

**Rapport
13R-001/A3**

5 mars 2013

StocaMine

***A l'attention de
Alain ROLLET et
Jacky ROMAN***

**Evaluation des flux potentiels de saumure
contaminée à partir du stockage de
Wittelsheim**

***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	16 janvier 2013
A2	Hypothèse de perméabilité des barrages plus réaliste Prise en compte améliorée de l'effet de la saumure Prise en compte de l'effet retard des barrages de bentonite sur la sortie de la saumure polluée	31 janvier 2013
A3	Ajout des résultats des simulations jusqu'à 4500 ans de fluage après l'excavation du stockage Ajout des résultats en termes de flux massique sortant des barrages Prise en compte des commentaires de StocaMine	5 mars 2013

Sommaire

1.	Références	10
2.	Introduction	11
3.	Comportement mécanique du sel	13
4.	Modèle pour la détermination de l'état de contraintes initial au voisinage de la zone de stockage	15
4.1.	Géométrie	15
4.2.	Conditions aux limites et initialisation des contraintes	17
4.3.	Exploitation des niveaux supérieur et inférieur	17
4.4.	Excavation de la zone de stockage	20
4.5.	Calage des paramètres de la loi de fluage : modèles locaux de convergence	26
4.6.	Résultats pour le modèle global : convergences et évolution de l'état de contraintes au-dessus du stockage	30
5.	Détermination de la vitesse de remplissage du stockage par la saumure	34
5.1.	Hypothèses	34
5.1.1.	Les différents cas de calculs	34
5.1.2.	Les propriétés et la géométrie	34
5.2.	Résultats	37
5.2.1.	Cas 1 : Vides résiduels 30%, 58 000 m ³ /an, barrage simple	37
5.2.2.	Cas 2 : Vides résiduels 30%, 22 000 m ³ /an, barrage simple	38
5.2.3.	Cas 3 : Vides résiduels 20%, 105 000 m ³ /an, barrage simple	40
5.2.4.	Cas 4 : Vides résiduels 30%, 58 000 m ³ /an, barrage double	41
6.	Simulation de la fermeture avant l'ennoyage	44
6.1.	Fermeture des différentes configurations de galeries	44
6.1.1.	Galeries vides	45
6.1.2.	Blocs de sel décollés du toit	48
6.1.2.1.	Modèle	48
6.1.2.2.	Propriétés des blocs de sel décollés	49
6.1.2.3.	Résultats	50
6.1.3.	Galeries remplies de déchets à 70%	53
6.1.3.1.	Modèle	53
6.1.3.2.	Propriétés des déchets	53
6.1.3.3.	Résultats	54
6.1.4.	Remplissage des tunnels avec du béton	57
6.1.4.1.	Modèle	57
6.1.4.2.	Propriétés du béton de remplissage	57
6.1.4.3.	Résultats	59
6.2.	Fermeture globale du stockage	61
6.2.1.	Première option de remplissage	63
6.2.2.	Seconde option de remplissage	65
6.2.3.	Troisième option de remplissage	66
6.3.	Estimation de la date d'ennoyage du stockage	68
7.	Evolution du stockage après l'ennoyage	71
7.1.	Effet de la saumure sur la fermeture, modèles locaux	71
7.2.	Evaluation du flux potentiel de saumure contaminée à l'extérieur des barrages en bentonite	74
7.3.	Fermeture du stockage après ennoyage total : cas 3	75
7.4.	Fermeture du stockage après ennoyage total : cas 1	79
7.5.	Flux massique des polluants sortant des barrages	82
8.	Conclusion	85
8.1.	Méthode, résultats intermédiaires	85

8.2. Retour sur les hypothèses considérées dans l'étude	86
8.3. Choix du remplissage	87
8.4. Flux de saumure polluée et de mercure	88

Liste des figures

Figure 4-1 : Géométrie du modèle global.	15
Figure 4-2 : Vue centrée sur la zone de stockage.	16
Figure 4-3 : Géométrie utilisée pour la modélisation du niveau d'excavation inférieur	16
Figure 4-4 : Géométrie utilisée pour la modélisation du niveau d'excavation supérieur	17
Figure 4-5 : Stockage StocaMine.....	17
Figure 4-6 : Module de Young en fonction de la réduction de volume des zones de vide.	19
Figure 4-7 : Coefficient de Poisson en fonction de la réduction de volume des zones de vide.	19
Figure 4-8 : Géométrie des galeries de la zone de stockage.	20
Figure 4-9 : Modélisations 2D utilisées pour évaluer l'influence de la finesse du maillage au voisinage de la galerie sur la convergence de cette dernière.....	21
Figure 4-10 : Comparaison de l'évolution de la convergence de la galerie avec le temps en fonction de la finesse du maillage, sur les premiers 500 ans. La ligne rouge correspond à l'évolution observée dans le cas de la galerie modélisée à l'aide d'une seule zone.	21
Figure 4-11 : Modèles utilisés pour évaluer l'influence de la finesse du maillage dans le cas de l'intersection de deux galeries de stockage.	22
Figure 4-12 : Modèles utilisés pour évaluer l'influence de la finesse du maillage dans le cas de l'intersection entre une galerie de stockage et les voies doubles d'accès au stockage.....	23
Figure 4-13 : Intersections de deux galeries de stockage. Comparaison de la convergence avec le temps pour un modèle finement maillé (en pointillé) et un modèle « à une zone ».	23
Figure 4-14: Intersections entre une galerie de stockage et une galerie d'accès double. Comparaison de la convergence avec le temps pour un modèle finement maillé (en pointillé) et un modèle « à une zone ».	24
Figure 4-15: Zones du modèle global pour lesquelles la méthode des contraintes horizontales est utilisée.....	24
Figure 4-16: Zones du modèle global au niveau du stockage pour lesquelles le paramètre « n » de la loi de Norton est initialisée à 4.125.	25
Figure 4-17 : Positions des points utilisés pour le calcul des convergences.....	25
Figure 4-18 : Zones au-dessus des parties ouest, centrale et est du stockage utilisées pour déterminer l'évolution des contraintes verticales au cours du temps.	26
Figure 4-19 : Modèles mis en œuvre pour la simulation des convergences. De gauche à droite : partie ouest, partie centrale et partie est.....	26
Figure 4-20 : Position des galeries pour lesquelles des simulations sont prévues.....	27
Figure 4-21 : Position des points sur lesquels sont réalisées les mesures des convergences.....	27
Figure 4-22 : Résultats obtenus avec le modèle simulant la partie ouest du stockage.	28
Figure 4-23 : Résultats obtenus avec le modèle simulant la partie centrale du stockage.	29
Figure 4-24 : Résultats obtenus avec le modèle simulant la partie est du stockage.	29

Figure 4-25 : Réduction de volume dans les éléments représentant le niveau d'exploitation inférieur datant des années 40 et 60.	30
Figure 4-26 : Module de Young (en MPa) dans les éléments représentant le niveau d'exploitation inférieur datant des années 40 et 60.	30
Figure 4-27 : Réduction de volume dans les éléments représentant le niveau d'exploitation supérieur datant des années 50.	31
Figure 4-28 : Module de Young (en MPa) dans les éléments représentant le niveau d'exploitation supérieur datant des années 50.	31
Figure 4-29 : Comparaison entre les convergences expérimentales et celles obtenues avec FLAC3D après 10 ans de fluage (valeurs en %/an).	32
Figure 4-30 : Evolution des contraintes verticales avec le temps sur une période de 4500 ans, 20 m au-dessus des galeries de stockage.	33
Figure 5-1 : Modèle d'un barrage de longueur 5 m et de hauteur 5m. Tranche d'épaisseur 1m.	36
Figure 5-2 : Modèle d'un barrage de longueur 10 m et de hauteur 5m. Tranche d'épaisseur 1m.	36
Figure 5-3 : Cas 1, historique de la pression en face externe (m).	37
Figure 5-4 : Cas 1, historique du volume de saumure dans le barrage (m3).	38
Figure 5-5 : Cas 1, historique du volume total d'eau qui a pénétré dans le barrage (noir) et du volume total d'eau qui est sorti du barrage par sa face interne (rouge). Volumes en m ³	38
Figure 5-6 : Cas 2, historique de la pression en face externe (m).	39
Figure 5-7 : Cas 2, historique du volume de saumure dans le barrage (m3).	39
Figure 5-8 : Cas 2, historique du volume total d'eau qui a pénétré dans le barrage (noir) et du volume total d'eau qui est sorti du barrage par sa face interne (rouge). Volumes en m ³	40
Figure 5-9 : Cas 3, historique de la pression en face externe (m).	40
Figure 5-10 : Cas 3, historique du volume de saumure dans le barrage (m3).	41
Figure 5-11 : Cas 3, historique du volume total d'eau qui a pénétré dans le barrage (noir) et du volume total d'eau qui est sorti du barrage par sa face interne (rouge). Volumes en m ³	41
Figure 5-12 : Cas 4, historique de la pression en face externe (m).	42
Figure 5-13 : Cas 4, historique du volume de saumure dans le barrage (m3).	42
Figure 5-14 : Cas 4, historique du volume total d'eau qui a pénétré dans le barrage (noir) et du volume total d'eau qui est sorti du barrage par sa face interne (rouge). Volumes en m ³	43
Figure 6-1 : Evolution des contraintes verticales à 20 m au-dessus du stockage. La ligne en pointillés représente l'évolution moyenne.	44
Figure 6-2 : Evolution des vides avec le temps sur les premières 1000 années de fluage pour une section 2D de dimensions 5.5x2.8 m.	45
Figure 6-3 : Evolution des vides avec le temps sur les premières 1000 années de fluage pour une section 2D perpendiculaire à une double voie d'accès au stockage.	46
Figure 6-4 : Intersection entre deux galeries de stockage.	46

Figure 6-5 : Intersection entre une galerie de stockage et une double galerie d'accès.	47
Figure 6-6 : Comparaison entre l'évolution des volumes de vide entre les modèles d'intersection de galeries et les modèles de sections de galeries 2D.	47
Figure 6-7 : Comparaison entre les courbes de fermeture d'une section 2D d'une galerie de stockage et celles des modèles d'intersection des galeries. La ligne rouge représente la courbe de la section 2D avec un factor de 0.4 appliqué sur l'axe des abscisses.	48
Figure 6-8 : Excavation de la section de galerie.	49
Figure 6-9 : "Ré-activation" des blocs de sel décollés du toit.	49
Figure 6-10 : Evolution du module de Young des blocs de sel décollés avec la porosité.	50
Figure 6-11 : Porosité des blocs de sel décollés après 2000 ans de fluage.	51
Figure 6-12 : Module de Young des blocs de sel décollés après 2000 ans de fluage.	51
Figure 6-13 : Galerie vide. Evolution du volume des vides sur les premières 1000 années de fluage dans les deux parties du tunnel (blocs de sel décollés et vides au-dessus des blocs) par rapport à leur taille initiale.	52
Figure 6-14 : Galerie vide. Variations du volume total de vides (porosité des blocs décollés et vides au-dessus des blocs) en fonction du temps.	52
Figure 6-15 : Géométrie du modèle de l'intersection des galeries avec déchets.	53
Figure 6-16 : Géométrie des déchets à l'intérieur de la galerie.	53
Figure 6-17 : Géométrie du modèle après 100 ans (a), 500 ans (b), 1000 ans (c) et 2000 ans (d).	55
Figure 6-18 : Galerie avec déchets. Variations du volume de vides au-dessus des déchets et du volume de vides dans les déchets en fonction du temps, sur les premières 1000 années de fluage.	56
Figure 6-19 : Galerie avec déchets. Variations du volume total de vides (porosité des déchets et vides au-dessus des déchets) en fonction du temps.	56
Figure 6-20 : Courbe d'évolution du module du béton sur les 50 premières années.	59
Figure 6-21: Galerie avec béton. Variations du volume des vides dans le béton en fonction du temps.	60
Figure 6-22 : Evolution de la contrainte déviatorique en MPa (contrainte de Von Mises, définie en équation (2)) en fonction du temps.	60
Figure 6-23 : Evolution normalisée des volumes de vide avec le temps pour les modèles locaux pris en compte.	63
Figure 6-24 : Première option de remplissage béton – Volume de vides dans le stockage en fonction du temps.	64
Figure 6-25 : Première option de remplissage béton – Taux de fermeture des vides (m^3/an) en fonction du temps.	64
Figure 6-26 : Seconde option de remplissage – Volume de vides dans le stockage en fonction du temps et comparaison avec l'option précédente.	65
Figure 6-27 : Seconde option de remplissage béton – Taux de fermeture des vides (m^3/an) en fonction du temps et comparaison avec l'option précédente.	66

Figure 6-28 : Troisième option de remplissage – Volume de vides dans le stockage en fonction du temps et comparaison avec les options précédentes.	67
Figure 6-29 : Troisième option de remplissage béton – Taux de fermeture des vides (m ³ /an) en fonction du temps et comparaison avec les options précédentes.	67
Figure 6-30 : Première option de remplissage avec béton : évolution du volume des vides et de la saumure.....	69
Figure 6-31 : Seconde option de remplissage avec béton : évolution du volume des vides et de la saumure.	69
Figure 6-32 : Troisième option de remplissage avec béton : évolution du volume des vides et de la saumure.....	70
Figure 7-1 : Intersection de galeries avec déchets – évolution normalisée du volume des vides, avec et sans effet de la pression de saumure.	73
Figure 7-2 : Intersection de galeries avec béton – évolution normalisée du volume des vides, avec et sans effet de la pression de saumure.	73
Figure 7-3 : Intersection de galeries avec déchets – évolution normalisée du volume des vides dans les déchets (uniquement), avec et sans effet de la pression de saumure.....	74
Figure 7-4 : Option 1 - Evolution du volume de vides du stockage.	76
Figure 7-5 : Option 1 – Variation annuelle du volume de vides du stockage.....	76
Figure 7-6 : Option 2 - Evolution du volume de vides du stockage.	77
Figure 7-7 : Option 2 – Variation annuelle du volume de vides du stockage.....	77
Figure 7-8 : Option 3 - Evolution du volume de vide du stockage.....	78
Figure 7-9 : Option 3 – Variation annuelle du volume de vides du stockage.....	78
Figure 7-10 : Option 1 : Date d’ennoyage = 1100 ans - Evolution du volume de vide du stockage.....	79
Figure 7-11 : Option 1 : Date d’ennoyage = 1100 ans – Variation annuelle du volume de vide du stockage.....	80
Figure 7-12 : Option 2 : Date d’ennoyage = 1300 ans - Evolution du volume de vide du stockage.....	80
Figure 7-13 : Option 2 : Date d’ennoyage = 1300 ans – Variation annuelle du volume de vide du stockage.....	81
Figure 7-14 : Option 3 : Date d’ennoyage = 1600 ans - Evolution du volume de vide du stockage.....	81
Figure 7-15 : Option 3 : Date d’ennoyage = 1600 ans – Variation annuelle du volume de vide du stockage.....	82

Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Valeurs des paramètres du modèle du Norton, ajustés sur des essais de fluage [3].	14
Tableau 3-2 : Caractéristiques élastiques du sel.	14
Tableau 4-1 : Comparaison des convergences obtenues par les modèles FLAC3D (paramètres initiaux pour la loi de Norton) avec les valeurs expérimentales.	27
Tableau 4-2 : Paramètre de la loi de fluage de Norton.	28
Tableau 4-3 : Comparaison des convergences obtenues avec les modèles FLAC3D avec les valeurs expérimentales.	28
Tableau 4-4 : Comparaison entre les convergences verticales moyennes.	33
Tableau 5-1 : Les hypothèses de remontée de l'eau.	34
Tableau 5-2 : Les propriétés de la bentonite utilisées dans le modèle.	35
Tableau 6-1 : Propriétés des déchets.	54
Tableau 6-2 : Résistance à compression du béton « Complexe 2 ».	57
Tableau 6-3 : Propriétés du béton « Complexe 2 ».	57
Tableau 6-4 : Volume et modèle local correspondant au trois parties du stockage.	62
Tableau 6-5 : Temps et débits d'envoyage du stockage pour les 4 cas pris en compte.	68
Tableau 6-6 : Temps d'envoyage du stockage pour les 4 cas de remontée de la saumure et les trois options de remplissage avec béton.	68
Tableau 7-1 : Cas 3 - Année et débit de sortie de la saumure contaminée.	79
Tableau 7-2 : Cas 1 - Année et débit de sortie de la saumure contaminée.	82
Tableau 7-3 : Calcul du flux massique de mercure sortant des barrages pour le cas 3 de remontée de la saumure ($105\,000\text{ m}^3/\text{an}$).	83
Tableau 7-4 : Calcul du flux massique de mercure sortant des barrages pour le cas 1 de remontée de la saumure ($58\,000\text{ m}^3/\text{an}$).	83

1. REFERENCES

- [1] INERIS, 2010. Etude géomécanique du stockage de StocaMine. Rapport d'étude N° DRS-10-108130-14273A.
- [2] INERIS, 2011. Etude hydrogéologique de l'ennoyage du site. Rapport d'étude N° DRS-10-108130-12810B.
- [3] Ghoreychi, M, 1991. Comportement du sel broyé sous l'effet d'une source de chaleur dans des sondages réalisés dans une mine de sel. Edition CCE, EUR 13638FR.
- [4] StocaMine. – « Courrier de spécifications sur la modélisation des éventuels flux contaminés sortant du stockage StocaMine ». 16 octobre 2012, réf 115-12/DG-AR/PP
- [5] Nagra, 1986. Resaturation of backfilled tunnels in Granite. INTERA Technologies (R. W. Andrews, D. W. LaFleur, S. B. Pahwa). Nagra Technical report 86-27.
- [6] Brooks, R.H. and A.T. Corey, 1966. Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow. Journal of the Irrigation and Drainage Division, proceedings ASCE, June.
- [7] Villar, M.V., Sánchez M., and A. Gens, 2008. Behaviour of a bentonite barrier in the laboratory: Experimental results up to 8 years and numerical simulation. Physics and Chemistry of the Earth, 33, pp 476–485.
- [8] CAUCHETEUX , A., 2000. Evolution au cours de la lixiviation des propriétés physico-chimiques d'un REFIOM humide stabilisé aux liants hydrauliques. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [9] Université d'Artois – Faculté des sciences appliquées – Laboratoire Génie Civil et Geoenvironnement (LGCgE). « Etude de formulations de coulis – Société Surschiste ». 30 septembre 2012.
- [10] AFNOR (1992). Eurocode 2 "Calcul des structures en béton" et Document d'Application Nationale. Normalisation Française. 1992, NF P18 – 711.

2. INTRODUCTION

Dans le cadre des études pour la fermeture définitive du stockage de déchets ultimes de Wittelsheim, la société StocaMine a chargé ITASCA Consultants SAS d'évaluer les flux potentiels de saumure contaminée à partir du stockage, à long terme, pour plusieurs solutions de confinement des déchets.

Le stockage de déchets ultimes de Wittelsheim a reçu environ 42000 tonnes entre 1999 et 2003. L'activité de stockage a été interrompue à cette date suite à l'incendie d'un bloc de stockage, et le stockage est resté en l'état. Un peu plus de la moitié de la longueur de galeries excavées est remplie de déchets, le reste étant vide. Dans le cadre de la liquidation de la société StocaMine, des études sur le devenir de ces déchets ont été menées. L'une des alternatives est le confinement des déchets sur place pour une durée indéterminée. Les travaux déjà réalisés – pour la plupart par l'INERIS ([1], [2]), à la demande de StocaMine – ont permis de focaliser les études sur le phénomène des venues d'eau existant dans la mine, en provenance de l'aquifère sus-jacent. Ce phénomène semble le plus à même de compromettre l'intégrité parfaite du stockage.

Les écoulements sont localisés à l'extrados des 15 puits de la mine, dont 13 ont déjà été comblés et 2 sont actuellement utilisés pour l'accès au stockage. A longue échéance – siècles - la mine sera donc ennoyée. Dans le même temps, le fluage du sel provoque la convergence progressive de l'ensemble des vides. La saumure se chargera en produits toxiques dès lors que le stockage lui-même sera noyé. Une fois la mine complètement en eau, la convergence ultérieure pourrait « chasser » la saumure, et donc les polluants qu'elle aura dissous, vers la nappe d'Alsace sus-jacente.

L'isolation du stockage par rapport au reste de la mine, par la mise en place de barrages aussi étanches que possibles, doit permettre de réduire les débits de polluant. Cette isolation sera assurée en premier lieu par des barrages en bentonite. Deux hypothèses de barrages sont prises en compte dans cette étude: un ou deux noyaux de bentonite de 5m de longueur par noyau.

Dans ce cas, l'expulsion de la saumure nécessitera l'augmentation de la pression de saumure dans le stockage, au moins jusqu'à la valeur de la pression exercée par la saumure à l'extérieur des barrages. Cela est possible seulement dans le cas où les galeries du stockage sont encore partiellement ouvertes à la fin de l'ennoyage, et où la porosité des déchets peut encore diminuer ultérieurement à cause du fluage des parois de ces vides résiduels.

Par ailleurs, les vides subsistant dans le stockage peuvent être remplis par un béton de cendres volantes. Trois options de remplissage sont considérées :

Option 1 : Uniquement les blocs vides et le bloc 15 (bloc endommagé par un incendie) ;

Option 2 : option 1, plus l'ensemble des galeries de service du stockage

Option 3 : option 2, plus l'ensemble des blocs stockés.

Le paragraphe 3 décrit le comportement mécanique du sel tel que présenté par la documentation fournie. Il donne les hypothèses initiales utilisées.

Avant de procéder à l'étude de la fermeture des galeries du stockage avec le temps, et donc à l'évaluation du flux potentiel de saumure contaminée, une étude supplémentaire a été réalisée afin de déterminer la contrainte verticale qui s'applique au niveau du stockage. En effet, les anciens travaux miniers réalisés au-dessus du stockage au cours des années 1940-1960 peuvent perturber fortement le champ de contraintes isostatique. Ces travaux, en taille foudroyée, n'ont pas laissé les mêmes vides résiduels qu'une exploitation par chambres et piliers. Mais il reste sans nul doute des hétérogénéités fortes de module entre les parties exploitées et les stots qui ont une influence directe

sur les contraintes. Cette étude préliminaire, décrite en paragraphe 4, est faite à l'aide d'un modèle « global » qui tient compte de la géométrie des vides miniers ainsi que de la géométrie du stockage.

L'état des contraintes ainsi déterminé est la condition aux limites de modèles locaux des galeries du stockage. Ces modèles sont utilisés pour vérifier la pertinence des paramètres de fluage du sel choisis, en comparant les valeurs des convergences obtenues par ces modèles avec les observations expérimentales existantes. Les valeurs des paramètres de fluage du sel sont alors recalées pour obtenir des convergences réalistes. Lors du recalage, les calculs de contrainte « globaux » sont alors repris, pour tenir compte de la nouvelle valeur de ces paramètres sur la répartition du champ de contraintes. Le processus est donc itératif.

Le paragraphe 5 est une étude, en écoulements non saturés, de la mise en saturation progressive des barrages de bentonites. Pour différentes hypothèses d'arrivée – puis de montée en pression – de la saumure, les temps de saturation et les débits « permanents » au travers des barrages sont calculés, ce qui permettra de calculer le moment où le stockage est rempli de saumure, et où celle-ci peut donc éventuellement monter en pression sous l'effet du fluage.

Le paragraphe 6 décrit l'étude de la fermeture du stockage jusqu'à la fin de l'ennoyage, réalisée en combinant les modèles locaux des différentes configurations de galeries en fonction des différentes options de remplissage spécifiées par StocaMine. Une fois la saumure présente, son effet sur le fluage est étudié et les flux potentiels sortants de saumure en sont déduits au paragraphe 7.

Le paragraphe 8 constitue la conclusion de l'étude.

3. COMPORTEMENT MECANIQUE DU SEL

Le comportement rhéologique du sel est caractérisé par :

- une aptitude au fluage plus ou moins importante qui se traduit par des déformations irréversibles (viscoplasticité), lesquelles se manifestent sous toute contrainte déviatorique et ne dépendent pas de la contrainte moyenne ;
- un seuil de déclenchement du fluage sous contrainte déviatorique qui est pratiquement nul (non mesurable) ;
- une vitesse des déformations différées qui augmente, d'une manière non linéaire, avec la contrainte déviatorique et avec l'humidité et la température ;
- un seuil d'endommagement qui dépend de la contrainte moyenne ainsi que du déviateur, au-delà duquel le sel se fissure et la vitesse de fluage accélère (fluage tertiaire).

D'après les études de plusieurs auteurs (dont une liste est répertoriée en [1]), deux principaux modèles rhéologiques ont été proposés pour le comportement viscoplastique (fluage) de ce matériau : le modèle de Lemaitre et le modèle de Norton. Les deux modèles diffèrent en ce qui concerne l'évolution du fluage avec le temps. Dans le cas du modèle de Lemaitre, le fluage ralentit avec le temps et son évolution est exprimée par une loi de puissance du temps. Au contraire le modèle de Norton considère qu'au-delà d'une phase transitoire de courte durée, le fluage atteint un régime stationnaire (évolution linéaire), à partir duquel seul un changement de la sollicitation – par exemple la modification de la géométrie de l'excavation due au fluage lui-même – peut modifier la vitesse de fluage.

Compte tenu du fait que les convergences mesurées in situ sur une dizaine d'années dans le site de stockage StocaMine évoluent de manière quasi-linéaire avec le temps, les précédentes études réalisées par l'INERIS [1] ont été faites en utilisant le modèle de Norton. De plus, comme l'objectif des études concerne essentiellement le moyen et long terme (et non la phase de creusement des ouvrages), seulement la partie décrivant le fluage stationnaire a été retenue dans le modèle rhéologique du sel :

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = A_s \exp \frac{\frac{K_s}{T} \frac{\sigma_{eff}^{ns}}{\sigma_0} \frac{\partial \sigma_{eff}}{\partial \sigma_{ij}}}{\sigma_0} \quad (1)$$

avec :

- σ_{eff} : contrainte de Von Mises :

$$\sigma_{eff} = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij}^d \sigma_{ij}^d} \quad (2)$$

ou J_2 est le deuxième invariant du tenseur de cisaillement effectif σ_{ij}^d ;

- A_s, K_s, n_s : constantes du modèle
- T : Température
- σ_0 : Contrainte de référence (1 MPa).

Les valeurs des paramètres de ce modèle ont été déterminées par des essais de fluage réalisés à différents paliers de contrainte déviatorique et de température, sur le sel de la mine Amélie aux MDPA [3] et sont répertoriées en Tableau 3-1.

Paramètre	Description	Valeur
A_s (1/jour)	Vitesse de référence	0.005
n_s	Exposant de contrainte	4
K_s (K)	Constante de la loi d'Arrhenius	4700
T (K)	Température	308

Tableau 3-1 : Valeurs des paramètres du modèle du Norton, ajustés sur des essais de fluage [3].

Suite à la réalisation de modèles numériques du stockage et des voies doubles d'accès, l'INERIS a recalé la valeur du paramètre A_s , en retenant une valeur de 0.022 j^{-1} au lieu de 0.005 [1]. Ce recalage est aussi justifié par le fait que les paramètres du Tableau 3-1 dérivent d'essais de laboratoire sur des échantillons qui ne sont pas nécessairement représentatifs du massif rocheux, lequel est affecté par des hétérogénéités, des impuretés et de la fissuration.

