

# Endommagement et fissuration induite en paroi de cavité saline sous sollicitation cyclique

## Cyclic loading induced damage and cracking in salt cavern

Hajar HABBANI<sup>1\*</sup>, Hippolyte DJIZANNE<sup>1</sup>, Amade POUYA<sup>2</sup>, Benoit BROUARD<sup>3</sup>

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

*2 Laboratoire Navier, UMR 8205, Ecole des Ponts, UGE & CNRS, Champs sur marne, France*

*3 Brouard Consulting, Paris, France*

*\*hajar.habbani@ineris.fr*

**RESUME :** Le stockage géologique de l'hydrogène dans les cavités salines constitue une solution potentielle pour répondre aux besoins sans cesse croissants en énergie bas-carbone. La tenue mécanique des cavités salines repose sur une compréhension des processus thermomécaniques, susceptibles d'induire un endommagement en paroi sous sollicitation cyclique. Cette contribution présente une approche numérique visant à comparer l'effet du type de cyclage sur l'initiation et la propagation des fissures à la paroi d'une cavité cylindrique : (i) cyclage journalier rapide et (ii) cyclage lent de type saisonnier. Ces sollicitations cycliques sont susceptibles d'engendrer localement un endommagement du sel gemme en paroi et/ou une micro-fracturation pouvant affecter la stabilité mécanique de la cavité. Ce risque est évalué numériquement à l'aide des logiciels DISROC et LOCAS. DISROC est un code aux éléments finis développé par FRACSIMA, conçu pour les matériaux présentant des discontinuités, intégrant des modèles de zones cohésives pour simuler l'initiation et la propagation des fractures. LOCAS est une suite logicielle développée par Brouard Consulting à des fins de modélisation et d'analyse 3D ou 2D axisymétriques de cavités salines pour la production de saumure, le stockage de gaz ou de liquides. Les simulations numériques de la présente étude, à géométrie et amplitudes imposées (cas d'étude), sont interprétées à partir du suivi au voisinage de la paroi des contraintes effectives de Bérest, du taux de déformation et indicateurs d'endommagement (ouverture de la fracture cohésive, critères d'initiation et de propagation). L'objectif est d'établir un lien qualitatif et quantifié entre la fréquence des cycles de chargement et le niveau d'exposition au risque (effondrement du toit, écaillage, chute de blocs) afin d'éclairer le dimensionnement, les stratégies d'exploitation et la maîtrise des risques des cavités salines dédiées au stockage d'hydrogène.

**ABSTRACT:** Underground Hydrogen Storage in salt caverns is a potential solution to meet steadily increasing low-carbon energy needs. The mechanical integrity of salt caverns relies on understanding thermo-mechanical processes that may induce wall damage under cyclic loading. This contribution presents a numerical approach aimed at comparing the effect of cycling regime on fracture initiation and propagation at the wall of a cylindrical cavern: (i) rapid daily cycling and (ii) slow seasonal-type cycling. Such cyclic solicitations may locally cause wall damage in rock salt and/or microfracturing, which can affect cavern mechanical stability. This risk is assessed numerically using DISROC and LOCAS softwares. DISROC is a finite-element code developed by FRACSIMA for materials with discontinuities, incorporating cohesive-zone models to simulate fracture initiation and propagation. LOCAS is a software suite developed by Brouard Consulting for 3D or 2D axisymmetric modelling and analysis of salt caverns for brine production and for gas or liquid storage. The numerical simulations of this study, with prescribed geometry and loading amplitudes (case study), are interpreted based on near-wall monitoring of Bérest effective stresses, strain rate, and damage indicators (cohesive-fracture opening, initiation, and propagation criteria). The objective is to establish a qualitative and quantitative link between loading-cycle frequency and the level of exposure to mechanical risk (roof collapse, spalling, block fall) to inform design, operational strategies, and risk management for salt caverns dedicated to hydrogen storage.

**Mots-clés :** Cavités salines ; cyclage journalier ; cyclage saisonnier ; thermomécanique.

## 1 INTRODUCTION

Le développement du stockage souterrain de gaz ou d'hydrogène en cavités salines soulève des questions fondamentales quant aux mécanismes thermomécaniques susceptibles d'affecter l'intégrité des parois. Depuis plusieurs décennies, de nombreux travaux expérimentaux, *in-situ* et numériques ont mis

en évidence la sensibilité du sel gemme aux variations rapides de pression et de température. Ces sollicitations cycliques peuvent induire des contraintes en traction, de la dilatance, la formation de microfissures et, dans certains cas, l'initiation ou la propagation de fractures en paroi de la cavité.

Les premiers travaux expérimentaux ont montré que des chocs thermiques importants peuvent

provoquer l'apparition de fissures perpendiculaires aux parois, comme l'a illustré l'essai de Dreyer (1977) dans une petite cavité refroidie par injection d'azote liquide. Des observations analogues ont été faites dans des mines de sel, notamment à Gorleben, où des périodes de refroidissement prolongés ont entraîné la formation de fractures verticales et horizontales (Wallner & Eickemeier, 2001). Les essais STARFISH menés dans la mine de Varangéville ont également confirmé que des chutes de température de quelques dizaines de degrés génèrent des fissures dont l'ouverture et la propagation demeurent étroitement liées aux gradients thermiques (Hévin et al., 2016).

