

**Rapport
16R-006A1**

03 juin 2016

*A l'attention de
Alain ROLLET
Jacky ROMAN*

Stockage de Wittelsheim.

**Evaluation des flux potentiels de saumure
contaminée en considérant le remplissage
des blocs vides du stockage avec des
havrits de sel et des barrages en béton
spécial**

*Auteur : CAMUSSO Marco
Vérificateur : BILLAUX Daniel
Approbateur : BILLAUX Daniel*

ITASCA CONSULTANTS, S.A.S.

64, Chemin des Mouilles,
F-69134 ECULLY Cedex
Tel : 33 (0)4 72 18 04 20
Fax : 33 (0)4 72 18 04 21
Email : itasca@itasca.fr
Web site : www.itasca.fr



ITASCA
Consultants, s.a.s.

SUIVI DES MODIFICATIONS

Version	Modifications	Date
A1	Emission initiale	03 juin 2016

Sommaire

1.	Introduction	7
2.	Etudes antérieures.....	9
3.	Modèles de comportement	10
3.1.	Sel.....	10
3.2.	Déchets du stockage	11
3.3.	Coulis de remplissage.....	12
3.4.	Havrits de sel	14
4.	Détermination de la vitesse de remplissage du stockage par la saumure	16
5.	Simulation de la fermeture du stockage avant l’envoiage.....	18
5.1.	Fermeture des modèles locaux	18
5.2.	Fermeture globale du stockage	22
5.2.1.	Résultats pour les deux scénarios de déstockage et les deux scénarios de remblayage avec les havrits.....	25
5.2.2.	Estimation de la date d’envoiage du stockage	28
6.	Evolution du stockage après l’envoiage	30
6.1.	Effet de la saumure sur la fermeture, modèles locaux.....	30
6.2.	Evaluation du flux potentiel de saumure contaminée à l’extérieur des barrages	34
6.3.	Fermeture du stockage après envoiage	35
6.4.	Influence de la longueur des barrages	38
7.	Conclusion.....	39

Liste des figures

Figure 3-1 : Résultats des essais triaxiaux à différentes pressions de confinement sur des éprouvettes de déchets REFIONM.....	11
Figure 3-2 : Résultats des essais œdométriques en termes de tassement sous contrainte aux échéances de 1, 2 et 3 mois, [8].	13
Figure 4-1 : Géométrie du demi-barrage mis en place dans les tunnels d'accès et surface d'application de la condition en pression imposée.	17
Figure 5-1 : Géométrie du modèle global du site de StocaMine prenant en compte l'excavation des vides miniers ainsi que de l'ensemble du stockage.....	19
Figure 5-2 : Evolution des contraintes verticales à 20 m au-dessus du stockage sur 1000 ans. La ligne en pointillés représente l'évolution moyenne. L'origine de l'axe du temps correspond au moment de l'excavation des galeries.	19
Figure 5-3 : Evolution des contraintes verticales à 20 m au-dessus du stockage sur 100 000 ans. La ligne en pointillés représente l'évolution moyenne.	20
Figure 5-4 : Modèle 3D de croisement des galeries des blocs de stockage remplis par le coulis. Evolution du volume des vides sur 1 000 et 100 000 ans.	21
Figure 5-5 : Modèle 2D des voies doubles d'accès au stockage remplis par le coulis. Evolution du volume des vides sur 1 000 et 100 000 ans.....	21
Figure 5-6 : Modèle 3D de croisement des galeries des blocs de stockage remplis par les déchets. Evolution du volume des vides sur 1 000 et 100 000 ans.	22
Figure 5-7 : Evolution du volume de vides dans le stockage en fonction des hypothèses de déstockage et de remblayage avec havrits, sur les 1 000 premières années.	25
Figure 5-8 : Evolution du volume de vides dans le stockage en fonction des hypothèses de déstockage et de remblayage avec havrits, sur 100 000 ans.	26
Figure 5-9 : Taux de fermeture des vides (m ³ /an) en fonction des hypothèses de déstockage et de remblayage avec havrits, sur les 1 000 premières années.....	26
Figure 5-10 : Taux de fermeture des vides (m ³ /an) en fonction des hypothèses de déstockage et de remblayage avec havrits, sur 100 000 ans.....	27
Figure 5-11 : Evolution du volume des vides et de la saumure à l'intérieur du stockage.	29
Figure 6-1 : Evolution de la pression d'eau dans le stockage en fonction de l'hypothèse de remontée de la saumure et du déstockage, pour le cas de remblayage des galeries d'accès avec les havrits de sel.	31
Figure 6-2 : Evolution de la pression d'eau dans le stockage en fonction de l'hypothèse de remontée de la saumure et du déstockage, pour le cas de remblayage des galeries d'accès avec le coulis.	31
Figure 6-3 : Modèle 3D de croisement des galeries des blocs de stockage remplis par le coulis. Evolution du volume des vides sur 100 000 ans, sans et avec la prise en compte de la pression de la saumure à partir de 3 555 ans.....	33
Figure 6-4 : Modèle 2D des voies doubles d'accès au stockage. Evolution du volume des vides sur 100 000 ans, sans et avec la prise en compte de la pression de la saumure à partir de 3 555 ans.	33
Figure 6-5 : Modèle 3D de croisement des galeries des blocs de stockage remplis par les déchets. Evolution du volume des vides sur 100 000 ans, sans et avec la prise en compte de la pression de la saumure à partir de 3 555 ans.....	34
Figure 6-6 : Evolution du volume de vides du stockage dans le cas d'un ennoyage à partir de 3 555 ans.	37
Figure 6-7 : Evolution de la variation annuelle du volume de vides du stockage dans le cas d'un ennoyage à partir de 3 555 ans.....	37

Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Valeurs des paramètres du modèle du Norton [1].	10
Tableau 3-2 : Caractéristiques élastiques du sel.	11
Tableau 3-3 : Résultats des essais œdométriques sur des éprouvettes de déchets REFIOM. Paramètres physiques initiaux et après compaction (ρ_d : masse volumique ; ρ_s : masse volumique des grains ; e : indice des vides ; n : porosité).	11
Tableau 3-4 : Propriétés du modèle de Cam-Clay pour la simulation des déchets REFIOM.	12
Tableau 3-5 : Déchets stockés dans le site de StocaMine (y compris dans le Bloc 15).	12
Tableau 3-6 : Résistance à la compression du béton « Complexe 2 » [7].	13
Tableau 3-7 : Mesures des masses volumiques et de porosité du coulis « Complexe 94 », [8].	13
Tableau 3-8 : Propriétés du coulis de remplissage.	14
Tableau 4-1 : Les hypothèses de remontée de l'eau.	16
Tableau 4-2 : Résultats des calculs hydrauliques pour l'ensemble des barrages du stockage.	17
Tableau 5-1 : Volumes initiaux des différentes parties du stockage et tonnage des déchets.	23
Tableau 5-2 : Volumes initiaux en fonction des hypothèses de déstockage.	24
Tableau 5-3 : Modèle local et courbe d'évolution des vides correspondant au trois parties du stockage.	24
Tableau 5-4 : Temps et débits d'envoyage du stockage pour les 2 cas de remontée de la saumure.	28
Tableau 5-5 : Temps d'envoyage du stockage pour les 2 cas de remonté de la saumure et les deux options de déstockage.	28
Tableau 6-1 : Année et débit de sortie de la saumure contaminée pour les différents cas de calcul.	36
Tableau 6-2 : Comparaison entre les résultats pour une longueur des barrages de 5m et de 6m (hypothèse de référence de l'INERIS de remontée de la saumure et remplissage des galeries de service avec les havrits de sel).	38

Références

- [1] Itasca, 2013. Evaluation des flux potentiels de saumure contaminée à partir du stockage de Wittelsheim. Rapport 13R-001A.
- [2] Itasca, 2013. Stockage de Wittelsheim. Etude de l'évolution de la perméabilité du sel. Rapport 13R-016A3.
- [3] Itasca, 2015. Stockage de Wittelsheim. Etude de comparaison entre les barrages en bentonite et les barrages en béton Sorel. Rapport 14R-028A3.
- [4] INERIS, 2010. Etude géomécanique du stockage de StocaMine. Rapport d'étude N° DRS-10-108130-14273A.
- [5] ASGA – GeoRessources, 2013. Caractérisation physico-mécanique de REFIOM. Réf. GR.EF.XXX.PSI.RPRE.13.0086.A.
- [6] Itasca Consulting Group, Inc., 2012. *FLAC3D* – Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions, Ver. 5.0. Minneapolis: Itasca.
- [7] Université d'Artois – Faculté des sciences appliquées – Laboratoire Génie Civil et Geoenvironnement (LGCgE), 2012. « Etude de formulations de coulis – Société Surschiste ». Rapport final, Partie 1. 30 septembre 2012.
- [8] Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, LERM, 2013. Caractérisation physique d'un coulis de comblement de vides. 15 mai 2013.
- [9] StocaMine, 2016. Courrier électronique de M. Alain Rollet du 11 avril 2016. Reprise études géomécanique et géochimique.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des études pour la fermeture définitive du stockage de déchets ultimes de Wittelsheim, la société StocaMine souhaite évaluer les flux potentiels de saumure contaminée à partir du stockage, à long terme pour plusieurs solutions de confinement des déchets. Deux évaluations ont été réalisées par ITASCA Consultants S.A.S. (ITASCA), dans les dernières années, prenant en compte différents scénarios de remplissage du stockage avec un coulis de cendres volantes et différentes typologies de barrages de confinement (en bentonite et en béton Sorel).

Par ailleurs ITASCA a réalisé des études portant sur l'évolution de la perméabilité du sel situé autour des barrages avec le temps, dans le but de valider l'hypothèse de base utilisée dans les calculs, selon laquelle l'écoulement de la saumure vers le stockage (et à partir du stockage vers l'extérieur) ne peut avoir lieu qu'à travers les barrages de confinement du stockage.

Une synthèse de l'ensemble de ces études est donnée en paragraphe 2.

Au vu des contraintes techniques liées à la mise en œuvre du remplissage, StocaMine étudie actuellement le remplacement du coulis de cendres volantes par des havrits de sel. Ce matériau se caractérise par une porosité initiale de l'ordre de 50%, laquelle diminue ensuite fortement avec le temps suite au fluage du sel environnant les ouvrages. Cette configuration représente une condition moins favorable pour le stockage, la durée de la phase d'envoyage par la saumure traversant les barrages étant raccourcie. Cela se traduit par une date de sortie de la saumure polluée vers la nappe d'Alsace plus rapide et, au vu de l'évolution de la vitesse de fermeture du stockage avec le temps, par des flux potentiels plus importants.

StocaMine indique également que la solution de confinement précédemment envisagée avec des barrages en béton Sorel ne convient pas au stockage de Wittelsheim. En effet, le faible contenu de chlorure de magnésium dans la saumure ne permet pas d'assurer la transformation de phase du béton lors du passage de la saumure, et donc *in fine* la réduction de la perméabilité des barrages. A ce jour, StocaMine retient donc la solution des barrages en béton spécial offrant la même perméabilité que les barrages en bentonite (10^{-18} m^2) dans leur partie centrale, avec deux appuis en béton de 3 m de long de part et d'autre de ce noyau.

Au vu des points évoqués ci-dessus, StocaMine a chargé ITASCA d'une reprise des calculs précédents, en considérant deux hypothèses différentes de remplissage du stockage :

- le remblayage des blocs vides (16, 25 et 26) avec un havrit présentant une porosité « long terme » nulle et le remblayage des galeries d'accès et du Bloc 15 avec le coulis de cendres volantes déjà étudié précédemment, et dont la porosité résiduelle est importante, de l'ordre de 69% ;
- le remblayage des blocs vides et des galeries d'accès avec un matériau sans porosité résiduelle « long terme » et le remblayage du Bloc 15 seul avec le coulis. Dans ce cas, la porosité disponible est limitée aux seuls blocs stockés et au coulis du Bloc 15. Ceci représente une hypothèse limite : le remblayage ne participe pas à la formation de vides résiduels.

Dans ces nouveaux calculs, les comportements mécaniques du sel, du coulis de remplissage et des déchets REFIOM sont modélisés de la même manière que pour notre étude récente [3]. Une synthèse de l'ensemble des propriétés de ces matériaux est donnée en paragraphe 3. Comme indiqué plus loin au paragraphe 3.4, le remplissage des tunnels vides avec les havrits de sel n'est pas modélisé, ce matériau étant supposé avoir une porosité nulle avant la fin de l'envoyage.

Par ailleurs, les nouveaux barrages en béton spécial ayant la même perméabilité que la bentonite déjà étudiée (10^{-18} m^2), il n'est pas nécessaire de reprendre ici l'étude d'écoulement de la saumure, le débit entrant à travers les barrages en état permanent étant le même pour les deux types de

barrages. Une synthèse de l'étude d'écoulement réalisée précédemment [3] est donnée en paragraphe 4.

Les résultats en termes de flux entrant seront ici utilisés pour déterminer la nouvelle date d'envoyage du stockage. Celle-ci est calculée à partir de l'intersection entre la courbe représentant l'évolution du volume de saumure entré dans le stockage et la courbe donnant l'évolution des vides résiduels du stockage. Cette étude est décrite en paragraphe 5.

La détermination rigoureuse de l'évolution des vides du stockage demanderait la modélisation de l'ensemble des tunnels. Une approche simplifiée est utilisée, dans laquelle la fermeture des tunnels est simulée à l'échelle locale sur des galeries remplies de coulis ou des déchets. Afin de prendre en compte l'influence des travaux miniers sus-jacents sur l'état des contraintes initiales dans le sel au voisinage du stockage, les conditions aux limites en contraintes pour les modèles locaux sont tirées des résultats des simulations de l'étude antérieure (modèle 3D du site de StocaMine).

Notons que pour la partie « avant envoi », les courbes d'évolution des vides à l'échelle locale peuvent être reprises de l'étude précédente [3], les hypothèses sur les propriétés des matériaux étant les mêmes.

Une fois le stockage complètement envahi par la saumure, toute réduction supplémentaire du volume des vides y entraîne d'abord la montée en pression du fluide dans le stockage, puis sa sortie à travers les barrages lorsque la pression interne dépasse la pression agissant sur les faces externes des barrages. Le flux potentiel de saumure polluée en sortie est déduit du taux annuel de fermeture du stockage, avec l'hypothèse de l'incompressibilité de la saumure et d'une perte de charge négligeable à travers les barrages. Cette étude est décrite en paragraphe 6.

Le paragraphe 6.4 constitue la conclusion de l'étude.

Les calculs décrits dans ce document considèrent des barrages de confinement de 5m de long. Cette hypothèse est reprise de nos études précédentes, dans l'objectif d'assurer une continuité d'hypothèses entre les différentes études. Toutefois, StocaMine indique que la géométrie des barrages telle que retenue à ce jour comporte des barrages de longueur de 6m. L'impact d'une telle modification sur le flux potentiels de saumure polluée ainsi que sur la date de sortie est présenté dans les conclusions de l'étude pour le cas le plus conservatif pour le stockage (remplissage des galeries de service avec les havrits de sel et remontée de la saumure selon l'hypothèse de référence de l'INERIS).

2. ETUDES ANTERIEURES

Une première évaluation a été réalisée par ITASCA Consultants S.A.S. (ITASCA) et a donné lieu à un rapport finalisé début mars 2013 (réf. [1]). Dans ce travail, le sel entourant les excavations et les barrages était considéré comme imperméable, dans l'attente des résultats d'une campagne de mesure sur site. L'entrée et la sortie du stockage par la saumure polluée ont donc été considérées comme ayant lieu seulement à travers les barrages en bentonite mis en place le long des tunnels d'accès pour isoler le stockage. L'étude a permis d'évaluer un flux sortant de mercure de 0,6 kg/an dans le cas le plus pessimiste (remplissage avec béton uniquement des blocs vides du stockage et débit maximal d'arrivée de la saumure de 105 000 m³/an) et de 0,45 kg/an dans le cas où des conditions plus réalistes de débit de remontée de la saumure au droit du stockage étaient prises en compte (58 000 m³/an et mêmes conditions de remplissage).

Au vu de l'hypothèse « optimiste » de l'imperméabilité du sel au voisinage des barrages, StocaMine a ensuite demandé à ITASCA la réalisation d'une nouvelle série de simulations ayant pour objectif l'étude de l'évolution de la perméabilité du sel encaissant les barrages, à la fois dans l'espace et dans le temps. Des données de perméabilité du sel en paroi des galeries étant devenues disponibles, une loi contrainte – perméabilité a été calée puis utilisée lors de simulations des barrages sur le long terme. Les résultats des calculs (résumés dans le rapport [2]) ont mis en évidence une première phase d'augmentation de la perméabilité lors de l'excavation des galeries (création d'une zone endommagée autour des ouvrages) suivie par une rapide diminution vers des valeurs proches des valeurs initiales à partir du moment de la pose des barrages (reconfinement, puis cicatrisation du sel endommagé). Ces phénomènes survenant bien avant la date d'arrivée de la saumure à la profondeur du stockage, nous avons donc pu valider notre hypothèse initiale, selon laquelle l'écoulement de la saumure vers le stockage ne peut avoir lieu qu'à travers les barrages de confinement du stockage.

