

STOCAMINE

Evaluation du volume des vides souterrains
résiduels après ennoyage du stockage

F. HADJ-HASSEN

Octobre 2009

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| 1. CADRE ET OBJECTIF DE L'ETUDE | 1 |
| 2. RAPPEL DES PRINCIPALES DONNEES DU STOCKAGE..... | 1 |
| 2.1 Caractéristiques mécaniques du sel..... | 1 |
| 2.2 Modélisation numérique du stockage | 2 |
| 2.3 Analyse du volume des vides résiduels | 4 |
| 3. MODELISATION DE L'ENNOYAGE DU STOCKAGE | 5 |
| 3.1 Caractérisation de la convergence | 5 |
| 3.2 Caractérisation du volume des vides résiduels..... | 7 |
| 3.3 Evaluation de la surpression induite par la saumure..... | 9 |
| 4. CONCLUSIONS | 12 |

1. CADRE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

Le site de stockage des déchets toxiques de la mine d'Amélie se trouve à proximité des puits Joseph et Else dans une couche de sel gemme située au mur des deux couches de potasse exploitées par foudroyage. Les études hydrogéologiques conduites récemment sur le comportement à long terme du site ont montré que les puits de mines fermés laisseraient passer un débit d'eau douce qui, au fil du temps, conduirait à un ennoyage lent de l'ensemble des vides souterrains. Ainsi le site sera à terme rempli de saumure formée par la transformation de l'eau douce au contact des terrains salifères.

L'Ecole des Mines de Paris a conduit deux études importantes sur ce site de stockage. La première a été effectuée par Vouille en 1990 et s'est intéressée aux aspects mécaniques liés à la sureté du projet de stockage. La seconde, réalisée par Hadj-Hassen et Tijani en 2006, a été consacrée à la réactualisation des conditions de stabilité après l'incident survenu en 2002 dans le bloc 15 en s'appuyant sur les observations et les mesures de convergence effectuées.

Les vides souterrains seront amenés à se fermer lentement sous l'effet du fluage du sel, la question se pose donc du devenir de la saumure contenue dans la mine sur le long terme: pourra-t-elle sortir par les puits de mine sous l'impulsion de la fermeture progressive des vides souterrains ?

L'objectif de la présente étude est de reprendre la modélisation du comportement du stockage à long terme en intégrant le remplissage des vides par la saumure et le rôle de celle-ci dans le confortement des ouvrages et la réduction du fluage du sel. La problématique principale s'articule donc autour des deux points suivants :

- l'évaluation du volume des vides souterrains et son évolution avec l'ennoyage et le remplissage par la saumure,
- la mobilisation éventuelle d'un volume de saumure sous l'effet du fluage du sel (volume pouvant être traduit par une surpression ou un débit).

2. RAPPEL DES PRINCIPALES DONNEES DU STOCKAGE

Le site de stockage correspond à une configuration de découpage par chambres et piliers avec un taux de défruitement moyen de l'ordre de 38.5%. Des piliers carrés de largeur 20 m séparent des galeries longitudinales et transversales de hauteur 2.8 m et de largeur 5.5 m.

2.1 Caractéristiques mécaniques du sel

Des essais de compression simple et des essais de fluage ont été réalisés par Vouille en 1990 pour mesurer les propriétés élastiques et viscoplastiques du sel. Les échantillons utilisés ont été prélevés par sondage au toit de la galerie desservant la base du puits Joseph.

La déformation viscoplastique du sel est décrite par la loi de Lemaitre qui exprime le fluage sous un déviateur de contraintes (σ) en fonction du temps (t) selon une loi en puissance définie par les trois paramètres α, β et K :

$$\varepsilon_{vp} = \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\beta} t^{\alpha}$$

Les tableau 1 résume les valeurs moyennes retenues pour les principales propriétés du sel :

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques retenues pour le sel

| Masse volumique (Kg/m ³) | Module de Young (MPa) | Coefficient de Poisson | Résistance en compression simple (MPa) | α | β | K (*) | Indice de fluage (%) |
|--|-----------------------|------------------------|--|----------|---------|-------|----------------------|
| 2160 | 25 000 | 0.23 | 32.9 | 0.27 | 2.296 | 0.266 | 2 |
| * le temps est en jour, les contraintes sont en MPa et les déformations sont en micron/mètre | | | | | | | |

L'indice de fluage correspond à la déformation viscoplastique obtenue au bout d'une année sous un déviateur de 10 MPa. Cet indice montre que le sel étudié est moyennement fluant ; les sels peu fluants ont des indices inférieurs à 1 % et ceux très fluants peuvent avoir des indices dépassant les 10 %.

2.2 Modélisation numérique du stockage

Le modèle numérique de base du stockage est celui élaboré par Vouille en 1990. Il s'agit d'un modèle axisymétrique utilisant deux axes de symétrie verticaux : le premier passe par le centre d'un pilier (symétrie de révolution) et le second passe par le centre d'une galerie (déplacement horizontal nul). Verticalement, le modèle est limité par deux plans horizontaux situés respectivement à 20 m au dessus du toit des galeries et à 20 m au dessous du mur de ces mêmes galeries. Sur la limite inférieure, la composante verticale du déplacement est supposée nulle en considérant que le plan est situé suffisamment loin des perturbations induites par le creusement. Sur la limite supérieure, une contrainte verticale correspondant au poids des terrains sus-jacents est appliquée (Fig. 1).

Le champ de contraintes a été considéré isotrope (composantes horizontales égales à la composante verticale) en prenant en compte deux types de terrains : un recouvrement non salifère de 320 m d'épaisseur et de masse volumique moyenne 2500 kg/m³ et des terrains salifères de masse volumique 2160 kg/m³.

Le caractère bidimensionnel du modèle ne permettant pas de rendre compte d'une façon rigoureuse du dégagement progressif des piliers, le creusement de la structure a été considéré instantané. Cette procédure a l'avantage de conduire à une borne supérieure des déplacements et à une majoration des contraintes instantanées.

L'évolution des déformations et des contraintes a été étudiée sur une durée de l'ordre de 1400 années en tenant compte du caractère fini des déformations et en réactualisant la forme du maillage toutes les fois que l'incrément de convergence verticale des galeries dépassait 1 cm (calculs en grandes déformations).

Les principaux résultats des modélisations effectuées sont les suivants :

- Le seul risque d'endommagement identifié concerne le développement d'un écaillage des parements des galeries à moyen terme en raison du passage progressif de la contrainte tangentielle d'une compression à une traction (transition évaluée à environ 4 ans). Ce phénomène resterait toutefois superficiel et à long terme, la zone sollicitée en traction ne dépasserait pas une épaisseur de 40 cm.
- Les courbes de convergence des parements des galeries (horizontale ou verticale) suivent une évolution parabolique à vitesse décroissante avec le temps. Cette tendance a été modélisée par une loi simple qui donne la valeur de la convergence (C en mm) en fonction du temps (t exprimé en années, Fig. 2). Dans l'analyse effectuée, il a été admis que la convergence mesurable au bout d'un temps donné correspond à la convergence calculée à laquelle on retranche une convergence initiale obtenue à la date T=10 jours.

$$C = A \left[t^\alpha - \left(\frac{10}{365} \right)^\alpha \right]$$

Les coefficients A et α correspondants aux convergences verticale et horizontale prennent les valeurs respectives de 275.5 et 0.2327 ainsi que 253.4 et 0.2285.