À l'échelle des cavités, plusieurs retours d'expérience attestent de phénomènes d'instabilité associés à des cycles de pression rapides, tels que la dépressurisation rapide ou lorsque les soutirages sont répétés. Le cas de la cavité Kiel 101, caractérisée par une chute de pression de près de 50% en quelques jours, a mis en évidence la possibilité de ruptures locales et d'importantes évolutions de géométrie (Röhr, 1974 ; Bérest et al., 2012). Des phénomènes similaires ont été rapportés au dôme d'Eminence (Coates et al., 1983) et à Tersanne, où des détachements de blocs du fond de cavité ont été observés.

Des avancées significatives ont récemment été obtenues grâce aux approches numériques. Les travaux de modélisation thermomécanique réalisés sur des cavités exploitées en cyclage rapide ont montré l'accroissement des gradients thermiques dans les premiers mètres de la paroi et la possibilité d'apparition de zones en traction même pour des amplitudes modérées de pression (Pellizzaro et al., 2011). Par ailleurs, des analyses fondées sur un modèle de zones cohésives représentant les discontinuités ont permis de simuler l'initiation et la propagation de microfissures induites par des chocs thermiques représentatifs du stockage d'hydrogène (Habibani et al., 2025a). Ces travaux montrent que l'amplitude et la vitesse des variations thermiques jouent un rôle prépondérant dans la localisation des fissures et leur évolution.

Enfin, des études à l'échelle de la cavité ont permis d'examiner les mécanismes d'écaillage, de détachement de blocs et les conditions mécaniques propices à l'apparition de zones dilatantes ou de contraintes effectives en traction basées sur un modèle de fractures cohésives (Habibani et al., 2025b). Ces résultats soulignent la nécessité de mieux caractériser l'effet de la fréquence des cycles (qu'ils soient journaliers ou saisonniers) sur l'intensité des gradients thermiques, la distribution des contraintes et les mécanismes d'endommagement.

Dans ce contexte, l'analyse comparative de plusieurs régimes de cyclage thermomécanique constitue un enjeu essentiel pour la compréhension des processus d'endommagement en paroi de cavités salines.

## 2 APPROCHE THEORIQUE

### 2.1 Mécanique du sel gemme

Le comportement mécanique du sel gemme est fortement non linéaire et dépend à la fois du mode de sollicitation et de la durée de chargement. En compression de courte durée, il présente une réponse globalement élastique, alors qu'en traction il se caractérise par un comportement fragile. Lorsqu'un déviateur de contraintes est appliqué à l'échantillon, une déformation supplémentaire se met en place et augmente progressivement. Si ce déviateur est maintenu constant, la déformation continue d'évoluer au cours du temps : ce comportement différé est appelé fluage. Ce comportement est décrit dans cet article par une loi constitutive de Munson-Dawson (Munson, 1997) prenant en compte le fluage transitoire (primaire) et le fluage stationnaire (secondaire). Elle se définit comme suit :

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} + F \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma_{ij}} F \dot{\varepsilon}_{ss} \quad (2)$$

L'équation (2) peut se simplifier sous la forme

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = F \dot{\varepsilon}_{ij}^{ss} \quad (3)$$

Avec :

$$\begin{cases} F = e^{\Delta(1-\xi/\varepsilon_t^*)^2} & \text{si } \xi \leq \varepsilon_t^* \\ F = e^{-\delta(1-\frac{\xi}{\varepsilon_t^*})^2} & \text{si } \xi \geq \varepsilon_t^* \\ \dot{\xi} = (F - 1) \dot{\varepsilon}_{ss} \end{cases} \quad (4)$$

Et :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_{ss} = A e^{(-\frac{Q}{RT})} \sigma^n \\ \varepsilon_t^* = K_0 e^{cT} \sigma^m \\ \Delta = \alpha_w + \beta_w \log_{10} \left( \frac{\sigma}{\mu} \right) \end{cases} \quad (5)$$

Où  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{el}$  est la vitesse de déformation élastique ;  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$  représente la vitesse de déformation viscoplastique avec  $\dot{\varepsilon}_{ss}$  ; la vitesse de déformation stationnaire et  $\varepsilon_t^*$  la déformation transitoire limite.  $\sigma$  est la contrainte déviatorique, Les paramètres  $K_0$ ,  $c$ ,  $m$ ,  $\Delta$ ,  $\delta$  caractérisent le fluage transitoire et les paramètres  $A$ ,  $Q$ ,  $R$ ,  $n$  le fluage stationnaire.

En plus des déformations élastiques et viscoplastiques, les déformations d'origine thermique s'additionnent par le biais de l'équation suivante :

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{th} = \alpha \dot{T}_{salt} \delta_{ij} \quad (6)$$

Les propriétés mécaniques du sel gemme sont donnés dans Djizanne et al. (2023). Les terrains surincombants le sel gemme sont modélisés par une roche supposée avoir une réponse purement élastique ( $E = 25$  GPa,  $\nu = 0,25$ ).

## 2.2 Mécanique des fractures

La dégradation progressive de la résistance et de la rigidité de la roche peut conduire à la formation de fractures, qui peuvent être décrites à l'aide de la mécanique de l'endommagement appliquée aux interfaces représentées par des éléments joints. L'approche de modélisation repose sur la définition de la loi constitutive des zones cohésives pour les joints. D'un point de vue mécanique, les fractures sont modélisées selon l'approche de fractures cohésives comme défini par (Barenblatt, 1962). Le modèle de zone cohésive fournit une description phénoménologique de la séparation d'interface pendant la propagation de fissure (Yu et al., 2021) ; une couche d'éléments cohésifs est introduite le long de la fracture attendue entre les éléments de la matrice. Dans ce modèle, une zone cohésive est supposée exister en avant du front de fissure pour caractériser la zone de processus de rupture (Jin et Sun, 2006). Les surfaces supérieure et inférieure de cette bande agissant comme des surfaces cohésives qui se déforment selon une loi constitutive reliant le tenseur de contrainte ( $\underline{\sigma}$ ) aux déplacements relatifs ( $\underline{u}$ ) entre ces surfaces. En analyse bidimensionnelle, ( $\underline{\sigma}$ ) et ( $\underline{u}$ ) possèdent des composantes normale et tangentielle. La modélisation en zone cohésive élimine les singularités de contrainte au front de fissure, inhérentes aux approches de mécanique linéaire de la rupture (Dugdale, 1960 ; Barenblatt, 1962).

