

# Toit de sel et intégrité des cavités de stockage d'hydrogène

## Salt roof and integrity of hydrogen storage caverns

Hippolyte DJIZANNE<sup>1\*</sup>

*1 Ineris – Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Verneuil-en-Halatte, France*

*\*hippolyte.djizanne@ineris.fr*

**RESUME :** La stabilité mécanique et l'intégrité du confinement des cavités salines creusées par dissolution dépendent de manière critique du maintien d'une épaisseur suffisante de toit de sel, c'est-à-dire la couche d'halite intacte entre le toit de la cavité et le sommet de la formation salifère. Cet article examine le rôle géomécanique de ce segment dans le soutien structural à long terme, la capacité d'étanchéité et l'intégrité des puits dans les contextes de stockage souterrain de gaz et de production de saumure. Les propriétés favorables du sel – faible perméabilité, comportement viscoplastique et capacité d'auto-cicatrisation – sont compromises lorsque les cavités sont lessivées trop près du toit du sel, où les intercalaires non-salifères (anhydrite, argile, marne) introduisent des incompatibilités de contraintes, des initiations de fractures et des chemins de perméabilité. Des études de cas en Chine, au Canada, en France, aux Pays-Bas et aux États-Unis confirment qu'une épaisseur insuffisante de toit de sel (< 10 mètres dans certains cas) contribue aux effondrements de toit, aux affaissements, à la migration ascendante des vides et aux dommages aux tubages. Les modèles numériques suggèrent que l'épaisseur du toit a une influence limitée sur la pression minimale de gaz pour éviter la dilatance, mais les défaillances réelles démontrent qu'un toit compétent est essentiel pour amortir les contraintes thermiques et mécaniques. Cet article conclut par une synthèse de la réglementation actuelles.

**ABSTRACT:** The mechanical stability and containment integrity of solution-mined salt caverns rely critically on maintaining a sufficient salt roof thickness, the intact halite layer between the cavern roof and the top of the salt formation. This review examines the geomechanical role of this roof segment in ensuring long-term structural support, sealing capacity, and well integrity in underground gas storage contexts. Salt favorable properties - low permeability, viscoplastic behaviour, and self-healing capability - are compromised when caverns are leached too close to the top of salt, where non-salt interbeds introduce stress incompatibility, fracture initiation, and permeability pathways. Case studies from China, Canada, France, the Netherlands, and the U.S. confirm that insufficient salt roof thickness (<10 m) contributes to roof falls, sinkholes, and casing damage. Numerical models suggest that salt roof thickness has a limited influence on the minimum gas pressure required to avoid dilation, but real-world failures demonstrate that a competent salt roof is essential. This article concludes with design recommendations and a synthesis of current regulatory gaps.

**Mots-clés:** Toit de sel ; Stockage d'hydrogène ; Stabilité mécanique ; Intégrité du confinement.

## 1 INTRODUCTION

La transition énergétique nécessite des solutions de stockage souterrain robustes pour les hydrocarbures et les vecteurs énergétiques émergents comme l'hydrogène. Les cavités salines creusées par dissolution répondent à ces besoins grâce à leur confinement supérieur, leurs propriétés mécaniques et leur flexibilité opérationnelle. Cependant, la stabilité à long terme et le confinement dépendent fondamentalement du maintien de la cavité entièrement dans la halite, notamment au niveau du toit où les risques mécaniques et hydrauliques convergent.

Le sel gemme présente une perméabilité ultra-faible ( $\sim 10^{-21}$  à  $10^{-20}$  m<sup>2</sup>), un fluage viscoplastique sous contrainte déviatorique et une auto-cicatrisation par recristallisation sous pression. Ces caractéristiques sont absentes dans les lithologies non-salifères intercalées (anhydrite, argile, marne), rendant ces

interfaces sujettes à la rupture fragile et aux discontinuités de contraintes (Bérest et Brouard, 2003).

Les défaillances historiques confirment ces risques. En 1980, un forage au lac Peigneur a percé le toit d'une mine de sel, déclenchant une inondation rapide et un affaissement de surface (Martinez et al., 1998). L'effondrement de Bayou Corne, lié à une épaisseur insuffisante du toit de sel, a causé l'évacuation de la communauté locale. Ces événements soulignent que l'intégrité du toit de sel reste centrale pour la performance sécuritaire des cavités.

Le stockage d'hydrogène ajoute de la complexité : il implique des cycles de pression plus fréquents, des amplitudes plus élevées et des interactions géochimiques distinctes par rapport au gaz naturel. La diffusivité plus élevée de l'hydrogène réduit les marges de sécurité là où l'épaisseur du toit de sel est limitée (Lankof et Tarkowski, 2020).

## 2 RETOURS D'EXPÉRIENCE : ACCIDENTS LIÉS AU TOIT DE SEL

Plusieurs accidents majeurs survenus au cours des dernières décennies illustrent les conséquences d'une épaisseur insuffisante de toit de sel ou d'une mauvaise caractérisation de l'interface sel/non-sel. L'analyse de ces événements permet d'identifier les mécanismes de rupture et de justifier les recommandations de conception.