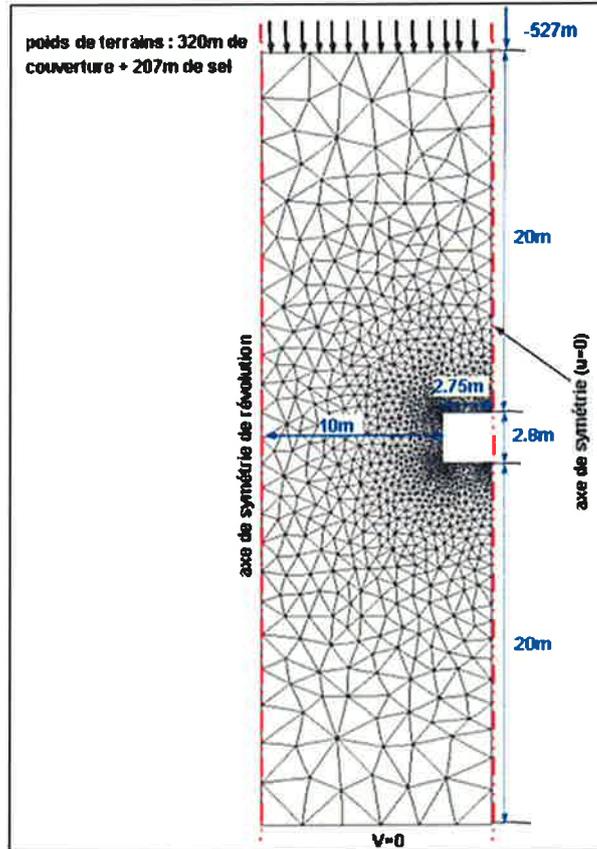


Figure 1 : Modèle numérique du stockage

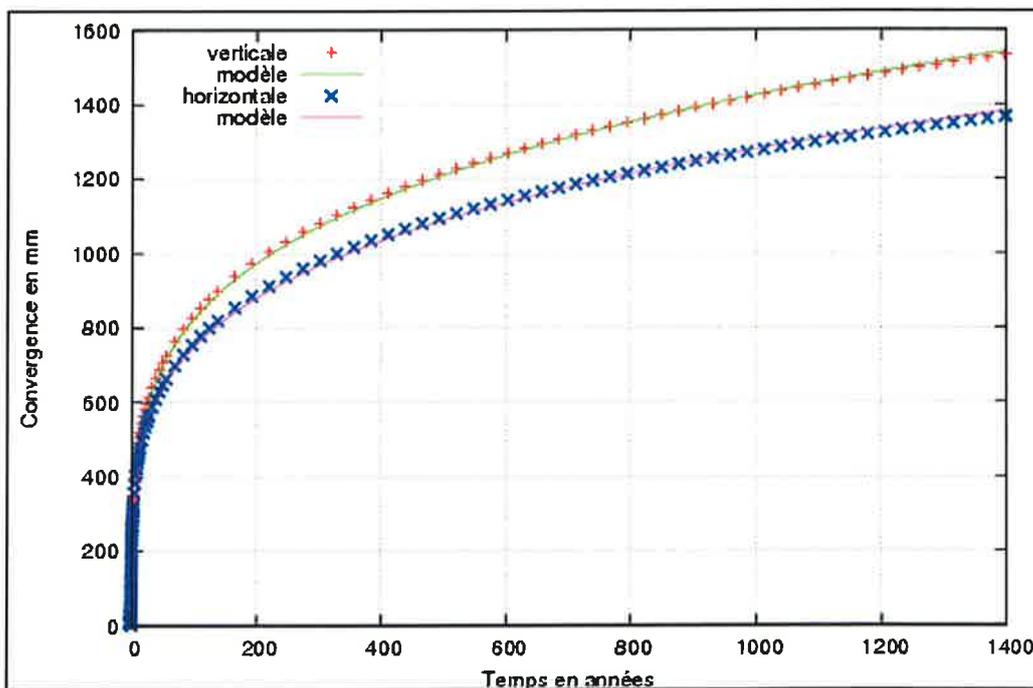


Figure 2 : Ajustement des convergence verticale et horizontale par des lois empiriques

2.3 Analyse du volume des vides résiduels

Le bureau Cesam a évalué le volume des vides résiduels en utilisant trois méthodes différentes : une méthode simple basée sur les résultats d'essais de fluage effectués par Vigier en 1981, une méthode utilisant les résultats de l'étude de Vouille et en fin une méthode basée sur l'expérience et les observations du mineur qui considère que le volume décroît d'une façon exponentielle négative avec un taux annuel moyen de 0.8 %. C'est cette dernière méthode qui a été retenue pour déterminer la durée d'ennoyage de l'ensemble des vides souterrains liés à l'exploitation de potasse et au site de stockage.

Nous avons cherché à vérifier la méthode de calcul basée sur les résultats de la modélisation numérique. Connaissant les amplitudes des convergences verticale et horizontale, le bureau Cesam a déduit le volume des vides en considérant une chambre de section rectangulaire et de longueur invariable :

$$V_{(t)} = V_{(o)} \frac{(h_{(o)} - Ch_{(t)}).(l_{(o)} - Cl_{(t)})}{(h_{(o)} - l_{(o)})}$$

avec : - l et h : largeur et hauteur de la galerie,
 - Ch_(t) et Cl_(t) : convergences horizontale et verticale ajustées par la loi indiquée ci-dessus.

La simulation numérique permet de calculer directement la variation du volume des vides en fonction du temps. Rappelons que le vide considéré dans le modèle correspond à un tore centré autour de l'axe de symétrie de révolution qui passe par le milieu du pilier. Nous avons donc relancé le calcul et tracer le graphique donnant l'évolution de ce paramètre en comparaison avec la méthode utilisant la variation de la section ainsi que la méthode inspirée de l'expérience (le volume initial des vides souterrains est estimé à 300 000 m³, Fig. 3).