Dans le modèle constitutif adopté, l'endommagement du matériau est traité comme un processus de plasticité selon l'approche cohésive proposée par Pouya et Bemani (2015). La variable interne d'endommagement ( $D$ ) quantifie la dégradation se produisant à chaque discontinuité potentielle, laquelle est numériquement représentée par un élément joint. Après le seuil d'amorçage, le matériau peut continuer à se dégrader jusqu'à la rupture complète de la zone cohésive, ce qui signifie l'initiation d'une fissure. À ce stade, une discontinuité apparaît dans le champ de déplacement environnant. Les composantes tangentielle et normale de ( $\underline{\sigma}$ ) et ( $\underline{u}$ ), respectivement  $[\tau, \sigma_n]^T$  et  $[u_t, u_n]^T$ . La loi constitutive est exprimée comme suit :

$$\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \tau \\ \sigma_n \end{pmatrix} = (1 - D) \cdot K \cdot \underline{u} + s \cdot k_0 \cdot \underline{u} \quad (7)$$

$$K = \begin{pmatrix} K_{tt} & 0 \\ 0 & K_{nn} \end{pmatrix}; k_0 = \begin{pmatrix} k_{0t} & 0 \\ 0 & \frac{k_{0n}}{(1 + \frac{u_n}{e_0})^2} \end{pmatrix} \quad (8)$$

La rigidité du matériau intact est caractérisée par le tenseur ( $K$ ), qui subit une dégradation après amorçage gouvernée par la variable interne d'endommagement ( $D$ ). Une rigidité résiduelle ( $k_0$ ) des surfaces cohésives de la discontinuité est prise en compte lorsque  $D = 1$ .

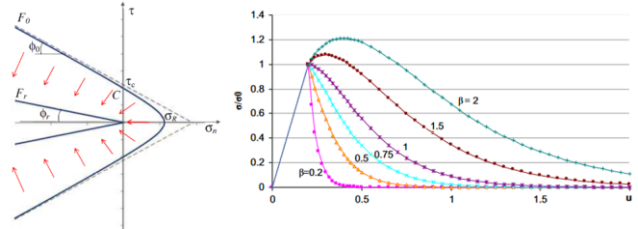


Figure 1. (a) Contrainte-déplacement du modèle pour différentes valeurs de  $\beta$ . (b) Évolution du critère d'endommagement jusqu'à la rupture complète du joint.

Le critère de rupture des fractures cohésives, proposée par Pouya et Bemani (2015) et illustré à la Figure 1 dépend de la contrainte tangentielle, de la contrainte normale et de l'endommagement. Dans ce critère,  $\sigma_R$  désigne la résistance en traction des joints intacts (équivalente à  $\sigma_t$  du Tableau 1). Le critère est formulé comme suit :

$$\begin{cases} F = \tau^2 - \sigma_n^2 \tan^2 \varphi + 2g \cdot \tau_c \sigma_n - g^2 C^2 \\ \tau_c = \frac{C^2 + \sigma_R^2 \tan^2 \varphi}{2 \cdot \sigma_R} \\ g(D) = (1 - D)[1 - \beta \cdot \ln(1 - D)] \end{cases} \quad (9)$$

où ( $C$ ) représente la cohésion d'une fracture cohésive intacte, ( $\varphi$ ) est l'angle de frottement, et ( $\sigma_R$ ) est la résistance en traction des joints intacts. La fonction  $g(D)$  est dérivée des conditions de consistance. Les paramètres mécaniques des joints sont fournis dans le Tableau 1.

Tableau 1. Paramètres des éléments joints.

Paramètre	Symbole	Valeurs
Rigidité normale	$K_{nn}$ ( $MPa \cdot m^{-1}$ )	300000
Rigidité tangentielle	$K_{tt}$ ( $MPa \cdot m^{-1}$ )	300000
Résistance à la traction	$\sigma_t$ ( $MPa$ )	1,5
Cohésion	$C$ ( $MPa$ )	8
Angle de frottement	$\phi$ ( $^\circ$ )	36,8
Ténacité	$K_{IC}$ ( $MPa \cdot m^{1/2}$ )	0,85
Paramètre de ductilité	$\beta$	0,1

## 3 APPROCHE NUMERIQUE

### 3.1 Modèle géométrique

Une cavité cylindrique est considérée, présentant un rayon et une hauteur maximale de 35 m et 175 m respectivement, pour un volume géométrique total de

506 818 m<sup>3</sup>. Le maillage est réalisé à l'aide du logiciel LOCAS (Brouard et al., 2022), et est constitué d'éléments triangulaires linéaires et subdivisés en trois zones de densité croissante (Figure 2).

