, 36], ainsi que le niveau maximal que la pression peut atteindre dans la cavité après l'abandon.

Si l'on considère une cavité sphérique fermée remplie de saumure, l'importance relative des quatre effets dépend de plusieurs paramètres tels que la profondeur et la taille de la cavité, la perméabilité, les propriétés mécaniques du sel et l'historique de la cavité avant son abandon. Toutefois, on peut regrouper ces paramètres en deux catégories principales.

- **Petites cavités (< 15 000 m³) relativement peu profondes (< 1000 m)**

Comme la cavité est « petite », l'écart initial de température entre la saumure et le massif se résorbe avant la fin de la période d'exploitation ou après une petite période d'attente (quelques années) qui suffit pour que l'effet thermique disparaisse rapidement. 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 sa pression interne, 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 (Figure 13).

Ainsi, la pression initiale dans la cavité fermée, imposée par l'injection ou le retrait de la saumure, va lentement tendre vers une valeur d'équilibre où le volume de saumure sortant équivaut exactement à la perte de volume liée à la fermeture de la cavité. Cette pression d'équilibre est bien inférieure à la pression géostatique et, par conséquent, n'entraîne pas de risque de fracturation.

⁷ Déformation de la surface terrestre due à l'attraction lunaire et solaire. Son amplitude, mesurée par satellite, peut dépasser le mètre.

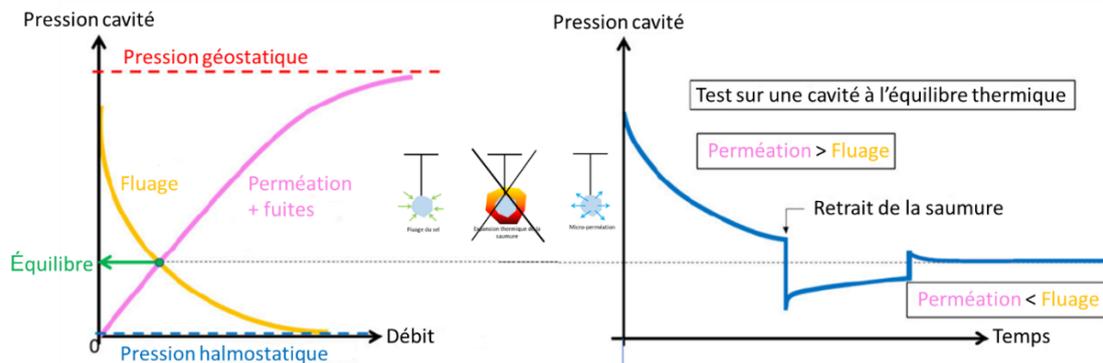


Figure 13 : Test d'abandon sur une cavité peu profonde effectué à l'équilibre thermique [41]

Quelques essais *in situ* soutenus par le SMRI (Solution Mining Research Institute) ont confirmé cet énoncé. En France, des tests d'abandon ont été réalisés sur des petites cavités relativement peu profondes à Etrez (Ain) en 1997 et suivis pendant 17 ans et à Caresse-Cassaber (Pyrénées-Atlantiques) en 2004 pendant 8 ans (Figure 14). Leurs résultats montrent une convergence lente de la pression de la saumure vers une pression d'équilibre qui, à mi-profondeur de la cavité est inférieure à la pression géostatique [33].

Un autre test d'abandon a été réalisé à Gellenoncourt sur deux cavités coalescentes connectées hydrauliquement, d'un volume total important de 240 000 m³ (Figure 14). Cet essai a mis en évidence que malgré un écart initial de température relativement faible entre la saumure et le massif en raison de la faible profondeur de la cavité, la grande taille de celle-ci a entraîné un taux de diminution de la température extrêmement lent. Ainsi, un écart de température infime subsistait au moment du début de l'essai, après près de 30 ans d'abandon. Cet écart a engendré une différence significative entre les prévisions et les mesures, rendant ainsi plus difficile la formulation de conclusions quant à l'atteinte de la pression d'équilibre [33].

En Allemagne à Staßfurt, un essai a été également réalisé sur deux cavités peu profondes (400 – 500 m de profondeur) et il présente une cohérence avec la notion de pression d'équilibre [31].

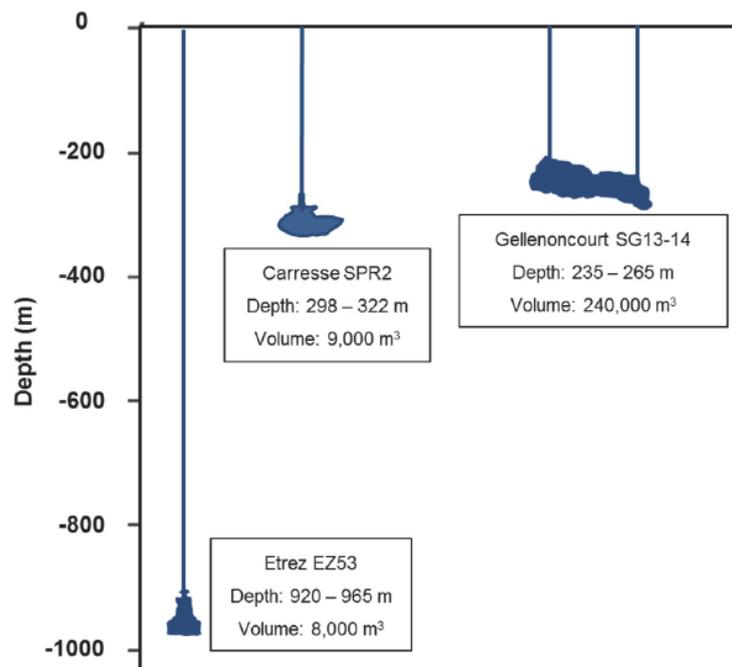


Figure 14 : Principales caractéristiques des cavités salines testées à l'abandon en France [33]

- **Grandes cavités (> 15 000 m³) relativement profondes (> 1000 m)**

Dans le cas de grandes cavités situées en profondeur où l'écart initial de température entre la saumure injectée et le massif du sel est très petit, la pression d'équilibre atteinte est très proche de la pression

géostatique à cause de la faible perméabilité du sel ($k < 10^{-21} \text{ m}^2$) et du fluage fort aux grandes profondeurs [34]. Dans ce contexte, quand la dimension verticale de la cavité est grande ($> 200 \text{ m}$), la pression de saumure au sommet de la cavité peut dépasser légèrement la pression géostatique, ce qui produit un risque de fracturation [42]. Les études de Ratigan (2000) [43] prouvent que la perméabilité du sel augmente quand la pression de saumure est proche de la pression géostatique. Ceci favorise la perméation de la saumure et la détente de la cavité. Cet accroissement de perméabilité a été confirmé par des essais en laboratoire et *in situ*. Par exemple, l'essai d'une cavité dans le site d'Etzel en Allemagne [44] a mis en évidence la formation de microfissures dans la paroi de la cavité et l'apparition de volumes d'infiltration élevés lorsque la pression interne dépasse la pression géostatique.

En général, dans les cavités profondes, il y a une grande différence de température entre la saumure et le massif rocheux encaissant en raison du gradient géothermique (qui vaut en moyenne $30^\circ\text{C}/\text{km}$ en France). Dans ce cas, les deux phénomènes, expansion thermique et perméation, jouent un rôle important sur l'évolution de la pression. Si l'écart initial de température est important, le réchauffement peut être très lent et cet écart peut persister pendant des décennies, entraînant des augmentations de pression importantes à l'intérieur de la cavité qui peuvent dépasser le seuil de perméation du sel. Il est ainsi recommandé d'attendre un certain temps avant de fermer la cavité pour éviter des problèmes tels que des fuites et des fissures dans la roche encaissante qui pourraient potentiellement entraîner la contamination de l'eau souterraine, voire causer des dommages en surface. L'équilibre thermique peut prendre jusqu'à 50 voire 100 ans pour être atteint, en fonction de la perméation du sel, du volume et de la géométrie de la cavité⁸ [45].

En réalité, il est peu probable que les cavités soient complètement étanches. En effet, des travaux de modélisation réalisés par Brückner en 2023 [46] montrent qu'une cavité fermée continue à libérer très lentement de la saumure dans le massif de sel (Figure 15). Cette saumure peut s'infiltrer dans la masse de sel environnante ou s'écouler vers un aquifère supérieur, le long des puits d'accès cimentés, même après que les puits ont été correctement bouchés [20]. Dans ce cas, la cavité se rétrécit progressivement en raison du fluage du sel provoqué par l'écart entre la pression géostatique à la profondeur de la cavité et la pression de saumure dans la cavité.

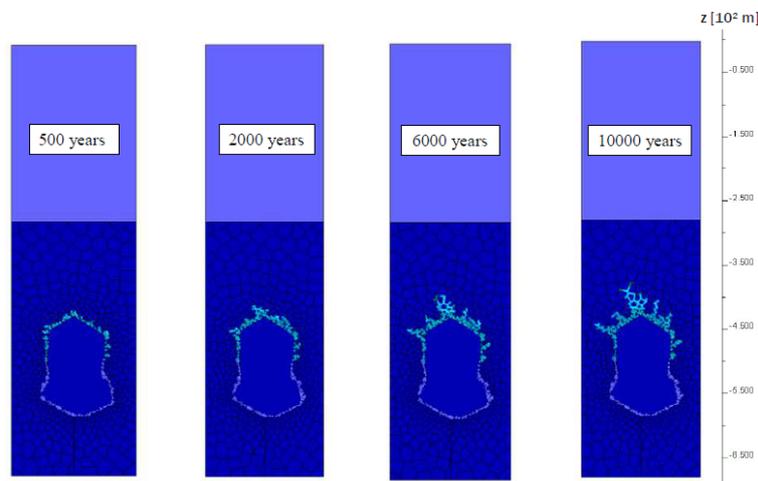


Figure 15 : Résultats de simulation de l'infiltration de la saumure d'une cavité profonde dans le massif de sel sur le long terme (après 500, 2000, 6000 et 10000 ans) [46]

5.3 Mesures de suivi de l'évolution de la cavité

Le scénario le plus préoccupant est celui d'une cavité conçue pour rester stable, mais qui finit par se dégrader et devenir instable, comme cela s'est produit à Drouville, Lorraine (Meurthe-et-Moselle) en France [20] ou à Hengelo aux Pays-Bas [15]. Afin d'éviter ce scénario, les mesures suivantes devront être mises en place :

⁸ Une cavité élancée se réchauffera plus rapidement qu'une cavité de forme isotrope du fait de sa surface de contact plus importante entre la saumure et le massif [36].