Une étude ultérieure a été ensuite réalisée en fin 2014 (réf. [3]) en apportant des modifications aux hypothèses retenues dans les études précédentes concernant :

1. la stratigraphie autour des barrages de confinement avec la prise en compte de quelques passes de marnes ;
2. les propriétés mécaniques du coulis de remplissage et des déchets REFION ;
3. le remplissage de tout le stockage sauf la partie des blocs stockés avec le coulis de cendres volantes ;
4. deux scénarios de déstockage, avec un déstockage respectivement de 56% et 93% des déchets mercuriels et arséniés.

Cette étude a également pris en compte deux typologies de barrage, respectivement en bentonite avec une perméabilité de 10⁻¹⁸ m² et en béton Sorel avec une perméabilité de 10⁻¹⁹ m². Les résultats de l'étude ont fourni un flux sortant de mercure de 3,6 g/an dans le cas des barrages en bentonite et inférieur à 0,6 g/an dans le cas des barrages en béton Sorel pour le cas d'un déstockage de 56% de la masse des déchets mercuriels et arséniés et une hypothèse de débit maximal d'arrivée de la saumure de 105 000 m³/an. Un déstockage plus poussé (93%) permet de diviser ces valeurs par un facteur 6 (respectivement 0,6 et <0.1 g/an pour les deux typologies de barrage).

Encore une fois, ces résultats supposent que le flux de saumure entrant et sortant du stockage ne peut avoir lieu qu'à travers les barrages de confinement du site de StocaMine. Nous avons vérifié que cette condition reste vraie même dans le cas où des appuis en béton ne sont pas mis en œuvre des deux côtés des barrages. Une étude plus fine a toutefois mis en évidence la nécessité d'avoir une longueur minimum de 3 m pour ces appuis en béton standard, afin de garantir la stabilité de l'ensemble du barrage sur le long terme (réf. [3]).

3. MODELES DE COMPORTEMENT

3.1. Sel

Le modèle de comportement du sel reprend les hypothèses de modélisation utilisées dans les études précédemment menées par l'INERIS (réf. [4]) et ITASCA (réf. [1], [2] et [3]) sur le stockage de Wittelsheim. Le sel est représenté par un modèle viscoélastique, dont le fluage est simulé en considérant la loi de Norton. Seul le fluage stationnaire est retenu dans le modèle rhéologique du sel, l'objectif des études concernant uniquement les moyen et long termes (et non la phase de creusement des ouvrages).

La loi de Norton est implémentée dans le logiciel *FLAC3D*, avec un modèle de comportement nommé « two-component power law » dans lequel le tenseur de vitesse de déformation de fluage est calculé par la formule suivante :

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \left(\frac{3}{2}\right) \dot{\epsilon}_{cr} \left(\frac{\sigma_{ij}^d}{\sigma_{eff}}\right) \quad (1)$$

Avec :

- σ_{eff} : contrainte de Von Mises ;
- σ_{ij}^d : tenseur de cisaillement ;
- $\dot{\epsilon}_{cr}$: vitesse de fluage :

$$\dot{\epsilon}_{cr} = A \sigma_{eff}^{n_s} \quad (2)$$

- A et n_s : propriétés du sel, obtenues à partir des valeurs du Tableau 3-1 :

$$A = A_s \exp\left(\frac{K_s}{T}\right) \quad (3)$$

Le Tableau 3-1 résume le jeu de paramètres du modèle de Norton retenues pour le sel, issues du calage réalisé précédemment par ITASCA lors de l'étude [1].

Description	Paramètre	Valeur
Vitesse de référence	A_s (1/jour)	0,015
Exposant de contrainte	n_s	4
Constante de la loi d'Arrhenius	K_s (K)	4 700
Température	T (K)	308

Tableau 3-1 : Valeurs des paramètres du modèle du Norton [1].

En ce qui concerne le comportement instantané du sel, un modèle élastique est pris en compte. Ses propriétés sont répertoriées dans le Tableau 3-2.

Description	Paramètre	Valeur
Masse volumique	ρ (kg/m ³)	2 160
Module de Young	E (GPa)	25
Coefficient de Poisson	ν	0,25

Tableau 3-2 : Caractéristiques élastiques du sel.

3.2. Déchets du stockage

Les déchets sont modélisés par un modèle de comportement de Cam-Clay, permettant de reproduire à la fois les résultats des essais œdométriques et ceux des essais triaxiaux réalisés en laboratoire lors de la campagne de mesures des propriétés physico-mécaniques des déchets REFIOM menée par ASGA – GeoRessources [5].

Globalement, les résultats de laboratoire montrent une porosité initiale très élevée (84%) et une compressibilité importante avec une valeur de l'indice de compression C_c de l'ordre de 1,2 :

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma_v)}, \tag{4}$$

Avec e l'indice de vides et σ_v la contrainte verticale appliquée à l'échantillon.

σ_v (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	e	n (%)
0 (initial)	0,41	2,52	5,25	84
3	0,87	-	1,90	65
6	1,07	-	1,36	58
9	1,10	-	1,28	56
12	1,15	-	1,18	54

Tableau 3-3 : Résultats des essais œdométriques sur des éprouvettes de déchets REFIOM.

Paramètres physiques initiaux et après compaction (ρ_d : masse volumique ; ρ_s : masse volumique des grains ; e : indice des vides ; n : porosité).

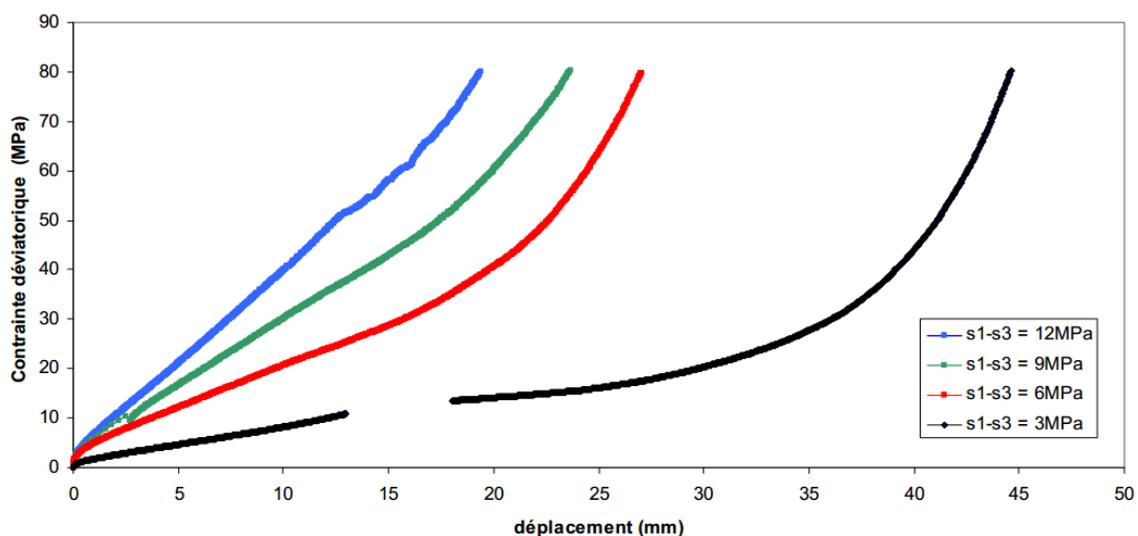


Figure 3-1 : Résultats des essais triaxiaux à différentes pressions de confinement sur des éprouvettes de déchets REFIOM.

Les propriétés du modèle de Cam-Clay qui permettent de reproduire au mieux les résultats expérimentaux sont fournies en Tableau 3-4. La description complète de ces paramètres ainsi que de la procédure de calage utilisée est donnée en [3]. Ces valeurs sont utilisées dans les modèles locaux pour simuler la fermeture des galeries remplies par les déchets.

Description	Paramètre	Valeur
Masse volumique	ρ (kg/m ³)	410
Pente de la courbe de consolidation normale	λ (-)	0,531
Pente de la courbe de recompression	κ (-)	0,106
Coefficient de Poisson	ν (-)	0,05
Pression de référence	p_1 (MPa)	0,003
Volume spécifique à la pression de référence sur la courbe de consolidation normale	v_λ	6,25
Coefficient du modèle	M	3,3

Tableau 3-4 : Propriétés du modèle de Cam-Clay pour la simulation des déchets REFIOM.

Notons que dans la réalité le stockage contient aussi d'autres types de déchets, différents des REFIOM. Le Tableau 3-5 indique les quantités et les volumes des déchets stockés dans le site de StocaMine, avant tout déstockage.

Déchets	Tonnage (t)	ρ (t/m ³)	V (m ³)
REFIOM	20 714	0,41	50 522
Amiantés	3 774	0,4	9 435
Autres (Hg / As)	19 389	1,0	19 389

Tableau 3-5 : Déchets stockés dans le site de StocaMine (y compris dans le Bloc 15).

Une prédiction rigoureuse de la fermeture des vides du stockage nécessiterait la prise en compte du comportement mécanique des déchets amiantés et des déchets lourds (Hg /As), celui-ci pouvant être sensiblement différent de celui des REFIOM. En particulier, StocaMine indique que les déchets amiantés sont caractérisés par un potentiel de compaction nettement supérieur aux REFIOM.

Cette prédiction n'est toutefois pas possible à ce jour, car seulement les déchets REFIOM ont été caractérisés du point de vue mécanique en laboratoire. En l'absence de ces informations, les propriétés mécaniques des REFIOM décrites en Tableau 3-4 sont utilisées pour l'ensemble des déchets du stockage. Comme détaillé dans notre rapport précédent, ce choix est sensé avoir un impact limité sur la variation des vides avec le temps dans les galeries stockées, les REFIOM constituant la plus grande partie du stockage (~64% en volume).

3.3. Coulis de remplissage

Le béton de remplissage que StocaMine souhaite utiliser est un béton de cendres volantes. Le modèle de comportement choisi pour la modélisation de ce matériau est un modèle élastoplastique parfait de Mohr-Coulomb, dont l'ensemble des propriétés sont listées en Tableau 3-8. Ces propriétés ont été définies à partir des résultats des essais de laboratoire disponibles à ce jour pour un coulis de type COMPLEX, et provenant de deux campagnes de mesures différentes :

- résistance à la compression lors des premiers 90 jours des éprouvettes de coulis de « COMPLEX 2 » (Tableau 3-6) - Laboratoire Génie Civil et Geoenvironnement (LGCgE) de l'Université d'Artois [7] ;

- Age (jours)	Résistance à la compression
3	-
7	0,72
14	1,29
28	1,91
90	3,03

Tableau 3-6 : Résistance à la compression du béton « Complex 2 » [7].

- Masse volumique et porosité initiale accessible à l'eau (Tableau 3-7) ainsi que compressibilité du coulis « COMPLEX 94 » durci aux échéances de 1, 2 et 3 mois (Figure 3-2) - Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur les Matériaux (LERM) [8] ;

Réf. échantillon	31043-A4	31043-A5	31043-A6
Masse volumique apparente, (kg/m ³)	810	810	830
Masse volumique réelle, (kg/m ³)	1 500	1 500	1 500
Porosité (%)	69,1	69,2	68,3
Porosité moyenne (%)		68,9	

Tableau 3-7 : Mesures des masses volumiques et de porosité du coulis « Complex 94 », [8].

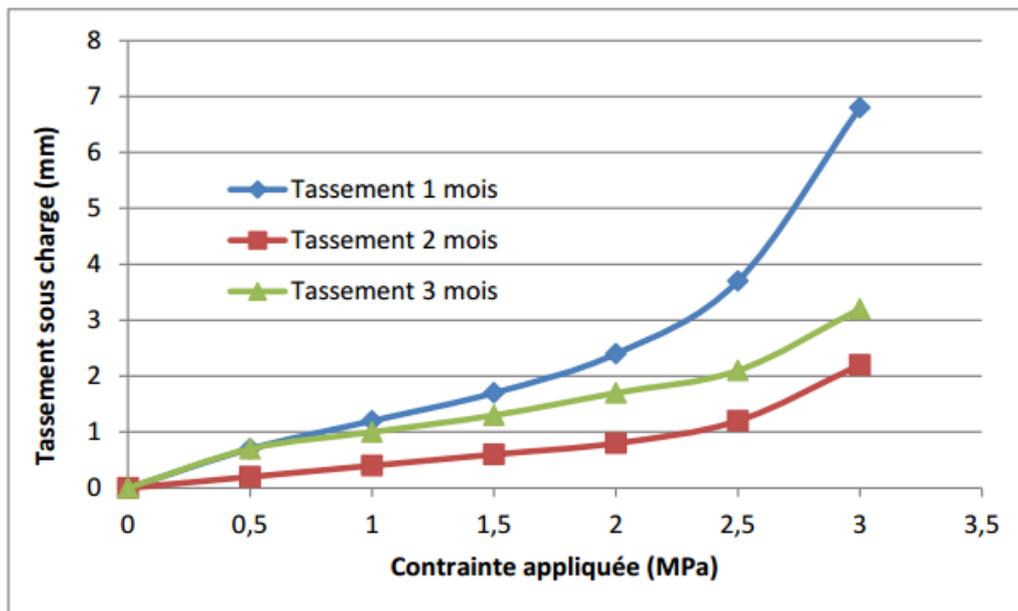


Figure 3-2 : Résultats des essais œdométriques en termes de tassement sous contrainte aux échéances de 1, 2 et 3 mois, [8].

Les deux séries de données listées ci-dessus concernent deux formulations de coulis différentes (« Complex 2 » et « Complex 94 ») et, prises individuellement, ne permettent pas de caractériser de manière complète et cohérente la déformabilité et la résistance du matériau. Afin de palier à cette limitation, lors de notre étude précédente [3] il a été décidé en concertation avec StocaMine de

simuler un coulis dont les propriétés sont celles du « Complex 94 » pour ce qui concerne la déformabilité et celles du « Complex 2 » pour ce qui concerne la résistance mécanique.

Le module de Young du coulis est obtenu à partir de l'essai œdométrique réalisé par le LERM à l'échéance de 2 mois (courbe avec le module plus important en Figure 3-2) et en considérant une valeur du coefficient de Poisson de 0,3 :

$$E = E_{oed} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} = 225MPa \quad (5)$$

La résistance à compression simple R_c est prise égale à la résistance à 90 jours. L'angle de frottement φ est considéré égal à 30° et la cohésion est directement déduite de la résistance en compression simple R_c :

$$c = R_c \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} = 0,87MPa \quad (6)$$

avec :

- R_c : résistance en compression simple (3 MPa)
- c : cohésion
- φ : angle de frottement

Enfin, la résistance en traction est estimée égale à un douzième de la résistance en compression, soit 0,25 MPa.

Paramètre	Coulis de remplissage
Masse volumique : ρ	810 kg/m ³
Module d'Young : E	225 GPa
Coefficient de Poisson : ν	0,30
Angle de frottement : φ	30°
Cohésion : c	0,87 MPa
Dilatance : ψ	0°
Résistance en compression : R_c	3 MPa
Résistance en traction : R_t	0,25 MPa

Tableau 3-8 : Propriétés du coulis de remplissage.

3.4. Havrits de sel

La nouvelle solution de remplissage des blocs vides envisagée par StocaMine prend en compte un remblayage par des blocs de sel broyé. Ce matériau présente initialement une porosité forte, de l'ordre de 50%. Lors de la fermeture progressive des tunnels dans le temps due au fluage du sel environnant le stockage, ce matériau est recomprimé et voit sa porosité se réduire de manière importante. L'IfG de Leipzig (Allemagne) [9], intervenant dans la tierce-expertise du dossier de fermeture du stockage pour la partie géomécanique, indique que ce remplissage doit être considéré à l'échelle de la durée de l'ennoyage du stockage comme un matériau à porosité nulle. Cette hypothèse pessimiste, prend en compte le fluage des blocs de remblayage et le phénomène de cicatrisation auquel le sel recomprimé est sujet.

Un pourcentage non négligeable du stockage étant rempli par les havrits (environ 30% du volume initial dans le cas d'un remblayage des seuls blocs vides, et 50% dans le cas d'un remblayage des galeries vides également), les vides résiduels du stockage accessibles à la saumure sont nettement réduit, ce qui se traduit par une durée de la phase d'ennoyage plus courte et donc par une sortie de la saumure polluée plus précoce dans le temps.

Au vu des indications fournies par l'IfG, les tunnels remplis par les havrits ne sont pas étudiés dans cette étude. Ils ne contribuent pas aux vides du stockage et à leur évolution avec le temps. L'évolution est fonction seulement de la variation des vides dans les galeries comblées par le coulis de cendres volantes et les déchets.

4. DETERMINATION DE LA VITESSE DE REMPLISSAGE DU STOCKAGE PAR LA SAUMURE

Deux hypothèses sur les dates de remontée de la saumure au droit du stockage sont prises en compte et reprises de notre étude précédente [3]. Ces hypothèses, fournies par l'INERIS, sont déduites de l'estimation : 1) des vides résiduels dans les travaux anciens ; 2) des débits d'invasion par la saumure. Après l'arrivée de la saumure au niveau du stockage, sa remontée jusqu'au contact avec la nappe d'Alsace intervient en deux temps : tout d'abord jusqu'au niveau -400m, puis jusqu'à la nappe. Le Tableau 4-1 récapitule les temps et les pressions correspondant à ces deux hypothèses, en utilisant pour la saumure saturée une densité de 1,28. Nous appelons l'hypothèse 1 « hypothèse de référence de l'INERIS », et l'hypothèse 2 « hypothèse d'envoyage moins rapide ».