Dans la présente étude, le comportement du sel est simulé en considérant la loi de fluage de Norton, avec – au départ - le jeu de paramètres calé par l'INERIS. La loi de Norton est directement implémentée dans le logiciel FLAC^{3D} avec un modèle de comportement nommé « two-component power law » dont le tenseur de la vitesse de fluage est calculé à partir de la formule suivante :

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

Avec :

- $\dot{\varepsilon}_{cr}$: la vitesse de fluage :

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A \sigma_{eff}^{n_s} \quad (4)$$

- A et n_s : propriétés du sel, dérivées des valeurs du Tableau 3-1 :

$$A = A_s \exp \frac{-K_s}{T} \quad (5)$$

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

Paramètre	Description	Valeur
ρ (kg/m ³)	Densité	2160
E (GPa)	Module de Young	25
ν	Coefficient de Poisson	0.25

Tableau 3-2 : Caractéristiques élastiques du sel.

4. MODELE POUR LA DETERMINATION DE L'ETAT DE CONTRAINTES INITIAL AU VOISINAGE DE LA ZONE DE STOCKAGE

Un modèle (nommé par la suite modèle global) a été mis en œuvre pour simuler et évaluer l'évolution de l'état de contraintes du sel situé au voisinage de la zone de stockage. Les contraintes sont occasionnées par et varient avec :

- l'exploitation de sel au-dessus de la zone de stockage au cours du siècle précédent,
- l'excavation de la zone de stockage elle-même.

Afin de simuler correctement l'évolution de cet état de contrainte avec le temps, le modèle prend en compte les trois zones d'exploitation sus-jacentes ainsi que la zone de stockage.

4.1. Géométrie

Le modèle représente une portion de 760x760 m dans le plan horizontal sur une épaisseur de 350 m (Figure 4-1). Sachant que la surface du sol se situe à une altitude de +270.1 m (altitude du puits Else et Joseph), le modèle est compris entre 345 et 695 m de profondeur. La zone de stockage des déchets est ainsi située à une profondeur moyenne de 550 m.

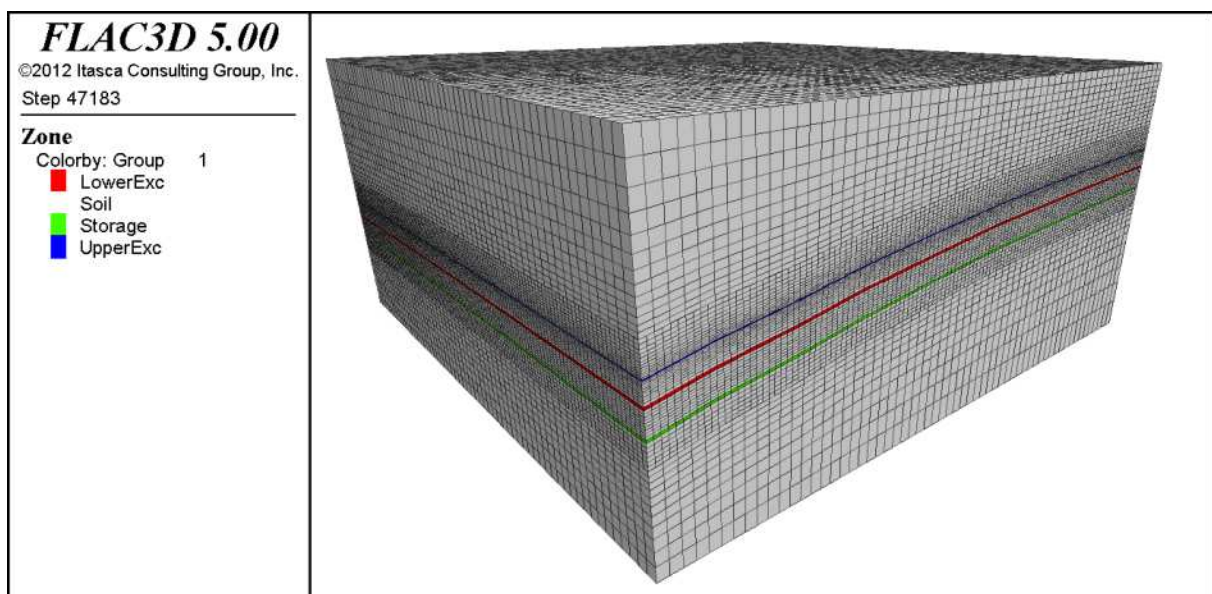


Figure 4-1 : Géométrie du modèle global.

Le modèle comprend deux niveaux d'exploitation ancienne :

- un premier (en rouge sur la Figure 4-1), situé juste au-dessus de la zone de stockage (en vert), de 3 m d'épaisseur, appelé niveau d'exploitation inférieur (*LowerExc*)
- un second (en bleu) situé au-dessus du premier niveau, de 1.3 m d'épaisseur, appelé niveau d'exploitation supérieur (*UpperExc*).

Le niveau inférieur a été principalement excavé dans les années 30-40, à l'exception de la partie située à droite du pilier qui elle a été excavée en 1960. L'excavation du niveau supérieur a eu lieu dans les années 50. La distance séparant le toit du niveau inférieur du plancher du niveau supérieur est de 20 m.

La zone de stockage est constituée d'un réseau de galeries se croisant les unes les autres, situées à environ 23-25 m en-dessous du plancher du niveau d'exploitation inférieur.

Les figures suivantes présentent certains détails du modèle global, en rapport avec les niveaux d'exploitation et la zone de stockage :

- une vue centrée sur la zone de stockage (Figure 4-2). On peut noter que le maillage est raffiné autour de la zone d'intérêt ;
- la géométrie utilisée pour modéliser le niveau d'exploitation inférieur (Figure 4-3) ;
- la géométrie utilisée pour modéliser le niveau d'exploitation supérieur (Figure 4-4) ;
- la géométrie utilisée pour modéliser la zone de stockage (Figure 4-5).

Les niveaux d'exploitation ainsi que la zone de stockage sont représentés, dans ce modèle global, par des couches à un seul élément de volume d'épaisseur. Ce choix est justifié par le besoin de conserver un nombre raisonnable d'éléments de volume, afin de ne pas allonger les temps de calcul.

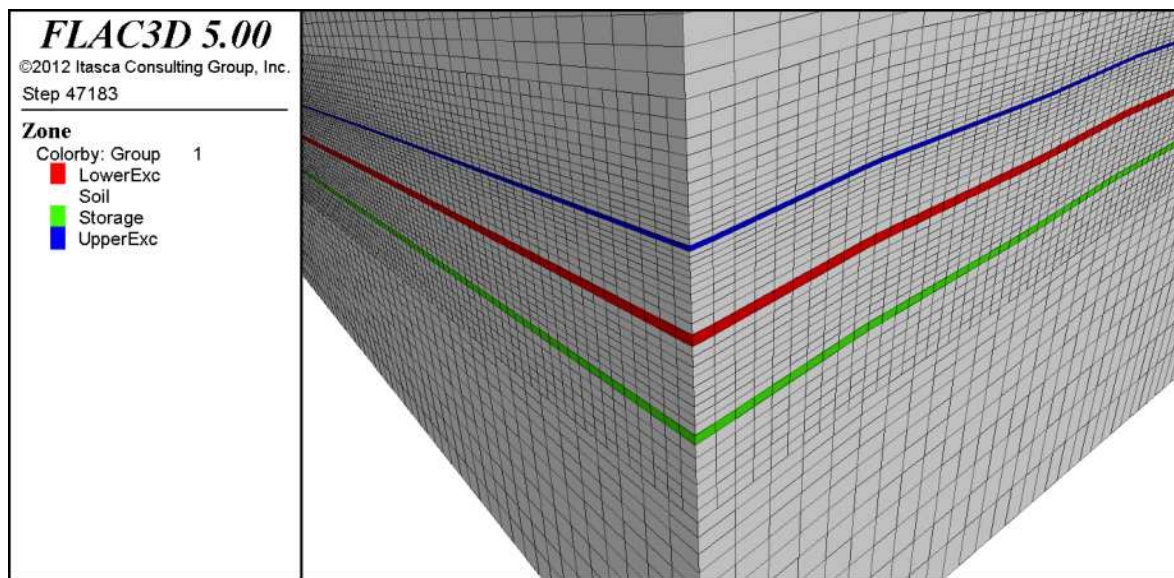


Figure 4-2 : Vue centrée sur la zone de stockage.



Figure 4-3 : Géométrie utilisée pour la modélisation du niveau d'excavation inférieur

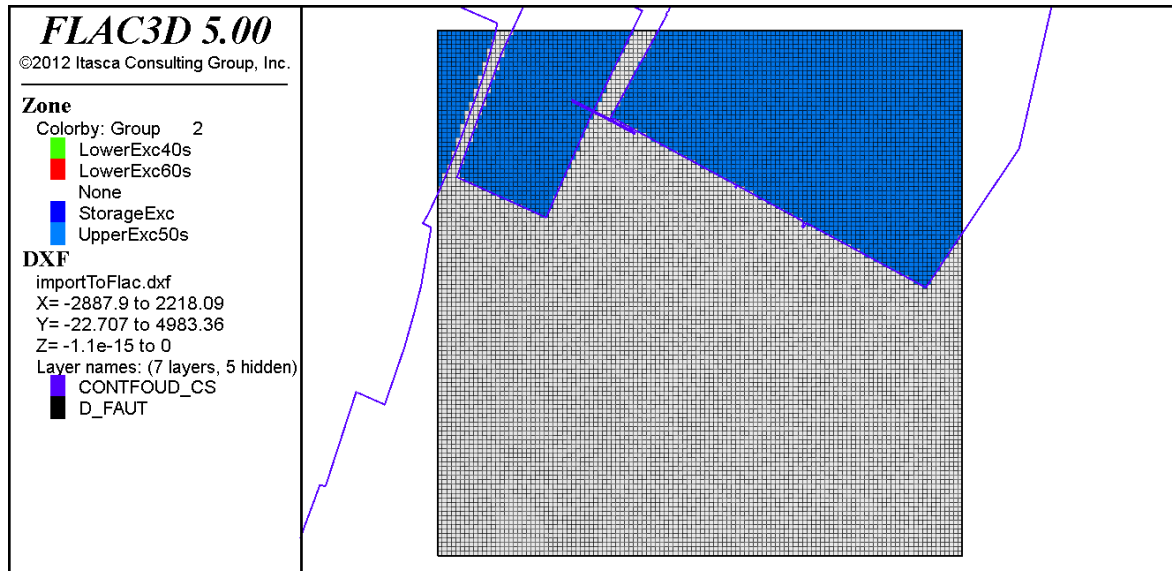


Figure 4-4 : Géométrie utilisée pour la modélisation du niveau d'excavation supérieur

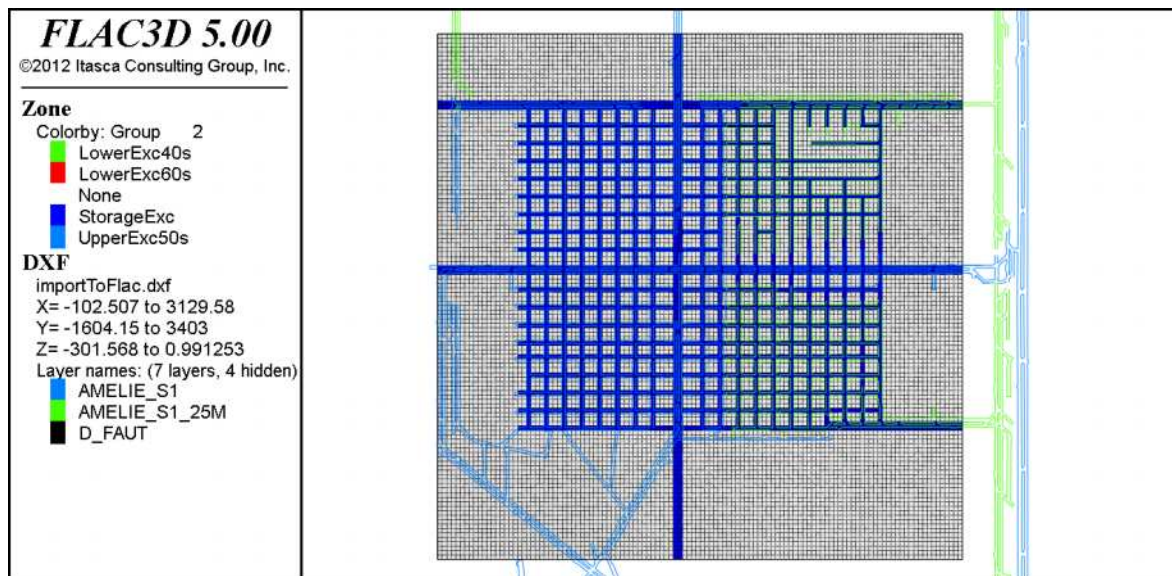


Figure 4-5 : Stockage StocaMine.

4.2. Conditions aux limites et initialisation des contraintes

Les déplacements dans les directions normales aux frontières du modèle sont fixés, à l'exception de la frontière supérieure, sur laquelle un champ de contraintes lithostatique vertical est appliqué. Le champ de contraintes initial prend en compte un coefficient K_0 égal à 1 (condition à long terme pour le sel) et le chargement lithostatique.

4.3. Exploitation des niveaux supérieur et inférieur

L'excavation des niveaux d'exploitation inférieur et supérieur est réalisée en déconfinant progressivement les éléments de volume les représentant. Le déconfinement est effectué en cinq étapes, correspondant respectivement à des taux de déconfinement de 20, 40, 60, 80 et 100%. A chaque étape, les contraintes dans les zones à excaver sont réduites, puis fixées à une valeur constante proportionnelle à la valeur initiale et au taux de déconfinement. Une fois que l'équilibre est atteint dans le modèle, une nouvelle étape de déconfinement est effectuée.