Des règles de dimensionnement spécifiques des cavités doivent être mises en œuvre. Selon une étude de cas réalisée par l'école des Mines de Paris dans le sel de Lorraine [20], l'extension horizontale maximale la plus raisonnable pour les cavités est de 80 m et la distance minimale admissible entre deux cavités est de 40 m. Le maintien d'une épaisseur du sel au toit des cavités de sel de Lorraine est crucial pour éviter d'endommager les couches marneuses sus-jacentes au contact de la saumure. Bien que les calculs suggèrent qu'une couche de sel relativement mince de 2,5 m serait suffisante pour assurer la stabilité mécanique, des incertitudes géologiques subsistent, notamment en ce qui concerne l'emplacement précis du sommet de la formation de sel. Par conséquent, une marge de sécurité de 10 m d'épaisseur de sel est recommandée pour éviter tout contact direct entre la saumure et les couches marneuses. Il est toutefois nécessaire de noter que ces dimensionnements varient d'une situation à l'autre et qu'il faut procéder à une étude spécifique pour chaque cas.

La caractérisation de l'état de la cavité et du puits pendant l'extraction du sel. Les techniques de contrôle de routine employées dans la saline de Hauterives (Drôme) sont les suivantes [45] :

- acquisition de données sur les paramètres de fluage du sel, par exemple à partir des capteurs de pression ou de température ;
- mesure de la perméabilité du massif de sel (sel + bancs d'insolubles) nécessitant un test d'étanchéité sur cavité. Ce test peut consister à injecter ou extraire de l'eau dans ou depuis la cavité tout en surveillant les changements de pression et de débit pour évaluer la perméabilité ;
- sonars annuels pour contrôler le volume, la géométrie de la cavité et son évolution dans le temps ;
- campagnes de levés topographiques (tous les 3 ans) pour suivre les déformations de la surface engendrées à l'échelle générale par les cavités ;
- prélèvements piézométriques semestriels pour suivre la concentration en sel dans les aquifères sus-jacents, ce qui pourrait être la signature d'une migration de saumure depuis la cavité.

Formulation de prévisions à long terme après la fin de l'extraction du sel, notamment pendant la durée du rééquilibrage thermique [45] :

- suivi de la température de la saumure dans la cavité ;
- suivi de la pression en tête de puits avec évacuation de la saumure pour maintenir une pression correcte. Ce suivi doit être maintenu jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit approximativement atteint ($\Delta T < 5\%$) [17].

Aux Pays-Bas, la période de surveillance en fin d'exploitation est de 30 ans. Le Groupe International des Experts (IEG) recommande une période de surveillance d'au moins 20 ans [20]. Dans de nombreux pays, tels que les Pays-Bas, l'Allemagne, l'Espagne et l'État de New York aux États-Unis (au site de Tully), un plan d'abandon doit être soumis aux autorités minières avant que la saumure ne soit extraite. Ce plan inclut une prévision des changements attendus sur 2 ou 3 décennies, et l'objectif du programme de mesure est de vérifier la concordance entre les changements prévus et observés [47]. Si les résultats le suggèrent, le plan peut prévoir une réévaluation de la fréquence de mesure. Les paramètres à mesurer incluent le nivellement de surface, un paramètre important et relativement facile à déterminer. Les prévisions quantitatives peuvent couvrir une période d'au moins un siècle et des considérations qualitatives peuvent être faites pour une période de plusieurs siècles après l'abandon de la cavité.

5.4 Conséquences géotechniques et aspects environnementaux

A très long terme et même si la cavité abandonnée ne subit aucune instabilité majeure⁹, la convergence liée au fluage du sel va amener celle-ci à se refermer sur elle-même¹⁰. Le retour d'expérience des affaissements qui ont eu lieu à la suite d'une fermeture rapide et inattendue de certaines cavités dans le sel, qu'il s'agisse de cavités d'exploitation du sel (Twenthe-Rijn et Heiligrelee aux Pays-Bas) ou de cavités de stockage (Tersanne en France, Eminence aux États-Unis [48]), montre que, dans certains contextes, la vitesse de fermeture peut être beaucoup plus rapide que celle prévue par modélisation du

⁹ en réalité, des phénomènes d'instabilité tels que des chutes de toit ont souvent lieu dans de nombreuses cavités [36]

¹⁰ Notons que les calculs de fluage ne tiennent pas compte de ce type d'endommagement autour de la cavité (ruptures de bancs, chutes de toit) qui tend à en accélérer la fermeture des cavités salines.

fluage : une vitesse d'affaissement de terrains sus-jacents de l'ordre du cm/an n'est pas à exclure [49, 36].

Par exemple, dans la concession de Twenthe-Rijn aux Pays-Bas, plusieurs affaissements progressifs de la surface au-dessus des cavités abandonnées ont été enregistrés depuis les années 1960. Le plus marquant est celui apparu en 1991, du jour au lendemain, avec environ 5 m de profondeur et 30 m de diamètre (Figure 16a). La vitesse de la remontée du vide en surface dans cette région est estimée à 5-15 cm/an [50]. En Chine, un fontis de 4200 m² s'est produit en 2010 dans l'exploitation par dissolution de Huichang, dans la région de Jiangxi, et a induit la formation d'un lac salin de 77,5 x 60 m par 15,8 m de profondeur [51]. La Figure 16b présente un lac salin formé dans la concession de Yunmeng, Hubei (Chine), en 2012 à la suite d'un affaissement de plus de 7000 m² qui a endommagé les installations en surface et a provoqué de graves nuisances à la végétation et aux eaux souterraines. D'autres affaissements/fontis bien documentés, résultant de l'exploitation par dissolution, se trouvent aux États-Unis, notamment au Kansas (Cargill Sink) et dans le Michigan (Grosse Ile) [52], au Canada (Ontario) et en Angleterre (Windsor) [53].

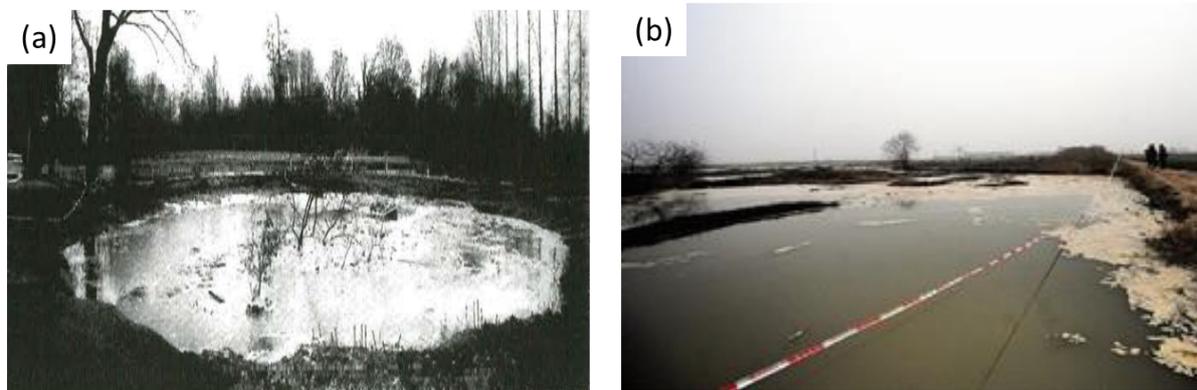


Figure 16 : Effondrement au-dessus d'une cavité saline : a) la concession Twenthe-Rijn au Pays-Bas [50] et b) la concession de Yunmeng en Chine [51]

En 2021, Réveillère et al. [54] ont mené une étude détaillée sur les incidents survenus dans 58 cavités salines à travers le monde. Outre le fluage rapide et inattendu, cette étude a montré qu'il existe plusieurs conditions possibles à l'origine de l'augmentation des désordres en surface, notamment les fuites, le mauvais remplissage de la cavité par de la saumure, les fracturations, les chutes majeures de blocs, les effondrements de toit et le maintien de connexions hydrauliques entre plusieurs cavités. La contribution de chaque mécanisme influence la séquence et la géométrie de la formation d'un affaissement. Cependant, la compréhension limitée de ces mécanismes rend difficile la création de modèles précis pour simuler l'effondrement des cavités. Une meilleure compréhension de la résistance à la fissuration des matériaux géologiques est nécessaire pour les intégrer adéquatement dans ces modèles [53].

Ainsi, il demeure nécessaire de mettre un place un plan d'abandon complet avant la fin de l'exploitation, afin de prévenir les affaissements et les effondrements provoqués par les cavités salines. Ce plan devrait inclure une description détaillée des mesures de suivi sur le court et le long terme (nivellement, pression, température...) ainsi que les stratégies de traitement envisageables. Ce plan doit permettre la comparaison des changements attendus des paramètres mesurés avec ceux observés *in situ*. Les nombreux travaux de recherche effectués montrent bien que le processus d'abandon « classique » décrit dans ce chapitre n'est pas aussi simple qu'on pourrait le penser, et qu'il exige une analyse approfondie ainsi qu'une période d'exécution significative. Dans le chapitre suivant, nous explorerons plus en détail la faisabilité du remblayage en tant que solution potentielle pour achever l'abandon de manière sécurisée et efficace.

6 Pratiques de remblayage dans les cavités salines abandonnées

6.1 Généralités

L'objectif principal du remblayage des cavités salines abandonnées est d'atténuer les problèmes de stabilité et les risques de mouvements de terrain évoqués ci-dessus.

Le remblayage des cavités permet de limiter l'affaissement du sol au-dessus de celles-ci [55]. Ce phénomène s'explique par le fait que le remplissage réduit la vitesse de fermeture de la cavité, en raison de l'effet de confinement exercé par les matériaux solides sur le massif environnant. L'affaissement est ainsi ralenti et réduit en amplitude (Figure 17). Enfin, l'affaissement cesse lorsque le matériau de remplissage atteint sa limite de compression.