Hypothèse	1	2
Description	Hypothèse de référence	Envoyage moins rapide
Estimation des vides résiduels dans les travaux anciens (%)	20	30
Estimation des débits d'arrivée de saumure (m ³ /an)	105 000	58 000
Arrivée de la saumure au stockage (années) Pression 0m	240	421
Arrivée de la saumure à la cote -400m (années) Pression 150*1,28 = 192m	294	487
Arrivée de la saumure au niveau de la nappe (années) Pression 600m	304	505

Tableau 4-1 : Les hypothèses de remontée de l'eau.

Par ailleurs, StocaMine souhaite l'étude d'une solution de confinement avec des barrages en béton spécial, caractérisé par une faible perméabilité, de l'ordre de 10^{-18} m².

Dans l'hypothèse d'une saturation complète des barrages pendant la phase d'envahissement par la saumure en train de remonter dans les travaux (ce qui raccourcit la durée nécessaire au remplissage du stockage, et fournit donc une estimation pessimiste), l'évolution du débit traversant le barrage n'est fonction que de la perméabilité et de la montée en pression de la saumure devant les barrages. Comme le béton spécial est caractérisé par la même perméabilité que la bentonite, nous pouvons donc reprendre les résultats obtenus lors de notre étude précédente et les utiliser pour les nouveaux calculs de la date d'envoyage du stockage. Pour rappel, ces résultats ont été calculés en considérant également la présence des minces couches de marnes au droit du stockage, dont la perméabilité est de l'ordre de 10^{-19} m² (perméabilité des marnes recomprimées).

Le Tableau 4-2 récapitule les résultats en termes de flux de saumure en régime permanent pour les deux hypothèses de remontée considérées. Bien évidemment, la date d'arrivée de la saumure n'a pas d'effet sur le débit permanent, mais seulement sur l'évolution dans le temps du volume de saumure entré dans le stockage.

Hypothèse	Arrivée saumure (ans)	Débit entrant en état permanent (m ³ /an)
1 – Référence	240	13,55
2 – Ennoyage moins rapide	421	13,55

Tableau 4-2 : Résultats des calculs hydrauliques pour l'ensemble des barrages du stockage.

Notons enfin que les conditions aux limites utilisées pour le calcul considèrent une pression sur la face externe du barrage, ainsi que sur les tranches des couches de marne en contact avec la saumure, qui varie suivant les hypothèses indiquées pour chacune des deux hypothèses étudiées ; du côté interne (côté du stockage), la pression est fixée à zéro. On notera que cette condition devient pessimiste (débit entrant surestimé) quand la pression de saumure commence à monter à l'intérieur du stockage. Mais au vu des débits obtenus, il est clair que la montée de la pression dans le stockage ne survient qu'après la fin des simulations hydrauliques présentées ici.

Pour ce qui concerne la face extérieure du barrage, la pression est appliquée sur une surface correspondant à la largeur du tunnel d'accès (soit 3,80 m) et à la hauteur totale du barrage (soit 2,80 m de galerie et 2 fois 0,90 m de surexcavation). Cela est montré en Figure 4-1, schéma A. En réalité, si on considérait un contact parfait entre le barrage et le sel, la pression ne devrait être appliquée que sur la partie du barrage en contact avec la saumure (soit une surface de 3,80 m de large fois 2,80 m de haut) comme indiqué dans le schéma B de la Figure 4-1. Un calcul supplémentaire réalisé montre que dans ce cas le débit en état permanent serait réduit d'environ 13% (soit 11,81 m³/an).

Les conditions aux limites choisies permettent ainsi de prendre indirectement en compte les défauts du contact entre le béton et le barrage et de fournir un état permanent correspondant au débit maximum pouvant traverser le barrage.

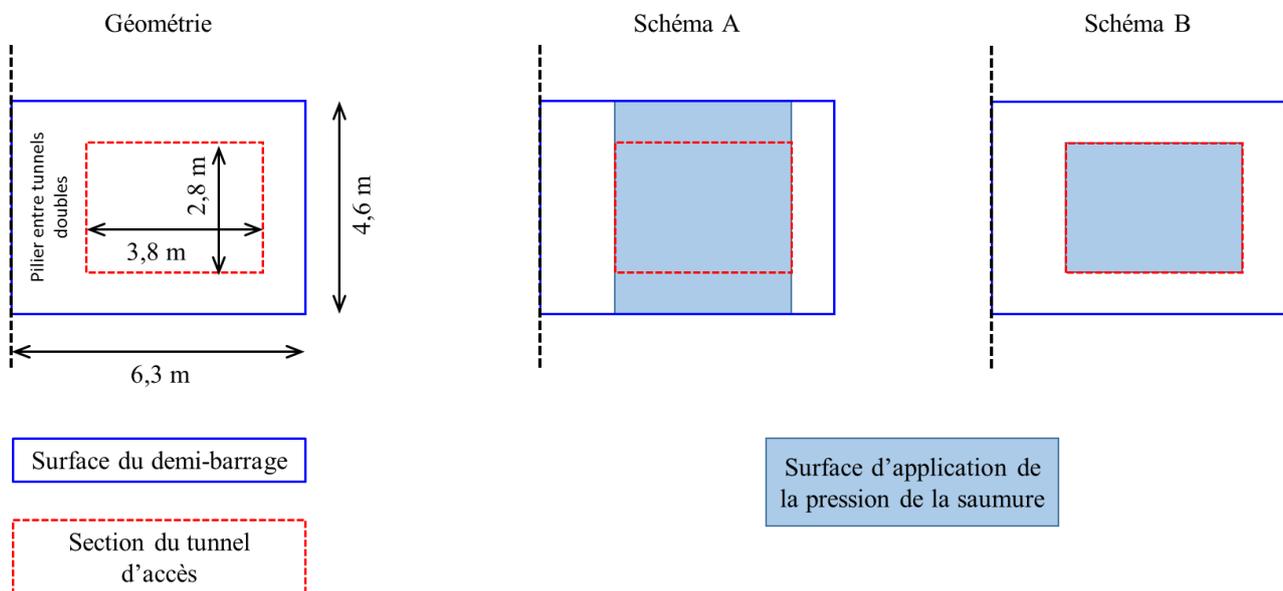


Figure 4-1 : Géométrie du demi-barrage mis en place dans les tunnels d'accès et surface d'application de la condition en pression imposée.

5. SIMULATION DE LA FERMETURE DU STOCKAGE AVANT L'ENNOYAGE

La fermeture du stockage est évaluée à partir de l'évolution de la fermeture des différentes configurations des tunnels du stockage à l'aide de modèles locaux (galeries de service partiellement remplies avec le coulis de remplissage et galeries des blocs du stockage partiellement remplies avec les déchets ou le coulis). La combinaison de ces modèles en termes d'évolution du volume de vides avec le temps permet ensuite d'évaluer la fermeture globale du stockage. Dans ce paragraphe, la présence de la saumure après l'envahissement n'est pas prise en compte. Ces simulations ne sont donc valides que jusqu'au moment où la saumure a complètement envahi le stockage.

Par ailleurs, comme précisé au paragraphe 3.4, les galeries remplies avec les havrits de sel ne sont pas prises en compte, le matériau de remblayage étant supposé avec une porosité nulle avant l'arrivée de la saumure dans le stockage.

5.1. Fermeture des modèles locaux

Les évolutions présentées de la Figure 5-4 à la Figure 5-6 sont reprise de l'étude précédente [3] et montrent l'évolution des vides pour les modèles locaux suivants :

- Croisement entre deux galeries des blocs de stockage remplies de déchets à 70% environ;
- Croisement entre deux galeries des blocs de stockage remplies de coulis à 80%;
- Voies doubles d'accès au stockage remplies à 90% de coulis.

Ces trois évolutions sont toujours valables dans le cadre de la nouvelle étude, les hypothèses sur le pourcentage de déchets et de coulis ainsi que sur les propriétés mécaniques restant les mêmes.

La description complète de ces modèles en termes de géométrie, conditions aux limites et phasage des calculs (creusement des tunnels et mis en place du coulis ou des déchets) est détaillée en [3]. Nous rappelons ici seulement que la contrainte appliquée sur la frontière supérieure du modèle est mise à jour périodiquement au cours de la simulation du fluage de façon à tenir compte de l'évolution de la contrainte verticale en toit du stockage, engendrée par la compaction progressive des vides miniers sus-jacents. Cette évolution, présentée en Figure 5-2 et en Figure 5-3 avec une ligne en pointillés est tirée du modèle global mis au point lors de notre première étude sur les flux potentiels du stockage de StocaMine (Figure 5-1) et correspond à l'évolution moyenne de la contrainte verticale 20 m au-dessus du stockage dans les régions situées en partie ouest, centrale et est de l'emprise du stockage.

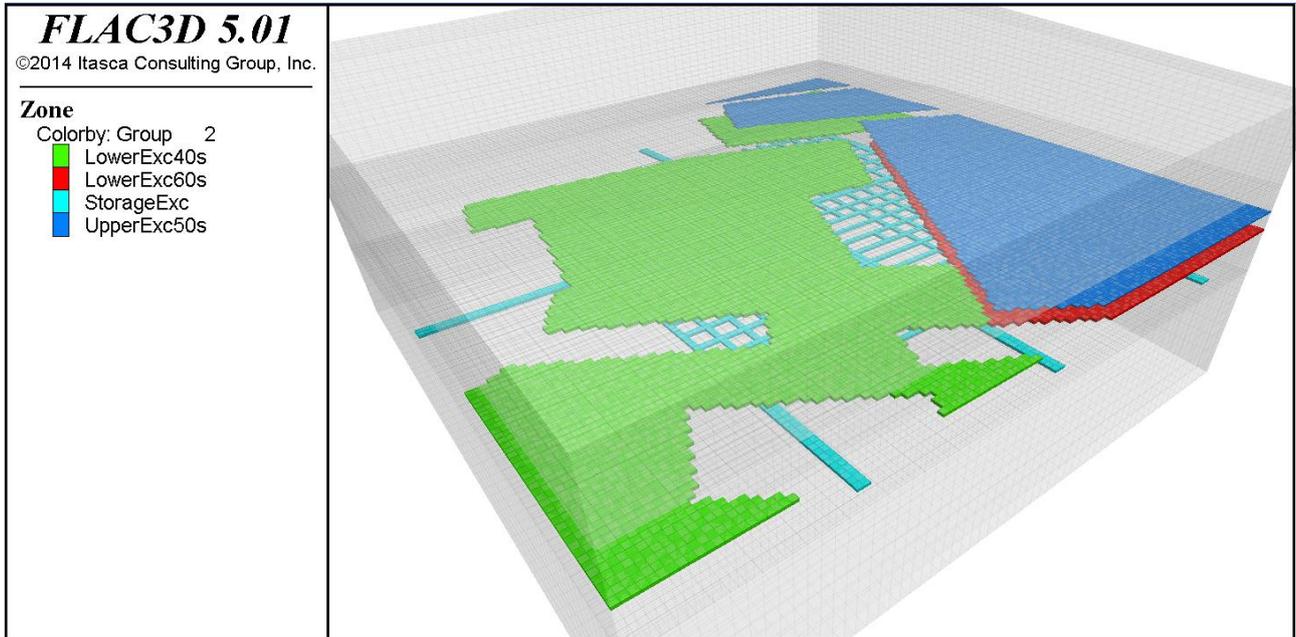


Figure 5-1 : Géométrie du modèle global du site de StocaMine prenant en compte l'excavation des vides miniers ainsi que de l'ensemble du stockage.

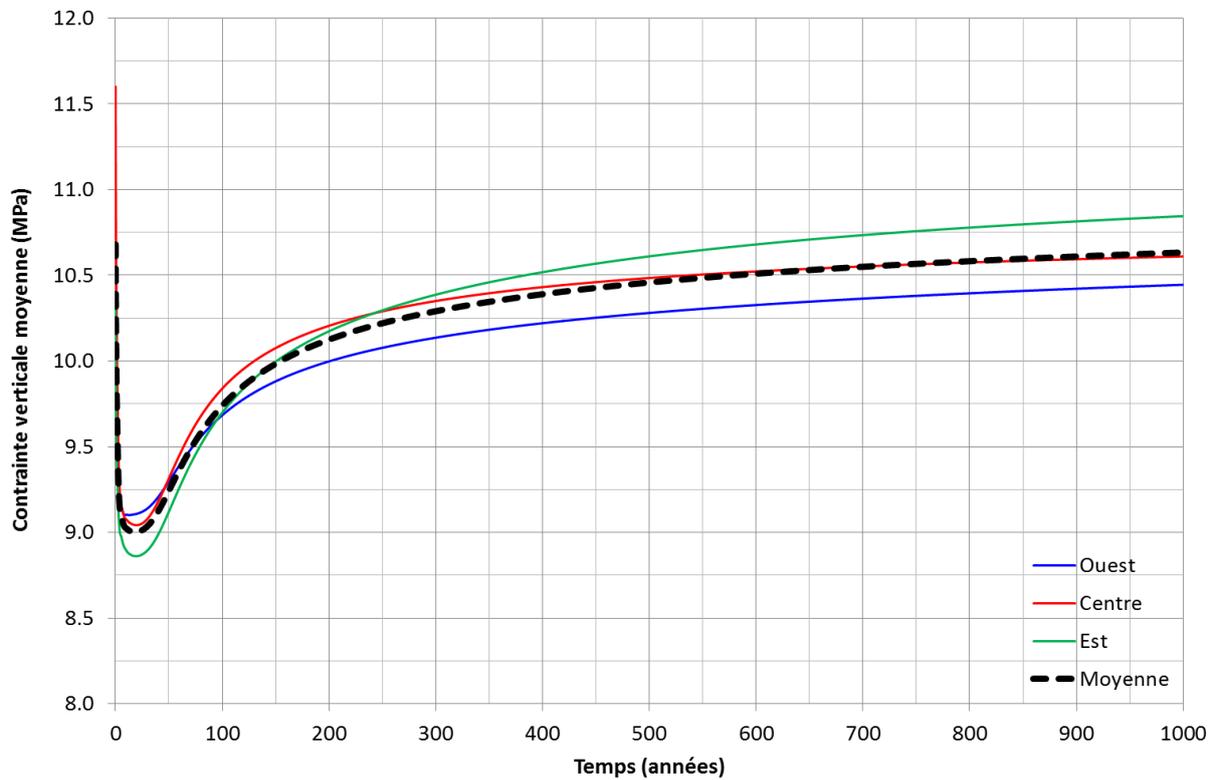


Figure 5-2 : Evolution des contraintes verticales à 20 m au-dessus du stockage sur 1000 ans. La ligne en pointillés représente l'évolution moyenne. L'origine de l'axe du temps correspond au moment de l'excavation des galeries.

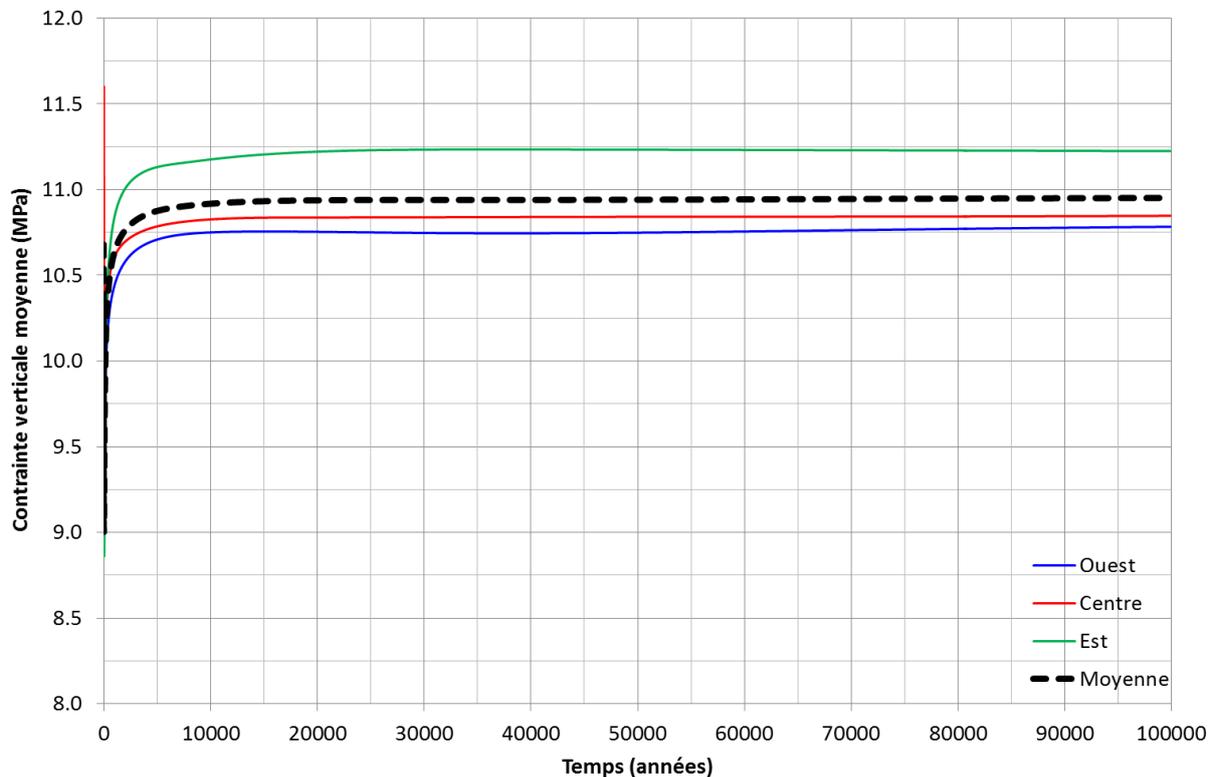


Figure 5-3 : Evolution des contraintes verticales à 20 m au-dessus du stockage sur 100 000 ans. La ligne en pointillés représente l'évolution moyenne.