### 2.1 Lac Peigneur, Louisiane (1980)

Le 20 novembre 1980, une plateforme de forage pétrolier opérant sur le lac Peigneur a accidentellement percé le toit d'une mine de sel exploitée par la Jefferson Island Salt Company. L'erreur de positionnement du forage, combinée à une méconnaissance de l'extension exacte des galeries minières, a provoqué une connexion hydraulique entre le lac et la mine. En quelques heures, les 10 millions de m<sup>3</sup> d'eau du lac se sont engouffrés dans la mine, créant un vortex qui a englouti la plateforme de forage, plusieurs barges et une partie des berges. L'effondrement a généré un cratère de 400 m de diamètre. Cet accident, bien que lié à une mine conventionnelle plutôt qu'à une cavité de dissolution, démontre les conséquences catastrophiques d'une rupture du toit de sel (Martinez et al., 1998).

### 2.2 Hutchinson, Kansas (1974)

Le 21 octobre 1974, un effondrement soudain s'est produit à proximité de l'usine de sel Cargill à Hutchinson, Kansas. Un trou béant (*sinkhole*) de 60 m de diamètre et 15 m de profondeur s'est formé en quelques heures, engendrant l'évacuation du personnel. L'enquête a révélé que des cavités de dissolution non contrôlées, créées par des circulations d'eau souterraine le long d'anciens puits mal abandonnés, s'étaient développées avec une épaisseur de toit de sel résiduelle inférieure à 10 m. La migration progressive des vides vers la surface (phénomène de « *stoping* ») a conduit à l'effondrement brutal lorsque le toit résiduel n'a plus pu supporter la charge des terrains de couverture (Walters, 1978 ; Bérest, 2017).

### 2.3 Bayou Corne, Louisiane (2012)

Le 3 août 2012, un trou béant de plus de 10 hectares s'est formé dans la paroisse d'Assumption, Louisiane, au-dessus d'une cavité de stockage de saumure exploitée par Texas Brine Company. La cavité, initialement creusée pour la production de sel, avait été développée trop près du flanc du dôme de sel de Napoleonville. L'épaisseur de sel entre la paroi de la cavité et le flanc du dôme était inférieure à 30 m par

endroits, et la cavité avait progressivement migré vers l'interface sel/sédiments. La rupture de cette paroi latérale a provoqué l'effondrement des terrains de couverture saturés, la remontée de gaz (méthane) et l'évacuation de 350 résidents pendant plusieurs années. Cet accident a conduit à un renforcement significatif des réglementations en Louisiane et au Texas concernant la distance minimale entre les cavités et les flancs de dôme (Louisiana DNR, 2023).

### 2.4 Cavité JK-A, Jintan, Chine (2015)

La cavité JK-A, située dans le bassin salifère de Jintan (province du Jiangsu), a subi un effondrement partiel de son toit en 2015 lors d'opérations de stockage de gaz naturel. L'analyse post-incident a révélé la présence d'un intercalaire argileux de 2 m d'épaisseur situé à seulement 5 m au-dessus du toit de la cavité. Cet intercalaire, non détecté lors des études géologiques initiales, présentait des propriétés mécaniques très différentes du sel encaissant (module d'Young 3 fois plus élevé, comportement fragile). Sous l'effet des cycles de pression, des fractures se sont propagées dans cet intercalaire, conduisant à un détachement de blocs rocheux dans la cavité. Cet accident souligne l'importance d'une caractérisation géologique détaillée du toit de sel, incluant la détection des intercalaires non-salifères (Wang et al., 2015).

Ces retours d'expérience convergent vers une conclusion commune : une épaisseur insuffisante de toit de sel, ou la présence d'intercalaires non-salifères non détectés à proximité du toit, constitue un facteur de risque majeur pour l'intégrité des cavités. Ils justifient pleinement l'adoption de marges de sécurité conservatrices dans les réglementations et les pratiques de conception.

## 3 COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES TOITS DE SEL

### 3.1 Fluage élasto-viscoplastique

Le sel gemme (halite) présente un comportement ductile et sujet au fluage sous contrainte déviatorique, contrairement à la plupart des lithologies fragiles. Cette déformation résulte de mécanismes tels que le glissement et la montée des dislocations, ainsi que la dissolution sous pression. Pour capturer cette réponse complexe, des modèles constitutifs comme Norton-Hoff pour le fluage stationnaire, la loi de Lemaitre pour le fluage transitoire et des cadres multi-mécanismes sont utilisés (Munson et Dawson, 1979 ; Lubby 2, Spiers et al., 1990 pour la dissolution sous contrainte).

Sous extension triaxiale, typique pour les toits de cavités, le sel est sujet à la dilatance (expansion volumique due aux microfissures). Plusieurs critères de rupture par dilatance ont été proposés, notamment ceux de Spiers et al. (1988), Ratigan et al. (1991), Hunsche et al. (1993) et DeVries et al. (2005). La perméabilité du sel augmente localement lors de la dilatance, créant des chemins de fluides potentiels.

Les conditions typiques des cavités (10-30 MPa, 30-60 °C) produisent des vitesses de fluage stationnaire de  $10^{-10}$  à  $10^{-8}$  s<sup>-1</sup>. Sur quelques années, ce fluage viscoplastique redistribue les contraintes autour de la cavité, réduisant massivement les charges de pointe. De plus, le sel présente une auto-cicatrisation par recristallisation sous pression, colmatant les microfissures en quelques semaines à quelques mois.