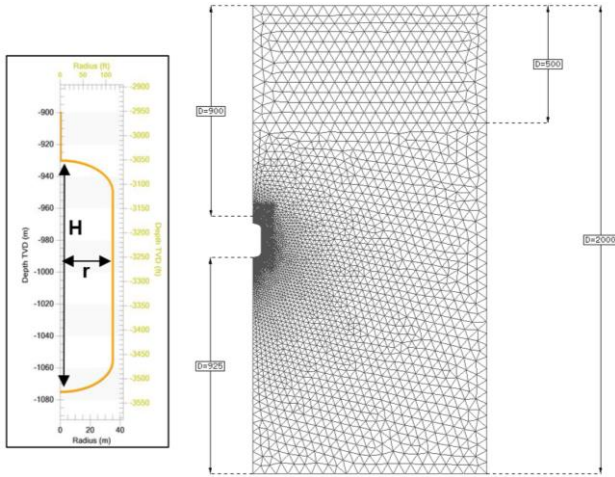


Figure 2. Géométrie et maillage du modèle.

Afin de modéliser le processus de fracturation, une zone spécifique intégrant des éléments joints en paroi de cavité (450 m de largeur) est considérée.

### 3.2 Conditions initiales et aux limites

Il s'agit d'un modèle axisymétrique, soumis à un chargement thermomécanique avec un état géostatique initial. Les conditions aux limites mécaniques imposent un déplacement vertical nul en partie inférieure et un déplacement radial nul sur l'axe de révolution. Les conditions aux limites thermiques consistent en l'imposition d'une température de 10°C au niveau du sol ainsi qu'un flux thermique constant de 96,3mW.m<sup>2</sup> à la base du modèle.

La variation de température lors du remplissage de la cavité en hydrogène est obtenue à partir des calculs réalisés avec LOCAS qui permet de prendre en compte les effets thermodynamiques du gaz ; ce champ thermique est ensuite utilisé comme conditions aux limites pour l'analyse thermomécanique réalisée avec DISROC (FracSima, 2016).

### 3.3 Chargement de la cavité :

Dans la présente étude, la cavité est soumise à deux types de chargement :

- Cycle saisonnier : un soutirage (183 jours) faisant passer la pression de  $P_{max} = 16,56 \text{ MPa}$  à  $P_{min} = 4,8 \text{ MPa}$ , suivi d'une injection (183 jours) de  $P_{min}$  à  $P_{max}$ .
- Cycle journalier : débutant par 4 h de soutirage (de  $P_{max}$  à  $P_{min}$ ), suivies de 6 h de remise en pression (de  $P_{min}$  à  $P_{max}$ ). Un second soutirage de 4 h

précède une injection d'environ 10 h, formant un cycle complet de 24h.

L'historique de chargement de la cavité est pris en compte depuis son lessivage d'une durée de 550 jours, suivi d'une période de mise en repos de 100 jours avant le premier remplissage en hydrogène d'une durée de 80 jours.

## 4 RESULTATS

### 4.1 Cyclage journalier

Durant le premier soutirage (4h) du cycle journalier, la pression dans la cavité diminue en passant de  $P_{max}$  à  $P_{min}$ . Parallèlement, la température chute de 35,03 °C à -33,63 °C. Cette baisse rapide de température engendre ainsi un gradient thermique marqué au voisinage de la paroi de la cavité, susceptible d'induire des contraintes thermiques supplémentaires.

Une analyse numérique sur LOCAS a été réalisée en se basant sur l'approche de la mécanique du milieu continu afin d'évaluer les zones d'endommagement dues à l'apparition des contraintes effectives de Bérést :

$$\sigma_{eff} = \sigma_3 + P_c \quad (10)$$

où  $\sigma_3$  est la contrainte principale la moins compressive et  $P_c$  est la pression appliquée à la paroi de la cavité. Lorsque des contraintes en traction apparaissent au niveau de la paroi de la cavité, le sel peut devenir vulnérable à des phénomènes d'écaillage, voire à l'amorçage de fissures. En particulier, durant les phases de soutirage d'hydrogène, le refroidissement et la contraction thermique du sel près du parement sont susceptibles de générer des contraintes de traction localisées (Djizanne et al., 2023).

Les résultats montrent que lors du cycle journalier, la cavité subit des transitoires thermomécaniques très marqués. La température du gaz, initialement proche de la température géothermique (35°C), chute brutalement pendant le premier soutirage (4h) jusqu'à environ -33,6 °C, soit une variation de 68,7 °C. Cette baisse rapide traduit l'effet thermodynamique associé à la détente du gaz et induit un fort gradient thermique au voisinage de la paroi. Lors de la phase d'injection (6h) la température remonte rapidement avec un pic pouvant dépasser 60 °C, ce qui confirme l'importance des échanges thermiques liés aux phases de compression et aux conditions d'entrée du gaz. Un second transitoire apparaît ensuite lors du second soutirage (4h), avec une baisse moins sévère suivie d'un réchauffement progressif.