A la fin de l'excavation, les zones incluses dans le volume excavé ne sont pas supprimées, bien qu'elles ne représentent plus rien d'un point de vue mécanique : elles sont rendues « nulles ». Elles permettent ainsi d'accéder à diverses informations (déformation, ...) de façon rapide sans avoir d'influence sur le comportement mécanique du modèle. Selon StocaMine, le volume de vide va diminuer avec le temps. Tout d'abord, il y aura effondrement du toit avec foisonnement des matériaux effondrés, puis le fluage du sel compactera progressivement ces matériaux. A long terme, les volumes vides des niveaux d'exploitation seront donc complètement comblés, et le volume de vide restant représentera entre 20 et 30% du volume de vide initial. Cette hypothèse, validée par StocaMine, est en accord avec les résultats de l'étude menée par l'INERIS [1], [2].

Afin de simuler ce processus, les zones incluses dans les niveaux d'exploitation sont « réactivées », et leur module de Young est initialisé à 0. Ce module est augmenté progressivement avec la réduction du volume de ces zones, jusqu'à atteindre le module du sel (25 GPa). Le volume de ces zones a alors diminué jusqu'à environ 20 à 30% de à leur volume initial.

La transition entre ces deux modules « limites » a été modélisée par l'intermédiaire d'une fonction logarithmique : les volumes représentant les niveaux d'exploitation sont supposés diminuer progressivement avec le logarithme du module. En d'autres termes, l'augmentation du module est de plus en plus rapide au fur et à mesure de la compaction des tailles foudroyées. Par ailleurs, le module reste égal à zéro jusqu'à ce que le volume ne représente plus que 40% du volume initial (effondrement). Le module est alors augmenté suivant la loi logarithmique évoquée ci-dessus jusqu'à ce que le volume ne soit plus que de 20% du volume initial (compaction progressive des matériaux d'effondrement). Le module de la zone est alors celui du sel et ne peut plus être augmenté (Figure 4-6).

Afin de conserver des géométries compatibles pour ces zones représentant les volumes de vide, leur module de Young initial n'a pas réellement été fixé à zéro, mais limité à une valeur de 2.5 MPa, soit 1/10000 du module du sel.

Le module varie donc suivant les formules suivantes :

$$\begin{aligned}
 V_i/V_0 > 40\% & \quad E_i = E_0 \\
 20\% \leq V_i/V_0 \leq 40\% & \quad E_i = E_0 \cdot \exp\left(\left(\ln \frac{E_1}{E_0}\right) \cdot \frac{V_{40\%} - V_i}{V_{40\%} - V_{20\%}}\right) = E_0 \cdot \left(\frac{E_1}{E_0}\right)^{\frac{V_{40\%} - V_i}{V_{40\%} - V_{20\%}}} \\
 V_i/V_0 < 20\% & \quad E_i = E_1
 \end{aligned} \tag{6}$$

Où :

- V_0 : volume initial de la zone ;
- V_i : volume actuel de la zone ;
- $V_{40\%}$ et $V_{20\%}$: volumes de la zone correspondant respectivement à 40% et 20% du volume initial ;
- E_0 : Module de Young initial de la zone ($E = 2.5$ MPa);
- E_i : Module de Young actuel de la zone ($2.5 \leq E \leq 25,000$ MPa);
- E_1 : Module de Young final de la zone ($E = E_{\text{salt}} = 25,000$ MPa).

Une évolution similaire a été adoptée pour le coefficient de Poisson. Dans ce dernier cas, le coefficient est augmenté linéairement de 0 à 0.25 (valeur pour le sel) quand le volume des zones

diminue de 40% à 20% de leur volume initial (Figure 4-7). La valeur initiale de zéro (jusqu'à 40% du volume initial) permet de simuler la compaction des tailles foudroyées sans engendrer de déformations latérales.

Au cours du fluage, la réduction de volume des éléments représentant les niveaux d'exploitation est calculée à chaque cycle, et leurs propriétés élastiques sont modifiées en conséquence.

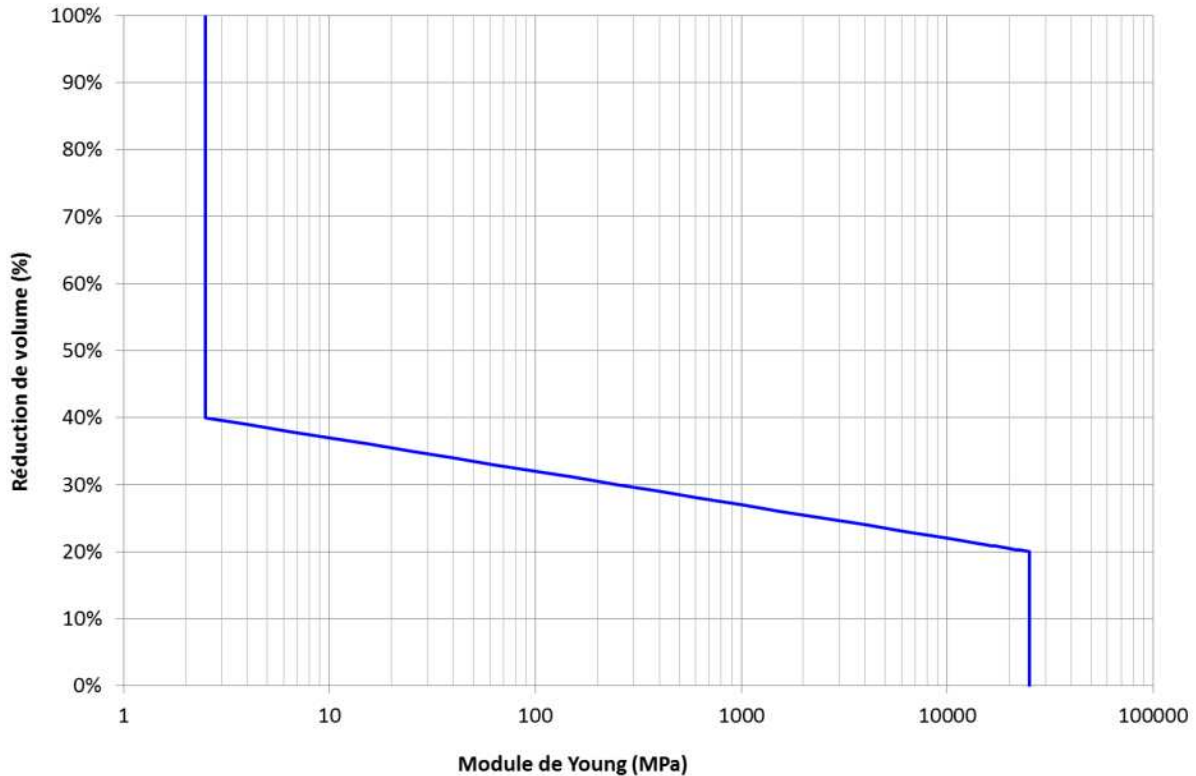


Figure 4-6 : Module de Young en fonction de la réduction de volume des zones de vide.

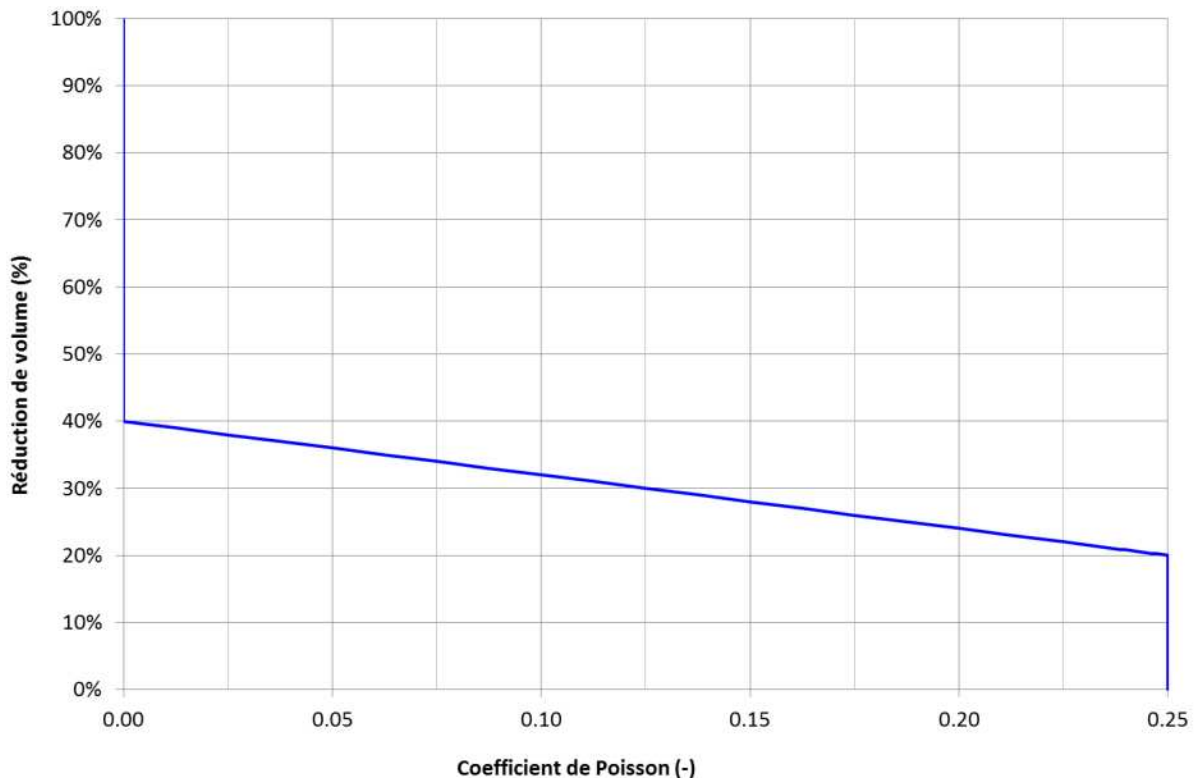


Figure 4-7 : Coefficient de Poisson en fonction de la réduction de volume des zones de vide.

La première excavation réalisée (par déconfinement progressif) est celle du niveau d'exploitation inférieur datant des années 30-40. A la suite de cette excavation, un temps de fluage de 10 ans est simulé à l'aide de la loi de fluage décrite plus haut. Dans un premier temps, les paramètres indiqués au paragraphe 3 sont utilisés.

L'excavation des niveaux d'exploitation supérieur (datant des années 50) puis inférieur (datant des années 60) est réalisée suivant le même principe. Entre chacune de ces deux excavations, un temps de fluage de 10 ans est simulé. Enfin, un temps de fluage de 40 ans est simulé, ce qui amène le modèle à l'année 2000.

4.4. Excavation de la zone de stockage

La zone de stockage des déchets est ensuite excavée et une période de fluage de 4500 ans est simulée, afin d'obtenir l'évolution de la contrainte verticale au-dessus du stockage. L'évolution ainsi obtenue sera utilisée pour lancer les modèles locaux de galeries de stockage, qui vont permettre :

- le calage des paramètres de la loi de Norton par comparaison des convergences obtenues sur ces modèles locaux avec les mesures expérimentales ;
- la simulation de la fermeture mécanique des galeries sur le long terme et donc l'évaluation des flux potentiels de saumure contaminée.

Sachant les éléments volumiques du modèle global ont des dimensions horizontales de 6.5x6.5m, alors que les galeries ont une largeur réelle de 5.5 m, cela implique l'excavation de rangées de largeur équivalente à une zone, comme indiqué sur la Figure 4-8.

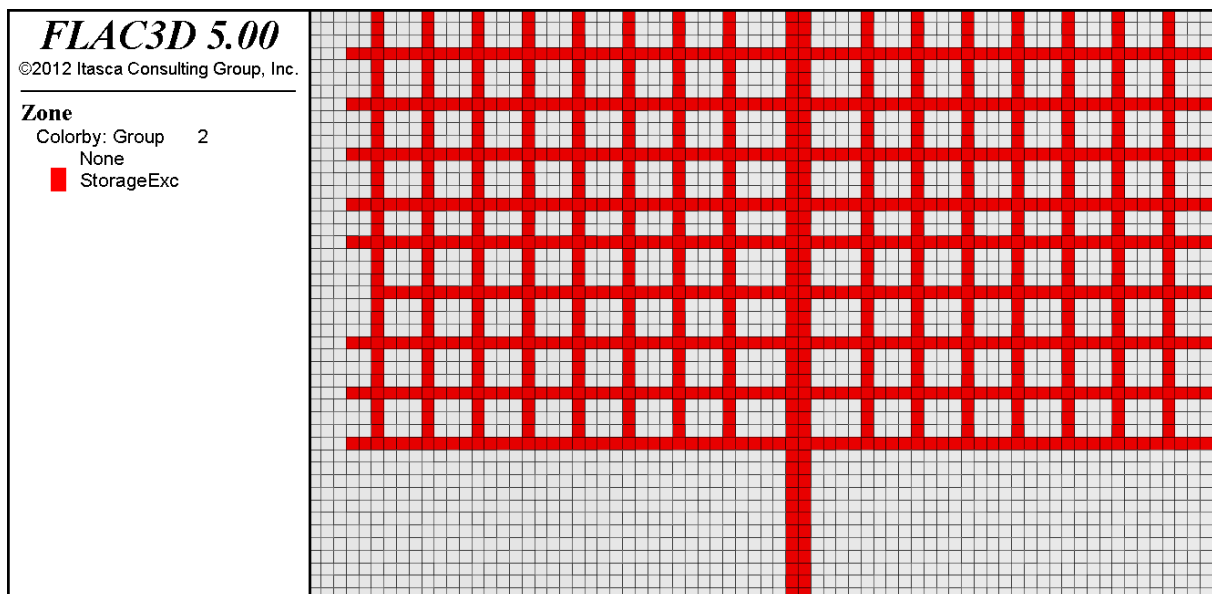


Figure 4-8 : Géométrie des galeries de la zone de stockage.