### 3.2 Distribution des contraintes

Suite à la création de la cavité par lessivage, le toit de sel subit une évolution complexe des contraintes en trois étapes : redistribution élastique immédiate, relaxation par fluage dépendant du temps, et stabilisation par effet de voûte à long terme. La réponse élastique produit des concentrations de contraintes initiales au centre du toit, avec des facteurs d'amplification de 2 à 3. Le fluage redistribue progressivement ces contraintes, réduisant les valeurs de pointe sur plusieurs années (Bérest et al., 2001).

Un toit en forme de dôme ou de caténaire est mécaniquement favorable, car il convertit les charges verticales en contraintes de compression en voûte. En revanche, les toits plats de grande portée concentrent les contraintes de cisaillement et de traction, augmentant le risque d'écaillage. La géométrie du toit est donc un paramètre de conception critique.

### 3.3 Contrastes avec les lithologies non-salifères

Contrairement à la halite, les lithologies non-salifères telles que l'anhydrite, la dolomite, le calcaire, la marne et l'argile sont généralement de comportement élastique-fragile. Ces matériaux présentent une rigidité plus élevée, une ductilité plus faible et une capacité de fluage minimale sous les conditions de contrainte *in-situ* (Hoek et Brown, 1997).

Les essais de laboratoire montrent que l'anhydrite et le calcaire fracturés conservent une perméabilité post-rupture élevée (jusqu'à  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>), bien plus élevée que la perméabilité ultra-faible de la halite ( $\sim 10^{-21}$  m<sup>2</sup>). Ces facteurs soulignent l'importance de maintenir une couche de toit en halite compétente dans la conception des cavités.

## 4 INTÉGRITÉ DU STOCKAGE EN CAVITÉ SALINE

### 4.1 Mécanismes de rupture aux interfaces

Les contacts sel / non-sel représentent des points faibles structuraux significatifs. Les études de laboratoire montrent que ces interfaces présentent des résistances au cisaillement pic et des angles de friction beaucoup plus faibles que la roche intacte environnante. La réduction de résistance post-pic peut dépasser 80 %, augmentant le risque de glissement sous les fluctuations de pression et de température.

La dégradation hydraulique aggrave le problème. Les contacts sel / non-sel présentent souvent une perméabilité élevée ( $10^{-12}$  à  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>), des ordres de grandeur plus élevée que le sel intact ( $10^{-21}$  m<sup>2</sup>). Les fractures peuvent évoluer en chemins de fuite préférentiels.

### 4.2 Implications pour l'intégrité des puits

L'intégrité des puits dépend du placement du dernier sabot de tubage cimenté (LCCS), la dernière barrière d'ingénierie entre les fluides stockés et les formations géologiques. Les meilleures pratiques (*API RP 1170*) prescrivent de placer le LCCS entièrement dans la halite pour assurer l'isolation zonale à long terme.

Dans le sel, le fluage radial induit une fermeture uniforme et ductile autour du tubage, offrant un confinement mécanique. En revanche, les roches non-salifères manquent de cette déformabilité. Les simulations récentes montrent que la longévité des puits dépend principalement du maintien d'une épaisseur minimale de sel ( $\geq 30-50$  m) entre le toit de la cavité et le LCCS.

### 4.3 Considérations opérationnelles

Le stockage souterrain de gaz et d'hydrogène implique des opérations cycliques complexes. Le stockage saisonnier conventionnel implique peu de cycles par an avec une variation de pression modérée ( $\Delta P \approx 30-50$  %). Le stockage d'hydrogène de nouvelle génération peut nécessiter des cycles quotidiens avec des amplitudes élevées ( $\Delta P \approx 70-90$  %), sollicitant le comportement mécanique de la masse saline.

Les propriétés physiques de l'hydrogène amplifient ces risques : diffusivité plus élevée, poids moléculaire plus faible et conductivité thermique accrue par rapport au méthane et le rendent plus susceptible de migrer à travers les microfissures ou les interfaces mal scellées.

## 5 ÉTUDE DE CAS NUMÉRIQUE

Cette section étudie l'influence de l'épaisseur du toit de sel (également appelée « garde de sel ») sur le comportement mécanique d'une cavité saline cylindrique générique soumise à des cycles de pression.

### 5.1 Méthodologie

Un modèle numérique a été développé pour évaluer l'influence de l'épaisseur du toit de sel sur la réponse thermomécanique d'une cavité de stockage d'hydrogène. Trois configurations ont été modélisées dans le logiciel LOCAS (Brouard et al., 2012), avec des toits de cavité fixés à 920 m de profondeur, et des profondeurs de toit de sel à 700 m, 800 m et 900 m, correspondant à des épaisseurs de 220 m, 120 m et 20 m respectivement.

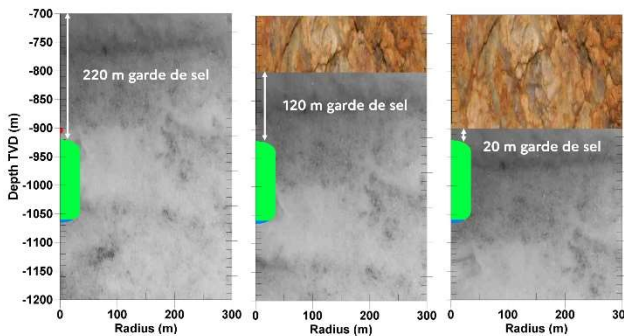


Figure 1. Représentation schématique de l'emplacement de la cavité par rapport au toit de sel.