Les résultats obtenus pour les tunnels remplis de coulis montrent de faibles variations des vides avec le temps, dès un temps de fluage de 100 ans. Dans le cas des déchets, compte tenu de leur déformabilité plus importante, les variations des vides restent importantes jusqu'à un temps de fluage d'environ 1 000 ans. Quel que soit le modèle, les vides diminuent très fortement au début de la simulation de fluage à cause (1) de la fermeture initiale de la partie des galeries restant vide en toit des déchets et du coulis et (2) de la mise en compression initiale des matériaux mis en place dans le tunnel (notamment les déchets). Cette compression progressive engendrée par le fluage du sel réduit petit à petit le déviateur de contrainte dans le sel et donc la vitesse de fluage. En conséquence, la vitesse de variation du volume de vides dans les tunnels ralentit, et devient très faible à partir de 1 000 ans de fluage.

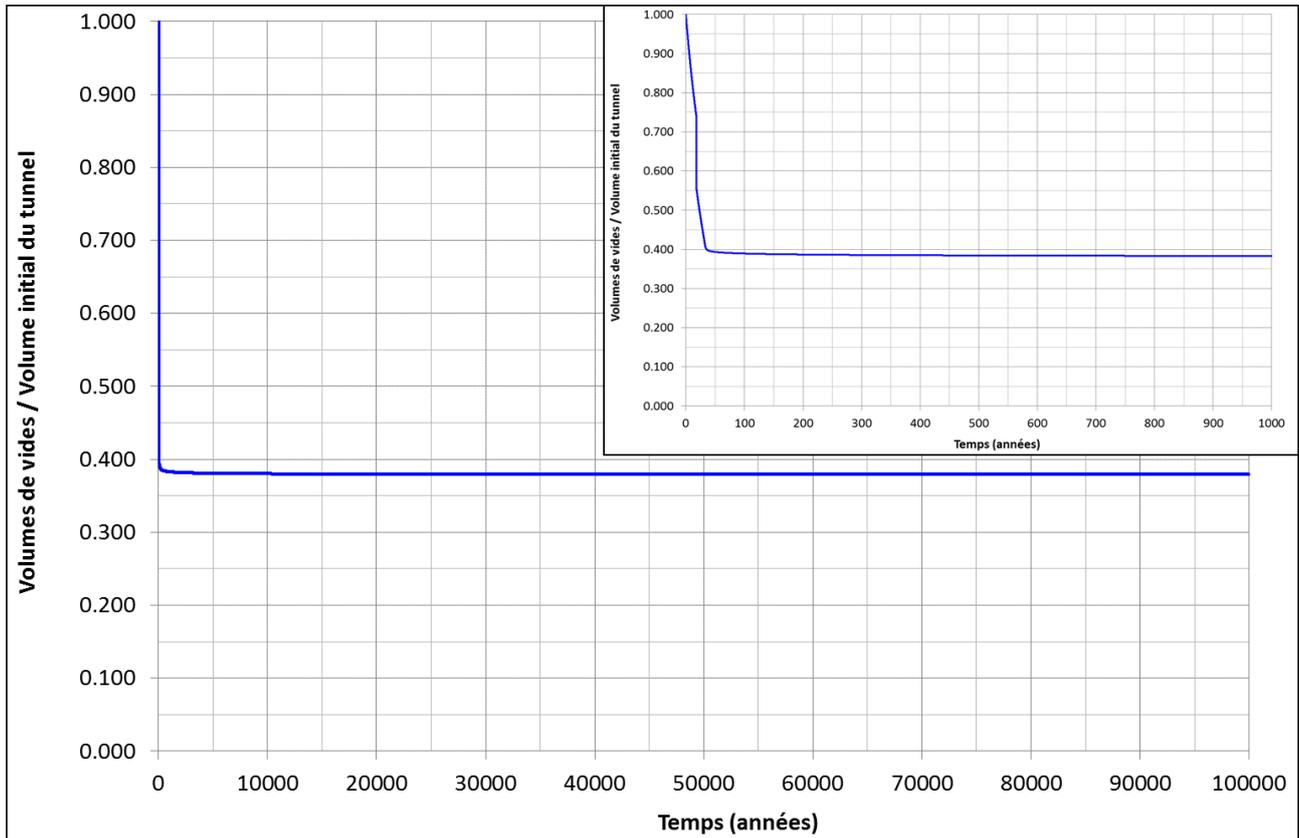


Figure 5-4 : Modèle 3D de croisement des galeries des blocs de stockage remplis par le coulis. Evolution du volume des vides sur 1 000 et 100 000 ans.

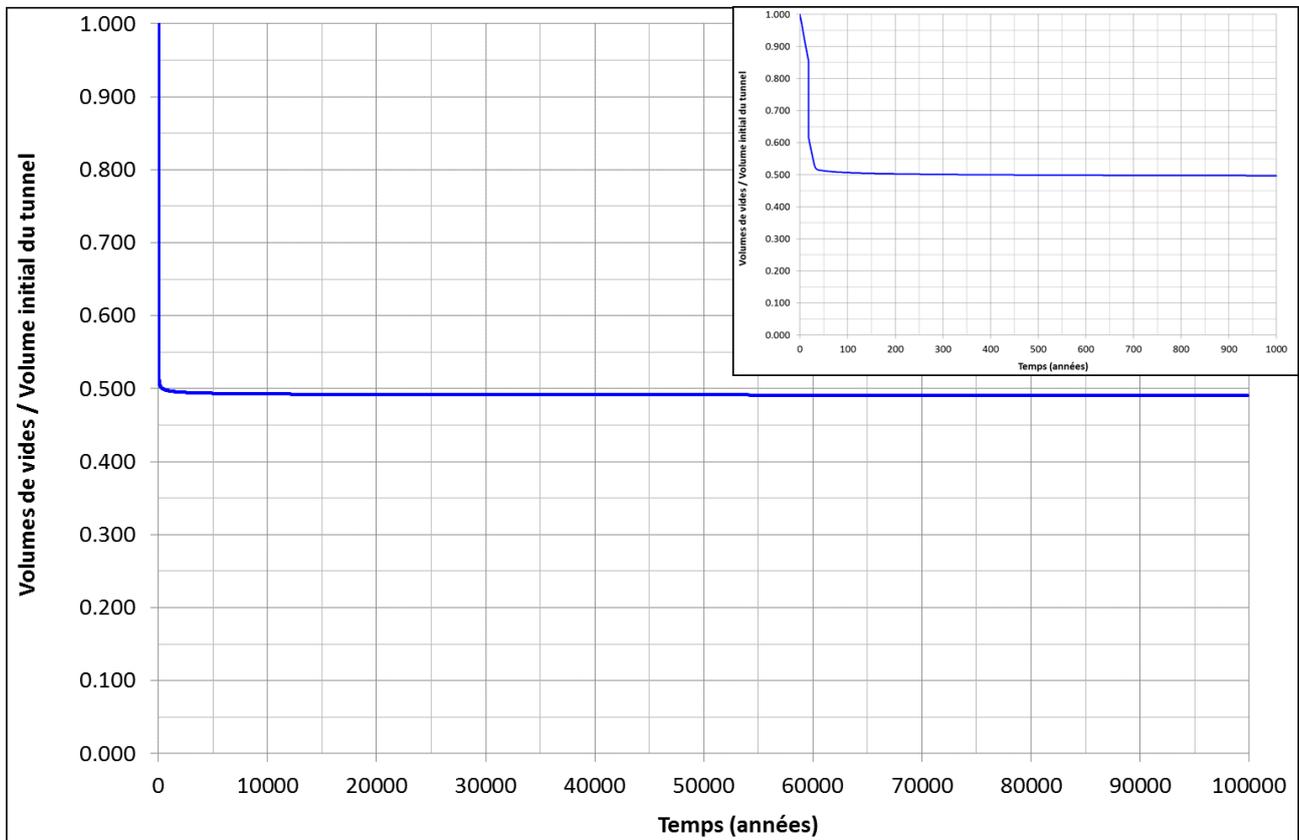


Figure 5-5 : Modèle 2D des voies doubles d'accès au stockage remplies par le coulis. Evolution du volume des vides sur 1 000 et 100 000 ans.

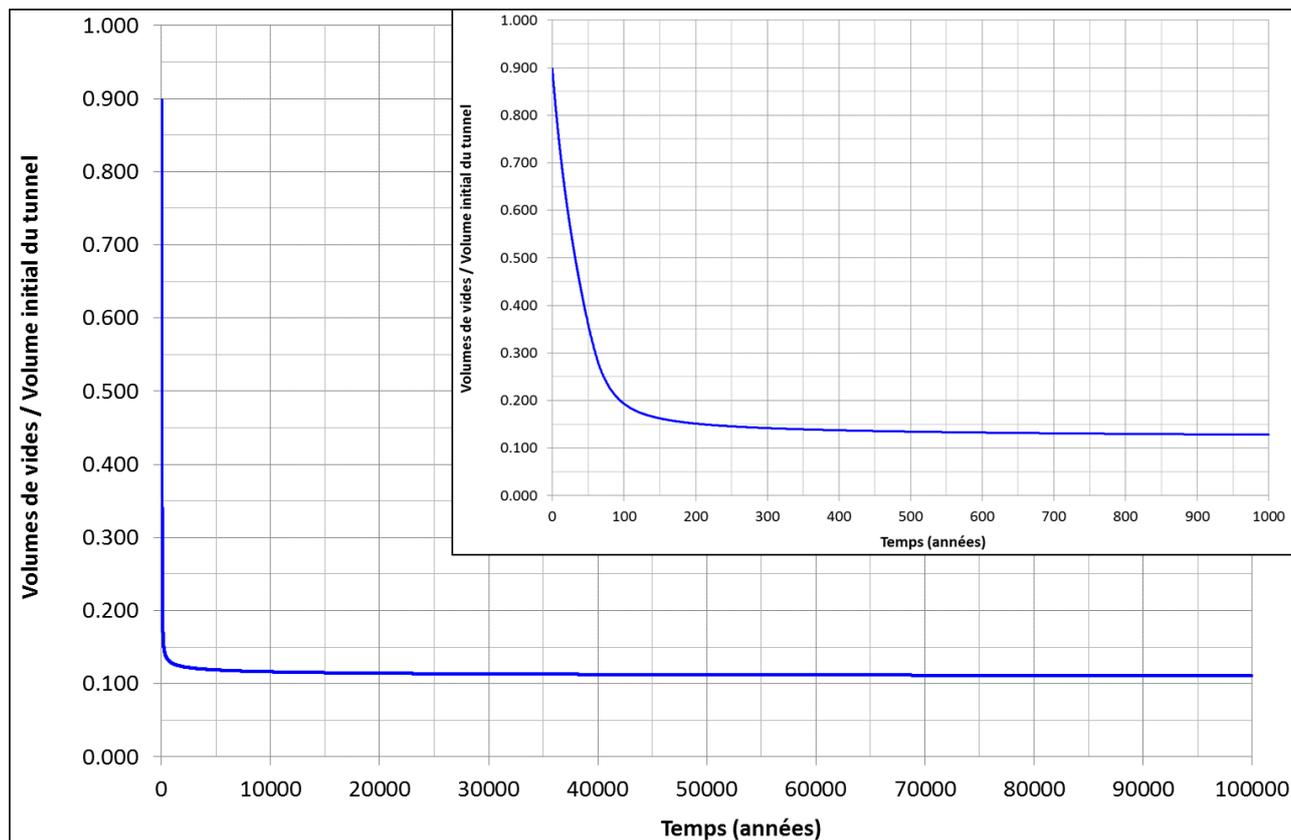


Figure 5-6 : Modèle 3D de croisement des galeries des blocs de stockage remplis par les déchets.
Evolution du volume des vides sur 1 000 et 100 000 ans.

5.2. Fermeture globale du stockage

Le stockage est isolé par différents barrages mis en place au niveau des galeries d'accès. Au cours du temps, la saumure remontant peu à peu dans les anciens travaux arrive au niveau du stockage et traverse progressivement les barrages. Le stockage commence alors à être envahi par un flux d'eau qui devient constant une fois que la remontée des eaux atteint la nappe phréatique d'Alsace (voir paragraphe 4). L'eau entrant en contact avec les déchets se charge en éléments polluants.

Une fois que le stockage est complètement ennoyé, toute réduction du volume des vides internes du stockage va entraîner l'expulsion hors du stockage de saumure contaminée. Initialement, la convergence entraîne une augmentation de la pression de saumure. Quand la pression interne devient supérieure à la pression exercée sur les faces externes des barrages, l'expulsion d'eau est amorcée, avec un débit dépendant du différentiel de pression. Ainsi, il apparaît que le flux sortant potentiel de saumure contaminée est fonction :

- De la date à laquelle le stockage est entièrement noyé par la saumure ;
- De l'évolution du volume de vides résiduels dans le stockage après cette date.

Un autre phénomène entre en compte. A partir du moment où les débits s'inversent vers l'extérieur du stockage, la saumure contaminée doit d'abord remplacer le fluide contenu dans les barrages avant de venir en contact avec les flux circulant dans les anciens travaux. Cela introduit un décalage supplémentaire de la date de sortie de la saumure, qui dépend principalement de la porosité des barrages (et donc du volume de saumure « saine » à remplacer par de la saumure « polluée »).

Le but de ce paragraphe est d'estimer le taux de fermeture du système de stockage, et donc *in fine* la date d'ennoyage du stockage. Ce taux dépend des géométries aussi bien que des conditions de remplissage des galeries qui composent le stockage (galeries contenant des déchets ou remplies de coulis). Les résultats des simulations des modèles locaux présentés dans le paragraphe 5.1 et repris

de notre étude précédente sont ici utilisés pour calculer le taux de fermeture du réseau de stockage comme étant la combinaison des fermetures des différentes galeries le composant.

Les données d'entrée pour ce calcul sont les volumes initiaux des différentes parties du stockage fournis par StocaMine pour l'étude précédente et listés en Tableau 5-1 :

Galeries	V (m ³)	Volume déchets (m ³)	Tonnage déchets (t)
Galeries de service	51 764	-	-
Blocs de stockage vides	73 150	-	-
Blocs stockés avec les déchets	118 041	75 407	42 097
Bloc 15	16 940		
- Partie stockée	6 166	3 939	1 780
- Partie vide	10 774	-	-

Tableau 5-1 : Volumes initiaux des différentes parties du stockage et tonnage des déchets.

Concernant le Bloc 15 du stockage (bloc endommagé par un incendie), 1 780 tonnes de déchets sont encore présentes à ce jour. Afin de simplifier le calcul de la variation de vides du stockage, nous considérons que le Bloc 15 est composé d'une partie remplie par les déchets sur une hauteur initiale d'environ 1,8 m (soit 64% environ de la hauteur des galeries, comme pour les autres blocs de stockage) et d'une partie complètement vide. Les volumes initiaux de ces deux parties du bloc sont donnés également en Tableau 5-1.

Enfin, concernant les blocks du stockage remplis par les déchets, StocaMine indique qu'à l'heure actuelle un déstockage des déchets contenant Hg est en cours. La partie déstockée sera ensuite remplie par les havrits de sel. Ceci aura une conséquence non négligeable sur l'évolution des vides du stockage avec le temps. La nouvelle configuration après déstockage est donc prise en compte pour l'évaluation de la date d'envoyage du stockage. Dans nos calculs, il est demandé de prendre en compte trois hypothèses de déstockage, soit un déstockage de 0%, 56% et 93% des déchets mercuriels.

StocaMine indique également que les deux déstockages nommés 56% et 93% comportent le même volume de tunnel déstocké, soit le volume correspondant à une allée de longueur 220m et de section 5,5 x 2,8 m. Ceci est dû au fait que la différence entre les scénarios 56% et 93% est minime en termes de colis à déstocker.

Compte tenu de cette observation, les résultats des calculs sont analysés pour deux configurations de déstockage, nommées respectivement 0% et 56%-93%. Les volumes initiaux des différentes parties du stockage sont donc recalculés en Tableau 5-2 en termes de galeries de service, blocs de stockage vides comblés par havrit et coulis (pour le Bloc 15), et blocs stockés avec les déchets.

Partie du stockage (m³)	Galeries de service	Blocs de stockage vides (havrits)	Bloc 15 - Partie vides (coulis)	Blocs avec déchets stockés
Valeurs initiales	51 764	73 150	-	118 041
Bloc 15	-	-	+10 774	+6 166
Déstockage 0%	-	-	-	-
Valeurs recalculées, 0%	51 764	73 150	10 774	124 207
Déstockage 56%-93%	-	+3 388	-	-3 388
Valeurs recalculées, 93%	51 764	76 538	10 774	120 819

Tableau 5-2 : Volumes initiaux en fonction des hypothèses de déstockage.