Ces variations thermiques s'accompagnent d'une réponse mécanique particulièrement critique à proximité de la paroi de la cavité. Avant le premier

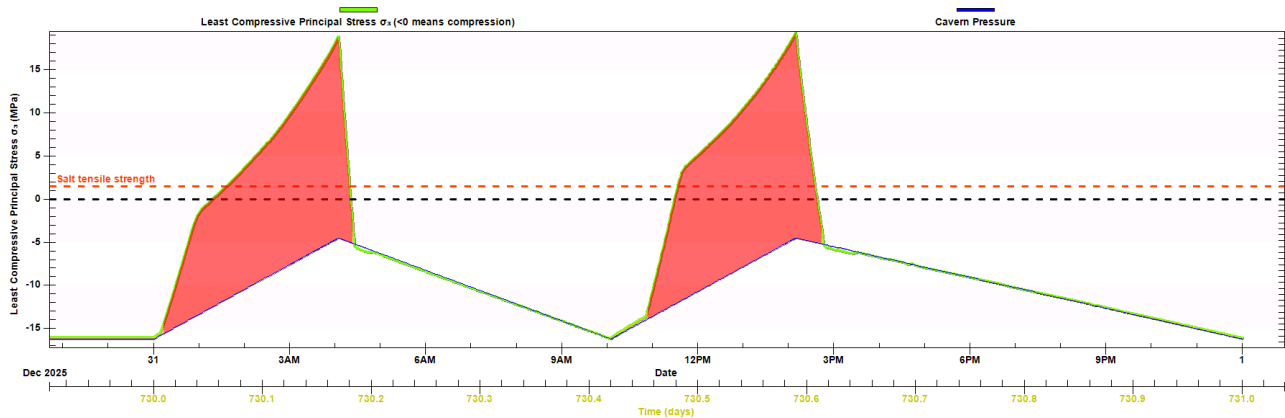


Figure 3. Evolution de la contrainte principale la moins compressive ( $\sigma_3$ ) au cours du cyclage journalier.

soutirage, la contrainte principale la moins compressive  $\sigma_3$  reste en compression ( $\approx -15$  MPa). En revanche, lors des phases de soutirage,  $\sigma_3$  augmente fortement et devient positive, atteignant des pics de l'ordre de 18 MPa. Or, la résistance en traction du sel  $\sigma_T$  étant de l'ordre de 1,5 MPa, l'apparition de zones de traction localisées peut être identifiée dès que  $\sigma_3 > \sigma_T$ . Le dépassement de ce seuil indique que la condition de rupture en traction est largement franchie comme le montre la Figure 4, même si cela se produit sur une durée relativement courte. Cette évolution s'explique par la superposition de deux effets : la baisse de pression interne réduit le confinement appliqué à la paroi, tandis que le refroidissement rapide génère des contraintes thermiques additionnelles, susceptibles d'initier des microfissures ou d'activer des discontinuités préexistantes. Ces résultats mettent en évidence que le cycle journalier, du fait des variations rapides de pression et de température, peut conduire à des états de traction c'est-à-dire où l'état de contrainte dépasse la résistance à la traction du sel (fixée ici à 1,5 MPa). Ceci suggère un risque élevé d'initiation de fissures au voisinage de la paroi de la cavité.

Une analyse basée sur la mécanique des discontinuités a été réalisée en utilisant des éléments finis enrichis par des éléments joints, intégrant le modèle de zone cohésive proposé par Pouya et Bemani (2015). Dans ce cadre, l'ouverture potentielle des éléments joints est évaluée à partir de la contrainte normale dans les joints  $\sigma_n$ . L'initiation est considérée lorsque  $\sigma_n$  au parement dépasse la résistance à la traction du sel, égale à  $\sigma_T = 1,5$  MPa. Les résultats présentés concernent le cyclage journalier et plus particulièrement la première phase de soutirage (4h), caractérisée par des transitoires thermomécaniques rapides.

Les isovaleurs de la contrainte normale dans les joints à 1,8 du début du soutirage met en évidence une réponse en traction ( $\sigma_n > 0$  MPa) localisée à la paroi de la cavité alors que le massif rocheux avoisinant

reste en compression. Les valeurs de  $\sigma_n$  atteintes à la paroi de la cavité sont de l'ordre de 2,7 MPa (Zone jaune-orange de la Figure 5), ce qui implique un dépassement de la  $\sigma_T$  et correspond à l'amorçage d'une fissure perpendiculaire à la paroi de cavité à 1,8 h du début du premier soutirage.

A  $t = 1,87$  h, les isovaleurs de la variable d'endommagement  $D$  montrent une localisation marquée (champ en rouge) correspondant à une fissure qui s'est propagée depuis son initiation à la paroi de la cavité vers le massif (Figure 6). Les zones d'endommagement où  $D = 1$  correspondent à une rupture complète des joints au cours du processus de propagation. Cette évolution est associée à une dissipation d'énergie de fissuration mobilisant le travail des forces de tractions cohésives au cours de l'ouverture des éléments joints. L'extension de la zone

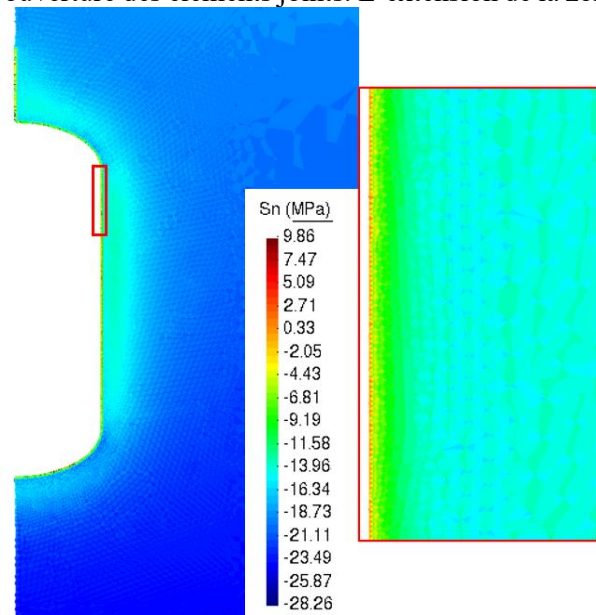


Figure 5. Isovaleurs de la contrainte normale dans les joints ( $\sigma_n$ ) au moment d'amorçage de la fissure (1,8 h). endommagée ( $D = 1$ ) traduit l'accumulation de cette dissipation lors de la création de nouvelles surfaces de rupture. La géométrie de la zone endommagée est compatible avec un mode de rupture de type écaillage,

où la coalescence de ces zones conduit à la délimitation de lamelles du massif rocheux susceptibles de se détacher lorsque la rupture des joints devient complète.