Il est difficile de simuler le comportement du sol excavé à l'aide de ce type de géométrie. Comme illustré sur la Figure 4-10, le comportement résultant est beaucoup plus rigide que dans le cas du même maillage plus raffiné. En particulier, la figure compare les résultats en termes de convergences pour deux sections de galeries :

- (a) : galerie modélisée avec une seule zone, de largeur 6.5 m et de hauteur 2.8 m - identique au modèle utilisé pour l'évaluation des contraintes verticales en partie haute du stockage,

- (b) : galerie modélisée avec des zones carrées de côté 0.2 m - ce qui équivaut à 28 zones dans la longueur et 14 zones dans la hauteur.

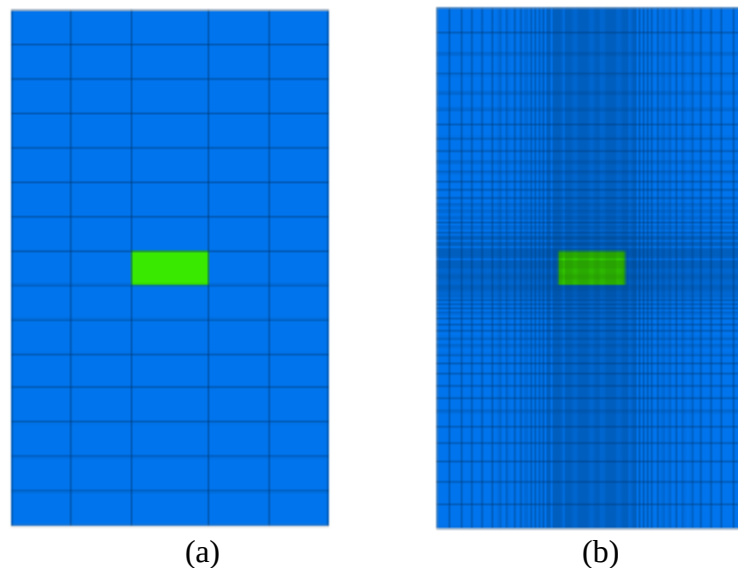


Figure 4-9 : Modélisations 2D utilisées pour évaluer l'influence de la finesse du maillage au voisinage de la galerie sur la convergence de cette dernière.

Les frontières des deux modèles sont situées à environ 20 m de la galerie dans la direction verticale et 10 m dans la direction horizontale. Les déplacements sont fixés dans les directions normales à chacune de ces frontières, à l'exception de la surface supérieure sur laquelle le chargement lithostatique est appliqué.

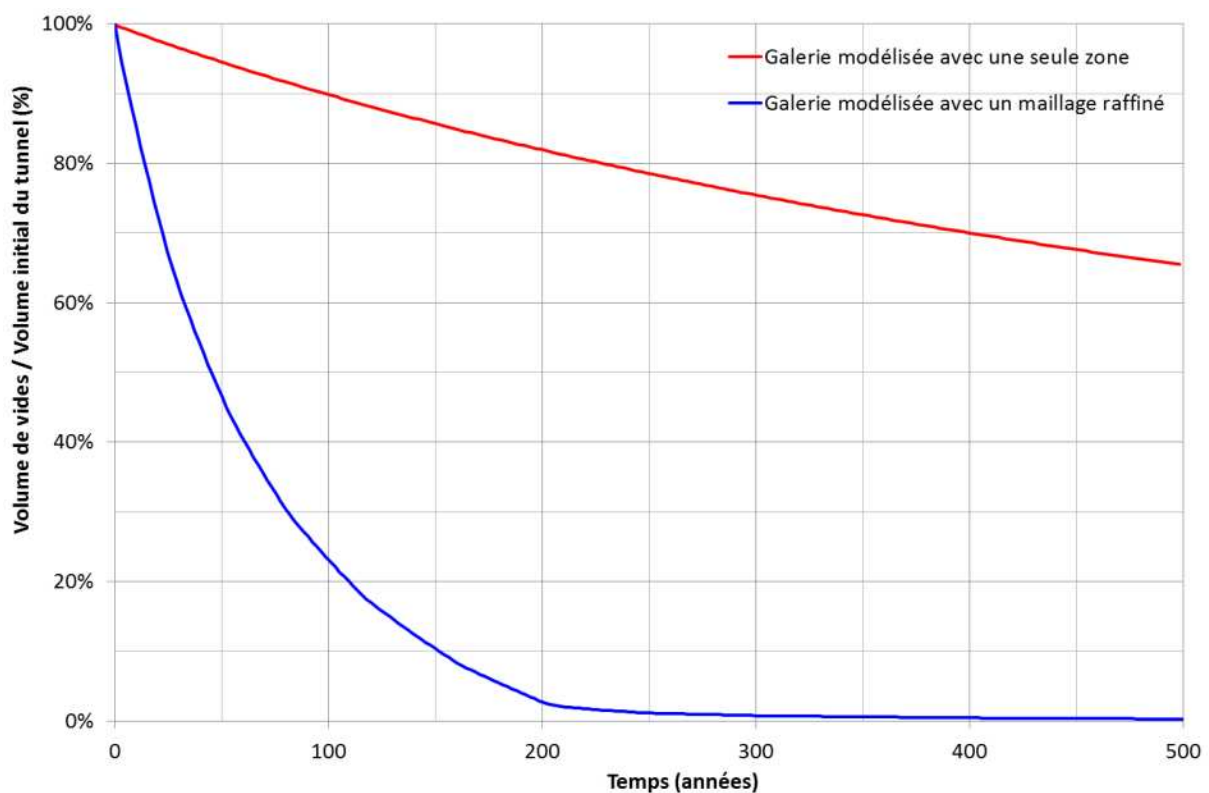


Figure 4-10 : Comparaison de l'évolution de la convergence de la galerie avec le temps en fonction de la finesse du maillage, sur les premiers 500 ans. La ligne rouge correspond à l'évolution observée dans le cas de la galerie modélisée à l'aide d'une seule zone.

Parmi les différentes méthodes testées pour améliorer le comportement du stockage dans le cas d'une simulation de l'excavation des galeries avec une seule zone, celle dont les résultats sont les plus satisfaisants considère les hypothèses suivantes :

- Les galeries ne sont pas explicitement excavées,
- Les contraintes horizontales dans les zones excavées (galeries et piliers) sont initialisées à 0. Cette hypothèse est raisonnable si on considère le système d'une intersection de galerie, les piliers ayant des contraintes latérales très faibles. Ensuite, les contraintes horizontales peuvent augmenter jusqu'à la valeur de la contrainte verticale en même temps que le volume de ces zones diminue suivant la formule suivante :

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot \left(1 - \frac{V_i}{V_0}\right)^\alpha, \quad (7)$$

où V_i est le volume actuel de la zone, V_0 est le volume initial et α est un coefficient à calibrer. En d'autres termes, le déviateur « moteur » du fluage diminue progressivement au fur et à mesure que le vide se referme.

Lorsque l'on augmente les contraintes horizontales, les contraintes déviatoriques diminuent, entraînant une diminution concomitante de la vitesse de fluage. Ainsi, la méthode proposée permet de reproduire la convergence observée lorsque le maillage est plus discrétisé : la majeure partie de la convergence intervient lors des premières années du fluage.

Afin de calibrer la méthode, deux tests ont été lancés en considérant les géométries représentatives du réseau de stockage :

- L'intersection de deux galeries de stockage (Figure 4-11) ;
- L'intersection entre une galerie de stockage et une galerie d'accès double (Figure 4-12).

Pour ces deux géométries, les courbes de convergence suivantes pour la galerie maillée à partir d'une seule zone ont été comparées avec celles de la galerie plus finement maillée. Un paramètre α égal à 4 permet de superposer correctement les deux courbes. De plus, dans le cas du modèle des voies doubles, le paramètre « n » de la loi de Norton a été élevé à la valeur de 4.125 pour les zones du modèle au niveau des tunnels, afin de mieux reproduire la déformabilité de cette partie du stockage.

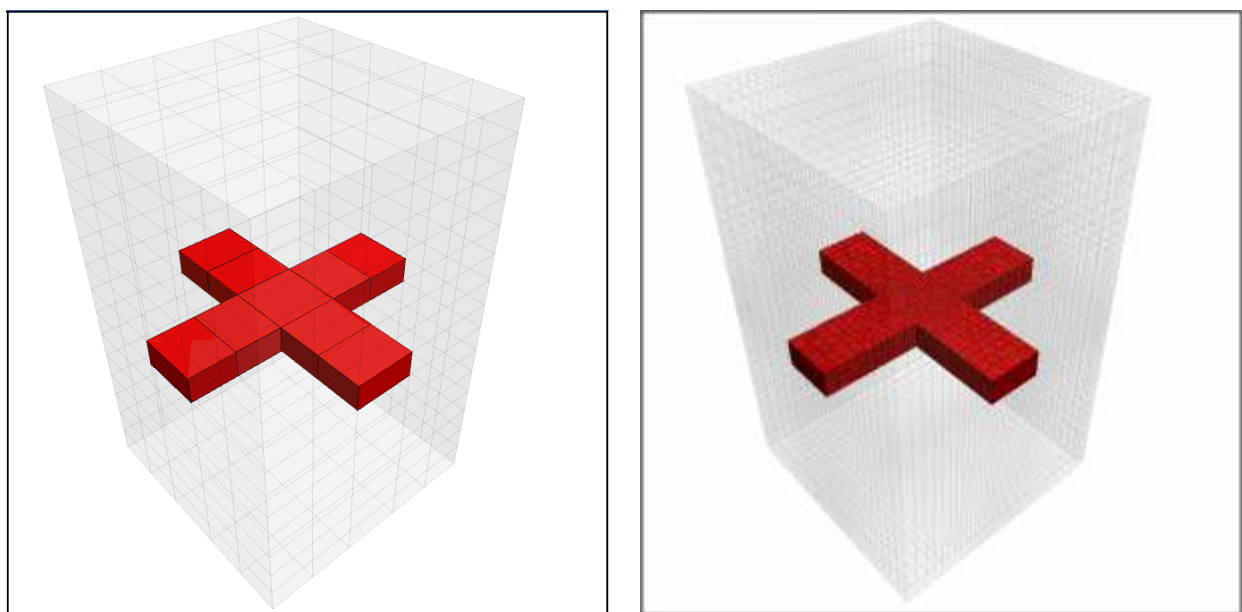


Figure 4-11 : Modèles utilisés pour évaluer l'influence de la finesse du maillage dans le cas de l'intersection de deux galeries de stockage.

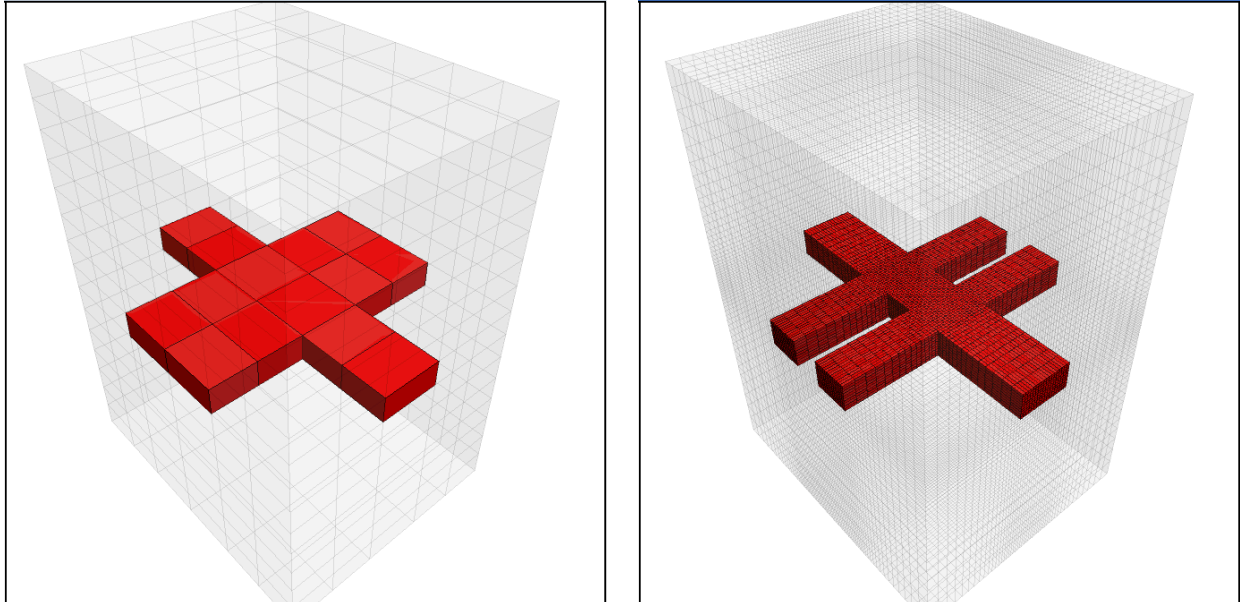


Figure 4-12 : Modèles utilisés pour évaluer l'influence de la finesse du maillage dans le cas de l'intersection entre une galerie de stockage et les voies doubles d'accès au stockage.

Les résultats sont respectivement présentés en Figure 4-13 and Figure 4-14 pour les deux géométries. Comme on peut le voir, les modèles plus finement maillés permettent seulement de décrire la courbe de convergence au cours des 20-30 premières années. Après cette date, un problème intervient, dû à des déformations élevées dans les zones situées au niveau de l'intersection.