Pour les parties de stockage décrites en Tableau 5-2, l'évolution du volume de vides à partir du volume initial défini ci-dessus est calculée en utilisant l'évolution des vides calculée à l'aide du modèle local correspondant. Bien évidemment, ce calcul n'est pas fait pour la partie vide du stockage remblayée par les havrits, ce matériau étant supposé avoir une porosité nulle. Le Tableau 5-3 regroupe pour chaque partie du stockage le modèle local qui lui correspond.

Evolution normalisée des vides (en fonction du volume initial)	Galeries de service	Bloc 15 - Partie vides (coulis)	Blocs avec déchets stockés
Modèle local	Section 2D perpendiculaire aux voies doubles	Croisement de 2 galeries de stockage remplies par le coulis	Croisement de 2 galeries de stockage remplies par les déchets
Remblayage des seuls blocs vides avec les havrits	Figure 5-5	Figure 5-4	Figure 5-6
Remblayage des blocs vides et des galeries de service avec les havrits	-	Figure 5-4	Figure 5-6

Tableau 5-3 : Modèle local et courbe d'évolution des vides correspondant au trois parties du stockage.

Finalement, l'évolution du volume total de vides dans le stockage est obtenue par sommation des trois évolutions de volumes de vides ainsi calculées sur les trois parties du stockage.

5.2.1. Résultats pour les deux scénarios de déstockage et les deux scénarios de remblayage avec les havrits

Les évolutions du volume de vides global du stockage et du annuel taux de fermeture des vides ($\Delta V/an$) sont présentées de la Figure 5-7 à la Figure 5-10 pour les deux scénarios de déstockage pris en compte (soit, déstockage 0% et déstockage 56%-93%) et pour les deux scénarios de remblaiement avec les havrits (soit, les blocs vides seulement, et « les blocs vides + les galeries de service »). Globalement ces résultats montrent :

- des évolutions très similaires pour les deux hypothèses de déstockage considérées. On note toutefois que le scénario 56%-93% amène à un volume des vides légèrement moins important, l'allée déstockée étant comblée par des havrits à porosité nulle ;
- une différence très importante au niveau du volume de vides du stockage pour les deux scénarios de remblaiement : à 1 000 ans, le volume des vides est d'environ 45 000 m³ dans le cas d'un remplissage des galeries d'accès par le coulis, tandis que ce volume est réduit de plus de deux fois (20 000 m³) dans le cas d'un remplissage par des havrits. On notera que dans notre étude précédente, le même volume à 1 000 ans était de l'ordre de 75 000 m³, les blocs vides étant supposés remplis par le coulis de cendres volantes ;
- la faible différence entre les deux solutions de remblayage en termes de taux de fermeture du stockage. En effet le coulis utilisé pour le remblayage des tunnels d'accès présente des variations de volume avec le temps faibles par rapport aux déchets. La variation des volumes de vides du stockage est donc contrôlée principalement par l'évolution des blocs stockés, d'autant plus qu'en termes de volume initial (Tableau 5-2), les blocs stockés représentent la plupart du volume du stockage.

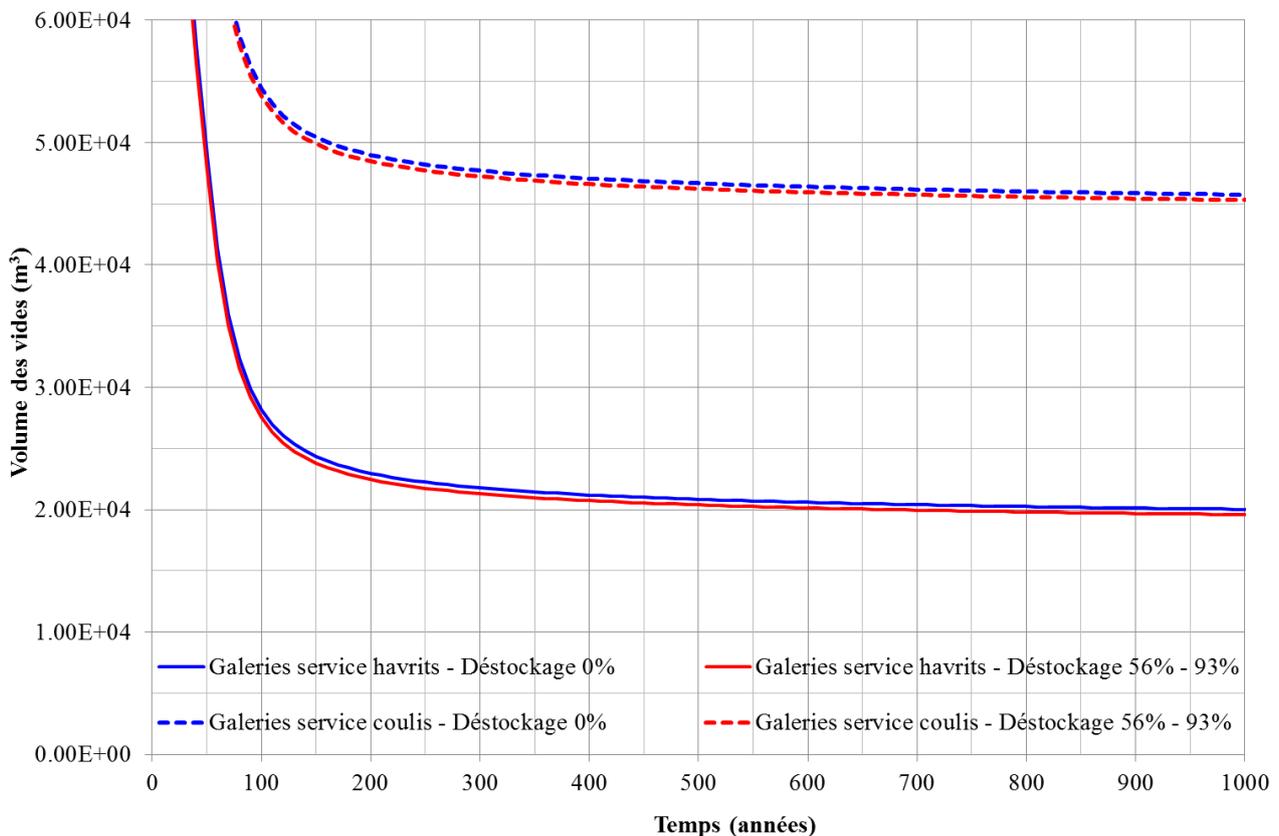


Figure 5-7 : Evolution du volume de vides dans le stockage en fonction des hypothèses de déstockage et de remblayage avec havrits, sur les 1 000 premières années.

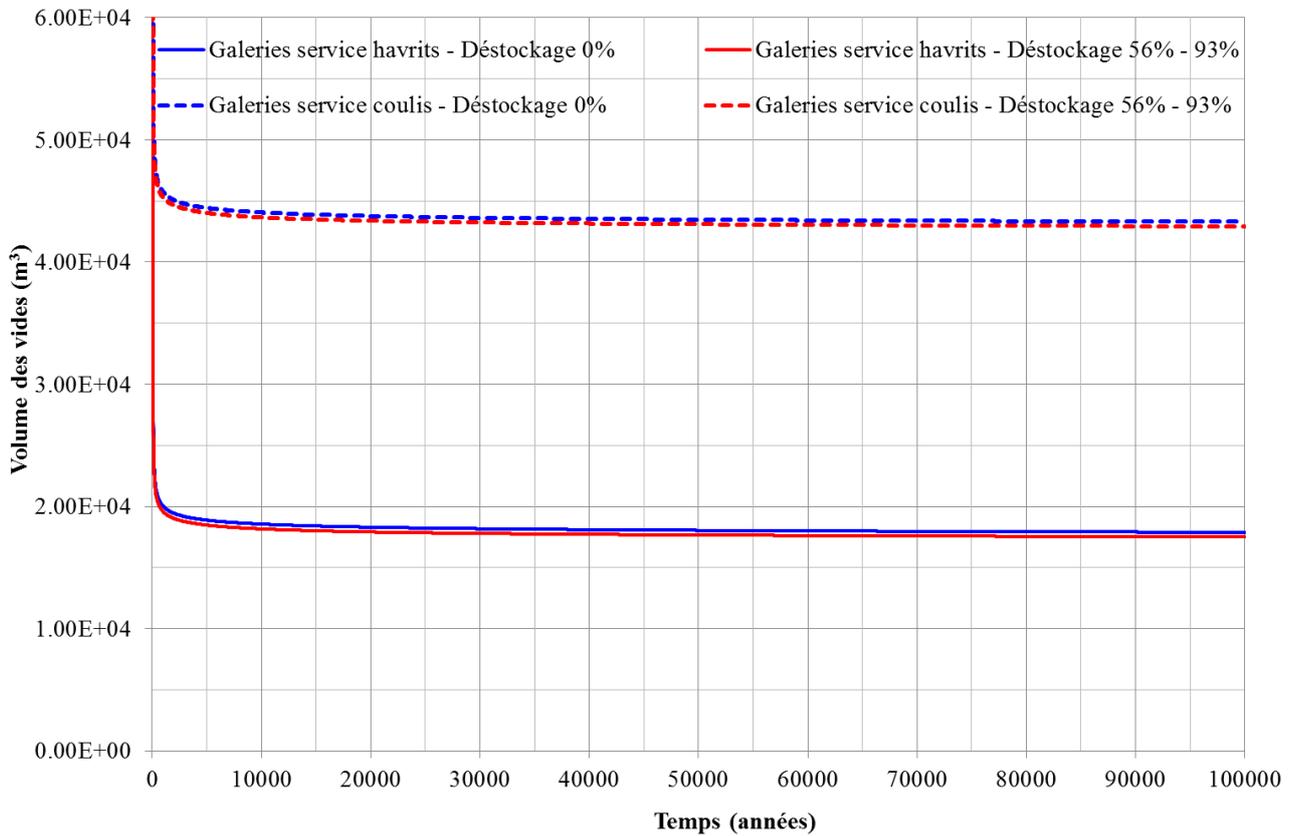


Figure 5-8 : Evolution du volume de vides dans le stockage en fonction des hypothèses de déstockage et de remblayage avec havrits, sur 100 000 ans.

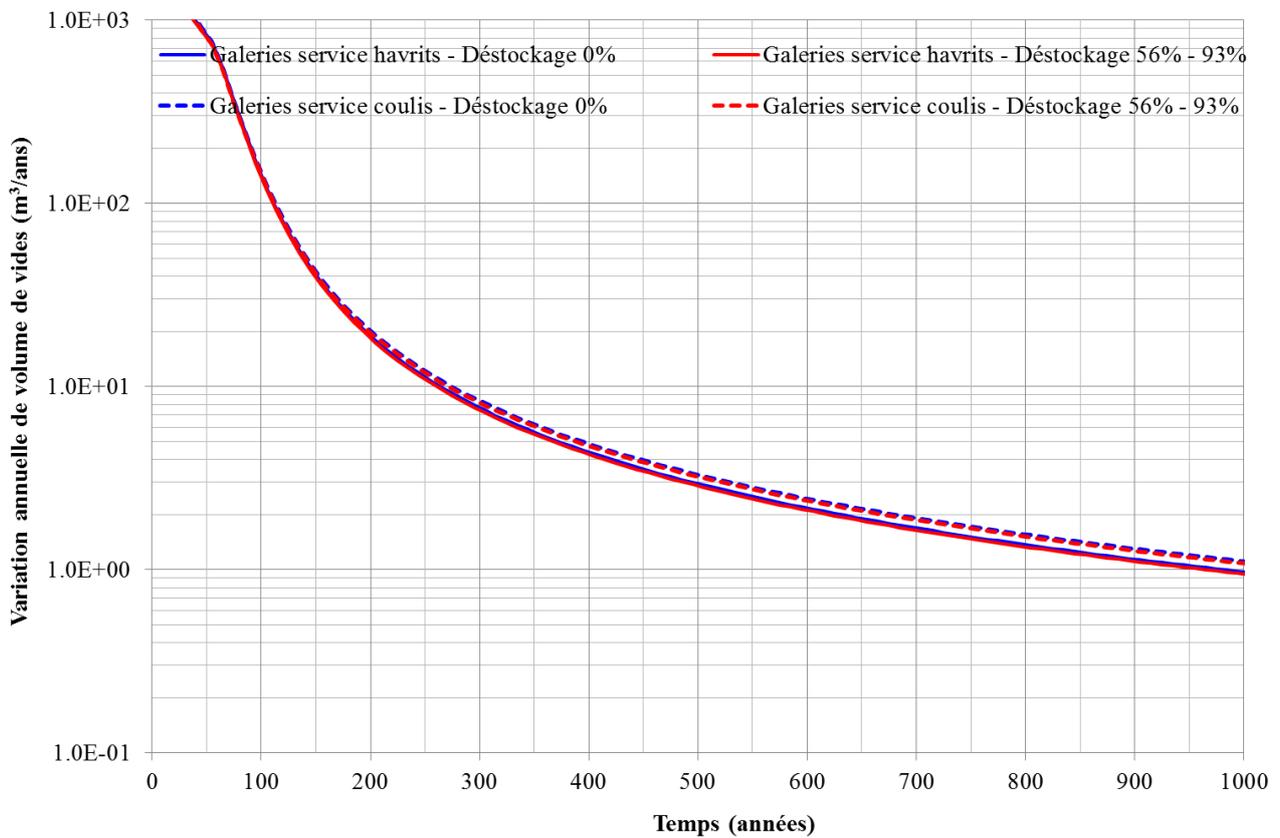


Figure 5-9 : Taux de fermeture des vides (m³/an) en fonction des hypothèses de déstockage et de remblayage avec havrits, sur les 1 000 premières années.

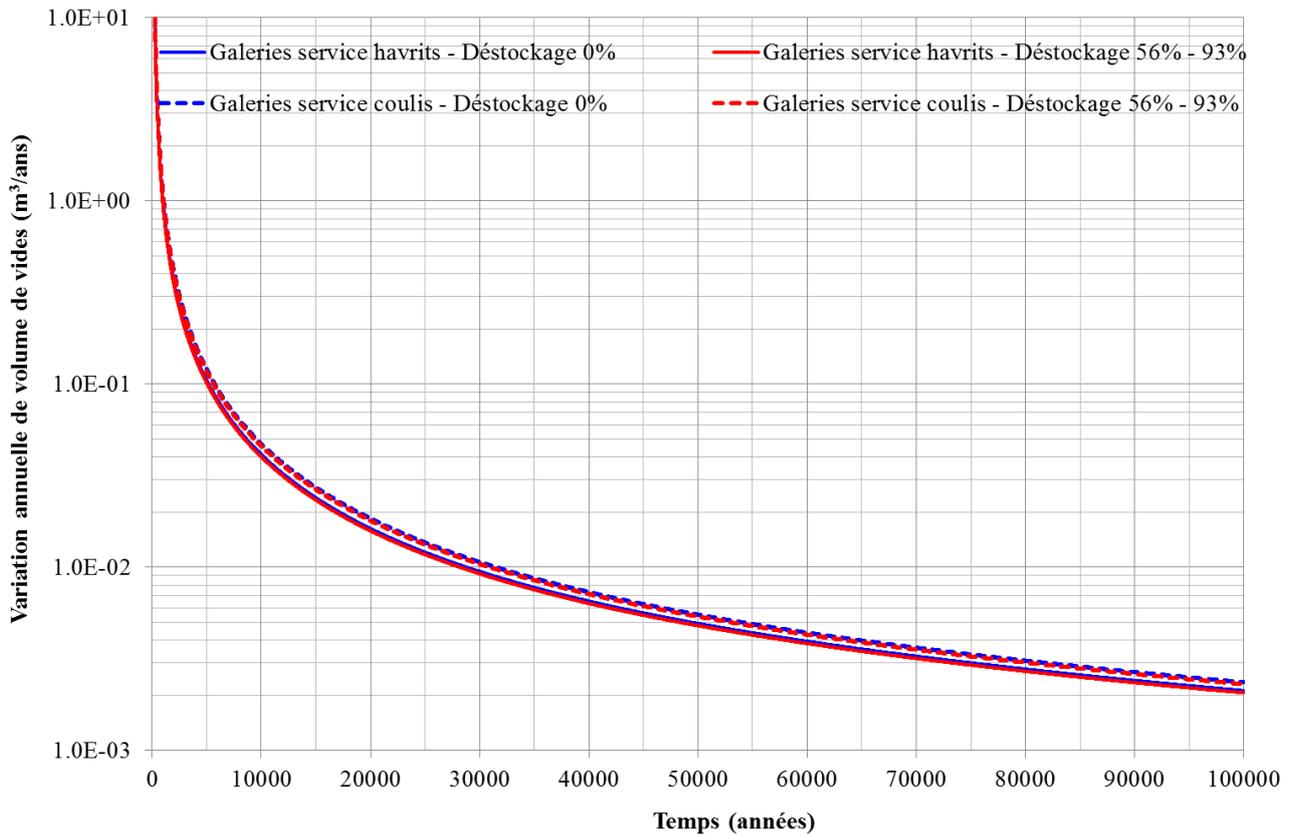


Figure 5-10 : Taux de fermeture des vides (m³/an) en fonction des hypothèses de déstockage et de remblayage avec havrits, sur 100 000 ans.

5.2.2. Estimation de la date d'envoyage du stockage

Les évolutions ainsi obtenues permettent de déterminer la date à laquelle le stockage sera complètement envahi par la saumure. Elle dépend du volume de vides encore existants dans le stockage (calculé dans les paragraphes précédents pour les deux scénarios de déstockage), du moment où la saumure sera remontée jusqu'au niveau des barrages, et de son débit entrant à travers les barrages, ceux-ci étant fonction de la typologie de barrage. Ces données sont disponibles pour les 2 cas de remontée de la saumure décrits en Paragraphe 4 et sont résumées dans le Tableau 5-4.