La cavité modélisée présente une géométrie cylindrique simplifiée avec un volume initial de 506 819 m<sup>3</sup>, une hauteur de 300 m et un rayon de 40 m. Le toit de la cavité est situé à 920 m de profondeur, tandis que le fond se trouve à 1 220 m. Cette géométrie représente une cavité typique de stockage de grande capacité.

Des simulations par éléments finis axisymétriques 2D ont été réalisées sous géométrie de cavité, propriétés matériaux et conditions aux limites identiques. Les conditions aux limites appliquées sont les suivantes : (i) déplacement radial nul le long de l'axe central de symétrie, (ii) déplacement radial bloqué sur la frontière externe du modèle, (iii) déplacement vertical nul à la base du modèle, et (iv) surface libre en partie supérieure. La pression géostatique est initialisée selon un gradient lithologique de 0,022 MPa/m.

Le comportement rhéologique du sel est décrit par une loi de fluage de type Norton-Hoff combinée à une composante transitoire de type Lemaitre. Les paramètres des matériaux utilisés sont représentatifs d'un sel gemme typique : module d'Young  $E = 25$  GPa, coefficient de Poisson  $\nu = 0,25$ , coefficient de dilatation thermique  $\alpha = 4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Le critère de dilata-

RD de RESPEC a été employé pour évaluer le début de l'endommagement.

Les simulations reproduisent le cycle de vie de la cavité saline, depuis sa création par dissolution jusqu'au premier remplissage et aux cycles opérationnels d'hydrogène. La Figure 2 présente l'évolution de la pression d'hydrogène et de la température calculée au cours de 2 cycles opérationnels. Lors du premier remplissage, l'hydrogène a été injecté à 45 °C. Au cours des cycles opérationnels suivants, la température de l'hydrogène a varié en fonction de la compression (injection) et de la détente (soutirage), tandis que la saumure résiduelle présente moins de fluctuations thermiques.

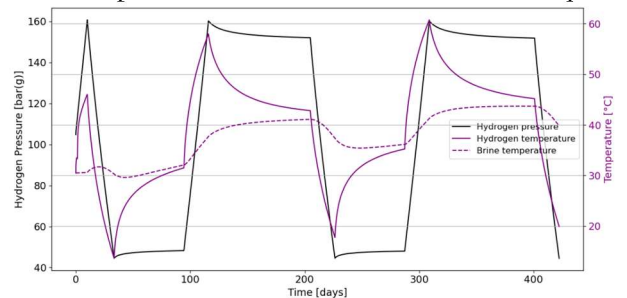


Figure 2. Évolution de la pression et de la température de l'hydrogène.

Les fluctuations de température dans le stockage de gaz génèrent des contraintes thermiques  $\sigma_{\text{thermique}} = E\alpha\Delta T/(1 - \nu)$ , le chargement cyclique peut initier un endommagement par dilatance pouvant conduire à une fissuration, particulièrement dans les lithologies fragiles. Pour l'hydrogène, les variations de température peuvent atteindre 35 à 40°C entre injection et soutirage, générant des contraintes thermiques non négligeable par rapport aux contraintes purement mécaniques. Les analyses suivantes se sont concentrées sur deux états de charge clés : la dernière pression interne maximale et la dernière pression interne minimale, représentant un cycle opérationnel. Les résultats incluent les champs de contraintes, de température, de déformation et de déplacement ; mais aussi, le facteur de sécurité ( $FoS$ ) pour évaluer les zones de dilatance autour de la cavité.

### 5.2 Résultats et discussion

#### 5.2.1 Contraintes déviatoriques

La Figure 3 illustre les distributions de contraintes déviatoriques pour les différentes configurations de toit de sel. La contrainte déviatorique, représentant la contrainte qui contribue au changement de forme d'un matériau, plutôt que son volume, est un indicateur clé du potentiel d'endommagement du sel, notamment lorsqu'elle est comparée à la contrainte moyenne. Avec une garde de sel de 220 m (toit de sel à 700 m), les contraintes déviatoriques sont plus uniformément

distribuées, culminant à ~8,52 MPa le long des flancs de la cavité et restant faibles au niveau du toit de sel. En revanche, avec une garde de sel de 20 m (toit de sel à 900 m), les contraintes déviatoriques de pointe (~8,62 MPa) se concentrent au niveau du toit de sel et du toit de la cavité, indiquant une susceptibilité à la rupture.

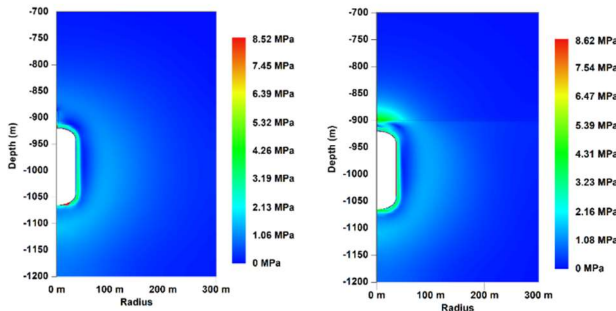


Figure 3. Isovaleurs des contraintes déviatoriques  $\sigma$  pour les configurations de toit de sel : 700 m (garde de 220 m) et 900 m (garde de 20 m).