En synthèse, l'analyse menée avec LOCAS sur la contrainte principale la moins compressive  $\sigma_3$  indique l'apparition de phases transitoires où l'état de contrainte en paroi de la cavité atteint un régime de traction. Cette tendance est confirmée par l'analyse DISROC ; à 1,8 h, la contrainte normale dans les joints en paroi  $\sigma_n > 1,5$  MPa déclenche l'initiation, puis la propagation est observée par l'évolution de la variable d'endommagement jusqu'à la rupture complète ( $D = 1$ ).

## 4.2 Cyclage saisonnier

Lors du cyclage saisonnier, la cavité est soumise à des sollicitations thermomécaniques à cinétique lente, ce qui se traduit par des évolutions plus progressives que dans le cas journalier (Section 4.1). Lors du passage à l'exploitation avec l'hydrogène, la température augmente pour atteindre un maximum de l'ordre de 32,28 °C au premier remplissage. Au cours de la période de soutirage saisonnier, la température décroît ensuite progressivement sur plusieurs mois jusqu'à un minimum de 22,87 °C, avant de remonter graduellement pendant la phase d'injection pour atteindre en fin de période environ 41 °C. La variation thermique caractéristique sur le cycle est donc de l'ordre de 15 à 20 °C, et surtout ces variations se produisent sur des durées longues, ce qui limite les gradients thermiques instantanés au voisinage de la paroi.

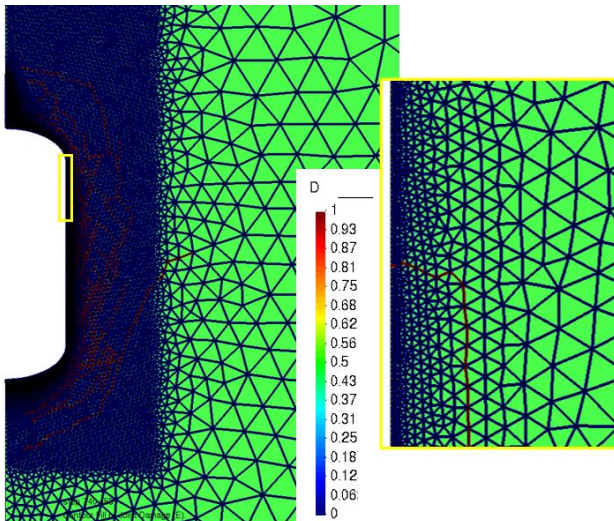


Figure 6. Isovaleurs de la variable d'endommagement ( $D$ ) en fin de propagation ( $t = 1,87$  h).

Sur le plan mécanique, cette évolution thermique et la variation de pression se traduisent par une réponse dominée par un état globalement compressif. La contrainte principale la moins compressive  $\sigma_3$  reste

négative sur toute la période du cyclage, avec des variations typiquement comprises entre environ -20 MPa et -10 MPa. Lors de la période de soutirage, associée à une diminution de la pression à la paroi de la cavité, la contrainte  $\sigma_3$  devient moins compressive et se rapproche de 0 MPa traduisant une réduction du confinement. À l'inverse, lors de la remontée en pression pendant l'injection,  $\sigma_3$  redevient plus compressive comme le montre la Figure 7

Contrairement au cyclage journalier, aucun basculement en traction n'est observé : la condition de formation de zones de traction localisées à la paroi de la cavité définie par  $\sigma_3 > \sigma_T = 1,5$  MPa n'est jamais atteinte. Ainsi, le cyclage saisonnier ne met pas en évidence, dans les conditions étudiées, de dépassement direct du seuil de traction du sel, ce qui suggère un risque plus faible d'amorçage de fissures par traction sous ce type de chargement thermomécanique. Ce comportement s'explique par la variation de pression et de température sur une durée suffisamment longue (6 mois lors du soutirage), pour que domine le comportement viscoplastique en paroi de la cavité saline induisant une relaxation des contraintes et une redistribution progressive des efforts à la paroi. Cette évolution tend à limiter l'apparition des zones en traction.

Une analyse complémentaire du cyclage saisonnier a été menée sous DISROC (Fracsima, 2016) en s'appuyant sur la méthode des éléments finis enrichis par des éléments joints et en intégrant le modèle des zones cohésives proposé par Pouya et Bemani (2015), permettant l'évaluation explicite du processus de fracturation. Dans ce cadre, l'amorçage d'une fracture en mode I est piloté par la contrainte normale dans les joints  $\sigma_n$  ; une initiation est attendue lorsque  $\sigma_n$  atteint un niveau de traction supérieur à la résistance à la traction du sel ( $\sigma_T = 1,5$  MPa). Les isovaleurs présentées dans l'analyse correspondent à un instant défavorable du cycle, en fin de soutirage saisonnier où la pression et la température sont minimales.

La Figure 8 présente les isovaleurs de la contrainte la moins compressive en valeur absolue  $|\sigma_3|$  : elles montrent un régime compressif ou aucune zone ne bascule vers un état de traction susceptible d'induire une ouverture des éléments joints. Ce constat est confirmé par les isovaleurs de la contrainte normale dans les joints  $\sigma_n$  et celles de la variable d'endommagement  $D$  comme présenté sur la Figure 9.