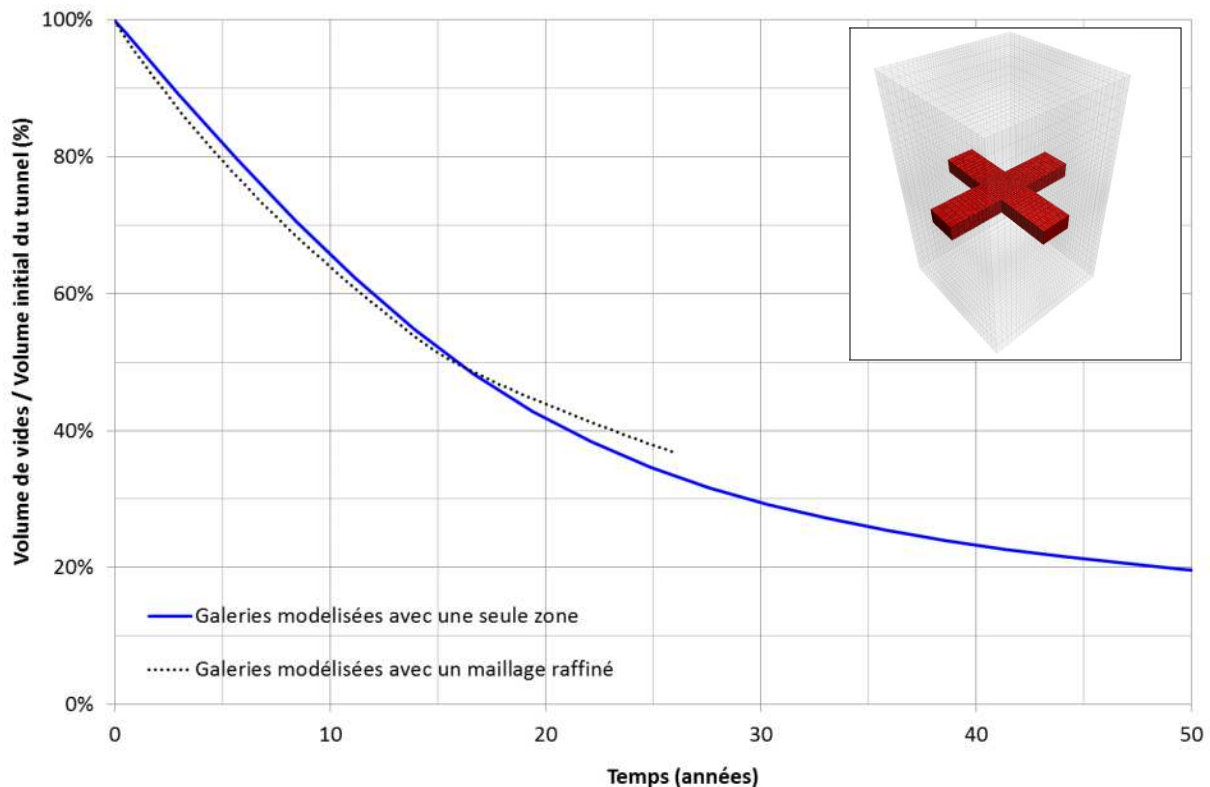


Figure 4-13 : Intersections de deux galeries de stockage. Comparaison de la convergence avec le temps pour un modèle finement maillé (en pointillé) et un modèle « à une zone ».

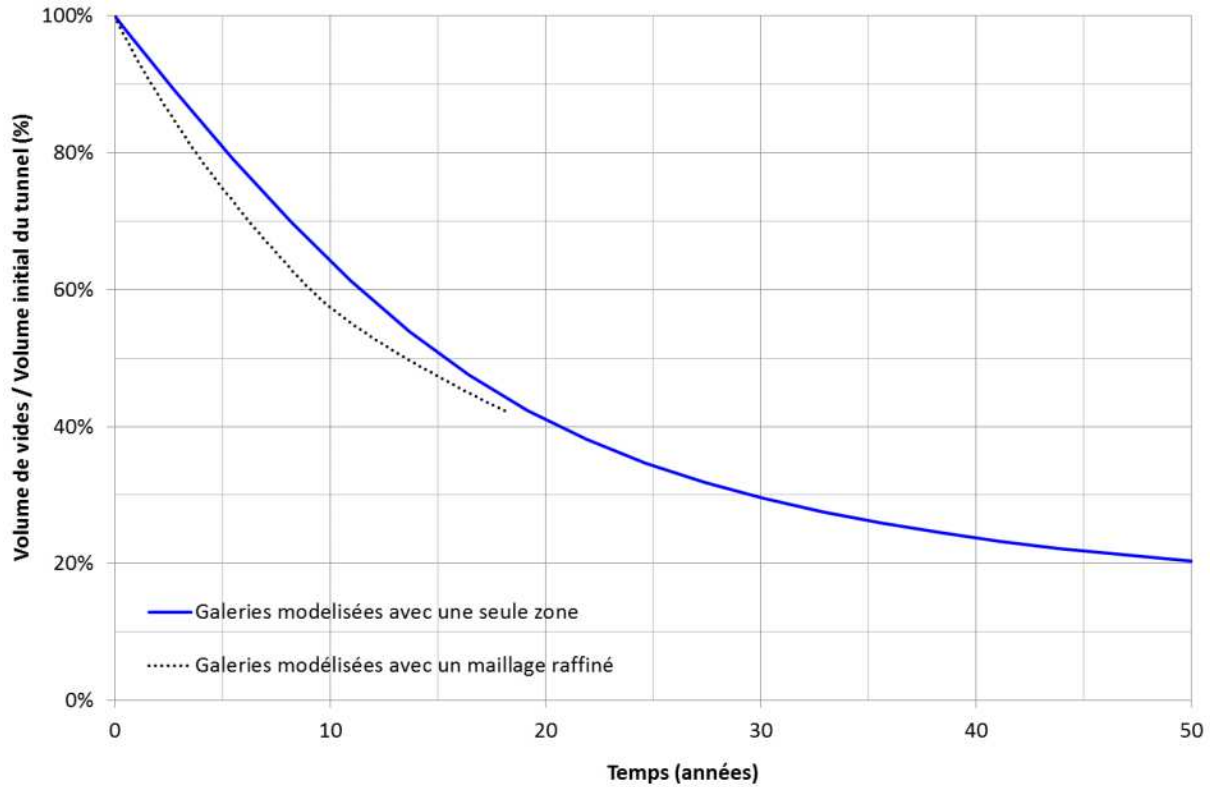


Figure 4-14: Intersections entre une galerie de stockage et une galerie d'accès double. Comparaison de la convergence avec le temps pour un modèle finement maillé (en pointillé) et un modèle « à une zone ».

L'utilisation de la méthode de limitation des contraintes horizontales permet donc de reproduire le comportement du réseau de stockage excavé de façon satisfaisante.

La Figure 4-15 montre les zones pour lesquelles les contraintes horizontales seront modifiées en fonction de la déformation volumique (en rouge et cyan). De plus, la Figure 4-16 montre en rouge les zones en proximité des voies doubles pour lesquelles le paramètre « n » a été initialisé à la valeur de 4.125 (de façon similaire à ce qui a été fait sur le petit modèle de calibration des voies doubles).

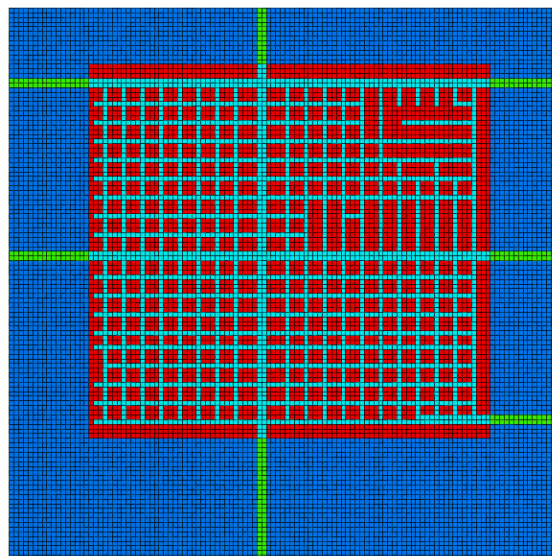


Figure 4-15: Zones du modèle global pour lesquelles la méthode des contraintes horizontales est utilisée.

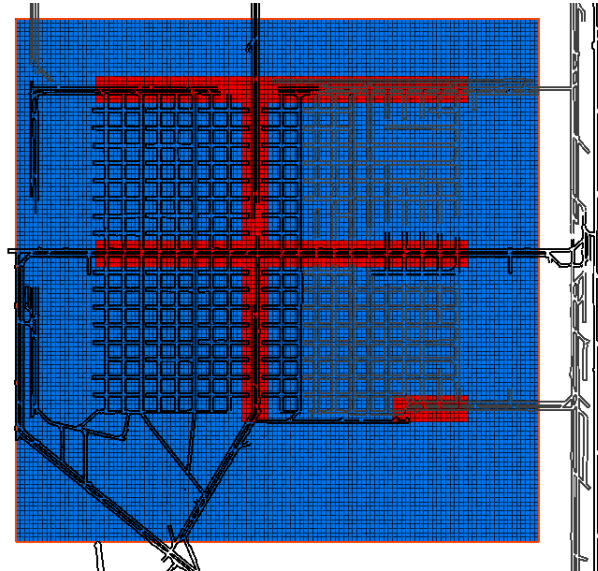


Figure 4-16: Zones du modèle global au niveau du stockage pour lesquelles le paramètre « n » de la loi de Norton est initialisée à 4.125.

Au cours de la simulation de fluage, les convergences à des positions définies sont enregistrées (positions pour lesquelles les convergences réelles ont été mesurées). Les convergences sont calculées par moyennage des convergences de deux couples de points (Figure 4-17). Vu le maillage très grossier, ces valeurs ne sont pas utilisées directement.

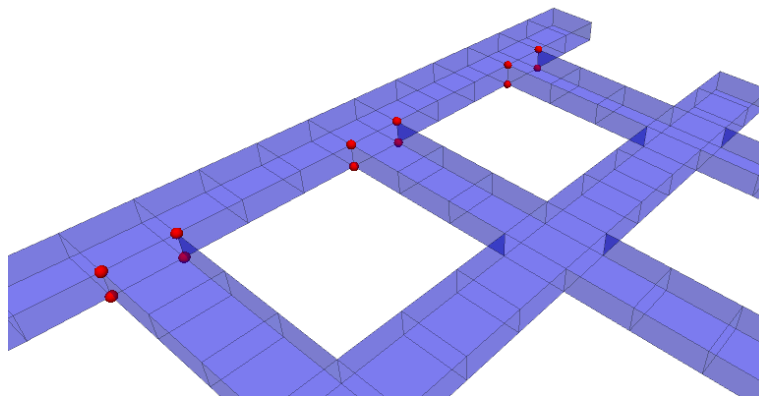


Figure 4-17 : Positions des points utilisés pour le calcul des convergences.

En plus des convergences, l'évolution des contraintes verticales au-dessus du stockage est enregistrée. La contrainte verticale moyenne dans les zones situées à 20 m au-dessus des positions des points de mesure des convergences est ainsi enregistrée (Figure 4-18).

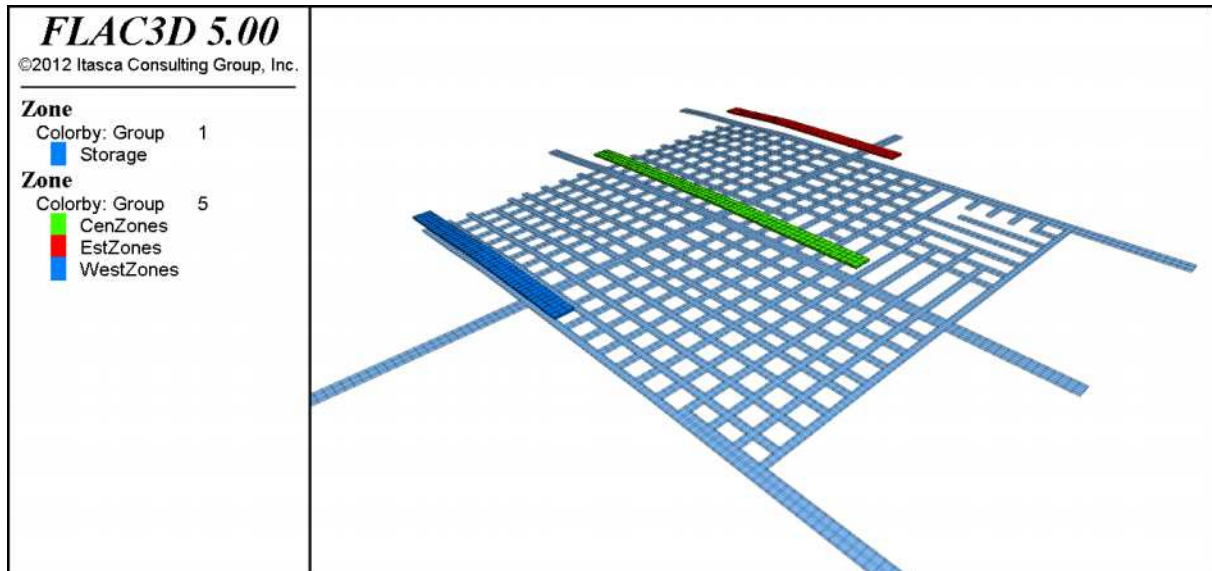


Figure 4-18 : Zones au-dessus des parties ouest, centrale et est du stockage utilisées pour déterminer l'évolution des contraintes verticales au cours du temps.

4.5. Calage des paramètres de la loi de fluage : modèles locaux de convergence

Des modèles locaux de galeries de stockage finement maillés sont mis en œuvre dans le but d'obtenir et de comparer les convergences avec les résultats des mesures.

La limite supérieure est située à environ 20 m au-dessus de l'excavation. La contrainte verticale obtenue à partir du modèle global est appliquée sur cette frontière alors que les déplacements normaux aux autres frontières sont fixés. Le modèle utilise un maillage fin, avec des tailles de zones de 0.3 m (ainsi, une section de galerie de 5.5x2.8m sera maillée en 18x10 zones). La géométrie des modèles prend en compte les symétries.