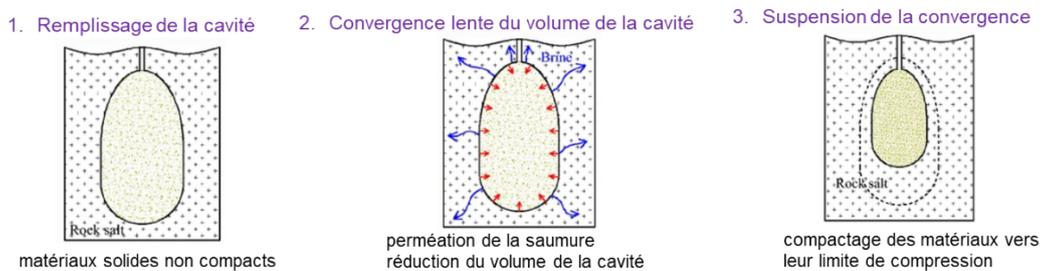


Figure 17 : Schéma illustratif du principe de remblayage dans les cavités salines [55]

Selon le guide SMRI publié en 2006 sur les techniques d'abandon des cavités [32], notamment en ce qui concerne la pratique du remblayage et l'efficacité au fil du temps des matériaux généralement utilisés pour ce type d'opération, l'effet de confinement ne devient significatif qu'après une compaction d'environ 15 à 20 %. Cependant, cette valeur dépend des caractéristiques pétrophysiques des matériaux, telles que la porosité et la perméabilité.

6.2 Méthodes de remblayage

Dans le guide de 2006 sur les techniques d'abandon des cavités [32], différentes options ont été étudiées en fonction de la condition initiale de la cavité et du traitement appliqué. Pour ce faire, une cavité profonde de 300 m de haut et de 500 000 m³ de volume a été utilisée comme modèle pour simuler l'évolution de la vitesse de fermeture au fil du temps selon la méthode d'abandon.

Les résultats de simulation sont présentés sur la Figure 18. Les courbes I, II et III illustrent l'impact de différentes conditions initiales sur la fermeture de la cavité lors de l'utilisation de la méthode de remblayage. La courbe I correspond à une cavité initialement vide à pression atmosphérique, la courbe II à une cavité remplie de saumure opérée à pression d'équilibre, et la courbe III à une cavité remplie de saumure opérée à une pression maximale, qui est d'environ 15 à 20 % inférieure à la pression géostatique. La courbe IV montre quant à elle l'évolution de la vitesse de fermeture de la cavité lors de l'utilisation du processus d'abandon "classique" sans traitement par remblayage (voir paragraphe 5).

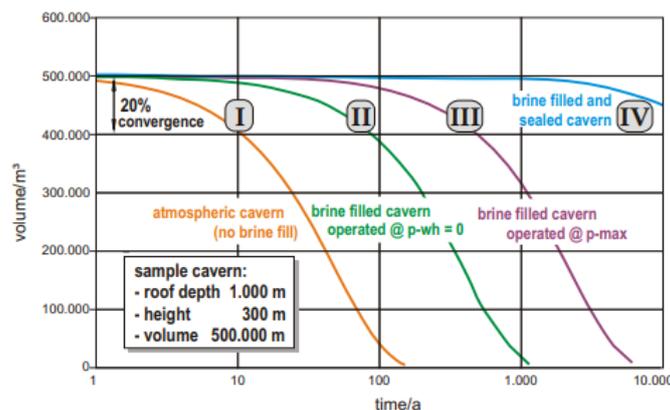


Figure 18 : Evolution de la fermeture de la cavité selon la méthode d'abandon [32]

Le traitement par remblayage des cavités vides à pression atmosphérique, telles que les cavités après stockage, est schématisé sur Figure 19 (cas de recherche). Cette opération ne suit pas les principales étapes d'abandon évoquées dans le chapitre 5. En effet, la vitesse de fermeture de la cavité dès les premières phases, c'est-à-dire avant d'atteindre une compaction suffisante de remblai, est similaire à celle d'une cavité vide, et une augmentation suffisante de la pression dans la cavité ne s'établit que progressivement sur une longue période.

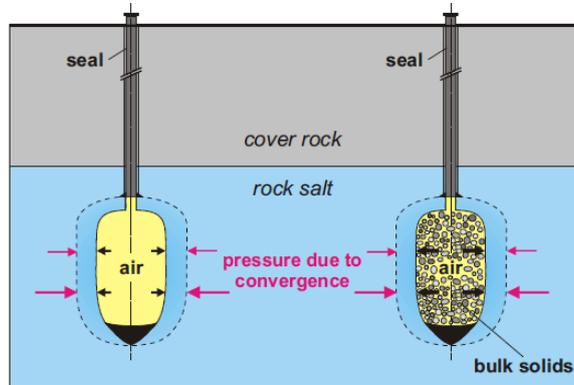


Figure 19 : Méthode de remblayage à partir d'une cavité vide à pression atmosphérique (cas de recherche) [32]

Le graphique de l'évolution du volume de la cavité en fonction du temps montre que, pour une cavité vide (courbe I dans la Figure 18), une réduction de volume de 20 % est atteinte au bout de 10 ans, mais cela dépend des caractéristiques initiales du remblai. Un tel scénario implique une perte de volume due au fluage de 10 000 m³ par an sur une période d'environ 100 ans avant d'atteindre une fermeture totale de la cavité.

Cette opération à partir d'une cavité vide peut certes assurer une stabilité mécanique en peu de temps (quelques dizaines d'années) mais elle ne peut être appliquée que sur des cavités suffisamment profondes pour maintenir leur stabilité pendant plusieurs années sans traitement, c'est-à-dire le temps nécessaire pour procéder à la vidange puis au remblayage. En situation réelle, cette option est pratiquement inapplicable pour les cavités salines de production ou de stockage, car celles-ci ne sont pas conçues pour fonctionner à la pression atmosphérique, c'est-à-dire dans une situation où il n'y a pas de pression significative dans la cavité pour contrer la pression de la formation encaissante.

L'option de remblayage la plus intéressante consiste ainsi à partir d'une cavité initialement remplie de saumure, car la vitesse de fermeture dans les premières phases est équivalente à celle d'une cavité soumise au processus d'abandon « classique », et donc bien meilleure que le cas précédent.

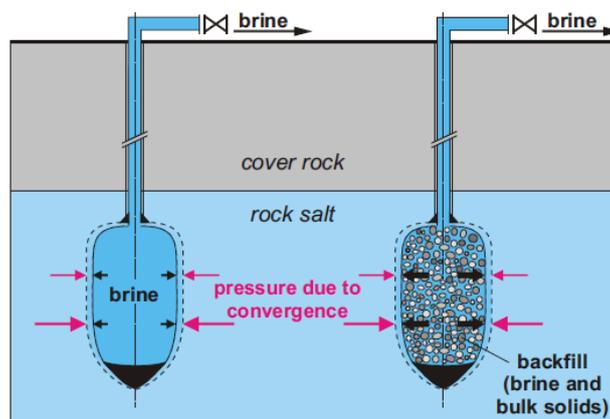


Figure 20 : Méthode de remblayage à partir d'une cavité remplie de saumure [32]

La courbe II dans la Figure 18 montre qu'il faut environ 100 ans pour que le matériau de remblai génère un effet appréciable sur la pression à l'intérieur de la cavité. Il est alors nécessaire de mettre en place un dispositif de surveillance à long terme. Le choix de matériaux de remblai est limité pour cette méthode en raison du risque de réaction du remblai avec la saumure.

L'avantage dans ce cas est que la fermeture de la cavité cesse une fois le compactage terminé. La Figure 21 présente une étude comparative de l'évolution de la convergence du volume et de l'affaissement en surface dans le cas d'une cavité saline située à 920 m de profondeur, qu'elle soit remplie ou non de remblai, composé ici de déchets alcalins mélangés à de la saumure [55]. Les résultats indiquent que la cavité saline non remblayée continue de converger après 1000 ans (Figure 21a), tandis que la convergence s'arrête au bout d'environ 560 ans lorsque la cavité est remblayée, avec un affaissement de surface de 28 cm, soit 49 % de moins que celui provoqué par une cavité non remblayée (Figure 21b).

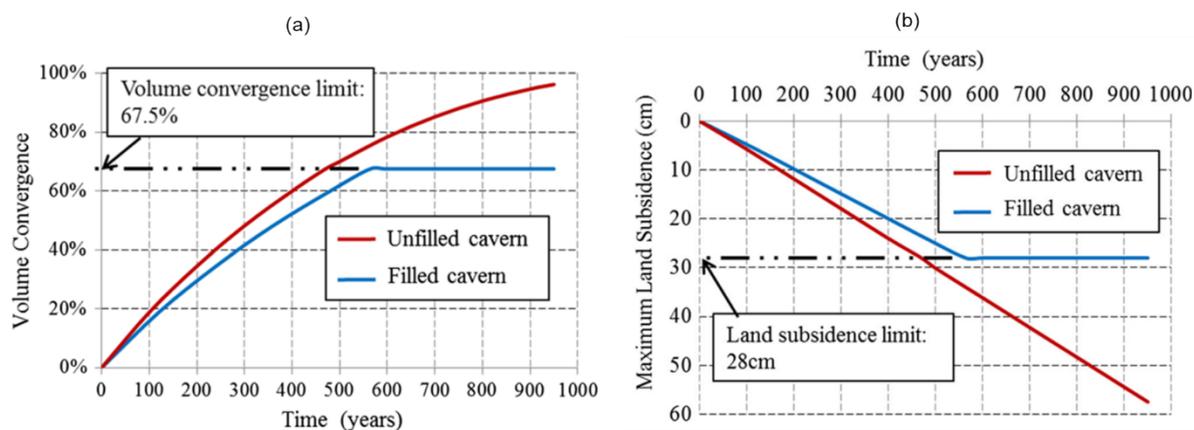


Figure 21 : Comparaison de : a) la convergence de volume et b) l'affaissement en surface entre une cavité non remblayée et une cavité remblayée (mélange déchet alcalin + saumure) [55]

6.3 Nature des produits de remblayage

Dans la littérature, nous n'avons pas trouvé d'information sur les exigences géomécaniques à respecter pour les matériaux de remblayage des cavités salines. Il s'agit uniquement de prescriptions vis-à-vis de leur caractère inerte et non dangereux pour la sécurité et la protection de l'environnement.