Hypothèse de remontée de la saumure	1	2
Description	Référence INERIS	Remontée moins rapide
Débits d'arrivée de saumure (m ³ /an)	105 000	58 000
Arrivée de la saumure au stockage (années)	240	421
Arrivée de la saumure au niveau de la nappe (années)	304	505
Débit permanent (m³/an)	13,55	13,55

Tableau 5-4 : Temps et débits d'envoyage du stockage pour les 2 cas de remontée de la saumure.

En comparant l'évolution du volume d'eau qui entre dans le stockage avec l'évolution du volume de vides, on peut déduire le temps nécessaire pour l'envoyage complet du stockage, donné par la date à laquelle les deux courbes d'évolution « volume d'eau entré » et « volume des vides » se croisent. Les résultats sont montrés en Figure 5-11 pour les deux scénarios de déstockage et les deux scénarios de remblayage avec les havrits. Le Tableau 5-5 fournit les différents temps d'envoyage ainsi calculés.

Envoyage du stockage (ans)	Déstockage 0%		Déstockage 56%-93%	
	1	2	1	2
Hypothèse de remontée de la saumure				
Galeries de service havrits	1 730	1 920	1 700	1 890
Galeries de service coulis	3 585	3 780	3 555	3 750

Tableau 5-5 : Temps d'envoyage du stockage pour les 2 cas de remonté de la saumure et les deux options de déstockage.

La différence en termes de temps d'envoyage pour les deux scénarios de déstockage reste marginale et de l'ordre de 30 ans (plus précoce pour le cas d'un déstockage 56%-93%, le volume des vides du stockage étant légèrement plus faible). On observe également que le remblayage des galeries d'accès par les havrits raccourcit la durée de l'envoyage d'environ 1 850 ans par rapport à un remplissage par le coulis de cendres volantes.

Pour donner une comparaison, les calculs de l'étude précédente pour le cas des barrages en bentonite (avec la même perméabilité) avaient fourni des dates d'envoyage de l'ordre de 5 800 ans, les vides du stockage accessible à la saumure étant plus importantes à cause de l'hypothèse de remplissage des blocs vides par le coulis.

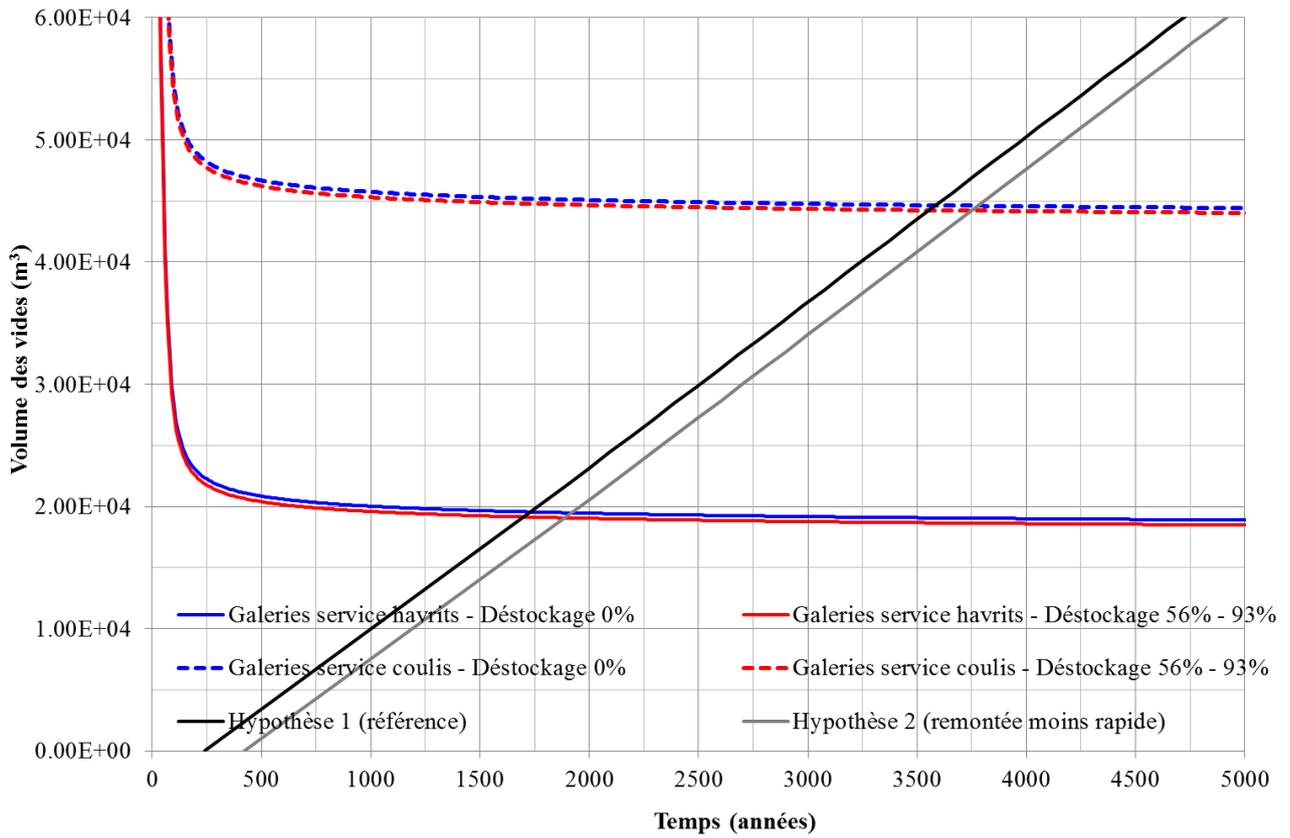


Figure 5-11 : Evolution du volume des vides et de la saumure à l'intérieur du stockage.

6. EVOLUTION DU STOCKAGE APRES L'ENNOYAGE

Une fois le stockage entièrement envahi par la saumure, celle-ci va monter en pression sous deux effets combinés : d'une part, un flux entrant qui va peu à peu s'annuler (lorsqu'il y aura équilibre des pressions entre le stockage et le reste des travaux miniers), et d'autre part la réduction du volume des vides dans le stockage.

Les résultats présentés dans le paragraphe 5.2.2 permettent d'obtenir les dates auxquelles le stockage sera complètement noyé. De nouvelles simulations sont donc lancées sur les modèles locaux, en tenant compte d'une pression à l'intérieur des excavations équivalente à la pression de la saumure, à partir des temps de fluage indiqués ci-dessus.

6.1. Effet de la saumure sur la fermeture, modèles locaux

La pression de la saumure est simulée à partir de la date d'ennoyage du stockage par l'introduction d'une courbe d'évolution des pressions interstitielles dans les déchets et dans le coulis.

Les débits de sortie ont un ordre de grandeur si faible que la perte de charge qu'ils induisent dans les barrages est négligeable. La pression dans le stockage ne dépasse donc pas la pression hydrostatique de la saumure à l'extérieur du stockage, calculée de la façon suivante :

$$p_{saumure,max} = (h_{eau} \cdot \rho_{eau} + h_{saumure} \cdot \rho_{saumure}) \cdot 9,81 = 5,89 \text{ MPa} \quad (7)$$

Où h_{eau} et $h_{saumure}$ sont respectivement la hauteur d'eau (300 m) et de saumure (250 m) et ρ_{eau} et $\rho_{saumure}$ les masses volumiques de l'eau (1 000 kg/m³) et de la saumure (1 200 kg/m³).

Les évolutions obtenues sont montrées en Figure 6-1 et en Figure 6-2 pour les deux hypothèses de remblayage avec les havrits de sel. Ces courbes sont calculées en considérant une pression nulle au moment de l'ennoyage (dates listées en Tableau 5-5), puis une variation de la pression dépendant du module volumique de la saumure (2 GPa) ainsi que de la variation de vides du stockage selon la relation suivante :

$$\Delta p_{saumure} = K_{saumure} \frac{\Delta V_{vides}}{V_{vide}} \quad (8)$$

Logiquement, l'augmentation de la pression dans le stockage de sa valeur initiale à la valeur maximale de 5,89 MPa est plus lente dans le cas d'un remblayage des galeries d'accès avec le coulis, car la date d'ennoyage étant repoussée plus loin dans le temps, la variation des vides du stockage est alors moins rapide.

La variation des vides prise en compte ici est déduite des calculs précédents pour la détermination de la date d'ennoyage (calculs sans la prise en compte de la saumure). En réalité, la variation à prendre en compte dans la formule devrait plutôt être celle des calculs avec présence de la saumure dans les tunnels de stockage. Nous verrons ci-dessous que la présence de la saumure induit globalement une diminution de la vitesse de convergence. L'hypothèse utilisée est donc pessimiste.

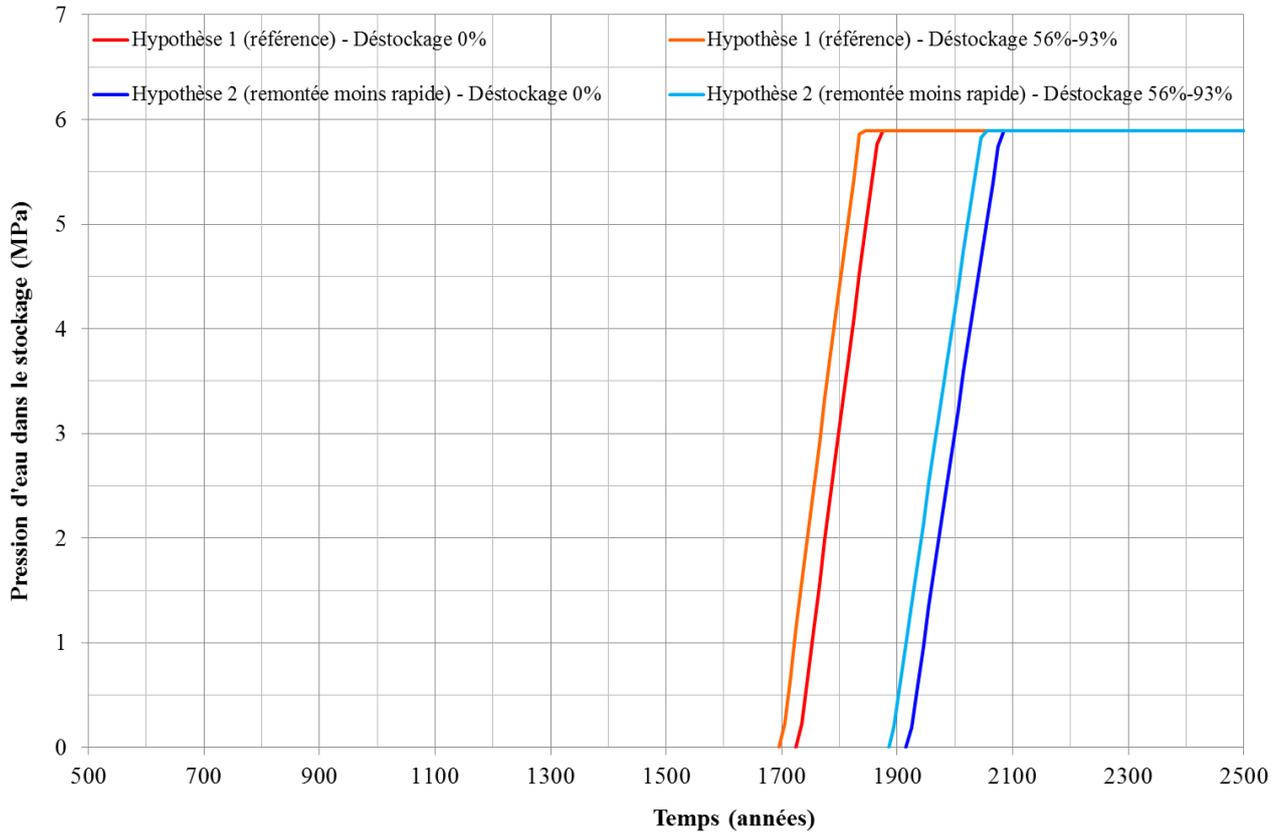


Figure 6-1 : Evolution de la pression d'eau dans le stockage en fonction de l'hypothèse de remontée de la saumure et du déstockage, pour le cas de remblayage des galeries d'accès avec les havrils de sel.

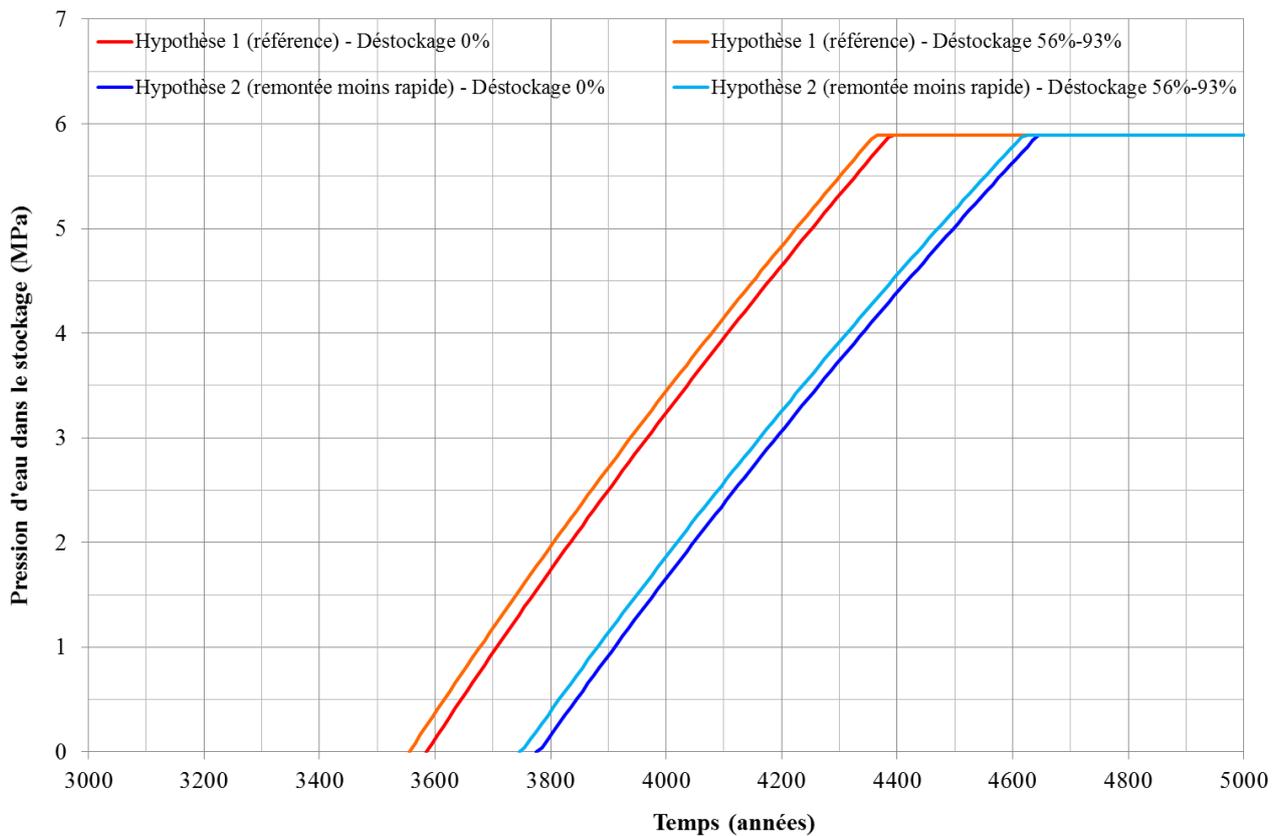


Figure 6-2 : Evolution de la pression d'eau dans le stockage en fonction de l'hypothèse de remontée de la saumure et du déstockage, pour le cas de remblayage des galeries d'accès avec le coulis.

Les résultats des nouvelles simulations sur les modèles locaux sont montrés de la Figure 6-3 à la Figure 6-5 en termes de l'évolution normalisée du volume des vides par rapport au volume initial des tunnels du modèle. Les évolutions obtenues précédemment sans prendre en compte l'effet de la saumure sont aussi montrées sur les graphes. Afin de limiter le nombre de figures à montrer et compte tenu des intervalles de temps très resserrés obtenus pour les différentes configurations étudiées, nous ne donnons ici que l'évolution pour la configuration suivante, correspondant à une date d'ennoyage de 3 555 ans :

- Hypothèse 1 d'arrivée de la saumure (référence INERIS) ;
- Remblayage des galeries d'accès par le coulis ;
- Déstockage 56%-93%.

Les autres configurations donnent des évolutions similaires, seulement décalées dans le temps en fonction de la date d'ennoyage du stockage.

La prise en compte de la pression de la saumure modifie les contraintes effectives à l'intérieur du tunnel. Le résultat est une accélération de la vitesse de fermeture du stockage dans les parties remplies par le coulis de remplissage (Figure 6-3 et Figure 6-4). Ce résultat est logique. En effet, si on considère le matériau à l'intérieur du tunnel avant l'ennoyage, il n'est pas soumis à une compression isotrope. Il est chargé par le toit du tunnel ainsi que par les parois verticales de façon presque isotrope alors qu'il subit une contrainte nettement plus faible le long des axes des tunnels. Au moment auquel l'eau entre en jeu, les contraintes effectives sont réduites, alors que le déviateur des contraintes ne se modifie pas. Le résultat est un état de contraintes qui dépasse le critère de plasticité. Des déformations plastiques des zones du coulis sont donc entraînées, causant une accélération de la fermeture de ces galeries. Dans le cas d'une pression de la saumure appliquée à partir de 3 555 ans cela a lieu à environ 4 200 ans, soit pour une valeur de la pression d'environ 5 MPa.