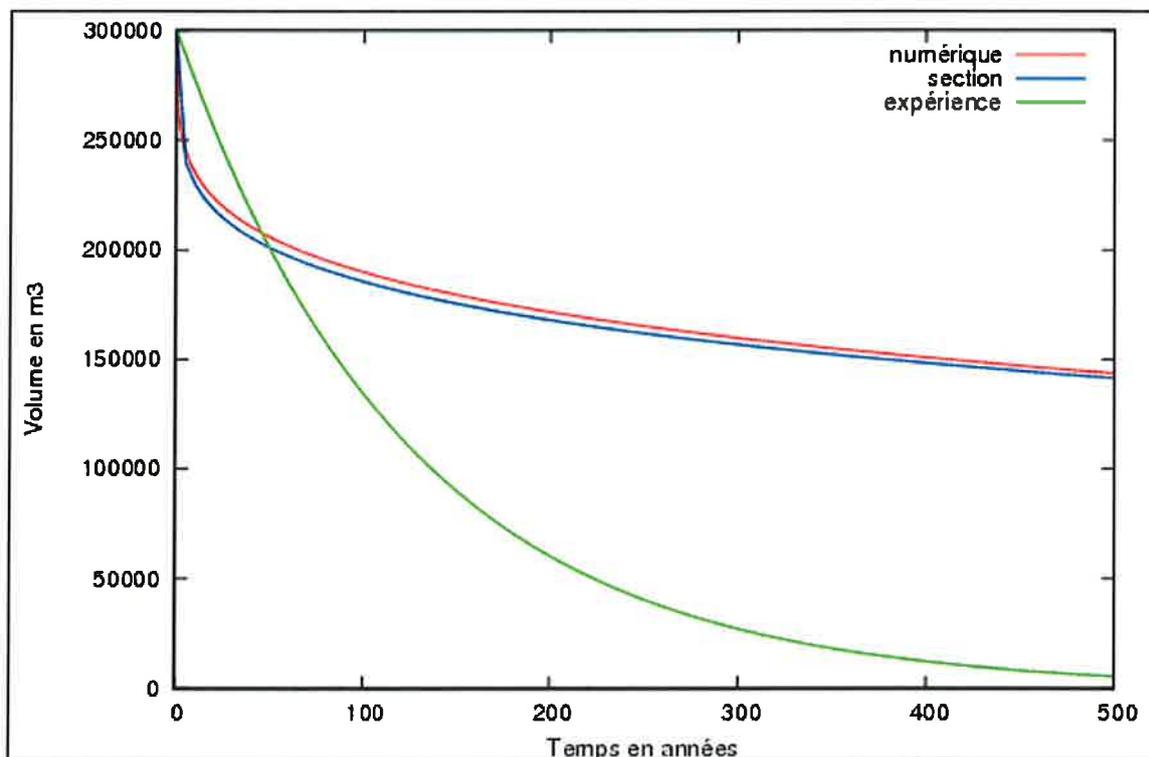


Figure 3 : Comparaison de la variation volumique dans les 3 situations (numérique : modèle axisymétrique, section : calcul simplifié de Cesam, expérience : modèle établi à partir des observations in-situ)

La figure 3 montre que la méthode de calcul de section conduit à une bonne évaluation de la fermeture des vides résiduels. En revanche, le modèle élaboré à partir de l'expérience donne une très forte réduction du volume des vides résiduels par rapport aux deux autres méthodes de calcul.

3. MODELISATION DE L'ENNOYAGE DU STOCKAGE

Les études hydrogéologiques effectuées par CESAM ont mis en évidence deux résultats importants :

- Le débit résiduel d'eau douce qui pourrait alimenter les vides souterrains après la fermeture et le remblayage des puits est évalué à 2.5 m³/h.
- Le remplissage de l'ensemble des vides souterrains s'étalerait sur une durée d'environ 150 ans.

Afin de rendre compte de l'influence de la saumure sur le fluage du sel et sur l'évolution des vides résiduels dans le stockage, nous avons repris la même modélisation numérique pour l'adapter à cette configuration. Seules les conditions de chargement ont été modifiées de manière à intégrer la phase de remplissage des vides et l'application progressive d'une pression de confinement induite par la colonne de saumure.

Le scénario simulé pour décrire le comportement du stockage comprend les 5 phases suivantes :

- Phase 1 : état initial caractérisé par un régime de contraintes isotropes
- Phase 2 : creusement instantané du stockage (hypothèse surestimant les déplacements et les contraintes)
- Phase 3 : fluage pendant 20 ans entre la fin de l'excavation (fin 1998) et le début de l'ennoyage (fin 2018)
- Phase 4 : remplissage progressif des vides par la saumure pendant 150 ans. En dépit d'une position haute du stockage qui fait que la saumure n'atteindra les vides qu'à la fin de l'ennoyage complet de la mine de potasse, nous avons admis que son remplissage s'étalera sur toute la période prévue.
- Phase 5 : fluage et comportement à très long terme après ennoyage (~1400 ans).

La phase de remplissage est modélisée par l'application d'une pression qui augmente linéairement jusqu'à atteindre une valeur maximale correspondant aux poids de la totalité de la colonne de saumure à la fin de l'ennoyage (soit une pression maximale au mur de la chambre égale à 6.5976 MPa, la densité de la saumure étant prise égale à 1.2). A la fin de cette phase, la pression a été maintenue constante. Cette dernière hypothèse suppose que la saumure pourra être expulsée lors du fluage du sel et la réduction du volume des vides (condition de puits ouvert). Nous reviendrons plus en détail sur cette hypothèse lorsque ce point particulier sera examiné.

Il est important de noter que ni les problèmes thermiques, ni la diffusion de la saumure dans le sel et dans les terrains encaissants, ni les phénomènes physico-chimiques de dissolution et de recristallisation n'ont été pris en compte dans cette modélisation. Ces points sont difficiles à évaluer et font l'objet actuellement de sujets de recherche. Nous avons appliqué dans cette étude l'état des connaissances actuelles et les règles de l'art qui ont fait leurs preuves sur de nombreux exemples.

3.1 Caractérisation de la convergence

Les courbes de convergence verticale et horizontale correspondant à la configuration d'ennoyage du stockage sont données sur la figure 4 en comparaison avec les mêmes courbes dans la situation de référence (sans ennoyage). Il apparaît clairement de cette figure que l'ennoyage réduit considérablement l'amplitude des mouvements. La déformation à la

date du début d'ennoyage constitue environ 38 % de la déformation totale sur la période simulée lorsque les vides sont abandonnés sans remplissage. Ce taux passe à environ 79 % pour la convergence verticale et environ 91 % pour la convergence horizontale lorsque les vides sont noyés.