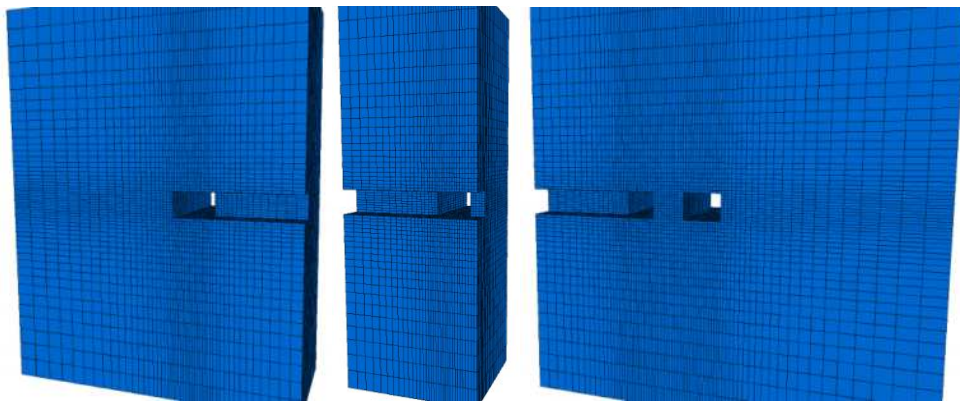


Figure 4-19 : Modèles mis en œuvre pour la simulation des convergences. De gauche à droite : partie ouest, partie centrale et partie est.

Sur la Figure 4-20 sont représentées les galeries pour lesquelles des simulations sont effectuées (rectangle rouges) :

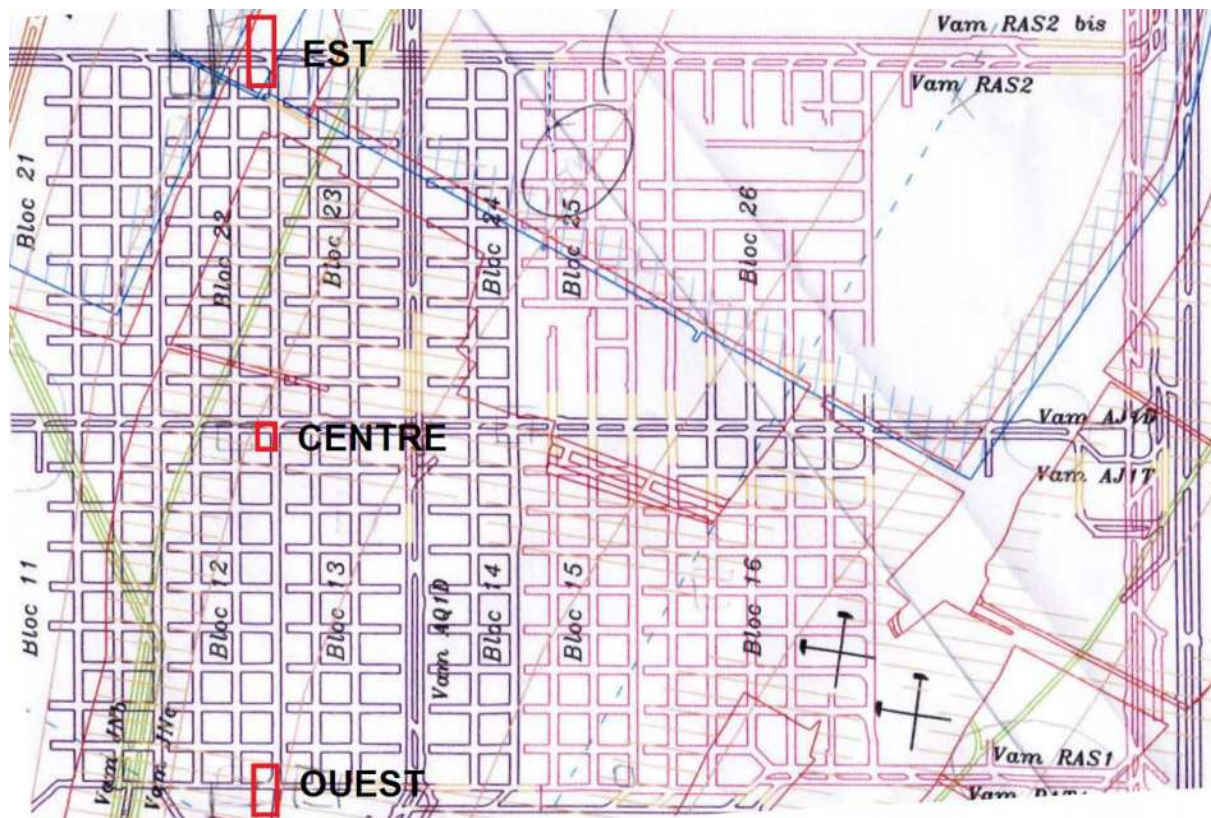


Figure 4-20 : Position des galeries pour lesquelles des simulations sont prévues.

Les galeries sont d'abord excavées en utilisant la méthode de déconfinement (avec des taux de déconfinement de 20, 40, 60, 80 et 100%), en recherchant l'équilibre mécanique à chaque pas de déconfinement. Une période de fluage d'une durée de 10 ans est ensuite simulée, et les convergences verticales entre le toit et le mur de la galerie sont mesurées. Ceci correspond à la mesure intitulée « H2 » dans le rapport géomécanique de L'INERIS.

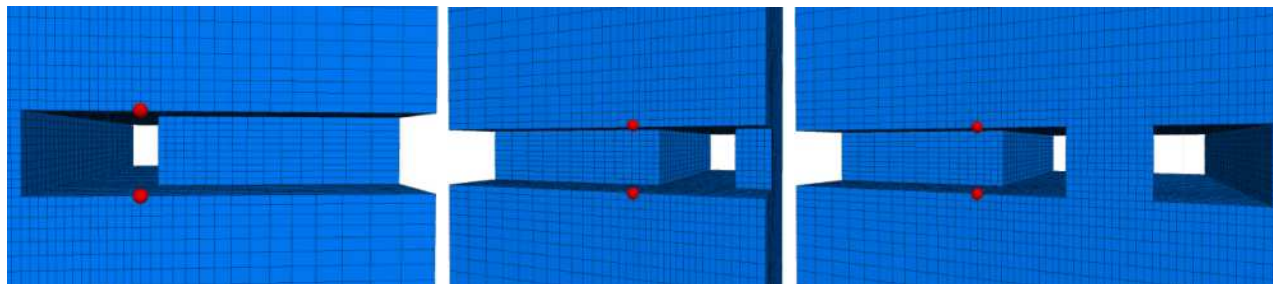


Figure 4-21 : Position des points sur lesquels sont réalisées les mesures des convergences.

Les convergences obtenues avec les paramètres initiaux sont récapitulées dans le Tableau 4-1 en termes de pourcentage de convergence par an, ainsi que les valeurs expérimentales moyennes.

Convergence verticale moyenne	Valeurs expérimentales (%/an)	FLAC3D, modèles locaux (%/an), paramètres initiaux
Ouest	0.64	0.66
Centre	1.14	2.48
Est	0.66	1.16

Tableau 4-1 : Comparaison des convergences obtenues par les modèles FLAC3D (paramètres initiaux pour la loi de Norton) avec les valeurs expérimentales.

A la suite de ces simulations, les paramètres de la loi de fluage sont recalibrés pour obtenir des convergences plus réalistes. Le modèle global est tout d'abord relancé en utilisant ces nouveaux

paramètres, puis les modèles locaux utilisent les nouveaux historiques de contrainte, 20 m au-dessus du stockage, pour obtenir des convergences actualisées. Ce calage aboutit aux paramètres indiqués dans la Tableau 4-2 ci-dessous.

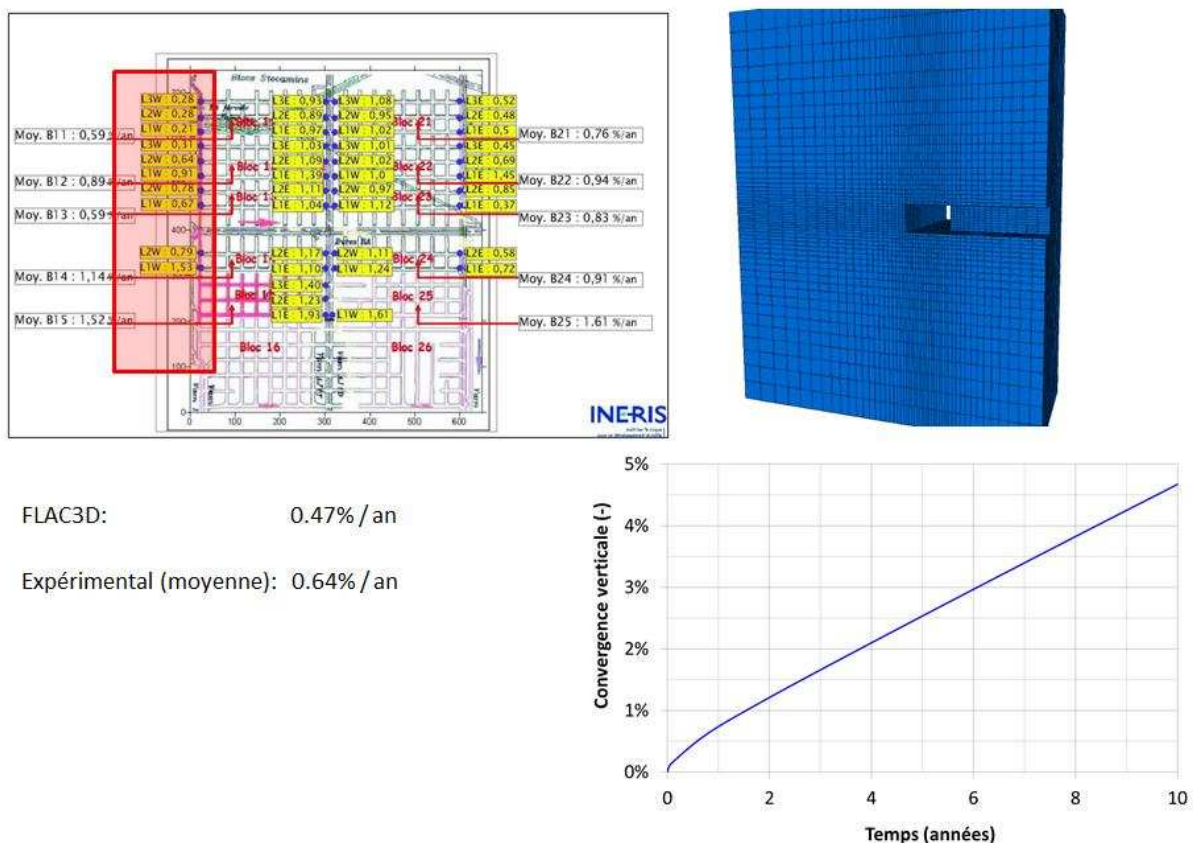
Paramètre de fluage	INERIS	Itasca
A (jour ⁻¹)	0.022	0.015
n (-)	4.0	4.0

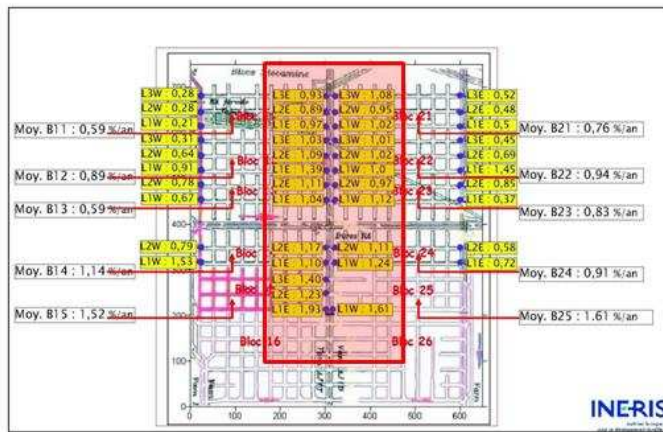
Tableau 4-2 : Paramètre de la loi de fluage de Norton.

Les résultats après 10 ans de fluage du stockage, pour ces nouveaux paramètres, sont donnés dans le Tableau 4-3. Le taux de convergence est quasi constant, de par la loi de fluage utilisée. Ces observations sont en accord avec les valeurs expérimentales (fluage « stable »).

Convergence verticale moyenne	Valeurs expérimentales (%/an)	FLAC3D, modèles locaux (%/an)
Ouest	0.64	0.44
Centre	1.14	1.57
Est	0.66	0.72

Tableau 4-3 : Comparaison des convergences obtenues avec les modèles FLAC3D avec les valeurs expérimentales.





FLAC3D: 1.63% / an

Expérimental (moyenne): 1.14% / an

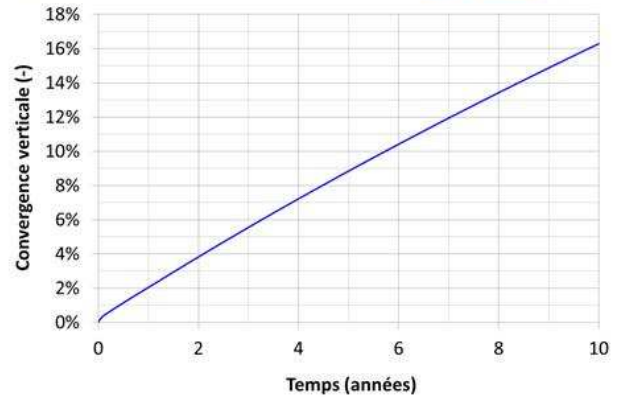
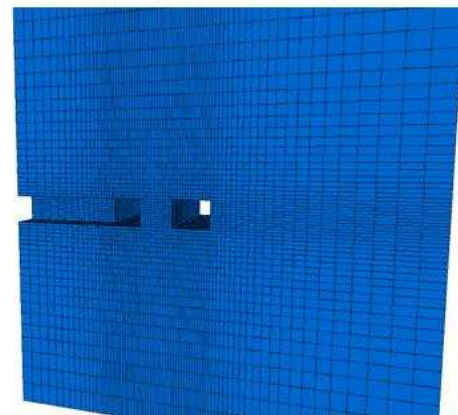
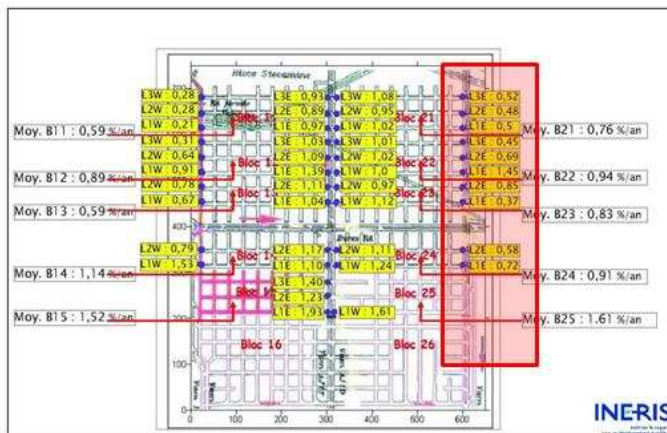


Figure 4-23 : Résultats obtenus avec le modèle simulant la partie centrale du stockage.