Cette concentration des contraintes dans le cas à 20 m s'explique par la proximité de l'interface sel/non-sel. Les terrains de couverture non-salifères, plus rigides que le sel, ne permettent pas une redistribution efficace des contraintes par fluage. Le contraste de rigidité à l'interface génère une discontinuité du champ de contraintes qui se traduit par des zones de concentration. Dans le cas à 220 m, l'épaisseur de sel importante permet au fluage de « lisser » progressivement les concentrations de contraintes, assurant une distribution plus homogène.

Les configurations avec une garde de sel minimale (20 m) présentent des contraintes déviatoriques élevées, un potentiel de dilatance accru, des amplitudes de déplacement plus grandes et une subsidence de surface plus importante. Les cavités situées plus profondément dans la masse de halite (700 m et 800 m) connaissent une redistribution des contraintes plus uniforme et des zones de traction réduites.

### 5.2.2 Contraintes effectives et risque de traction

La Figure 4 montre que la diminution de l'épaisseur de la garde de sel conduit à des zones de contraintes effectives en traction accrues près du toit de la cavité, soulignant un risque plus élevé d'instabilité mécanique de la cavité à la pression interne maximale. La contrainte effective de Bérest ( $\sigma_3 + P$ ), où  $\sigma_3$  est la contrainte principale mineure ou la moins compressive et P la pression interne de cavité, permet d'évaluer le risque de fracturation en traction. Lorsque cette quantité devient positive (dans un cas très conservatif) ou supérieure à la résistance à la traction du sel

(supposée ici à 1.5 MPa), le sel est localement soumis à des contraintes de traction, ce qui est particulièrement critique étant donné la très faible résistance en traction du sel (généralement comprise entre à 1-2 MPa).

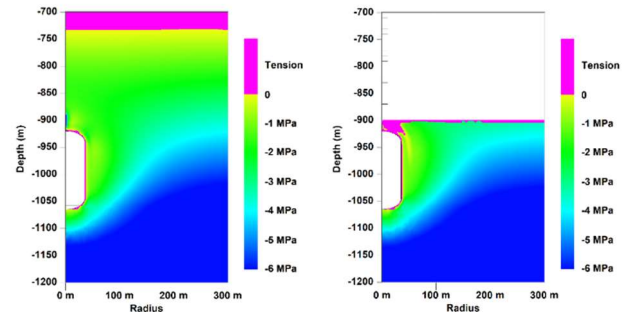


Figure 4. Contrainte effective de Bérest  $\sigma_3 + P$  à la pression maximale pour les configurations de toit de sel : 700 m (garde de 220 m), et 900 m (garde de 20 m).

À pression maximale, la contrainte effective de Bérest dépasse le seuil de résistance à la traction (1,5 MPa) pendant les cycles de pression, voir Figure 5. L'évolution temporelle de la contrainte effective de Bérest à un nœud situé au toit de la cavité révèle un comportement cyclique marqué. Pour toutes les configurations, les pics de contrainte effective atteignent des valeurs positives (traction) à chaque cycle de pressurisation maximale, et ce tout au long du cyclage. Cette observation confirme les résultats présentés sur la Figure 4 en termes d'isovaleurs de contrainte effective.

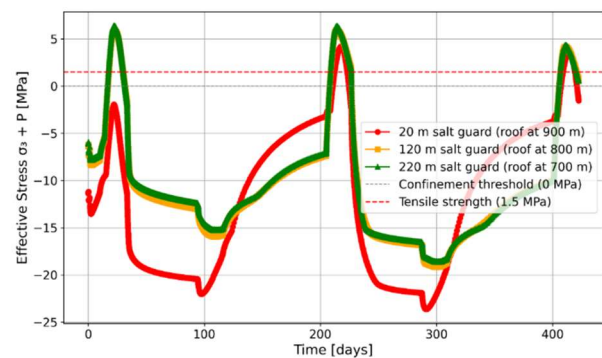


Figure 5. Evolution des contraintes effectives ( $\sigma_3 + P$ ) en un nœud au toit de la cavité.

### 5.2.3 Dilatance et facteur de sécurité

Les isovaleurs de dilatance et de déformation principale confirment aussi cette tendance. Avec des gardes plus minces, les zones de déformation et de dilatance s'étendent vers l'interface sel/non-sel. Le facteur de sécurité ( $FoS$ ) basé sur le critère RESPEC RD quantifie la marge de sécurité par rapport à l'initiation de la dilatance (DeVries et al., 2005). Un  $FoS$  supérieur à 1 indique que le sel reste dans le domaine de comportement contractant (sûr), tandis

qu'un  $FoS$  inférieur à 1 signale l'entrée dans le domaine dilatant avec risque d'endommagement.