En fin de soutirage, les résultats montrent que la contrainte normale dans les joints reste compressive en en paroi de la cavité ( $\sigma_n = -14,34$  MPa).  $\sigma_n$  ne franchit pas le seuil d'ouverture des joints.

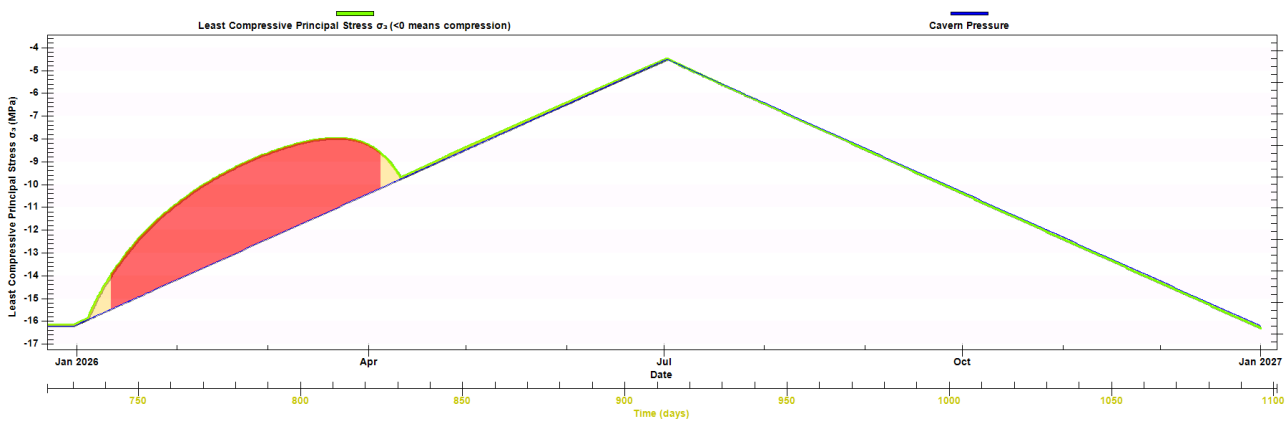


Figure 7. Evolution de la contrainte principale la moins compressive ( $\sigma_3$ ) au cours du cyclage saisonnier.

Les isovaleurs de la variable d'endommagement  $D$  montrent une valeur nulle au voisinage de la cavité ; indiquant qu'aucun amorçage de fissure n'est prédit comme le confirme la Figure 9.

En synthèse, les échanges thermiques conductifs avec le massif rocheux environnant atténuent progressivement l'amplitude des transitoires thermiques en paroi de la cavité, ce qui ne permet pas l'apparition des conditions de traction favorables à la propagation de fissures. Ni la contrainte principale la moins compressive  $\sigma_3$  ni la contrainte normale dans les joints  $\sigma_n$  n'atteignent un régime de traction susceptible de dépasser la résistance en traction du sel gemme, et l'indicateur d'endommagement  $D$  demeure nul, ce qui traduit l'absence d'initiation de fissures en fin de soutirage malgré la baisse de température et de pression.

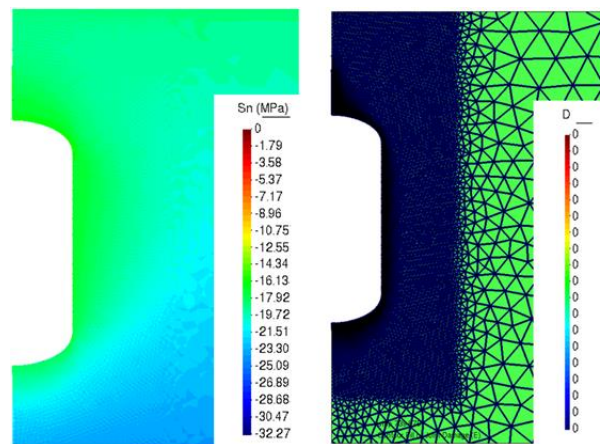


Figure 9. Isovaleurs de la contrainte normale dans les joints ( $\sigma_n$ ) et de la variable d'endommagement ( $D$ ) en fin de soutirage (183 jours).

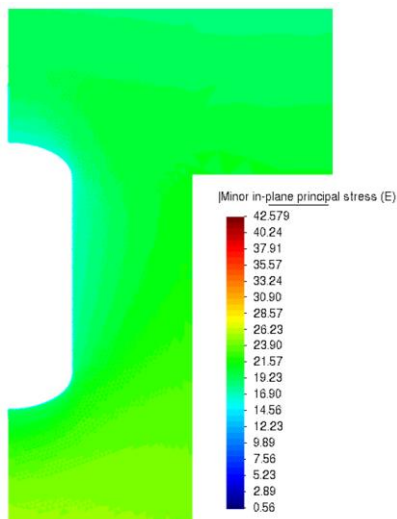


Figure 8. Isovaleurs de la contrainte principale la moins compressive en fin de soutirage en valeur absolue  $|\sigma_3|$  en fin de soutirage (183 jours).

## 5 CONCLUSION

Cet article examine l'influence du cyclage en pression et température sur l'intégrité mécanique des cavités salines destinées au stockage souterrain de l'hydrogène, dans le cadre d'un cas d'étude (géométrie et amplitudes imposées) en comparant un cyclage journalier et un cyclage saisonnier.