Face à l'importance des volumes nécessaires au remplissage des cavités, il est apparu intéressant de considérer les possibilités de réutilisation de sous-produits issus des procédés industriels, notamment leur capacité à former une charge additionnelle dans les coulis utilisés lors des remplissages gravitaires. Aujourd'hui, les méthodes les plus sûres et les plus appropriées pour remplir les cavités salines abandonnées sont l'utilisation de résidus provenant de l'épuration de la saumure (tels que la calcite et le magnésium) ou de déchets alcalins générés par la production de carbonate de soude dans l'industrie chimique du sel. Ces méthodes permettent de prévenir les désordres provoqués par les cavités abandonnées, et de réduire les risques de pollution environnementale liés à l'élimination de ces types de résidus en surface (tels que la salinisation de l'eau, la perturbation des organismes aquatiques, les émissions importantes de poussière atmosphérique...) [51].

Quelques cas identifiés dans la bibliographie en France et à l'international sont décrits ci-après.

6.3.1 En France

La concession d'Haraucourt, située en Meurthe-et-Moselle et exploitée par la société Solvay depuis plus de 100 ans, a connu deux phases de remblayage distinctes. Entre 1950 et l'arrêt du procédé en 1967, la méthode d'exploitation par piste a été complétée par le remblayage des cavités de dissolution dans les zones où la réserve de sel était épuisée, avec l'utilisation des stériles miniers résultant d'un processus de "caustification calcaire" qui produisait du carbonate de calcium, lequel était alors injecté avec de l'eau [56]. Depuis 2000, le remblayage des pistes a repris, mais cette fois-ci à partir de stériles miniers de calcium et de magnésium considérés comme inertes, qui sont issues du processus d'épuration de la saumure. Ces stériles sont injectées avec de la saumure [56].

6.3.2 Dans le monde

La première utilisation d'un remblai dans une cavité saline a été identifiée dans la concession de Holford, exploitée par INOVYN Entreprises, à quelques dizaines de kilomètres au sud de Manchester, au Royaume-Uni en 1959 [28]. L'exploitant a été autorisé à injecter 200 tonnes par jour de boues provenant de la purification de la saumure brute et 250 tonnes par jour de déchets alcalins provenant de la

production locale de carbonate de soude [25] [57]. De plus, il a été autorisé à ajouter des résidus organiques contenant des substances alcalines destinées à neutraliser toute trace d'acide présent dans les déchets, et ceci en accord avec les dispositions de la loi sur la protection de l'environnement [58].

Aux Pays-Bas, l'exploitant de Twente-Rijn a mis en œuvre deux méthodes qui ont donné de bons résultats du point de vue géotechnique, car aucun affaissement important n'a été relevé par la suite. D'une part, il a procédé au remblayage des puits avec les résidus de traitement de la saumure, notamment du gypse et de la craie, et d'autre part, à l'injection d'huiles dans la cavité. Ces huiles, en raison de leur faible densité par rapport à la saumure, surnagent et jouent le rôle de barrière protectrice contre les dissolutions à long terme, en empêchant un contact non désiré entre la saumure et les terrains de recouvrement [59]. Cependant, elles contiennent souvent des résidus pétroliers qui pourraient causer une pollution des eaux souterraines [50]. Des restrictions sur l'utilisation des terres alentours sont donc mises en place pour atténuer les dommages potentiels [60].

En Chine, le remblayage par des déchets alcalins a commencé à être utilisé au cours des dix dernières années dans certaines cavités abandonnées. La technique consiste à injecter dans la cavité une boue de déchets alcalins, obtenue à partir d'un mélange de déchets avec de la saumure, ce qui déplace la saumure déjà présente (Figure 22). Cette saumure déplacée peut ensuite être utilisée comme matière première pour la production chimique du sel [51].

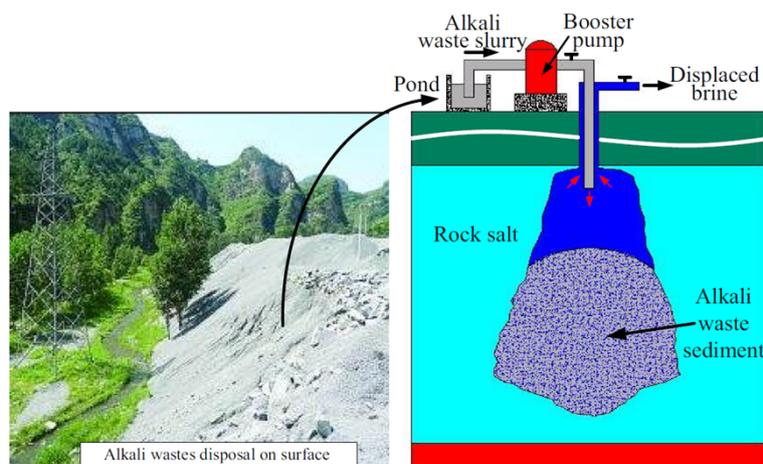


Figure 22 : Processus de remplissage d'une cavité saline abandonnée avec des déchets alcalins [51]

L'industrie américaine de l'extraction du sel injecte également dans les cavités les impuretés générées par les processus de purification de la saumure en surface. De nombreux autres pays, tels que le Canada, le Mexique et les Pays-Bas, ont également réalisé de nombreuses études sur la faisabilité du remplissage des cavités salines abandonnées avec des déchets provenant d'une usine de purification de la saumure, de la saumure concentrée de chlorure de magnésium et du sulfate extrait de l'évaporation de la saumure. [57, 25].

Outre les déchets alcalins, les cavités salines peuvent également être remplies par des déchets non toxiques provenant des champs pétroliers, tels que les fluides et les débris de forage, les déchets lors des opérations de finition, le sable de récupération et les fonds de réservoir. La législature d'État du Texas aux États-Unis a accordé six autorisations entre 1991 et 1994 pour le remplissage de cavités salines avec ces déchets [25]. Le Canada a également autorisé l'utilisation de tels produits dans plusieurs cavités près d'Edmonton et d'Unity, au Saskatchewan.

Des études de faisabilité pour le remplissage des cavités salines avec des déchets dangereux ou autres ont été menées dans plusieurs pays européens. La principale préoccupation est de savoir quelle sera la réaction à long terme de la cavité une fois qu'elle sera remplie. Conservera-t-elle son intégrité pendant des centaines, voire des milliers d'années ? Des études détaillées, sur plus d'une décennie, réalisées en 2002 par Bérest et Brouard [61] sur la mécanique des roches en laboratoire, sur le terrain et dans les cavités salines abandonnées, ont conclu que le stockage de déchets dangereux dans des cavités salines est une solution intéressante lorsque la toxicité de ces déchets disparaît après quelques décennies ou siècles. Ils ont également recommandé que de telles installations de stockage soient peu profondes (<1000 m) afin de minimiser l'effet du fluage.

Les déchets radioactifs stockés dans des cavités salines sont beaucoup plus problématiques, car leur toxicité peut persister pendant des millénaires, et la stabilité de la cavité doit être maintenue pendant

tout ce temps. L'Allemagne, par exemple, permet que tous les déchets qui ne peuvent pas être stockés pendant de longues périodes en surface sans représenter une menace sérieuse pour la biosphère, même après avoir subi un traitement, puissent être utilisés comme produit de remblayage des formations géologiques souterraines appropriées [57].

6.4 Difficultés de mise en œuvre du remblayage

La pratique de remblayage par la mise en place de boue dans une cavité peut effectivement fournir une structure résistante pour soutenir à la fois le toit de la cavité et ses parois latérales, tout en réduisant les risques de fracturation du sel. Cependant, ce processus présente plusieurs défis technologiques et logistiques. L'écoulement des solides, c'est-à-dire des boues, à la fois dans le puits (flux de la conduite) et dans la cavité, est complexe et est principalement influencé par les propriétés physiques des solides, comme leur granulométrie, leur forme, leur chimie de surface et les paramètres d'écoulement. Lorsque les solides sont injectés dans la cavité, ils décantent et se séparent progressivement de la saumure [62] jusqu'à ce qu'ils s'accumulent et forment éventuellement une matrice rigide, comme illustré dans la Figure 23. La résistance ultime de la structure de remblai dépend de la répartition des matériaux solides dans la cavité et de leurs propriétés de sédimentation.

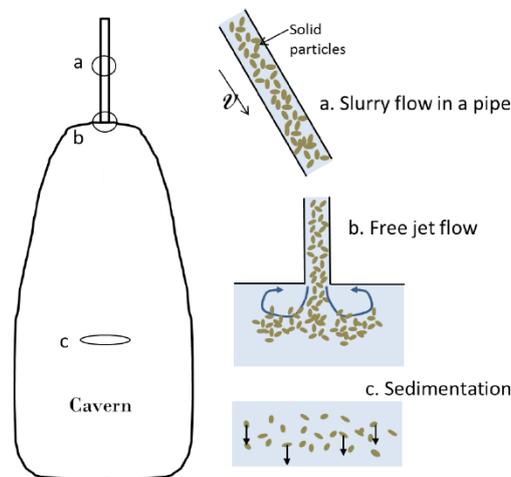


Figure 23 : Schéma d'une cavité saline qui illustre la complexité du processus de remblayage en trois étapes : a) écoulement de la boue dans le puits, b) entrée de la boue dans la cavité et c) sédimentation des particules solides [62]

L'intégrité de la pression dans une cavité destinée à l'élimination des déchets doit être définie, testée et, si nécessaire contrôlée, avant qu'elle ne soit remplie. Elle devrait être surveillée régulièrement tout au long du cycle de mise en place des déchets et, de manière optimale, pendant un certain temps après la fin de leur mise en place, et en tout état de cause avant que la cavité ne soit définitivement scellée [57].

Le remblayage permet d'obtenir une géométrie de cavité mieux adaptée, et de réduire les mouvements de surface en cas d'effondrement du toit [63]. Cependant, il convient de noter que pour les cavités de grand volume, ce processus prend beaucoup de temps et nécessite un grand volume de matériaux appropriés, qui ne sont généralement pas disponibles à un coût avantageux sur le site.