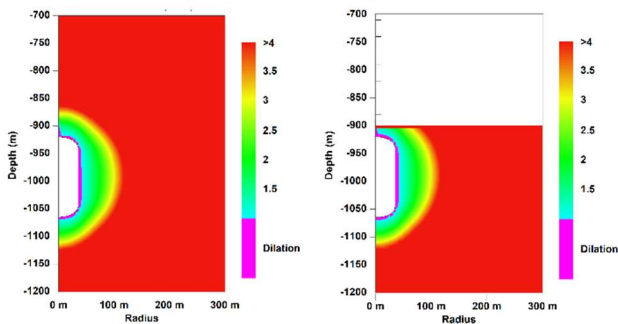


Figure 6. Dilatance du sel à la pression minimale – Facteur de sécurité ( $FoS$ ) basé sur le critère RESPEC RD pour les configurations de toit de sel : 700 m (garde de 220 m), et 900 m (garde de 20 m).

Le cas à 220 m maintient des valeurs de  $FoS$  élevées au toit de la cavité et une déformation localisée (Figures 6 et 7), tandis que le cas à 20 m montre une dilatance diffuse du toit de la cavité au toit du sel et une localisation des déformations un peu plus importantes.

La Figure 7 présente les isovaleurs de déformation principale maximale  $\epsilon_{max}$ . Dans le cas à 220 m, les déformations restent localisées aux abords immédiats de la paroi de la cavité, avec des valeurs maximales de l'ordre de 1,15 %. Pour le cas à 20 m, les déformations s'étendent sur une zone plus large incluant le toit de sel, avec des valeurs maximales atteignant 1,19 %. Cette extension de la zone déformée vers le toit de sel témoigne d'un mécanisme d'endommagement progressif qui est susceptible, à terme, de compromettre l'étanchéité de la cavité.

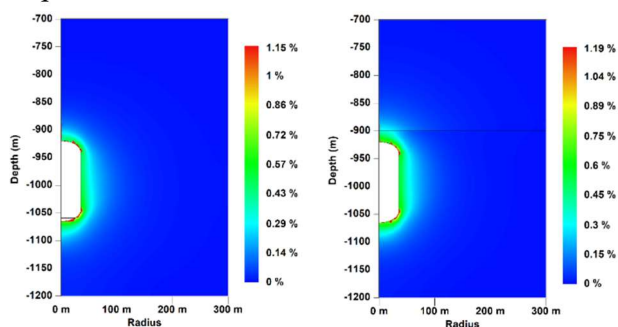


Figure 7. Isovaleurs de la déformation principale maximale  $\epsilon_{max}$  pour les toits de sel à 700 m (garde de 220 m), et 900 m (garde de 20 m).

### 5.3 Déplacements verticaux

Les résultats de déplacement vertical à la pression interne maximale présentés sur la Figure 8 montrent un affaissement au toit de la cavité, environ deux fois moins prononcé dans le cas à 700 m (220 m de garde de sel) qui est de -131,42 mm, comparativement au cas à 900 m (20 m de garde de sel) qui est de -230,2 mm.

En revanche, au fond de la cavité, le soulèvement est légèrement moins prononcé dans le cas avec une garde de 20 m (186.75 mm) comparativement au cas avec une garde de sel de 220 m (194.3 mm). Ceci s'explique par les mécanismes de relaxation des contraintes. Dans le cas d'un toit de sel à 700 m (garde épaisse à 220 m), le fluage du sel permet un réajustement progressif du champ de contraintes qui se traduit par un soulèvement du fond de la cavité (194.3 mm). Dans le cas à 900 m (garde mince à 20 m), la proximité de l'interface rigide sel/non-sel bloque ce mécanisme de relaxation réduisant légèrement la possibilité de redistribution.

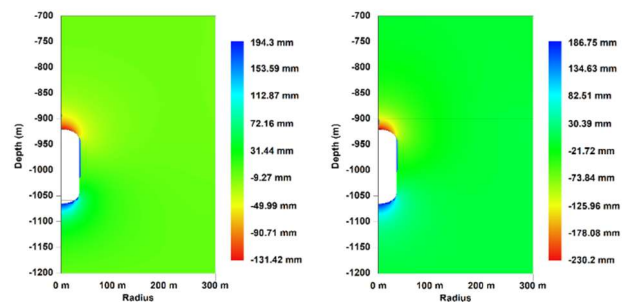


Figure 8. Déplacement vertical à la pression minimale pour le toit à 700 m et le toit à 900 m.

Ces déplacements, bien que faibles en valeur absolue, mettent en évidence des mécanismes de relaxation des contraintes qui dépendent d'un confinement adéquat par les terrains de couverture.

#### 5.3.1 Convergence et subsidence

La convergence de la cavité (ou fermeture par fluage) et la subsidence en surface ont été tracées en fonction du temps sur les Figures 9 et 10. La garde de sel la plus mince (20 m) présente une convergence plus élevée (>1,3 %) et une subsidence maximale (-5,2 mm). La convergence, définie comme la réduction relative du volume de la cavité, est un indicateur direct de la perte de capacité de stockage.

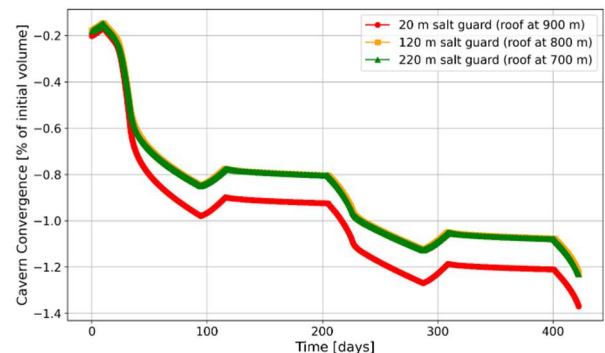


Figure 9. Convergence de la cavité en fonction du temps (normalisée par rapport au volume initial = 506 819 m<sup>3</sup>).