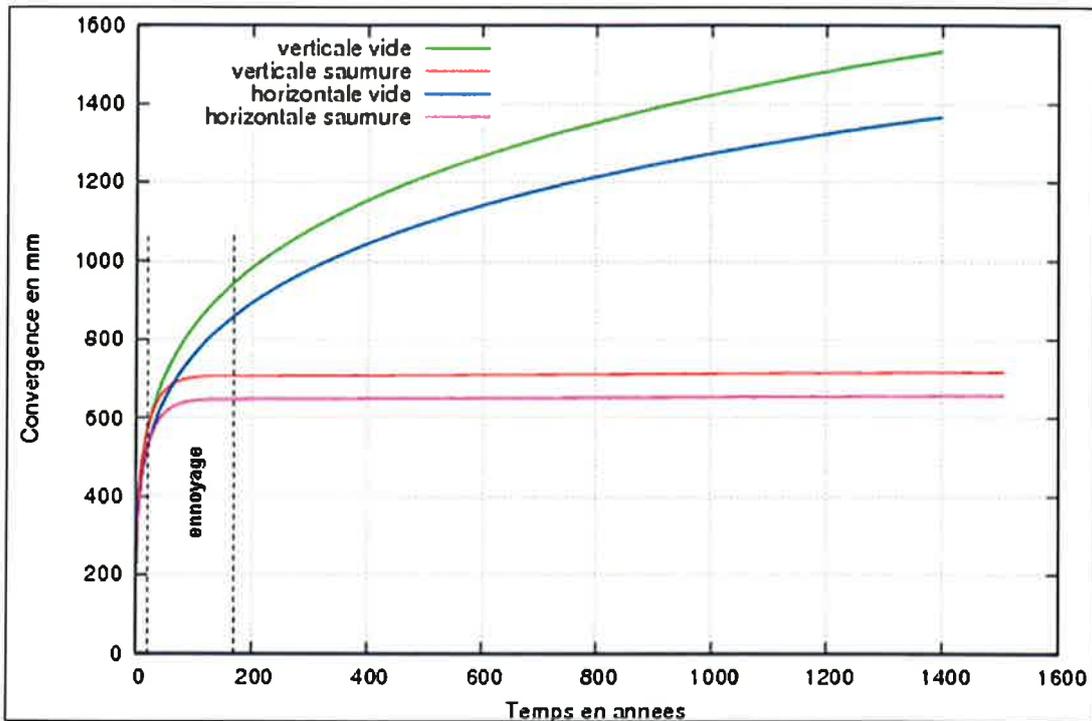


Figure 4 : Comparaison des convergences verticales et horizontales sans et avec saumure

Il est très difficile d'effectuer un ajustement satisfaisant couvrant la totalité du scénario en cas d'ennoyage. Nous avons par conséquent proposer deux lois pour chacune des deux phases importantes suivantes :

- Phase 1 : depuis le creusement jusqu'à la fin de l'ennoyage
- Phase 2 : comportement à long terme après la fin de l'ennoyage.

Pour la première phase, nous avons adapté le modèle de Vouille en lui apportant une seconde composante linéaire (le système d'unités reste toujours le même) :

$$C = A \left[t^\alpha - \left(\frac{10}{365} \right)^\alpha \right] + Bt$$

Quant à la seconde phase, nous avons admis que la convergence est linéaire et peut être décrite simplement par la relation $C = At + B$.

Le tableau 2 donne les paramètres de chaque loi pour les deux types de convergence et la figure 5 illustre les résultats d'ajustement pour les deux phases.

Tableau 2 : Paramètres des nouvelles lois d'ajustement de la convergence

| Phase | Forme de la loi | Convergence | A | α | B |
|-------|---|-------------|-------|----------|--------|
| 1 | $C = A \left[t^\alpha - \left(\frac{10}{365} \right)^\alpha \right] + Bt$ | Verticale | 281.7 | 0.255 | -2.034 |
| | | Horizontale | 256.2 | 0.259 | -1.940 |
| 2 | $C = At + B$ | Verticale | 0.008 | - | 706 |
| | | Horizontale | 0.007 | - | 647 |

le temps est en année et la convergence est en mm

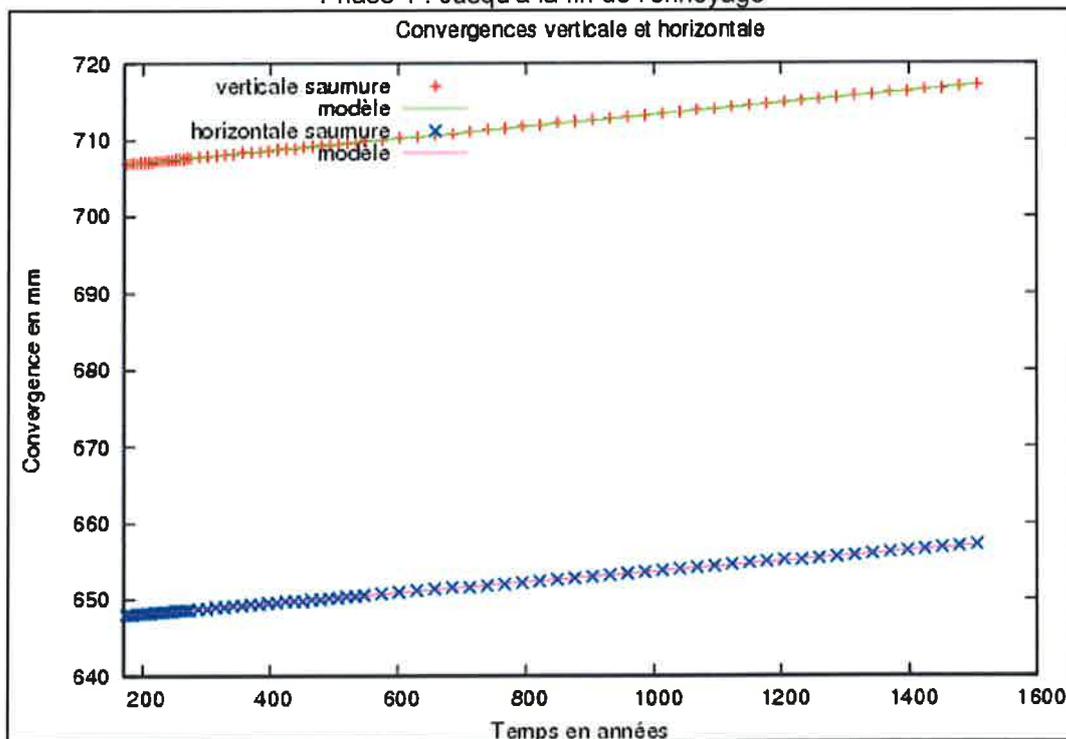
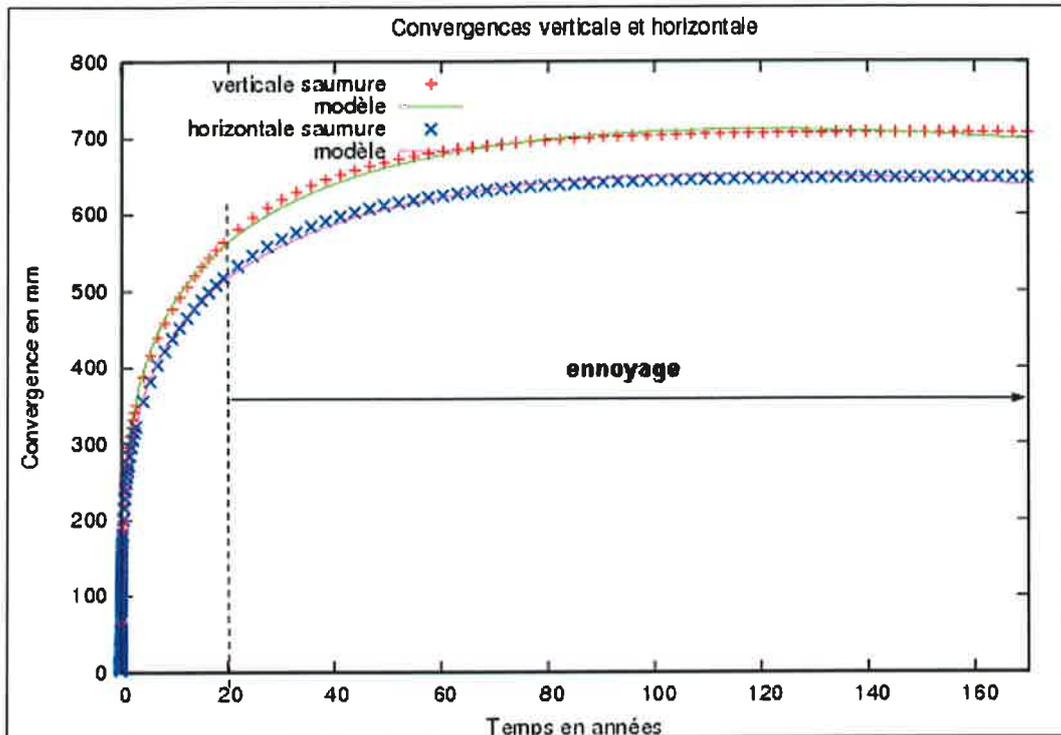