Les résultats numériques suggèrent que le mode d'exploitation (cyclage journalier ou saisonnier) constitue un facteur potentiellement déterminant pour l'intégrité mécanique des cavités salines, dans les conditions étudiées. Le cyclage journalier, caractérisé par des variations rapides de pression et de température, favorise l'apparition de zones en traction au voisinage de la paroi de la cavité, créant des conditions propices à l'initiation puis à la propagation de fissures. L'analyse thermomécanique en milieu continu réalisée avec LOCAS met en évidence l'apparition de contraintes effectives de traction, tandis que l'approche DISROC, fondée sur une représentation explicite des discontinuités, en fournit

une traduction structurale du processus d'amorçage et de propagation des fissures. À l'inverse, le cyclage saisonnier maintient la paroi dans un régime globalement plus favorable où les variations plus lentes ne conduisent pas, dans les cas étudiés, à une traction suffisante pour activer de manière significative l'initiation des fissures. Au-delà de la comparaison des deux scénarios, l'apport principal de l'étude réside dans la cohérence qualitative entre les deux niveaux de modélisation : l'indicateur global issu de l'analyse en milieu continu est cohérent avec la réponse obtenue par l'analyse basée sur la mécanique des discontinuités. Ces résultats obtenus sur une géométrie cylindrique idéalisée en conditions axisymétrique, présentent certaines limitations. La prise en compte d'une géométrie de cavité plus réaliste, de l'hétérogénéité du massif salin ou de l'anisotropie du sel gemme pourrait modifier quantitativement les seuils d'endommagement identifiés. Des validations expérimentales et des confrontations avec des données de terrain seraient nécessaires pour confirmer ces tendances.

Ces observations illustrent la sensibilité de la paroi de la cavité aux sollicitations thermomécaniques sévères et suggèrent que la maîtrise des vitesses de cyclage pourrait constituer un paramètre de conception important pour préserver la stabilité à long terme et la durabilité des stockages souterrains d'hydrogène gazeux en cavités salines.

## REMERCIEMENTS

Cette recherche a été en partie financée par le Clean Hydrogen Partnership de l'Union Européenne dans le cadre des projets HyPSTER (n° 101006751) et FrHyGe (n° 101137892).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barenblatt, G. I. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in Applied Mechanics*, 7, 55–129.
- Bérest P., Djizanne H., Brouard B. & Hévin G. (2012). Rapid depressurizations: can they lead to irreversible damage? *Proc. SMRI Spring Technical Conference, Regina, Canada*, 63-83.
- Brouard B, Zakharov V, Frangi A. 2022. Numerical modelling of Complex Behavior of Salt Caverns. *International Geomechanics Symposium, Abu Dhabi, UAE*, pp. 22–78.
- Coates, G. K., Lee, C. A., McLain, W. C., & Senseny, P. E. (1983). Closure and collapse of man-made cavities in salt. *Proc. of the 6th International Symposium on Salt*, 139–157.
- Djizanne H, Brouard B. & Hévin G. (2023). Mechanical stability of a salt cavern used for hydrogen storage. *15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium*. Schubert & Kluckner(Eds.) © ÖGG. Salzburg, Autriche.
- Dreyer, W. E. (1977). Cold and cryogenic storage of petroleum products. *Proceedings of Rockstore '77 (1st Int. Symposium on Storage in Excavated Rock Caverns)*, Stockholm, 237–249.
- Dugdale, D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *J. Mech. Phys. Solids*, 8, 100–104.
- Fracsima. (2016). *DISROC User Manual : Finite-element code for thermo-hydro-mechanical modeling in fractured media*. Fracsima, Paris. [Manuel de logiciel]
- Habbani, H., Djizanne, H., Brouard, B. & Pouya, A. (2025a). Modeling dilatancy-induced damage in rock salt using DISROC : A joint enriched finite element analysis for UHS. *11th Conference on the Mechanical Behavior of Salt*.
- Habbani H., Djizanne H., Brouard B. et Pouya A. (2025b). Thermomechanical induced fractures in salt caverns for gas storage : Insights from DISROC fracture modeling. *Proc. SMRI Spring Technical Conference, Wilhelmshaven, Germany*.
- Hévin, G., Charnavel, Y., Bolland, C., et al. (2016). Thermo-mechanical test in a salt mine as part of SMRI research on high-frequency cycling. *SMRI Research Report RR2016-1*.
- Jin, Z. H. & Sun, C. T. (2006). Cohesive zone modeling of interface fracture in elastic bi-materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 72(14), 1805–1817.
- Munson DE. (1997). Constitutive model of creep in Rock salt applied to underground room closure. *Int J Rock Mech Min Sci*, pp. 233–247.
- Pellizzaro, C., Bergeret, G., Leadbetter, A., & Charnavel, Y. (2011). Thermo-mechanical behavior of Stublach gas storage caverns. *Proceedings of the SMRI Fall Meeting, York, UK*.
- Pouya, A., & Bemani, P. Y. (2015). A damage-plasticity model for cohesive fractures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 73, 194–202.
- Röhr, H. U. (1974). Mechanical behavior of a gas storage cavern in evaporite rocks. *Proceedings of the 4th Symposium on Salt, Vol. 2*, 93–100.
- Wallner, M., & Eickemeier, R. (2001). Subsidence and fractures caused by thermo-mechanical effects. *Proceedings of the SMRI Spring Meeting, Orlando, USA*, 363–371.
- Yu, H., Taleghani, A. D. & Lian, Z. (2021). On how to select cohesive zone models for hydraulic fracturing simulation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 96, 104291.