Une convergence de 1,3 % sur 1 an ne représente pas une perte de volume significative. Des pertes de volume de 2 % par an sont courantes dans certains sels

ductiles comme à Tersanne. D'un point de vue purement opérationnel, une vitesse de convergence est jugée acceptable tant qu'elle ne compromet pas la rentabilité du stockage

La subsidence en surface (Figure 10), bien que modeste en valeur absolue (-5,2 mm pour le cas à 20 m contre -3,8 mm pour le cas à 220 m), suit une tendance quasi-linéaire avec le temps. Extrapolée sur plusieurs décennies d'exploitation, cette subsidence pourrait atteindre plusieurs centimètres, ce qui nécessiterait une surveillance géodésique régulière.

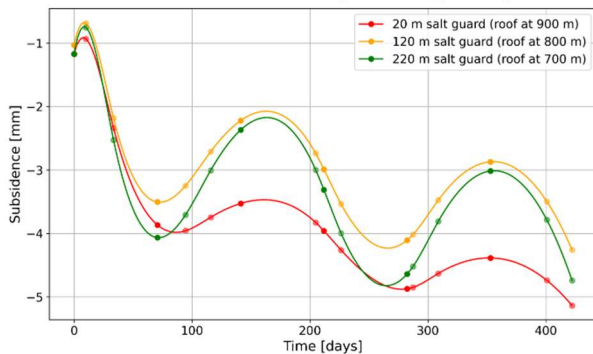


Figure 10. Subsidence en surface au cours du temps pour différentes profondeurs de toit de sel.

Le scénario avec une garde de 120 m a présenté des performances légèrement meilleures que le cas à 220 m en raison des interactions géométrie-contraintes, soulignant que la performance du toit de sel n'est pas strictement monotone avec l'épaisseur et dépend de la géométrie locale. Ce résultat est contre-intuitif.

#### 5.4 Synthèse de l'étude numérique

L'étude numérique confirme que l'épaisseur du toit de sel est un facteur déterminant pour l'intégrité mécanique de la cavité. Des gardes de sel épaisses assurent :

- Une meilleure redistribution des contraintes
- Des zones de dilatance, de déformation, et de traction réduites
- Un meilleur confinement et une plus grande symétrie des champs de contraintes
- Une stabilité à long terme améliorée de la cavité sous chargement cyclique

La configuration avec une garde de sel de 220 m présente un comportement conservatif avec des indicateurs de risque minimaux. Le cas à 120 m reste acceptable mais montre des signes de dilatance localisée lors de la dépressurisation. La configuration à 20 m présente des contraintes de traction élevées, une dilatance au toit et des conditions de convergence plus défavorables pour le stockage à long terme (en comparaison avec les deux précédents cas), en particulier dans le cadre d'une exploitation avec de l'hydrogène.

Ces résultats soutiennent l'adoption d'une épaisseur minimale de garde de sel dans la conception des stockages en cavité saline, particulièrement lorsque le chargement cyclique est intense. Un seuil de conception conservatif permet d'équilibrer stabilité, opérabilité et gestion des risques dans les systèmes géomécaniquement sensibles. Des études complémentaires sont nécessaires pour définir une garde de sel minimale recommandable pour les cavités de stockage d'hydrogène soumises à des cycles de pression fréquents.

## 6 CADRES RÉGLEMENTAIRES

Maintenir une épaisseur adéquate de toit de sel gemme est essentiel pour la sécurité des cavités. Bien que diverses juridictions reconnaissent ce besoin, seules quelques-unes codifient des exigences minimales.

Au Kansas, la réglementation K.A.R. 28-45a impose aux opérateurs de maintenir une épaisseur minimale de toit de sel de 100 pieds ( $\approx 30$  m) au-dessus des cavités utilisées pour le stockage d'hydrocarbures. Les cavités avec une épaisseur de toit entre 50 et 100 pieds ne sont autorisées que sous des protocoles de surveillance stricts. Les cavités avec moins de 50 pieds ( $\approx 15$  m) de toit de sel sont totalement interdites.

De même, la réglementation de Louisiane (La Admin Code tit. 43 § XVII-3121) exige que les toits de cavités soient maintenus intacts dans le stock de sel, sans toutefois fixer des limites. Si des preuves apparaissent qu'un toit de cavité a pénétré dans des formations non-salifères, toute opération supplémentaire est interdite à moins que l'intégrité mécanique ne soit prouvée.

Sur la base de ces cadres, les recommandations de conception suivantes sont formulées : maintenir une épaisseur minimale de toit de sel au-dessus du toit de la cavité ; placer le dernier sabot de tubage cimenté dans la halite avec une zone tampon de quelques dizaines de mètre ; éviter de placer les toits de cavité à moins de 10–15 m des intercalaires non-salifères ; utiliser des géométries de toit en voûte ; réaliser les modélisations géomécaniques adéquates.

## 7 CONCLUSIONS

Cet article a démontré le rôle géomécanique critique du toit de sel pour assurer la stabilité à long terme et le confinement des cavités salines. En analysant le comportement viscoplastique de la halite, sa capacité de redistribution des contraintes et son comportement dilatant, nous avons établi que le toit de sel n'est pas simplement une limite géométrique, mais un composant fonctionnel de l'intégrité de la cavité.