Figure 5 : Ajustement des deux phases principales par des lois différentes

3.2 Caractérisation du volume des vides résiduels

Comme constaté au niveau de la convergence, l'ennoyage des vides avec la saumure se traduit par une forte réduction de la convergence et par voie de conséquence par une diminution beaucoup moins rapide des volumes des vides résiduels. Au début de l'ennoyage, le fluage du sel conduit à une perte de volume de l'ordre de 25 %. Cette perte se poursuit lorsque les volumes sont abandonnés vides pour atteindre 41 % au bout de 170 ans. Avec

l'ennoyage des vides pendant cette période, la perte de volume est réduite à environ 31.3 %, soit une différence de l'ordre de 10 %. Après l'ennoyage, la réduction du volume devient encore plus faible et atteint seulement 31.4 % au bout de 500 ans (sans ennoyage, cette réduction est de 52 %). Sur la totalité de la période simulée (~1600 ans), la perte de volume lorsque les vides souterrains sont noyés avec la saumure est de l'ordre de 31.7 %.

Ainsi, la réduction du volume des vides entre la fin de l'ennoyage et la période simulée est seulement de l'ordre de 0.43 %.

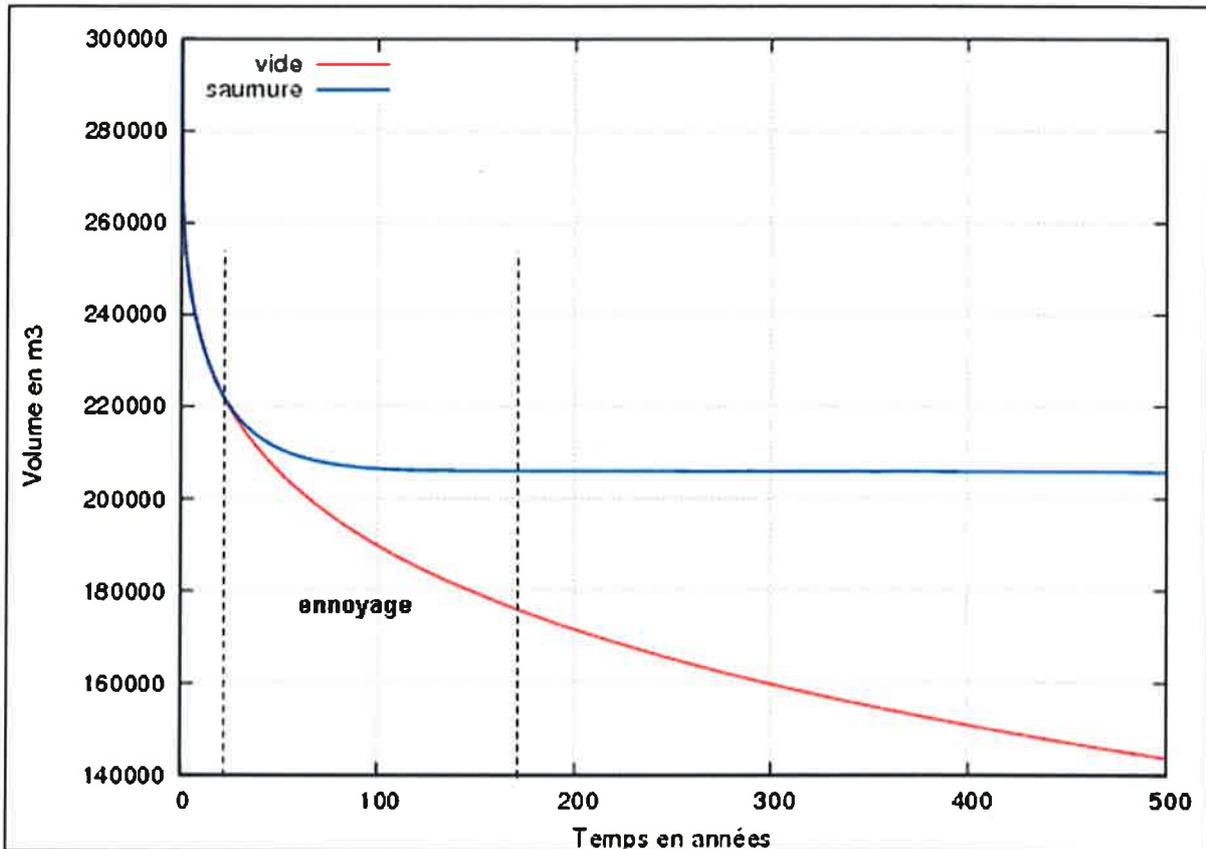


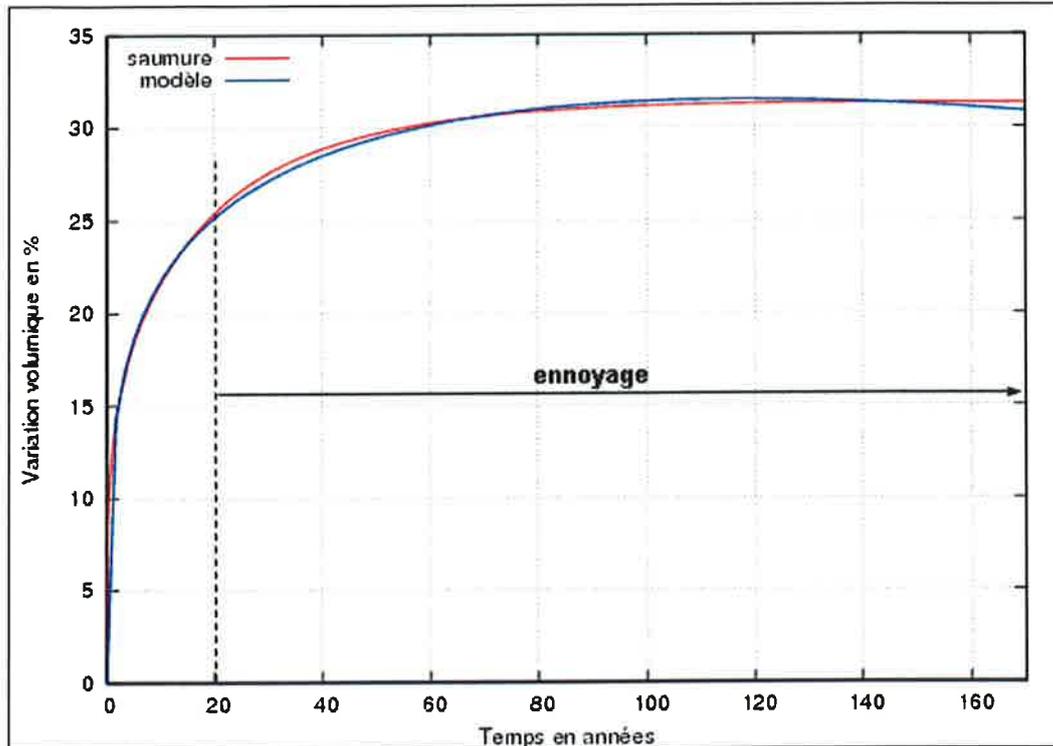
Figure 6 : Evolution du volume des vides résiduels lors de l'ennoyage avec la saumure en comparaison avec la situation de référence où les volumes restent vides