Dans la partie du stockage remplie par les déchets on observe une diminution de la vitesse de fermeture du tunnel (Figure 6-5). Cela s'explique en considérant le modèle de comportement de Cam-Clay utilisé pour la modélisation des déchets. En effet, ce modèle considère une compaction volumique fonction de la valeur de la pression moyenne effective, p' . Or, au moment auquel une pression d'eau différente de zéro commence à se développer dans les déchets, la pression moyenne p' est réduite, ce qui contrecarre son augmentation à cause du fluage du sel. En conséquence, la réduction de volume des déchets (et donc des vides liés à leur porosité) est nettement ralentie par rapport aux simulations où la pression de la saumure n'est pas prise en considération.

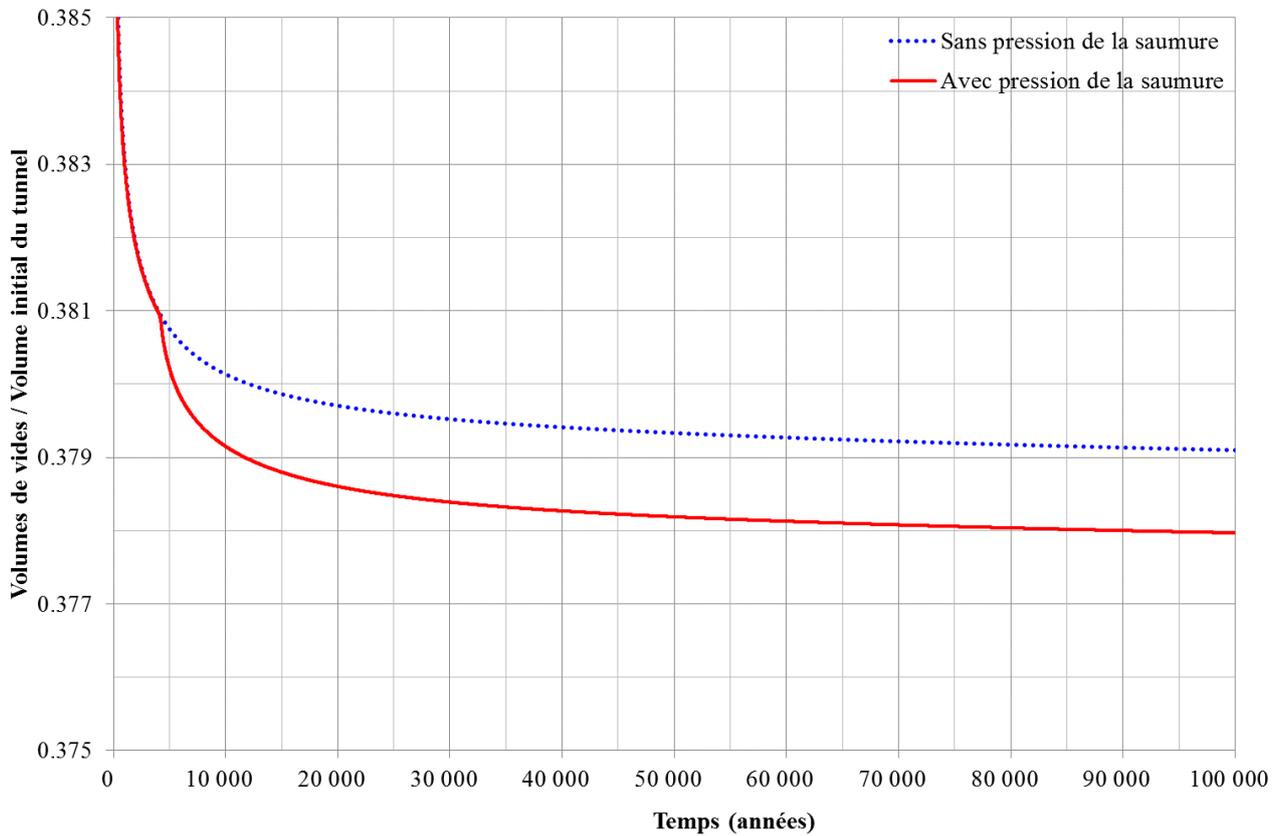


Figure 6-3 : Modèle 3D de croisement des galeries des blocs de stockage remplis par le coulis. Evolution du volume des vides sur 100 000 ans, sans et avec la prise en compte de la pression de la saumure à partir de 3 555 ans.

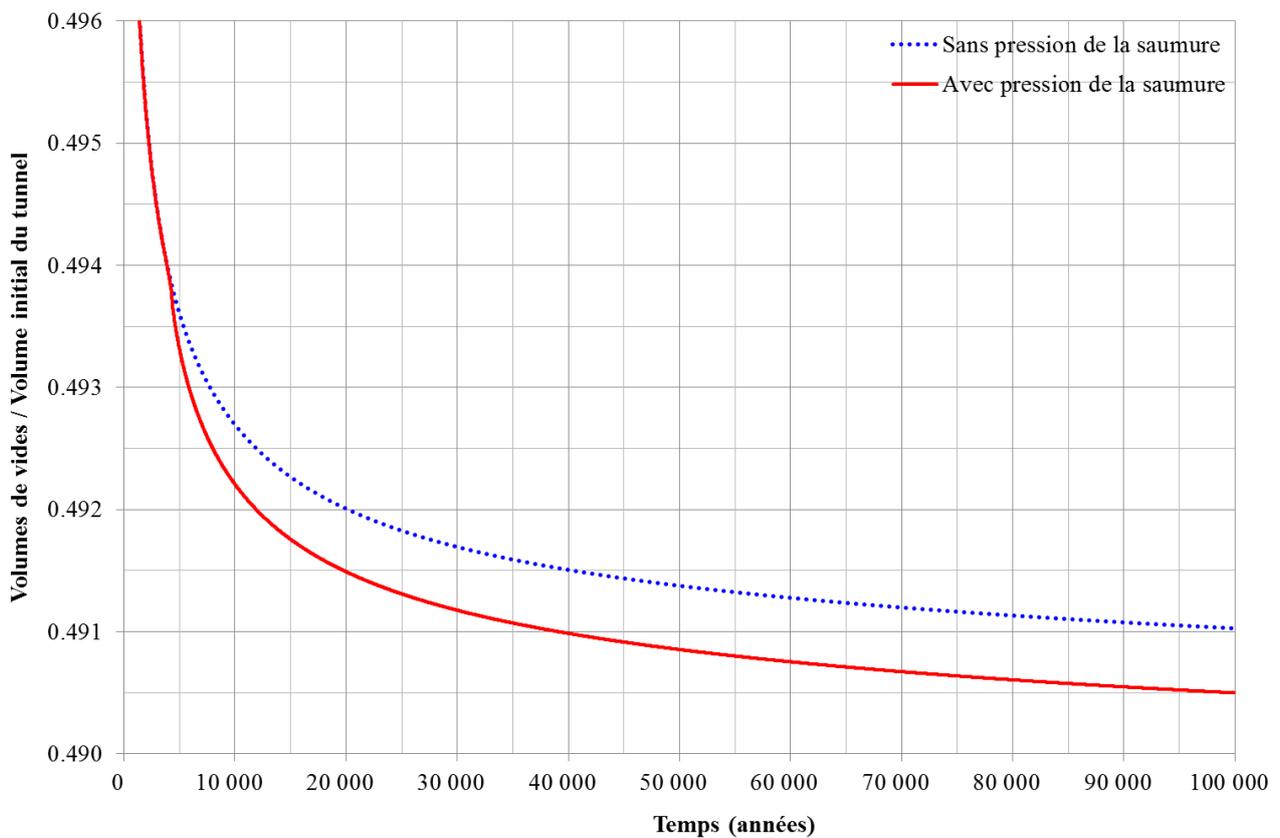


Figure 6-4 : Modèle 2D des voies doubles d'accès au stockage. Evolution du volume des vides sur 100 000 ans, sans et avec la prise en compte de la pression de la saumure à partir de 3 555 ans.

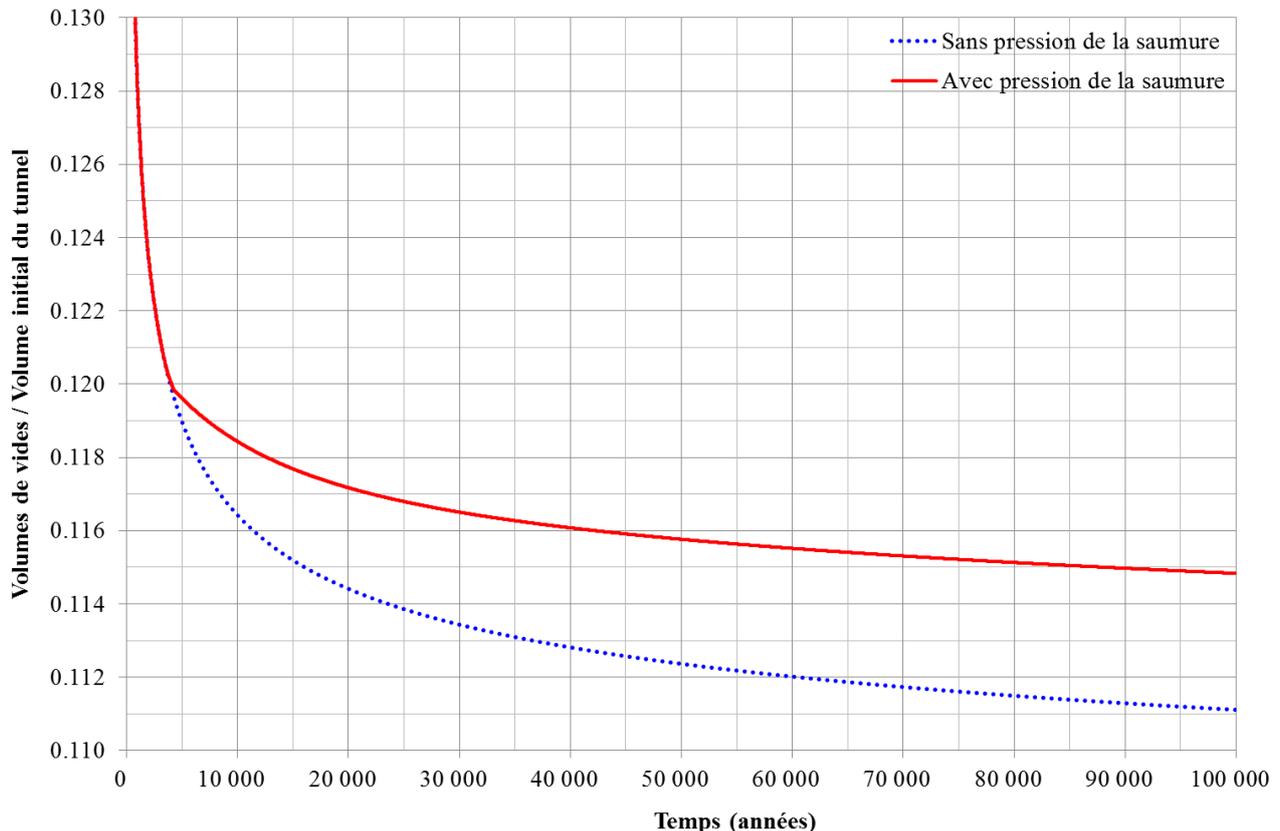


Figure 6-5 : Modèle 3D de croisement des galeries des blocs de stockage remplis par les déchets. Evolution du volume des vides sur 100 000 ans, sans et avec la prise en compte de la pression de la saumure à partir de 3 555 ans.

6.2. Evaluation du flux potentiel de saumure contaminée à l'extérieur des barrages

Les résultats obtenus sur les modèles locaux avec effet de la pression de la saumure sont utilisés pour déterminer le taux annuel de fermeture du stockage. Ce calcul est fait en prenant en compte pour les 8 cas définis (deux hypothèses d'arrivée d'eau, deux solutions de remblayage des galeries d'accès, deux scénarios de déstockage) les résultats avec pression de la saumure à partir de la date d'ennoyage du stockage. L'évolution du volume total de vides dans le stockage est obtenue comme la combinaison des fermetures des différentes galeries le composant.

Au moment de l'ennoyage complet du stockage, les barrages sont remplis de saumure « saine », non contaminée. L'expulsion de la saumure contaminée à l'extérieur des barrages nécessite donc le remplacement de ce fluide « sain » par de la saumure contaminée. Cela introduit un décalage important de la date de sortie de la saumure, qui dépend de la vitesse de fermeture du stockage ainsi que du volume de fluide que les barrages peuvent contenir. Cela représente environ 165 m^3 pour le cas des barrages en béton spécial en considérant un volume de barrages d'environ $3\,300 \text{ m}^3$ avec une porosité de 5% (valeur indiquée par StocaMine). En supposant que le front d'avancement de la saumure contaminée est uniforme dans l'ensemble des barrages (advection pure), il faudrait donc une réduction des vides du stockage de 165 m^3 à partir de la date d'ennoyage pour que la saumure contaminée arrive aux faces externes des barrages. Bien entendu, le front d'avancement de la saumure contaminée dans les barrages n'est pas uniforme, et une partie des contaminants arrivera avant l'envahissement total du barrage, en particulier à cause des phénomènes de diffusion. Mais le débit sortant de polluants « en avance sur l'advection » ne pourra être que beaucoup plus faible que celui dû à l'advection.

Les valeurs de porosité données ci-dessus représentent des valeurs initiales. Suite à la mise en compression du barrage par le fluage du sel, le volume des vides internes dans les barrages est vraisemblablement réduit par rapport à la valeur initiale. Il reste que cette réduction ne peut être que faible, compte tenu de la raideur des matériaux mis en œuvre pour la construction des barrages.

Le calcul de la propagation du front de contaminant depuis le lieu de dépôt jusqu'au barrage, puis au travers des barrages, est au-delà du périmètre de cette étude. Nous avons donc considéré une hypothèse pessimiste, considérant que le débit total d'entrée de saumure polluée dans les barrages sortait effectivement des barrages après le passage de la moitié de leur volume de vides, soit après une réduction du volume des vides du stockage de 82,5 m³. Par ailleurs, il n'est pas tenu compte ici du temps nécessaire pour que la saumure polluée migre du lieu de dissolution vers le barrage le plus proche.

Les taux de fermeture du stockage calculés à la date correspondant à la réduction des vides décrite ci-dessus représentent le flux potentiel de saumure en sortie du stockage, avec les hypothèses suivantes :

- La saumure est considérée comme incompressible. De fait, son module volumique (de l'ordre de 2 GPa) est tel que « l'emmagasinement » dû à la compression du fluide reste faible. Une réduction du volume du stockage donne donc lieu à l'expulsion d'un volume égal de saumure (hypothèse légèrement pessimiste);
- La perte de charge de la saumure au travers des barrages en bentonite peut être considérée comme négligeable. En effet les calculs réalisés sur la vitesse de remplissage du stockage montrent qu'un différentiel de pression d'environ 6 MPa produit au travers des barrages un débit stabilisé, de 13,55 m³/an en entrée dans le stockage. Comme le montre le Tableau 6-1, le taux de fermeture au moment de la sortie de la saumure polluée est inférieur dans tous les cas à 0,2 m³/an. La perte de charge due aux barrages peut donc être estimée inférieure à 90kPa.

6.3. Fermeture du stockage après ennoyage

L'évolution du volume total de vides et le taux annuel de variation du volume de vides sont illustrés en Figure 6-6 et en Figure 6-7 pour le cas d'un ennoyage à la date de 3 555 ans, soit pour le cas :

- Hypothèse 1 d'arrivée de la saumure (référence INERIS) ;
- Remblayage des galeries d'accès par le coulis ;
- Déstockage 56%-93%.

Les autres cas ne sont pas montrés dans la suite afin d'améliorer la lisibilité du rapport, leurs évolutions restant globalement similaires à celles données en Figure 6-6 et Figure 6-7.

La pression réduit la vitesse globale de fermeture du stockage. En effet, comme le montrent les figures précédentes pour les modèles locaux, la pression induit une réduction du taux de fermeture des vides dans les déchets plus importante que l'augmentation correspondante dans le coulis due au développement de la plasticité. Comme le volume initial des tunnels stockés avec les déchets est nettement plus important que le volume des tunnels comblés avec le coulis, il vient que l'arrivée de la saumure ralentit globalement la fermeture du stockage.

A partir de ces courbes, la date de sortie de la saumure contaminée est calculée comme le moment auquel la réduction cumulée des vides est de 82,5 m³ par rapport au volume des vides au moment de l'ennoyage complet du stockage.