De plus, comme mentionné précédemment, les matériaux de remblais typiquement envisagés pour ce type d'opération nécessitent une compaction très importante (15 à 20 %, soit l'équivalent d'environ 100 ans de fermeture de la cavité, voir Figure 18 courbe II) avant que le remblai ne devienne efficace. Dans ce cas, cela revient à attendre plus de 1000 ans pour stopper la fermeture de la cavité. Autant dire que l'avantage de cette solution par rapport à son coût (remblayage + maintenance des installations de surface) est peu évident [56].

Il convient de noter que la technique de remblayage est particulièrement préoccupante pour les cavités peu profondes, car elles sont plus susceptibles de causer des problèmes d'affaissement si elles ne sont pas remblayées de manière adéquate. Dans ces cas, il est recommandé d'effectuer un remblayage quasi complet afin de réduire au minimum le risque de migration du vide vers la surface. En revanche, pour les cavités profondes, il est généralement suffisant de les combler partiellement, étant donné que la propagation du vide vers la surface est déjà limitée par les formations géologiques qui les entourent.

6.5 Importance de la pratique de remblayage à l'échelle mondiale

6.5.1 En France

Dans la concession d'Haraucourt en Meurthe-et-Moselle, les injections dans les cavités de boues d'épuration de la saumure par voie hydraulique avec de la saumure brute réalisées depuis 2000 (cf. section 6.3.1) se sont avérées d'une réelle efficacité :

- l'injection d'un fluide saturé, exempt de pouvoir de dissolution, dans la partie amont des pistes a eu pour effet de stopper les mécanismes de dissolution, limitant ainsi les affaissements en surface ;
- les matériaux solides présents dans ces boues permettent le comblement progressif des vides résiduels engendrés par l'exploitation ou par la nappe salée, ce qui contribue également à avoir un effet positif sur les affaissements ;
- l'injection en souterrain des stériles limite leur stockage en surface.

Dans la concession de la Madeleine en Meurthe-et-Moselle, les injections de stériles miniers liquides (boue d'épuration de la saumure constituée principalement de carbonates), réalisées depuis 1968 et jusqu'à présent, ont permis de combler une partie importante des vides et/ou des cavités créés par la dissolution du sel.

Il convient également de noter qu'un processus de remblayage à base de sables et de coulis de ciment est en cours dans les cavités de stockage de Gargenville, exploitées par la société Géovexin. Toutefois, nous ne disposons pas de document permettant de préciser les détails de ce processus [59].

6.5.2 En Europe

En Allemagne, à Staßfurt, le processus de remblayage est utilisé dans plusieurs cavités de géométrie critique. Son efficacité a été prouvée au fil des années pour assurer la stabilité à long terme de ces cavités, évitant tout affaissement en surface sans compromettre l'environnement [64]. L'utilisation de matériaux d'origine minière, principalement des résidus issus des opérations de forage, a débuté en 2003. En 2008, une seconde méthode de remblayage a été introduite, utilisant des matériaux d'origine non minière, des cendres et des poussières de filtre provenant de l'incinération des déchets municipaux. Les deux méthodes de remblayage sont toujours en utilisation et n'ont connu aucune interruption majeure. En collaboration avec les autorités, l'exploitant met en place des mesures de contrôle et de surveillance pendant et après la fin des opérations. Celles-ci portent principalement sur les paramètres opérationnels (comme ceux cités dans paragraphe 5.3), les paramètres géomécaniques, tels que la perméabilité et la résistance à la compression après compactage, ainsi que la composition chimique des matériaux de remblayage. Dans ce contexte, l'exploitant doit fournir des preuves du confinement complet et à long terme du matériau de remblayage sans compromettre la biosphère, ainsi que des preuves de l'efficacité et de l'intégrité à long terme des terrains sus-jacents [64].

Aux Pays-Bas, les cavités de dissolution de la concession minière de Hengelo n'étaient pas conformes aux directives de sécurité et de stabilité, ce qui a entraîné leur migration et causé des dommages en surface au bout de 5 ans [64]. En outre, environ cinquante autres cavités peu profondes sont considérées comme potentiellement dangereuses à l'avenir et pourraient causer des dommages comparables en cas de migration. Pour réduire les risques, des mesures préventives de remblayage avec de la boue de purification de la saumure d'AkzoNobel (maintenant appelée Nobian) sont mises en place depuis 1960. Les données issues de décennies d'expérience ont montré que cette boue fonctionne de manière adéquate pour arrêter la migration et prévenir les affaissements. Cependant, les connaissances acquises suggèrent qu'il pourrait être suffisant de remblayer partiellement les cavités jusqu'à ce qu'elles soient intrinsèquement sûres, ce qui accélérera également le processus de remblayage [64]. Des efforts constants sont en cours pour améliorer l'analyse des risques et accroître l'efficacité du remblayage.

Au Royaume-Uni, le champ de saumure ICI à Holford a été le lieu d'élimination de déchets alcalins issus de la production de soude, de boues de déchets provenant de la purification de la saumure brute et de résidus organiques issus de la production de chlorohydrocarbures, comme rapporté par Hoather et Challinor en 1994 [58]. Depuis environ 1960, 250 tonnes par jour de déchets alcalins étaient pompées sous forme de suspension à 5 % dans la saumure pour être déversées en parallèle dans plusieurs cavités. Les solides de boue provenant de la purification de la saumure brute étaient également éliminés dans des cavités, à raison de 200 tonnes de solides par jour, selon les rapports [65].

6.5.3 Dans le reste du monde

En Chine, de nombreuses cavités salines ne conviennent pas au stockage d'hydrocarbures en raison de leur perméabilité élevée et de leur forme irrégulière instable, car elles peuvent être connectées à d'autres cavités voisines ou induire des fuites de saumure voire des effondrements au sol [66]. Avec le développement et l'expansion de la production de sel gemme et d'alcali, ainsi que l'augmentation croissante des déchets solides non toxiques tels que les déchets alcalins et les boues d'épuration de la saumure, des études ont été menées pour stocker ces déchets dans les cavités non utilisées. Bien que cette technologie soit courante dans d'autres parties du monde, elle en est encore à une phase préliminaire en Chine [66]. Des essais ont été menés avec succès depuis 2009 dans la mine de sel de Huai'an, province du Jiangsu, sur les caractéristiques de sédimentation de la boue alcaline, l'optimisation des composants des déchets alcalins et les effets de l'élimination des déchets sur la réduction de la subsidence du sol. Les résultats ont montré que le remplacement de la saumure par des déchets solides élimine la corrosion de la saumure sur les roches environnantes, et réduit la subsidence et les risques d'effondrement en raison de la rigidité accrue des solides. De plus, cette pratique permet de traiter la pollution du sol causée par le stockage de ces boues en surface, avec plus de 300 000 m³ de boue de déchets alcalins enfouis jusqu'à présent [66].

Au Brésil, le site d'exploitation du sel à Maceió a vu le jour en 1975 et il a fermé en 2019 après que le Service géologique du Brésil (CPRM) a publié un rapport liant cette activité à des dommages géologiques dans la région, notamment des fissures et des fentes en souterrain, ainsi qu'à un tremblement de terre mineur survenu en mars 2018. Un plan de fermeture de 35 cavités salines a été mis en place. Pour les cavités encore présentes à l'intérieur du massif de sel, il a été décidé d'effectuer une opération d'abandon en les remplissant avec de la saumure saturée et en surveillant régulièrement la pression, la géométrie et le mouvement de celles-ci. En ce qui concerne les cavités qui ont migré verticalement hors de la formation de sel et qui présentent un risque accru de perturbations en surface, un remblayage a été effectué. Le matériau sélectionné était un mélange de résidu de l'épuration de la saumure et de sable éolien provenant de fournisseurs locaux, choisi en fonction de leurs disponibilités et de leurs caractéristiques granulométriques (sable fin aux grains arrondis). La proportion sable-saumure pour la composition de la boue a été déterminée par des tests en laboratoire et ajustée pendant les opérations, oscillant entre 25 et 30 % de sable. Le système de remplissage utilisait deux puits fonctionnant simultanément, l'un pour la récupération de la saumure et l'autre pour l'injection de la boue sable-saumure (Figure 24), avec une alternance périodique des fonctions de ces puits afin d'éviter les dommages aux tuyaux et la formation d'accumulations, assurant ainsi une meilleure répartition du sable. La durée moyenne de remplissage d'une cavité était de 187 jours, avec un taux de remplissage de 95,6 % (correspondant à un volume de 242 474 m³). Cette opération s'est avérée efficace, entraînant une réduction significative des événements microsismiques dans l'environnement proche de l'exploitation.