Comme pour la convergence, nous proposons la même approche et les mêmes modèles pour rendre compte de l'évolution des volumes résiduels des vides. Deux phases principales sont donc identifiées : une première phase correspondant au creusement, au fluage et au remplissage progressif des vides avec la saumure, et une seconde phase correspondant au comportement à très long terme après la fin de l'ennoyage. Le tableau 3 et la figure 7 donnent les résultats des ajustements effectués.

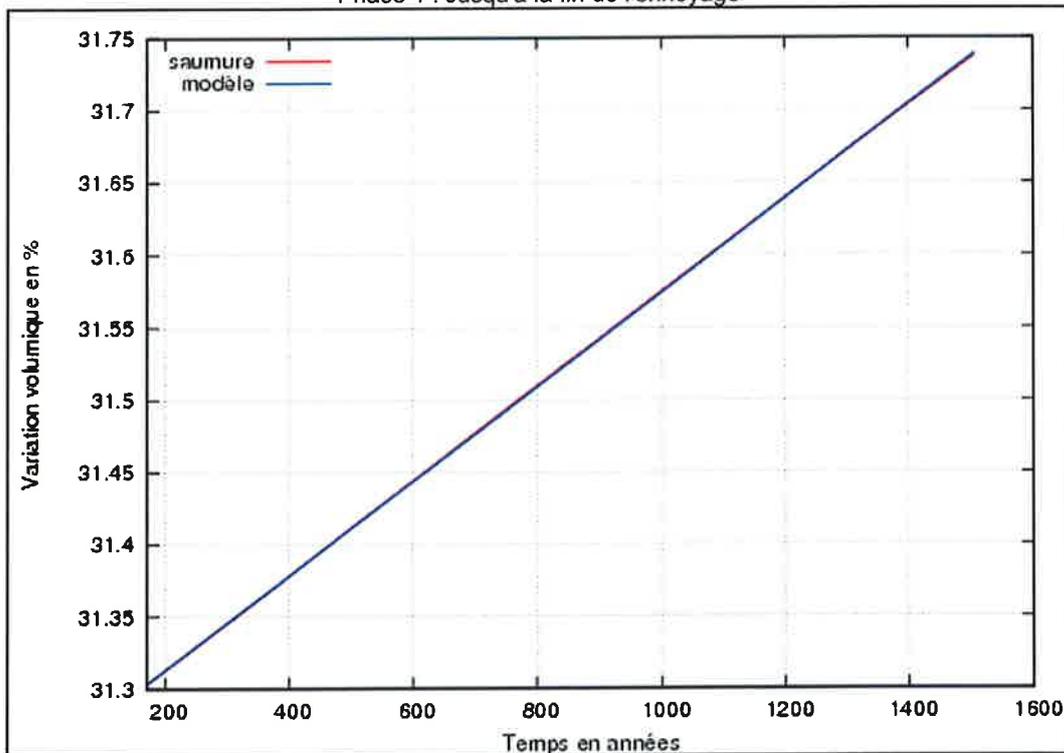
Tableau 3 : Paramètres des lois d'ajustement de la variation volumique

| Phase | Forme de la loi | A | α | B |
|-------|---|---------|----------|--------|
| 1 | $V_v = A \left[t^\alpha - \left(\frac{10}{365} \right)^\alpha \right] + Bt$ | 12.719 | 0.251 | -0.090 |
| 2 | $V_v = At + B$ | 0.00033 | - | 31.248 |

le temps est en année et la variation volumique est en %



Phase 1 : Jusqu'à la fin de l'ennoyage



Phase 2 : Comportement à long terme après la fin de l'ennoyage

Figure 7 : Ajustement de la variation volumique dans les deux phases principales

3.3 Evaluation de la surpression induite par la saumure

Pendant la phase d'ennoyage, l'eau douce infiltrée se transformera en saumure au contact des formations salifères et remplira progressivement les vides souterrains résiduels. A la fin de cette phase, une pression, correspondant à la colonne de saumure, s'établira sur les parois des galeries du stockage et évoluera selon les conditions de fermeture du site. Si un ou plusieurs ouvrages (puits, forages) sont maintenus ouverts, le fluage du sel induira une

variation du volume qui s'accompagnera par l'expulsion d'un certain volume de saumure à travers ces ouvrages et la pression restera ainsi constante. Si au contraire la fermeture est totale, une surpression sera créée par compression de la saumure.

Sous l'effet d'une variation relative de volume ($\Delta V/V$), la saumure est soumise à une augmentation de pression (ΔP) qui fait intervenir sa compressibilité (β) comme suit :

$$\Delta P = \frac{1}{\beta} \left(\frac{\Delta V}{V} \right)$$

La compressibilité de la saumure est assimilée à celle de l'eau et vaut $2.7 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$.

La figure 8 donne la relation entre la variation volumique et la surpression à partir de la date de fin de l'ennoyage.