L'étude de cas paramétrique, simulant des cavités avec différentes épaisseurs de toit de sel (220 m, 120 m, 20 m), a confirmé que l'épaisseur du toit de sel a une influence directe sur les champs de contraintes, les schémas de déformation et la résilience mécanique à long terme. Les configurations avec un toit de sel minimal (20 m) présentent des contraintes déviatoriques élevées, un potentiel de dilatance accru, une convergence et une subsidence de surface plus importante.

Ces résultats soulignent que le toit de sel n'est pas une condition aux limites passive, mais un paramètre de conception clé. D'un point de vue conception et réglementation, maintenir une épaisseur suffisante de toit de sel, devrait être traité comme un critère de sécurité minimal.

## 8 REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu en partie par le Clean Hydrogen Partnership de l'Union européenne à travers le projet HyPSTER (Grant No. 101006751) et le projet FrHyGe (Grant No. 101137892). L'auteur remercie les partenaires des projets pour leurs contributions.

## 9 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bérest, P. (2017). Cases, causes and classifications of craters above salt caverns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 100, pp. 318-329. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2017.10.025>
- Bérest, P. et Brouard, B. (2003). Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage. *Oil & Gas Science and Technology*, 58(3), pp. 361-384. <http://doi.org/10.2516/ogst:2003023>
- Bérest, P., Brouard, B. et Durup, J.G. (2001). Tightness tests in salt-cavern wells. *Oil & Gas Science and Technology*, 56(5), pp. 451-469. <http://doi.org/10.2516/ogst:2001037>
- Brouard, B., Bérest, P. et Karimi-Jafari, M. (2007). Salt cavern abandonment: experience and practice. *Oil & Gas Science and Technology*, 62(3), pp. 341-352. <http://doi.org/10.2516/ogst:2007028>
- Brouard, B., Bérest, P., de Greef, V. et Hévin, G. (2012). LOCAS – A software for salt cavern behavior analysis. Dans : *Mechanical Behavior of Salt VII*, CRC Press, Paris, France, pp. 423-430.
- DeVries, K.L., Mellegard, K.D. et Callahan, G.D. (2005). Cavern roof stability for natural gas storage in bedded salt. RESPEC Report RSI-1829, Rapid City, États-Unis.
- Djizanne, H., Bérest, P. et Brouard, B. (2012). Tensile effective stresses in hydrocarbon storage caverns. Dans : *SMRI Fall Technical Conference*, Bremen, Allemagne, pp. 1-14.
- Djizanne, H., Réveillère, A. et Hévin, G. (2024). Mechanical stability of salt caverns for underground hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 59, pp. 1234-1248. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.126>
- Hoek, E. et Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), pp. 1165-1186. [http://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](http://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Hunsche, U. et Hampel, A. (1999). Rock salt – the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. *Engineering Geology*, 52(3-4), pp. 271-291. [http://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00011-3](http://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00011-3)
- Lankof, L. et Tarkowski, R. (2020). Assessment of the potential for underground hydrogen storage in bedded salt formation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), pp. 19479-19492. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.024>
- Louisiana Department of Natural Resources (2023). Bayou Corne Sinkhole: Final Technical Assessment Report, Office of Conservation, Baton Rouge, États-Unis. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.dnr.louisiana.gov>, consulté le : 15/09/2024.
- Martinez, J.D., Johnson, K.S. et Neal, J.T. (1998). Sinkholes in evaporite rocks. *American Scientist*, 86(1), pp. 38-51. <http://doi.org/10.1511/1998.1.38>
- Munson, D.E. et Dawson, P.R. (1979). Constitutive model for the low temperature creep of salt (with application to WIPP), Sandia National Laboratories Report SAND-79-1853, Albuquerque, États-Unis.
- Ratigan, J.L., Van Sambeek, L.L., DeVries, K.L. et Nieland, J.D. (1991). The influence of seal design on the development of the disturbed rock zone in the WIPP alcove seal tests. RESPEC Report RSI-0400, Rapid City, États-Unis.
- Spiers, C.J., Peach, C.J., Brzesowsky, R.H., Schutjens, P.M.T.M., Liezenberg, J.L. et Zwart, H.J. (1988). Long-term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks. EUR Report 11848, Commission of the European Communities, Luxembourg.
- Spiers, C.J., Schutjens, P.M.T.M., Brzesowsky, R.H., Peach, C.J., Liezenberg, J.L. et Zwart, H.J. (1990). Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. *Geological Society London Special Publications*, 54(1), pp. 215-227. <http://doi.org/10.1144/GSL.SP.1990.054.01.21>
- Stormont, J.C. et Daemen, J.J.K. (1992). Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 29(4), pp. 325-342. [http://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)90508-W](http://doi.org/10.1016/0148-9062(92)90508-W)
- Walters, R.F. (1978). Land subsidence in central Kansas related to salt dissolution. *Kansas Geological Survey Bulletin*, 214, pp. 1-82.
- Wang, T., Yang, C., Ma, H., Daemen, J.J.K. et Wu, H. (2015). Safety evaluation of gas storage caverns located close to a tectonic fault. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 23, pp. 281-293. <http://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.02.005>