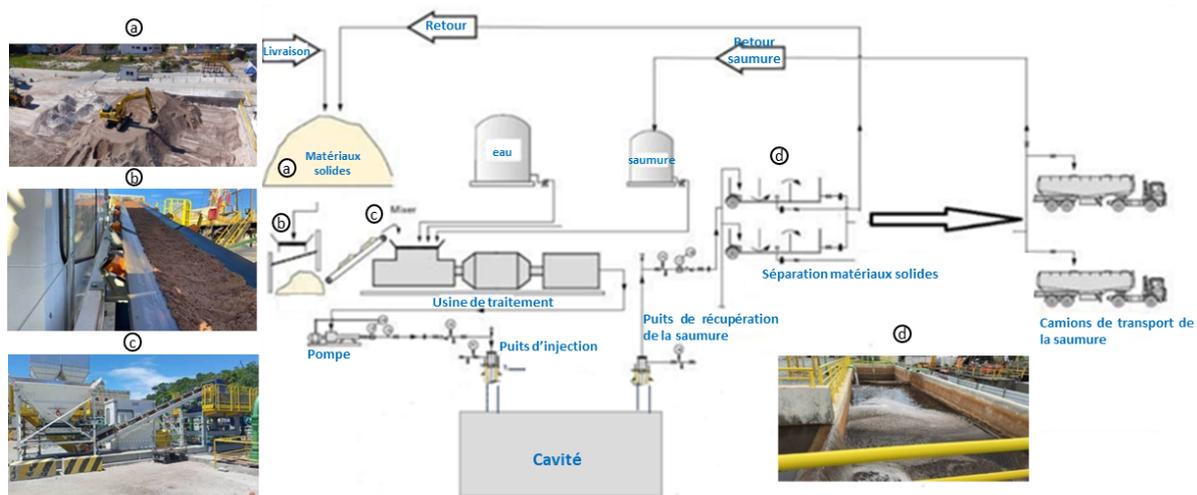


Figure 24 : Conception du système de remplissage employé par Braskem à Maceió (Brésil) [67]

Aux États-Unis, une opération de remblayage d'une cavité peu profonde (~400 m) près de Carlsbad, en Californie, a été mise en place en urgence suite à l'effondrement de trois cavités au même endroit. Les relevés sonar ont révélé un volume de vide à remplir trois fois plus important que prévu initialement lors

de la phase de conception. Par conséquent, il a été décidé d'utiliser un mélange de saumure et de sable moussé, avec une mousse similaire à celle de la mousse à raser, afin de rendre le sable pompable (Figure 25). Ce mélange contient environ 75 % de solides, et son coût est considérablement inférieur à celui du remblayage standard avec un coulis. De plus, il permet de remplir les vides sans rencontrer de problèmes d'approvisionnement ou d'extraction de la saumure pour maintenir la pression de la cavité. Cependant, l'utilisation du sable moussé comporte également des inconvénients, tels que l'accumulation d'air à la tête du puits, ce qui entraîne des difficultés de pompage, notamment au démarrage, ainsi que le colmatage du puits par la mousse et une sensibilité accrue aux pressions au fur et à mesure du remplissage [68].



Figure 25 : Mélange de remblai : sable, mousse et saumure dans des camions boueurs [68]

6.6 Synthèse des réponses au questionnaire envoyé

6.6.1 Préparation et envoi du questionnaire

Lors de la seconde phase de ce travail, réalisée en 2023, un document intitulé « Questionnaire relatif au traitement des cavités salines par remblayage » a été rédigé puis traduit en anglais. Afin de faciliter sa lecture, son remplissage et son retour, il a été limité à 6 questions avec des options de réponse proposées (voir Annexe). Ce questionnaire a été envoyé en février 2023 à 152 personnes issues de 69 organismes implantés dans 12 pays différents, dont 11 entreprises en France. Ces personnes ont été principalement sélectionnées parmi les participants des précédentes conférences SMRI, les chercheurs ayant publié dans ce domaine, ainsi que les professionnels de l'industrie minière. De plus, nous avons obtenu des contacts supplémentaires grâce aux recommandations de personnes figurant dans les questionnaires retournés.

En avril 2023, à la clôture de l'enquête, 34 organismes provenant de 13 pays différents avaient renvoyé leurs réponses, ce qui correspond à un taux de réponse de 49 %. Cependant, seuls 13 organismes (voir Figure 26) ont une expérience concrète dans la pratique du remblayage des cavités salines. Les autres sont en train de considérer cette pratique sur quelques cavités sans avoir encore entrepris concrètement un tel projet, ou en phase d'étude et prévoient de démarrer le processus dans les prochaines années, ou encore n'ont jamais abandonné aucune de leurs cavités et ne prévoient pas de le faire dans un avenir proche.

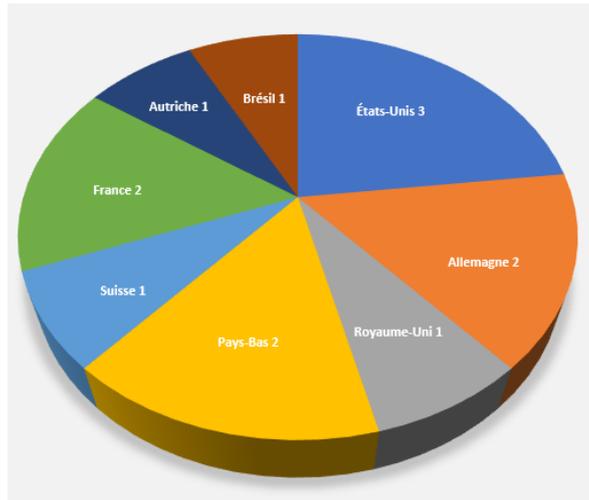


Figure 26 : Nombre de réponses d'organismes concrètement impliqués dans le remblayage au sein des pays contactés

6.6.2 Occurrence du traitement des cavités salines par remblayage

Il ressort de ces données que le processus de remblayage des cavités salines a deux objectifs principaux : sécuriser les cavités existantes et éliminer les déchets en surface. Les sites d'exploitation adaptent leurs approches en fonction de ces objectifs spécifiques. Les paramètres clés surveillés comprennent les pressions, les températures, les volumes et la forme de la cavité, et la surveillance se poursuit pendant et après le remblayage sur une période pouvant aller sur plusieurs mois à plusieurs années. Les résultats montrent un support notable au toit de la cavité, en particulier pour les cavités presque entièrement remplies, avec une réduction de la subsidence. De plus, le remblayage est principalement utilisé pour réduire le volume de résidus et de déchets en surface, sans entraîner de coût supplémentaire.

Ces informations sont synthétisées dans le Tableau 1 qui résume les retours du questionnaire.

Pays	Site	Paramètres surveillés	Durée de suivi	Bilan
France	-	Diagraphies, Gamma Ray ou Sonar	Plusieurs mois	Comblement en cours de vides déjà réputés stables Réduction du volume pris par les stériles dans les bassins de stockage
Pays-Bas	Hengelo (depuis 1940)	Pression, débit à la tête du puits Quantité de boue injectée dans la cavité Mesures sonar régulière	Durée du remblayage (~3 à 5 ans)	Augmentation de la pression après compactage partiel du matériau (compactage assez rapide) Diminution du taux d'affaissement (80 % du volume rempli) Etude en cours sur différents matériaux de remplissage permettant d'accélérer le processus
	Veendam	-	-	Réduction des déchets en surface (remblayage avec principalement du gypse) Seul 20 % du volume rempli réduit l'affaissement de 2 à 3 %.
Allemagne	Staßfurt	Pressions, températures, volume, valeur pH, niveau de remplissage, couches de densité, forme...	En cours et après remblayage (min 5 ans)	Stabilité mécanique appréciable (réduction de la subsidence sur le site) Elimination des matériaux problématiques sans danger
	Epe	Pas de suivi détaillé (processus non conçu pour durer)	-	Quantité d'injection faible par rapport au volume de la cavité (pas d'effet significatif) Réduction des déchets en surface sans coût supplémentaire.
Suisse	-	Volume restant à remblayer (périodique) Mouvements en surface (annuellement)	~50 ans	Pas de différence entre les cavités remblayées (de 5 à 10 %) et non remblayées Réduction des déchets en surface sans coût supplémentaire.
Autriche	-	-	-	Comblement en cours - Support notable au toit de la cavité Augmentation de la pression après un compactage partiel du matériau (la durée dépend des capacités de drainage)
Royaume-Uni	Holford	Volume de la cavité et relevés sonar	Plusieurs décennies	Stabilité mécanique induite par le remblayage difficile à quantifier. Réduction de la vitesse de fermeture de la cavité (non concluante)
États-Unis	-	Pressions à la tête du puits Géométrie de la cavité (sonars réguliers)	~10 ans	Effets de confinement non déterminés (petites cavités à faible taux de fluage) Méthode utile pour l'évacuation des résidus en surface
	-	Progression du remblayage	~20 ans	Le remblayage renforce le confinement du système et limite les affaissements
	-	Relevés sonar et de densité (annuels) Inspection des tubages (10 ans) Essais d'intégrité mécanique (5 ans) Taux d'injection, pressions, etc.	-	Avantage présumé de soutenir la structure pendant la fermeture à long terme de la cavité par fluage. Effets de confinement non déterminés Remblayage principalement pour l'élimination des déchets
Brésil	Maceió	Sonar (mensuel) Microsismique (permanent)	-	Effets de confinement après compactage d'environ 50 % du matériau (6 mois) Cavité stabilisée et les risques d'effondrement sont limités

Tableau 1 : Synthèse des retours d'expérience de la pratique de remblayage dans les cavités salines par pays

Cinq types de matériaux de remblayage ont été pris en compte dans le questionnaire envoyé (voir Annexe) : résidus d'épuration de la saumure, résidus pétrolier, déchets non toxiques des champs pétroliers (fluides, débris de forage, fonds de réservoir...), déchets alcalins, gypse. Les réponses obtenues montrent que l'utilisation de ces matériaux varie de peu fréquente dans le cas du gypse, à très fréquente dans le cas des résidus d'épuration de la saumure (Figure 27).

Par ailleurs, le questionnaire étant ouvert, d'autres matériaux ont parfois été mentionnés par les personnes-ressources. Parmi ces matériaux supplémentaires figurent le sable, qui est fréquemment utilisé aux États-Unis, en France et au Brésil, les déchets miniers en Allemagne et au Royaume-Uni, les coulis de ciment en France, ainsi que les résidus de l'incinération des déchets et les cendres de filtre (cendres volantes) en Allemagne. Ces matériaux complémentaires démontrent une diversité dans les pratiques de remblayage des cavités salines selon les pays interrogés.