Les résultats de ce calcul sont fournis en Tableau 6-1 pour l'ensemble des 8 cas de calcul. L'analyse de ces résultats montre que :

- La prise en compte d'une arrivée moins rapide de la saumure au niveau des barrages permet de ralentir la phase d'ennoyage d'environ 200 ans, ce qui se traduit par une sortie plus tardive de la saumure polluée d'environ 240 ans. Le taux de fermeture du stockage se réduisant dans le temps, ceci réduit le débit en sortie de 17% pour le cas d'un remblayage des galeries d'accès avec les havrits et de 8% pour le cas d'un remblayage avec le coulis de cendres volantes.
- Si on compare les résultats pour les deux solutions de remblayage des galeries d'accès envisagées par StocaMine, on observe que la solution comportant le remplissage avec le coulis permet de retarder la sortie de la saumure polluée d'environ 2400-2500 ans, avec des flux potentiel réduits de 25-30%.
- Le déstockage n'a qu'un effet marginal sur la date et le débit de sortie de la saumure. Bien évidemment, le flux massique de mercure sortant du stockage dépend, lui, directement du pourcentage de déstockage.

Hypothèse d'arrivée de la saumure	1 – Référence INERIS	2 – Remontée moins rapide
Arrivée de la saumure devant les barrages (ans)	240	421
Débit d'arrivée de la saumure (m ³ /an)	105 000	58 000
Débit entant en état permanent (m ³ /an)	13,55	13,55

Galeries d'accès remplies avec havrits	Déstockage		Déstockage	
	0%	56%-93%	0%	56%-93%
Date de fin de l'ennoyage du stockage (ans)	1 730	1 700	1 920	1 890
Volume de vides à l'ennoyage (m ³)	19 550	19 142	19 472	18 982
Date de sortie de la saumure contaminée (ans)	2 020	1 990	2 270	2 240
Flux de saumure contaminée sortant des barrages (m ³ /an)	0,191	0,191	0,158	0,158

Galeries d'accès remplies avec coulis	Déstockage		Déstockage	
	0%	56%-93%	0%	56%-93%
Date de fin de l'ennoyage du stockage (ans)	3 585	3 555	3 780	3 750
Volume de vides à l'ennoyage (m ³)	44 644	44 241	44 607	44 205
Date de sortie de la saumure contaminée (ans)	4 150	4 130	4 390	4 370
Flux de saumure contaminée sortant des barrages (m ³ /an)	0,131	0,128	0,121	0,118

Tableau 6-1 : Année et débit de sortie de la saumure contaminée pour les différents cas de calcul.

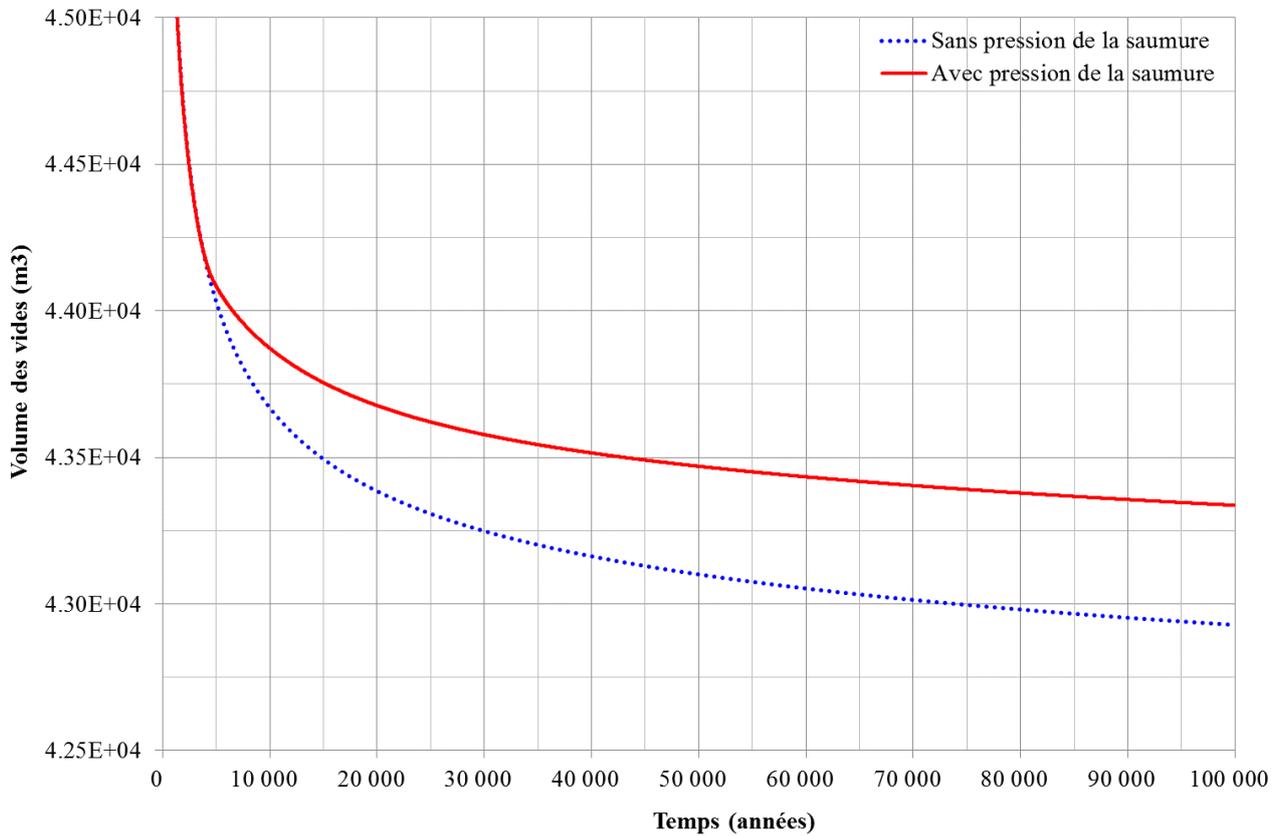


Figure 6-6 : Evolution du volume de vides du stockage dans le cas d'un ennoyage à partir de 3 555 ans.

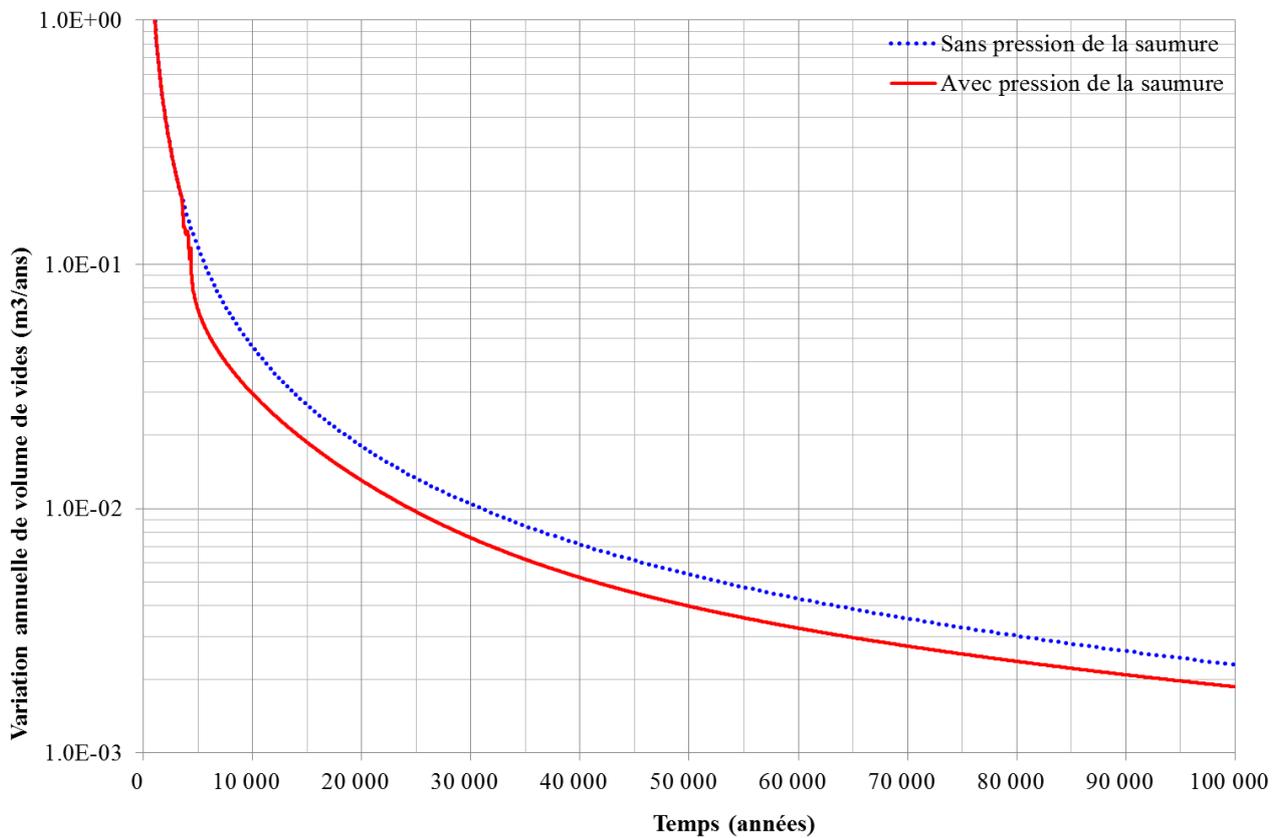


Figure 6-7 : Evolution de la variation annuelle du volume de vides du stockage dans le cas d'un ennoyage à partir de 3 555 ans.

6.4. Influence de la longueur des barrages

L'ensemble des résultats décrits dans cette note ont été obtenus en considérant des barrages de 5m de long. Cette valeur, reprise de nos études précédentes, a été choisie de manière à garder une continuité avec les travaux réalisés précédemment par ITASCA pour le stockage de Wittelsheim. Or, StocaMine indique que la géométrie retenue à ce jour comporte des barrages avec un noyau en béton spécial de 6m, confiné par deux appuis en béton standard de 3m de long. Ce changement de longueur peut avoir un effet non négligeable sur les résultats des calculs du fait :

- de la réduction du débit de saumure entrant dans le stockage, et donc du retardement de la date d'envoyage ;
- du plus grand volume de saumure saine contenu dans les vides du barrage à remplacer par la saumure polluée.

Une étude supplémentaire a donc été réalisée avec la nouvelle géométrie des barrages pour le cas considérant l'hypothèse de référence de l'INERIS d'arrivée de la saumure et le remblayage des galeries d'accès par les havrits (soit, la condition la plus pessimiste pour le stockage).

Les résultats obtenus sont résumés en Tableau 6-2 et montrent que le débit d'entrée de la saumure est réduit d'environ 15%, avec un retard de 240 ans et 430 ans respectivement pour la date d'envoyage et la date de sortie prévue de la saumure polluée. Ceci se traduit, *in fine*, par une réduction du débit en sortie du stockage d'environ 25% (soit 0,143 m³/an contre 0,191 m³/an obtenu avec des barrages de 5m de long).

Arrivée de la saumure : Hypothèse de référence de l'INERIS	Barrage, L=5m	Barrage, L=6m
Arrivée de la saumure devant les barrages (ans)	240	
Débit d'arrivée de la saumure (m ³ /an)	105 000	
Débit entrant en état permanent (m ³ /an)	13,55	11,56 (-15%)

Galeries d'accès remplies avec havrits	Déstockage 0%	Déstockage 56%-93%	Déstockage 0%	Déstockage 56%-93%
	Date de fin de l'envoyage du stockage (ans)	1 730	1 700	1 970 (+240 ans)
Volume de vides à l'envoyage (m ³)	19 550	19 142	19 453	19 046
Date de sortie de la saumure contaminée (ans)	2 020	1 990	2 450 (+430 ans)	2 420 (+430 ans)
Flux de saumure contaminée sortant des barrages (m ³ /an)	0,191	0,191	0,143 (-25%)	0,143 (-25%)

Tableau 6-2 : Comparaison entre les résultats pour une longueur des barrages de 5m et de 6m (hypothèse de référence de l'INERIS de remontée de la saumure et remplissage des galeries de service avec les havrits de sel).

7. CONCLUSION

Les études antérieures réalisées par ITASCA dans le cadre du dossier de fermeture du stockage de Wittelsheim ont été conduites en considérant un remplissage des blocs vides par un coulis de cendres volantes comportant une porosité initiale de 69% et une porosité résiduelle à long terme. Le remplissage de cette porosité lors de la phase d'ennoyage du stockage permettait de retarder la sortie de la saumure polluée, et donc *in fine*, le débit de sortie, celui-ci étant relié directement au taux de fermeture des vides du stockage, lequel diminue avec le temps.

Compte tenu des contraintes techniques liées à la mise en œuvre d'un tel remplissage, StocaMine étudie actuellement une nouvelle solution de remblayage des blocs vides et des galeries d'accès avec des havrits de sel. Lors de la mise en place de ce matériau dans les tunnels, la porosité est estimée de l'ordre de 50%. Toutefois, à cause du comportement de fluage typique du sel, et de sa capacité de cicatrisation lorsqu'il est soumis à une contrainte de confinement, cette porosité se réduit rapidement, jusqu'à atteindre des valeurs faibles. L'IfG de Leipzig, intervenant en tierce-expertise du dossier de fermeture pour la partie géomécanique, estime qu'à l'échelle de l'ennoyage du stockage ce matériau doit être considéré comme un matériau à porosité nulle. Ceci se traduit par une date d'ennoyage plus précoce et par des flux de sortie de la saumure plus importants.

StocaMine a donc chargé ITASCA d'une reprise des calculs de l'étude précédente visant à considérer :

- deux scénarios différents de remplissage du stockage avec des havrits de sel : soit les seuls blocs vides, soit les blocs vides plus les galeries de service. Ce dernier cas constitue une hypothèse limite dans laquelle la porosité disponible à la saumure est limitée aux seuls blocs stockés et au coulis du Bloc 15 ;
- trois hypothèses de déstockage, avec un déstockage de 0%, 56% ou 93% des déchets mercuriels. Comme les deux déstockages 56% et 93% induisent le même volume de tunnels déstockés (soit le volume correspondant à une allée), ces deux hypothèses sont traitées dans ce rapport comme un seul cas de calcul, nommé 56%-93% ;
- deux hypothèses de remontée de la saumure au droit des barrages et ensuite au niveau de la nappe d'Alsace : l'hypothèse de référence indiquée par l'INERIS (105 000 m³/an) et une hypothèse moins conservative considérant une remontée moins rapide (58 000 m³/an).

Le travail exposé dans ce rapport utilise les résultats d'une étude précédente pour le calcul de la date d'ennoyage du stockage. Les hypothèses sur les propriétés des matériaux (sel, coulis, déchets REFIOM) et le débit de saumure traversant les barrages lors de la phase d'ennoyage restent les mêmes. En effet, bien que la nouvelle solution de confinement considère des barrages en béton spécial, ce matériau a la même perméabilité que la bentonite étudiée dans nos études précédentes et produit donc le même débit entrant.

Une première étape de simulation a permis d'obtenir l'évolution du stockage avant la mise en pression de la saumure, pour les différents cas de calculs. Il faut au minimum un peu moins de deux millénaires pour que les vides du stockage se remplissent (remblayage des galeries de service et des blocs vides avec havrits). Le remblayage des galeries de service par le coulis de cendres volantes fait passer ce délai à un peu plus de 3 500 ans. La différence entre ces dates est due au volume des vides du stockage, nettement moins important dans le cas où les galeries de service sont comblées par les havrits (moins de 20 000 m³, contre 45 000 m³ pour un remplissage avec coulis).

La montée en pression de la saumure dans le stockage, après la fin de l'envahissement, est due au flux entrant qui va peu à peu s'annuler, et surtout à la réduction du volume des vides dans le stockage. Elle est conditionnée par le module volumique de la saumure. Bien entendu, cette montée en pression a un effet – globalement retardant – sur le fluage du sel et donc sur les variations de volume des vides.

Une fois la saumure montée en pression, l'écoulement « vers l'extérieur » à travers les barrages est amorcé. La date de sortie de la saumure polluée peut être calculée à partir de la date d'ennoyage et du temps nécessaire pour « remplacer » la saumure saine contenue dans les barrages par la saumure polluée.

Les résultats des calculs montrent un débit en sortie compris entre 0,12 et 0,19 m³/an, selon les différentes hypothèses de remontée de la saumure et de remblayage avec havrits de sel prises en compte. Bien entendu, une remontée plus rapide raccourcit la phase d'ennoyage, et donne donc lieu à une sortie plus précoce et à des flux plus importants. De même pour le cas d'un remblayage des galeries d'accès par les havrits au lieu d'un remplissage par le coulis. Les dates de sortie sont estimées de l'ordre de 2 000 ans et 4 150 ans pour les deux scénarios de remblayage analysés et pour une remontée de la saumure selon l'hypothèse de référence de l'INERIS (respectivement 2 250 et 4 380 ans pour une remontée moins rapide).

Enfin, les calculs ont mis en évidence un effet négligeable des opérations de déstockage sur la date et le débit volumique de sortie de la saumure. Il reste que le déstockage du mercure donnera lieu à des flux massique de Hg directement proportionnels à la quantité restant dans le stockage et passée en solution dans la saumure.

L'ensemble de ces résultats ont été obtenus pour des barrages de fermeture de 5m de long. Nous avons vérifié qu'une augmentation de 20% de la longueur (soit des barrages de 6m) permet une réduction du débit d'entrée dans le stockage d'environ 15%. Cela se traduit par un retard de la date de sortie de la saumure polluée de 430 ans et donc, *in fine*, par une réduction du flux potentiel d'environ 25% (soit un débit de 0,143 m³/an).