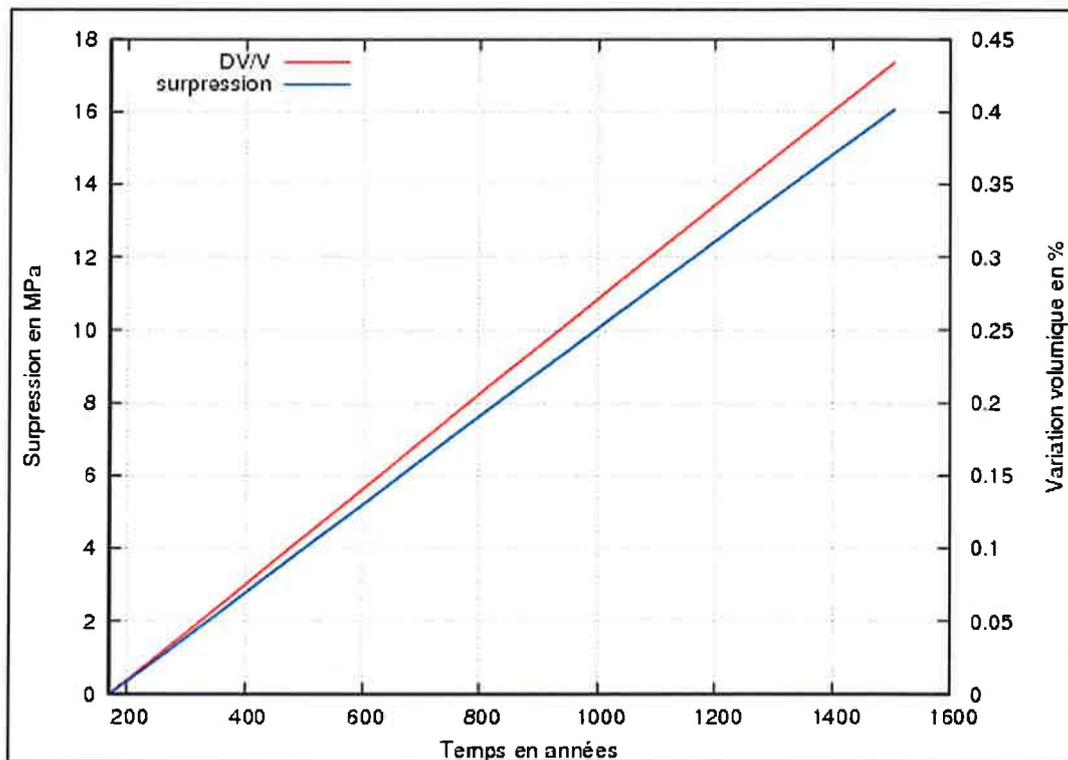


Figure 8 : Surpression induite par la variation volumique après la fin de l'ennoyage

Il est évident que l'établissement d'une corrélation directe entre la variation volumique évaluée avec une pression constante et la surpression induite conduit à un résultat surestimant ce dernier paramètre. A titre d'illustration, la variation volumique entre la fin de l'ennoyage et la fin de la période simulée est de l'ordre de 0.43 %. Une telle variation conduirait à une surpression de l'ordre de 16 MPa.

Il est donc nécessaire de mettre au point une démarche permettant de mieux rendre compte de l'interaction entre le fluage et la surpression induite par la saumure lorsque les ouvrages d'évacuation sont fermés. Pour ce faire, nous avons discrétisé la saumure en tant que fluide compressible dans le modèle numérique. Ainsi le calcul numérique est conduit en deux étapes successives :

- La première étape simule le creusement et l'ennoyage progressif jusqu'au remplissage total des vides. Le matériau saumure n'est pas activé et n'intervient que par une pression qui augmente linéairement pendant l'ennoyage (étape équivalente à la modélisation précédente).

- La deuxième étape consiste à activer, à la fin de la phase d'ennoyage, le matériau saumure pour qu'il intervienne avec sa compressibilité. La pression de la colonne de saumure continue à s'appliquer sur les parois des vides.

La figure 9 montre le détail du maillage qui rend compte de la présence de la saumure dans la galerie. Sur la figure 10, on donne l'évolution de la variation volumique obtenue en comparaison avec le résultat de la simulation précédente.

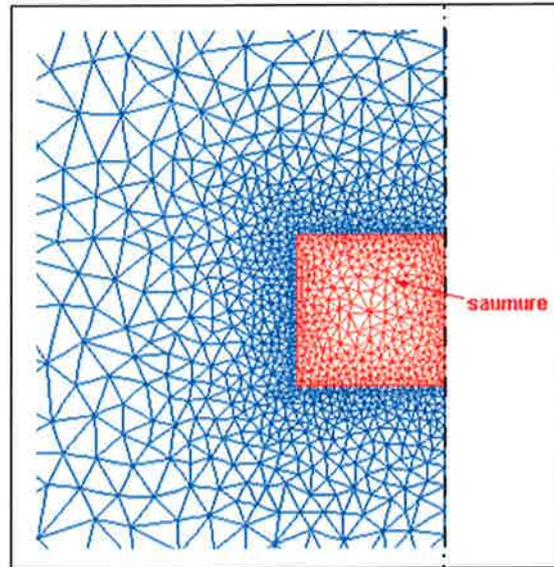


Figure 9 : Nouveau modèle pour rendre compte de la compressibilité de la saumure

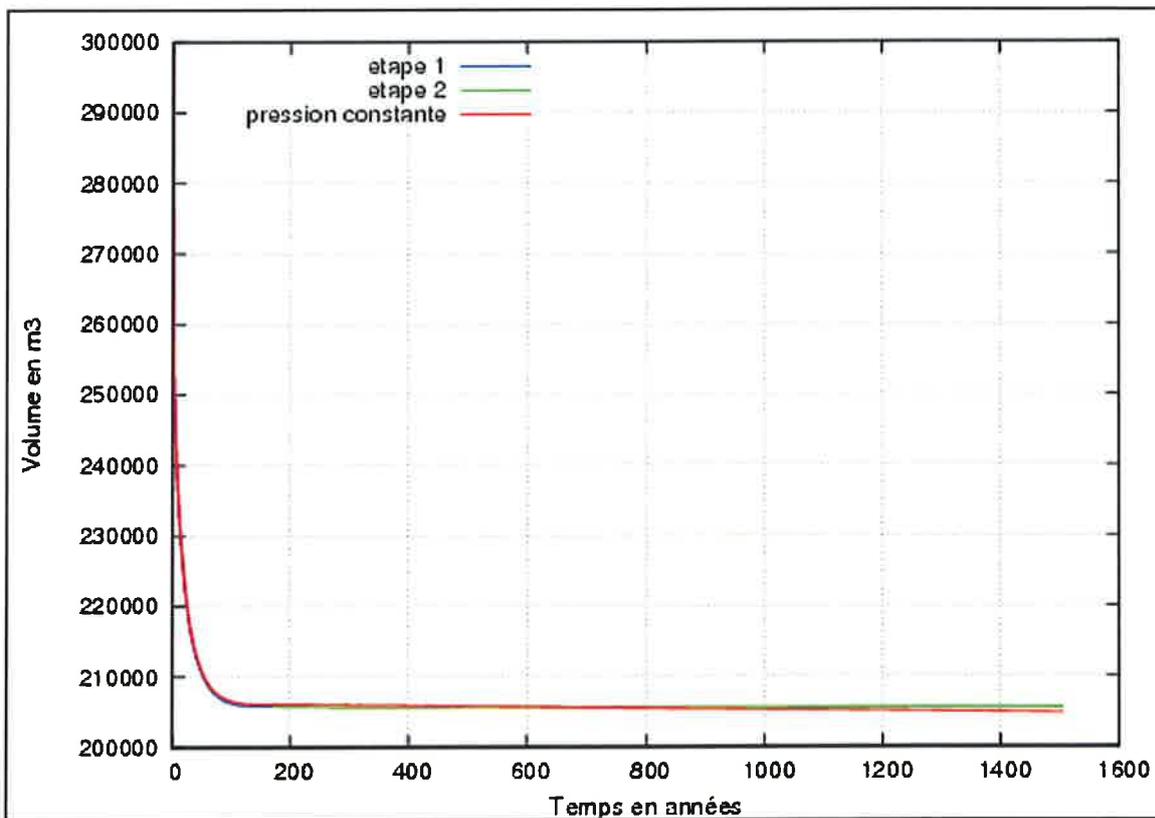


Figure 10 : Variation du volume obtenue avec le nouveau modèle en comparaison avec celle du modèle utilisant une pression constante.