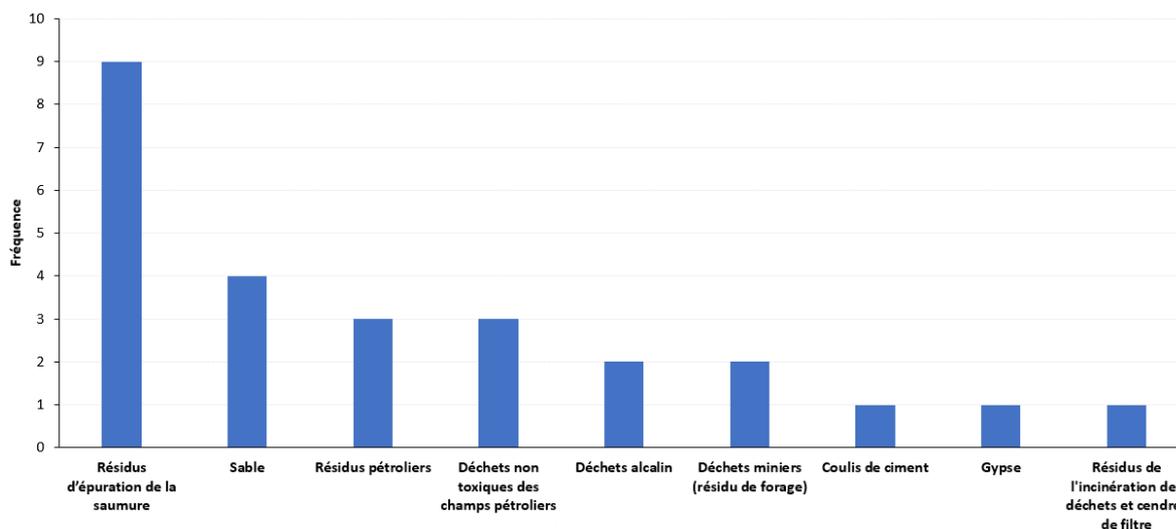


Figure 27 : Classement hiérarchique des matériaux de remblayage employés

Légende : 1 = peu fréquent, 2 = fréquent, 3 et plus = très fréquent

Dans le cas des déchets miniers issus des campagnes de forage, il a été signalé que les flux d'injection dans les cavités peuvent contenir une partie des hydrocarbures résiduels entraînés liés à l'exploitation pétrolière. Au fil du temps, l'accumulation de déchets et de solides dans la cavité peut libérer ces hydrocarbures, tels que le pétrole ou la boue, qui migrent vers le haut de la cavité en raison de la différence de densité. Bien qu'il soit possible de retirer ces hydrocarbures de la cavité, certaines formes de toit de cavité peuvent présenter des "pièges" géométriques où les hydrocarbures résiduels qui ne peuvent pas être extraits de la cavité peuvent alors constituer un risque lors de l'abandon à long terme de la cavité.

7 Conclusion

L'abandon des cavités salines est un sujet de plus en plus important dans le domaine de l'exploitation du sel par dissolution. Les recherches, menées par les différents acteurs industriels et les instituts de recherche du domaine, ont permis de développer des techniques d'abandon sécurisées et durables.

Plusieurs phénomènes contribuent à l'évolution de la pression dans une cavité abandonnée remplie de saumure et scellée (technique classique d'abandon), tels que le fluage du sel, l'expansion thermique de la saumure, la perméation de la saumure et sa fuite à travers la cimentation du puits. Il est essentiel de prendre en compte ces phénomènes pour déterminer la pression d'équilibre de la cavité, située entre la pression halmostatique (pression exercée par le poids de la saumure jusqu'à la surface) et la pression géostatique (pression qui règne à l'état naturel dans les terrains encaissants).

Dans le cas des cavités peu profondes (< 1000 m), la pression tend à converger lentement vers un état d'équilibre, évitant ainsi le risque de fracturation. Cependant, dans les cavités plus profondes, l'expansion thermique de la saumure et la perméation du sel peuvent entraîner des augmentations de pression significatives. Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'attendre une période suffisante pour atteindre l'équilibre thermique avant de sceller la cavité. Des mesures de suivi sont nécessaires pour surveiller l'évolution de la pression et déterminer les actions à entreprendre pour assurer la stabilité à long terme de la cavité, garantir la sécurité des installations en surface et minimiser les risques environnementaux.

En ce qui concerne l'abandon des cavités peu profondes stables (par remplissage de saumure et scellement), conforme aux pratiques de pointe dans une formation saline permettant une telle méthode, les conséquences à très long terme, qui sont retardées et lentes, s'avèrent négligeables. Cependant, chaque cas doit être examiné de manière approfondie et spécifique.

La pratique du remblayage s'est avérée efficace pour traiter les cavités salines abandonnées susceptibles de provoquer des désordres en surface. Dans ces cas, le remblayage à partir d'une cavité initialement remplie de saumure limite la convergence de la cavité et les amplitudes des mouvements en surface dès les premières phases de remblayage. L'efficacité de cette méthode dépend de la profondeur de la cavité et des caractéristiques des matériaux de remblai utilisés. Le volume à remplir varie en fonction de l'état initial de la cavité.

Dans le cas de cavités peu profondes et présentant des instabilités, un remblayage quasi total revêt une importance particulière pour limiter la migration du vide vers la surface et prévenir les effondrements des terrains au-dessus des cavités. Pour les cavités ne présentant pas de problèmes d'instabilité ou suffisamment profondes, un remblayage partiel suffira à limiter le taux de convergence et interdire tout mouvement de terrain en surface (ne serait-ce que les plus minimes). Cependant, l'effet de confinement par rapport à une cavité pleine de saumure ne se produit qu'après une certaine compaction des matériaux de remblayage, ce qui peut prendre plusieurs années, et un suivi est nécessaire pendant et après la finalisation du cycle de remblayage.

Les matériaux de remblayage utilisés peuvent inclure des résidus de l'épuration de la saumure tels que la calcite, le magnésium, du sable, des résidus pétroliers ou des déchets alcalins.

La pratique du remblayage permet également de réduire les risques d'atteintes environnementales liés à l'élimination de ces résidus en surface. Des exemples de bonnes pratiques ont été observés en France, aux Pays-Bas, en Chine, aux États-Unis, au Brésil et dans d'autres pays. Cependant, le comportement à long terme des cavités après leur abandon reste une préoccupation et des études approfondies sont en cours de développement pour évaluer l'intégrité mécanique à long terme de ces cavités.

8 Références

- [1] P. Boyer, «Exploitation moderne du sel,» Académie Lorraine des Sciences, Lorraine, 2011.
- [2] Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap), «Archéologie du Sel,» [En ligne]. Available: <https://www.inrap.fr/dossiers/Archeologie-du-Sel/Qu-est-ce-que-le-sel/D-ou-vient-le-sel->.
- [3] H. Lenattier, «Histoire du sel en Lorraine,» *Université de Lorraine*, p. 11, 21 mai 2011.
- [4] O. Weller, «First salt making in Europe : an overview from Neolithic times,» *Documenta Praehistorica XLII*, n° 142, pp. 185-196, 2015.
- [5] F. Poulard, X. Daupley, C. Didier, Z. Pokryszka, P. D'Hugues, N. Charles, J.-J. Dupuy et M. Save, «Exploitation minière et traitement des minerais,» Collection « La mine en France ». Tome 6, 2017.
- [6] D. S. Kostick, «The material flow of salt,» United States department of the interior - Bureau of Mines, USA, 1993.
- [7] B. Bourguel, «Les carbonates et sulfates de sodium,» BRGM-Département Géologie R 36299, Orléans, 1992.
- [8] M. Rabinovitch, «L'exploitation du sel marin en France,» [En ligne]. Available: <https://www.geosoc.fr/liens-docman/articles-documents-en-telechargement/environnement-patrimoine-1/le-littoral/254-l-exploitation-du-sel-marin-en-france/file.html>.
- [9] Institut national de l'environnement industriel et des risques, «Livraison L6.3 du projet ROSTOCK-H,» Ineris - 159826 - v1.0, Verneuil-en-Halatte, 2021.
- [10] Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, «Le stockage souterrain dans le contexte de la transition énergétique,» Référence Maîtrise des risques et impacts, 2016.
- [11] A. Gillhaus et P.-L. Horvath, «Compilation of geological and geotechnical data of worldwide domal salt deposits and domal salt cavern fields,» KBB Underground Technologies for Solution Mining Research Institute, Pennsylvania, Etas-Unis, 2008.
- [12] K. Wojciechowski, «Salt mining: methods of exploitation, processing and market future prospects,» Energy Technologies Department, Wrocław, Poland, 2020.
- [13] C. Brücker et A. Preuß, «Future of underground spatial planning and the resulting potential risks from the point of view of mining subsidence engineering,» *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 30, n° 11, 2020.
- [14] P. Gombert, F. Lahaie, M. Ghoreichi, A. Thoraval et R. Salmon, «Opportunités et contraintes du stockage souterrain d'énergie dans le cadre de la transition énergétique,» *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, pp. 1-8, 2018.
- [15] F. Geerts, «The Hengelo case: sustainable raw brine production and brine field development,» *Solution Mining Research*.
- [16] D. Brückner et W. Schreiner, «The History of DCP Storage Cavern Schoenebeck,» *SMRI Spring Technical Conference, Porto, Portugal*, 28-29 Avril 2008.
- [17] E. Khayrulina, N. Mitrakova, N. Poroshina, E. Menshikova et A. Perminova, «Formation of Solonchak in the Area of the Discharged Ancient Brine Wells (Perm Krai, Russia),» *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, 2022.
- [18] M. Ghoreychi et X. Daupley, «Devenir à long terme d'exploitations abandonnées de sel,» *Revue Française de Géotechnique*, n° 1106-10, pp. 73-83, 2004.
- [19] B. Feuga, «Les effondrements dus à l'exploitation du sel,» *Géosciences*, vol. 9, pp. 86-95, 2009.