La variation volumique induite entre la fin de l'ennoyage et la période simulée est extrêmement faible et vaut seulement 0.072 %. Pour mieux se rendre compte de la surpression induite, nous représentons sur la figure 11, l'évolution de la pression au centre du toit de la galerie dans les 2 configurations étudiées : ennoyage suivi d'une pression constante (puits ouvert) et ennoyage suivie de la mobilisation de la saumure (puits fermé). La surpression induite sur la totalité de la période simulée est égale à environ 2 MPa.

Cette figure donne la valeur de la contrainte initiale (représentée en vert) et montre que la pression de saumure à l'intérieure des galeries restera toujours inférieure à cette contrainte. Le rapport entre cette pression et la contrainte initiale est de l'ordre de 60 % à la fin de la période simulée. Ce rapport reste relativement faible pour conduire à la fracturation du sel au niveau des galeries.

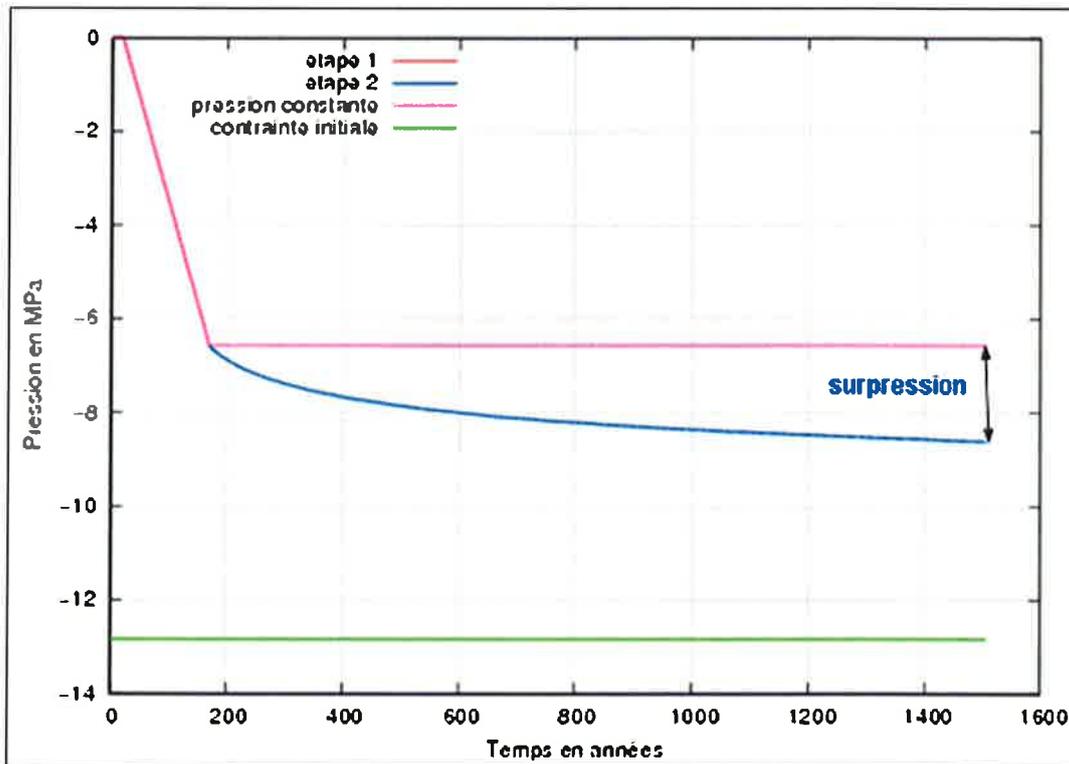


Figure 11 : Evolution de la pression appliquée au centre du toit de la galerie dans les deux configurations étudiées.

4. CONCLUSIONS

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les volumes des vides résiduels lors de la fermeture et l'ennoyage du stockage avec la saumure. Avant d'aborder ce sujet, nous avons commencé par examiner la méthode suivie par le bureau Cesam dans le calcul des vides résiduels du stockage à partir des résultats de la modélisation numérique réalisée par Vouille en 1990 sur un stockage sans ennoyage. L'analyse effectuée a montré que la méthode appelée méthode de section conduit à une bonne évaluation de la fermeture des vides par rapport à la modélisation numérique qui traite le problème en axisymétrie.

Deux scénarii d'ennoyage ont été envisagés : un ennoyage à puits ouvert dans lequel la pression de la saumure reste constante après le remplissage des vides, et un ennoyage à puits fermé générant une surpression de la saumure sous l'effet de la réduction des volumes de vides par le fluage du sel.

C'est le premier scénario qui a fait l'objet de la plus grande attention. En effet, les convergences verticale et horizontale ainsi que la variation volumique ont été ajustées par des lois empiriques définies pour les deux phases principales du comportement. La première phase couvre le creusement des galeries, le fluage du sel avant l'ennoyage et le remplissage progressif des galeries avec la saumure. Dans cette phase, la loi adoptée s'inspire de celle proposée par Vouille, mais avec une composante linéaire en plus. La seconde phase, correspondant au comportement à très long terme après ennoyage total, a été ajustée par une simple loi linéaire.

D'une façon générale, l'ennoyage des vides s'accompagne par une diminution importante de la convergence sous l'effet de la pression de la saumure et la réduction du fluage du sel. La variation du volume des vides est par conséquent beaucoup moins prononcée. Avant l'ennoyage, la perte de volume est de 25%. Au bout de 500 ans, cette perte monte à 52 % sans remplissage et se limite à 31.4 % en cas d'ennoyage. A la fin de la période simulée (~1600 ans), la perte de volume n'est que de 31.7 %.

L'étude du second scénario a nécessité la discrétisation de la saumure dans le modèle numérique et sa caractérisation rhéologique par un fluide compressible. La simulation a été conduite en deux étapes pour rendre compte de l'ennoyage. Le but recherché est d'évaluer la surpression induite par la saumure en cas de fermeture de tous les puits.

Les résultats obtenus ont montré que la perte de volume est encore moins importante (seulement 0.072 % entre la fin de l'ennoyage et la période étudiée). A cette date, la surpression induite est de l'ordre de 2 MPa et le rapport entre la pression appliquée sur les parois des vides et la contrainte initiale reste suffisamment faible pour écarter tout risque de fracturation du sel.

Il est important de rappeler au terme de cette étude que le scénario de fermeture a été modélisé avec les deux hypothèses suivantes :

- Les problèmes liés à l'évacuation de l'air et du gaz n'ont pas été pris en compte dans l'étude de fermeture du stockage.
- La saumure a été modélisée par un fluide compressible et non dilatant. L'effet de la température n'a pas été pris en compte. Compte tenu des profondeurs importantes de certains quartiers de la mine de potasse, des variations significatives de température peuvent être rencontrées. La saumure étant extrêmement sensible à la température, il est dans ce cas nécessaire d'examiner cet aspect avec plus de détail dans une optique d'abandon à puits fermés.