- [20] P. Bérest, B. Diamond, A. Duquesnoy, G. Durup, B. Feuga et L. Lohff, «Salt and brine production methods in France: Main conclusions of the international group (IEG) commissioned by the French regulatory authorities,» chez *Solution Mining Research Institute Fall Conference*, Berlin, Germany, 2004.
- [21] L. Driad-Lebeau, X. Daupley et D. Mercerat, «Suivi d'une cavité saline jusqu'à son effondrement : analyse microsismique,» *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Bulletin n°1" (JNGG'08)*, pp. 313-320, 2008.
- [22] F. Zamfirescu, A. Danchiv, M. Mocuta, M. Andrei et T. Constantinescu, «Technical solution and monitoring results of the controlled collapse of Field 1 salt cavern, Ocnele Mari, Romania,» *SMRI Fall Technical Conference*, 3-6 octobre 2010.
- [23] Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), «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, DRS-11-118134-02433B, Verneuil-en-Halatte, France, 2013.
- [24] J. M. Miehé, «Détection d'une cavité remplie de saumure par imagerie électrique et recherche d'anciens forages par magnétisme sur la concession saline d'Art-sur-Meurthe (54),» Rapport BRGM/RP-51589-FR, 2002.
- [25] J. Veil, D. Elcock, M. Raivel, D. Caudle, R. C. Ayers et B. Grunewald, «Preliminary Technical and Legal Evaluation of Disposing of Nonhazardous Oil Field Waste into Salt Caverns,» Argonne National Laboratory, Washington, DC, 1996.
- [26] E. Gaisbauer, «Experiences with blanket level measurement in solution mining caverns of Salinen Austria,» Salinen Austria GmbH, Austria.
- [27] Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est, «Demande d'autorisation d'ouverture de travaux miniers - Méthode d'exploitation - Concession de Saint-Pandelon,» Landes, 2021.
- [28] R. L. Thoms et R. M. Gehle, «A brief history of salt cavern use,» chez *Proc. 8th World Salt Symposium, R.M. Geertman ed*, 2000.
- [29] C. Katarzyna, «Insight into a shape of salt storage caverns,» *Archives of Mining Sciences*, vol. 65, n° 12, pp. 363-398, 2020.
- [30] E. Clause, B. Larrourou, M. Rostagnat et I. Wallard, «Sécurité du développement de la filière Hydrogène,» IGEDD (Rapport n° 014277-01) - CGE (Rapport n° 2022/01/CGE/SG), 2022.
- [31] J. Ratigan, «The SMRI Cavern Sealing & Abandonment Research Program,» *SMRI Spring Meeting, Houston, Texas*, 2003.
- [32] F. Crotogino et J. Kepplinger, «Cavern Well Abandonment Techniques Guidelines Manual,» Solution Mining Research Institute, Hannover, Germany, 2006.
- [33] P. Bérest, B. Brouard, E. Hertz, G. Lheur, G. Hévin, P. de Laguérie et J. M. Hardy, «Cavern abandonment : Three in situ Tests,» *Solution Mining Research Institute Fall 2013 Technical Conference*, 2013.
- [34] M. Karimi-Jafari, «Comportement transitoire des cavités salines profondes,» Ecole Polytechnique X, 2007.
- [35] P. Bérest, B. Brouard et M. Karim-Jafari, «Deep salt caverns abandonment,» *Post-mining, Nancy, France*, 16-17 Novembre 2005.
- [36] A. Thoraval et F. Lahaie, «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,» Ineris. DRS-11-118134-02433B, Veneuil-en-Halatte, 2013.

- [37] F. Lahaie et A. Thoraval, «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,» Verneuil-en-Halatte, 2013.
- [38] P. Bérest, P. A. Blum, G. Durup, D. Nguyen Minh et E. M. Quintanilha, «Long term creep test in a salt cavern,» *Solution Mining Research Institute-Meeting in Houston, Texas*, 24-27 Avril 1994.
- [39] B. Brouard, C. Lheur, E. Hertz, P. Bérest, V. de Greef et J.-F. Béraud, «A brine-outflow test in a Gallenoncourt cavern,» *SMRI Spring Technical Conference*, 27-28 April 2009.
- [40] P. Bérest, B. Brouard et G. Durup, «Abandon des cavités salines,» *Revue Française de Géotechnique*, n° 182, pp. 23-36, 1998.
- [41] B. Brouard et P. Bérest, «Overview of the Physical Phenomena involved in Salt Cavern Abandonment,» *SMRI Spring Technical Class*, 2023.
- [42] W. A. Paar, «Risk of progressive pressure build up in a sealed cavity,» *SMRI Fall Meeting*, 1997.
- [43] J. L. Ratigan, «The Solution Mining Research Institute Cavern Sealing and Abandonment Program 1996 Through 2002,» *SMRI Spring Meeting*, 2003.
- [44] R. B. Rokhar, R. Hauck, K. Staudtmeister et D. Zander-Schiebenhofer, «The results of the pressure build-up test in the brine filled cavern Etzel K102,» *SMRI Fall Meeting*, 2000.
- [45] SETIS, «Dossier de demande d'autorisation de travaux- Saline de Haauterives-Pièce 6 : Mémoire de fin travaux,» Vencorex CHLORALP, Grenoble, 2015.
- [46] D. Brückner, «Cavern Abandonment - Rock mechanical concept and in-situ investigations -,» *SMRI Spring 2023 Technical Class*, 2023.
- [47] G.-S. Schneider et H. Bernhardt, «Abandonment of Salt Caverns: Technical Aspects and Beyond,» *SMRI Fall Conference*, 23-24 septembre 2019.
- [48] P. Bérest, «Stabilité des cavités de stockage d'hydrocarbures dans le sel,» *Revue Française de géotechnique*, n° 116, 1981.
- [49] D. Nguyen-Minh, H. Maitcmrnam, S. Braham et J. G. Dump, «A Tentative Interpretation of Long-Term Surface Subsidence Measurements over a Solution Mined Cavern Field,» *Seventh Symposium on Salt*, vol. 1, pp. 441-449, 1993.
- [50] I. C. Kroon, B. Orlic et B. C. Scheffers, «Abandonment of solution mined salt caverns in the Netherlands,» Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO, Utrecht, 2003.
- [51] X. Shi, Q. Chen, H. Ma, Y. Li, T. Wang et C. Zhang, «Geomechanical investigation for abandoned salt caverns used for solid waste disposal,» *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, n° 180, pp. 1205-1218, 2021.
- [52] K. S. Johnson, «Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States,» *Environ Geol*, vol. 48, pp. 395-409, 2005.
- [53] G. K. Coates, C. A. Lee, W. C. McClain et P. E. Senseny, «Closure and collapse of man-made cavities in salt.,» H. L. Harner and B. C. Schreiber (eds.), Rapid City, South Dakota.
- [54] A. Réveillère, P. Bérest et R. Jeronimo, «SMRI Research Report RR2021-3: Past Salt Caverns Incidents Database Part 2: Sinkholes, Major Block Falls, Roof Falls, Casing Overstretch, Hydraulic Connections and Unexpectedly Fast Creep,» Solution Mining Research Institute, 2021.
- [55] X. Shi, Y. Li, C. Yang, Y. Xu, H. Ma, W. Liu et G. Ji, «Influences of filling abandoned salt caverns with alkali wastes on surface subsidence,» *Environmental Earth Science*, vol. 73, p. 6939–6950, 2015.
- [56] A. Charmoille, «Exploitation de sel par dissolution d'Haraucourt. Historique synthétique de l'exploitation,» Rapport INERIS DRS-15-149162-09326A, Verneuil-en-Halatte, 2015.

- [57] J. K. Warren, *Evaporites Sediments, Resources and Hydrocarbons*, Berlin: Springer, 2006, p. 1036.
- [58] H. A. Hoather et D. Challinor, «The use of salt cavities for the disposal of wastes,» *Meeting SMRI (ed) Paper. Solution Mining Research Institute*, 1994.
- [59] A. Charmoille et A. Thoraval, «Synthèse de l'état des connaissances et des pratiques en matière d'abandon des stockages souterrains,» Ineris, 2010.
- [60] A. P. Fawcett, «Successful design for mining subsidence: The CLASP experience,» chez *Conference on buildings and structures subject to mine subsidence, Institution of Engineers, Australia and Mine subsidence Board, Newcastle, Royaume-Uni*, 1988.
- [61] P. Bérest et B. Brouard, «Safety of salt caverns used for underground storage,» *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, vol. 58, n° 13, pp. 361-384, 2003.
- [62] G. Bettin, «Evaluation of Computational Method of High Reynolds Number Slurry Flow for Caverns Backfilling,» Sandia National Laboratories, California, 2015.
- [63] M. W. Schmidt, G. Gommlich, N. Stockmann, S. Meuresch, W. Menzel et P. Kamlot, «Geotechnical investigations on the backfilling of workings in the Leine rock salt (NaCl) at the southern flank of the Asse research mine,» *8th world salt symposium Geertman, R.M. (ed.)*, vol. 2, pp. 21185-21186, 2000.
- [64] M. den Hartogh, H. Leusink, R. van Steveninck, T. Schicht et T. Pinkse, «Preventing subsidence caused by cavern migration in Hengelo and Enschede, The Netherlands,» *SMRI Fall Technical Class, Münster, Germany, 25-26 septembre 2017*.
- [65] S. E. Wille, T. Pinkse, R. Quensel et G. Schneider, «Review of cavern backfilling techniques using residual material from salt production - SMRI Research Report RR2021-4,» DEEP.KBB GmbH, Bad Zwischenahn, Allemagne, 2021.
- [66] L. Wei, C. Jie, J. Deyi, S. Xilin, L. Yinping, J. Daemen et Y. Chunhe, «Tightness and suitability evaluation of abandoned salt caverns served as hydrocarbon energies storage under adverse geological conditions (AGC),» *Applied Energy*, n° 178, pp. 703-720, 2016.
- [67] B. Wilfred, «Cavern backfilling operations related to the Mine Closure Plan - Brazil,» *SMRI Spring Technical Class*, 2023.
- [68] P. A. Gallet, «"Carlsbad Cavity" Void Fill Case Study of backfill material design, testing and installation,» *SMRI Spring Technical Class*, 2023.
- [69] K. Neuhaus, «La conservation après usage des cavités salines,» 31 décembre 2011. [En ligne]. Available: <http://www.bi-lebensqualitaet.de/>.
- [70] R. Thoms et R. Gehle, «A brief history of salt cavern use,» *Proc. 8th World Salt Symposium*, pp. 1-8, 2000.
- [71] P. Gombert, «Avis sur l'impact d'une injection de stériles en amont-pendage de l'exploitation de Cerville,» Ineris - Direction Sites et Territoires, Verneuil-en-Halatte, 2022.
- [72] A. Bannach et M. Klafki, «Staufurt Shallow Cavern Abandonment Field Tests,» Solution Mining Research Institute, 2009.
- [73] M. Ghoreychi et P. Cosenza, «Quelques aspects de la sûreté à long terme de stockages dans le sel,» *Géotechnique et Environnement Colloque Franco-Polonais*, 15-19 novembre 1993.
- [74] C. L. Brassow et R. L. Thoms, «Use of solution-mined caverns for the disposal of hazardous and industrial waste products,» *8th World Salt Symp., R.M. Geertman ed., Elsevier*, pp. 229-235, 2000.

9 Liste des annexes

- Annexe 1 : questionnaire relatif au traitement des cavités salines par remblayage