FLAC3D: 0.76% / an

Expérimental (moyenne): 0.66% / an

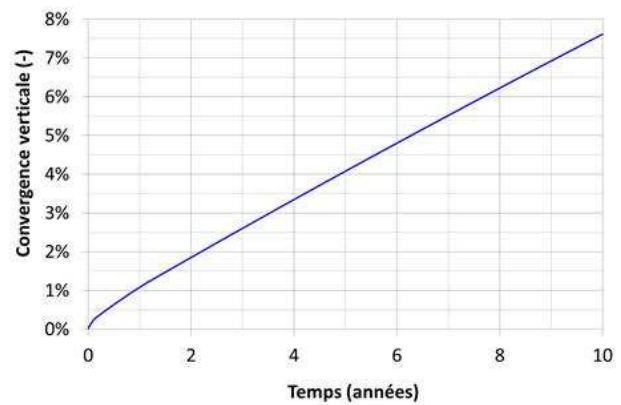


Figure 4-24 : Résultats obtenus avec le modèle simulant la partie est du stockage.

4.6. Résultats pour le modèle global : convergences et évolution de l'état de contraintes au-dessus du stockage

La Figure 4-25 et la Figure 4-27 montrent l'état des zones 10 ans après l'excavation du stockage, respectivement pour les niveaux d'exploitation inférieur et supérieur. Les zones bleues (marquées par le repère 60) sont les zones pour lesquelles la réduction de volume est comprise entre 0 et 60% (soit des volumes représentant entre 100% et 40% du volume initial), alors que les zones rouges (repère 80) sont celles pour lesquelles la réduction est comprise entre 60 et 80%. Les modules de Young correspondants sont indiqués sur la Figure 4-26 et la Figure 4-28 (l'échelle de la légende est en MPa).

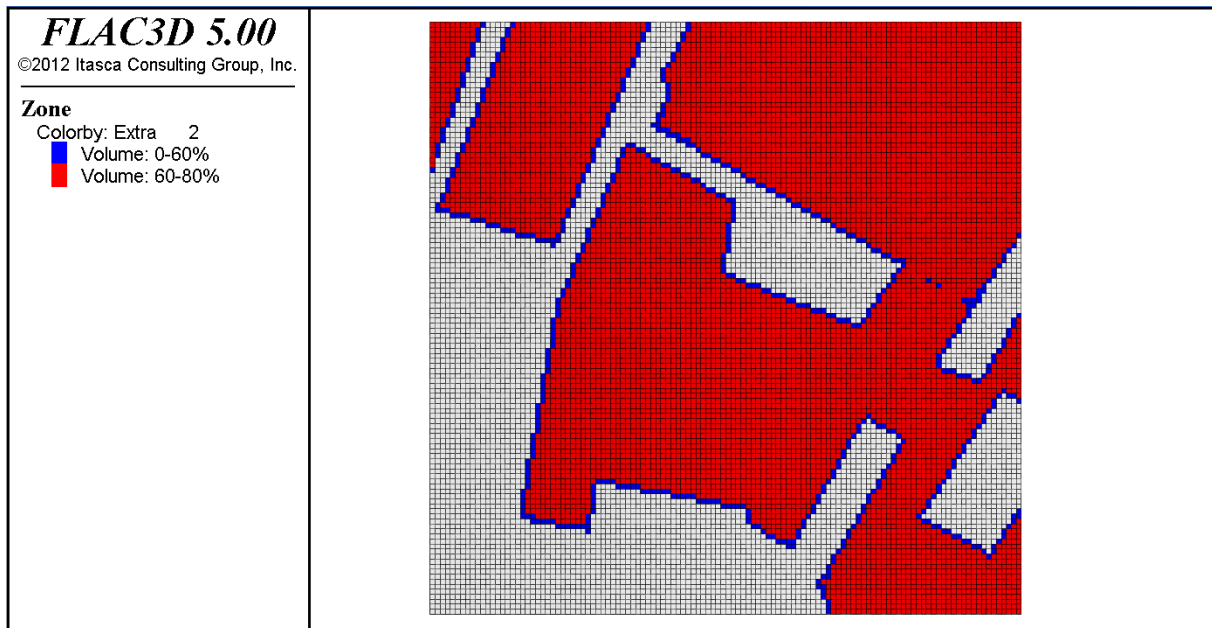


Figure 4-25 : Réduction de volume dans les éléments représentant le niveau d'exploitation inférieur datant des années 40 et 60.

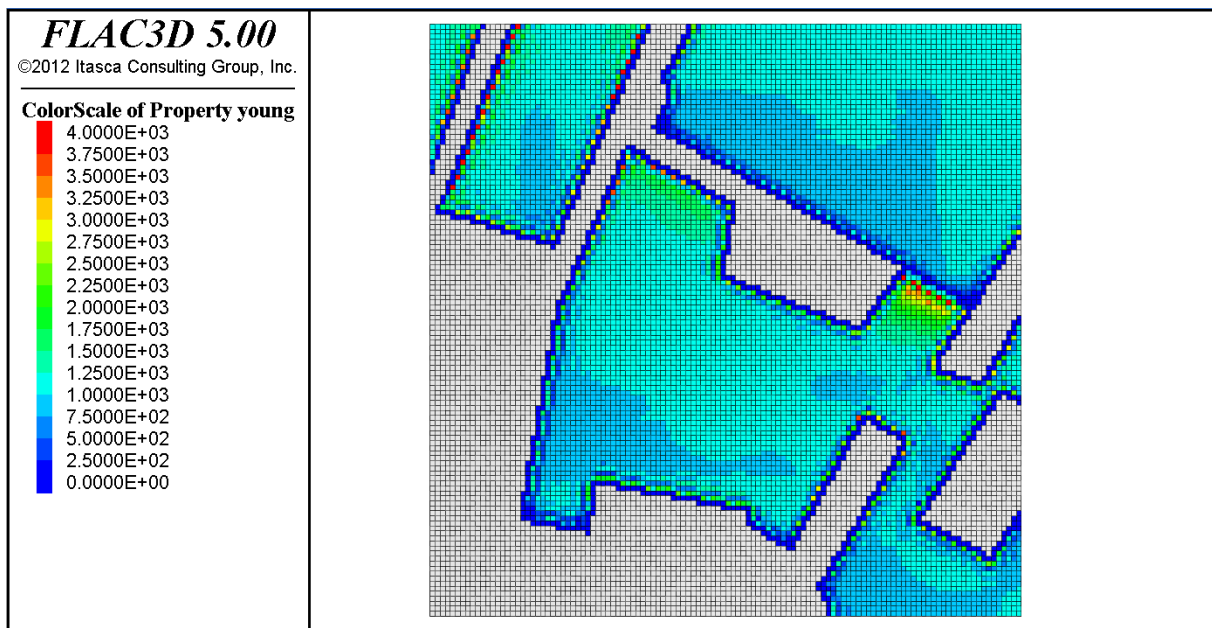


Figure 4-26 : Module de Young (en MPa) dans les éléments représentant le niveau d'exploitation inférieur datant des années 40 et 60.

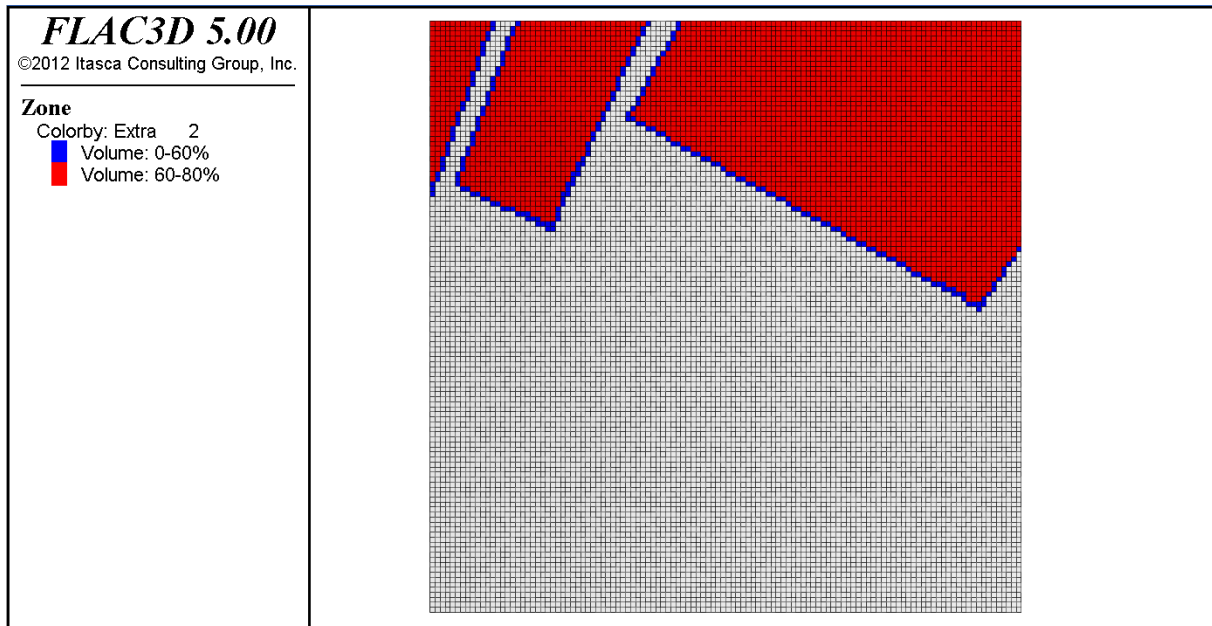


Figure 4-27 : Réduction de volume dans les éléments représentant le niveau d'exploitation supérieur datant des années 50.

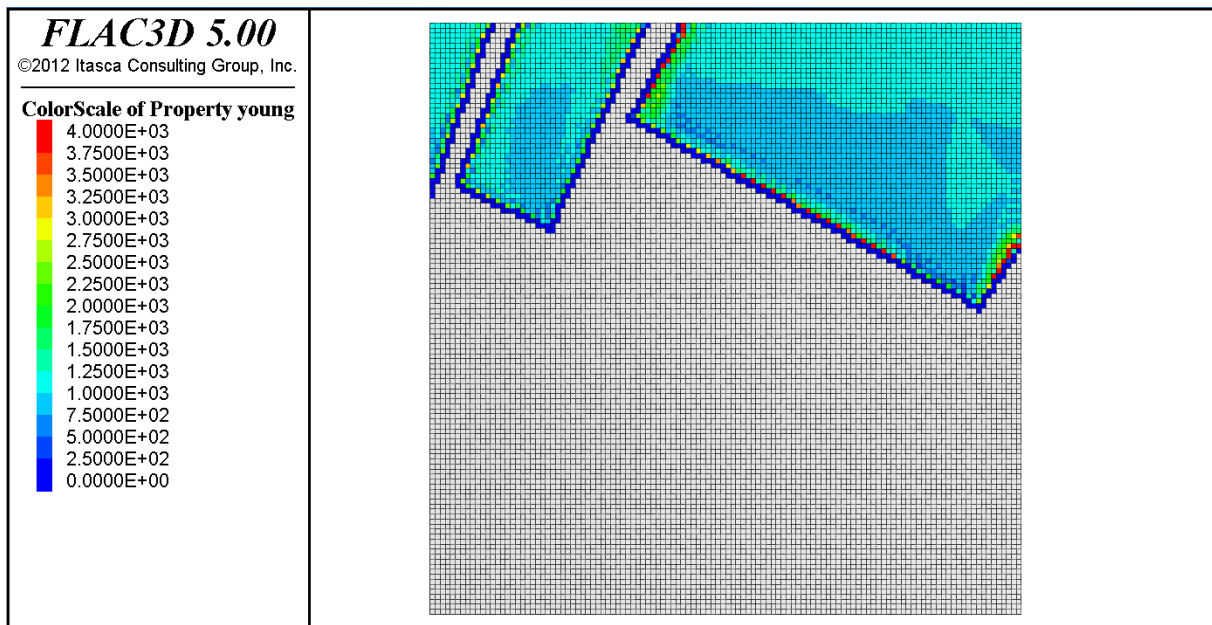


Figure 4-28 : Module de Young (en MPa) dans les éléments représentant le niveau d'exploitation supérieur datant des années 50.

Les convergences du modèle global dans les galeries de stockage après 10 ans de fluage sont montrées en Figure 4-29 et comparées avec les valeurs expérimentales calculées par Ineris. Comme on peut le voir dans le Tableau 4-4, les valeurs obtenues sont cohérentes avec les convergences expérimentales, en particulier si la comparaison est faite en terme de moyenne des convergences sur les parties ouest, centrale et est du stockage. Elles sont globalement légèrement sous-estimées, ce qui correspond à une remontée en contraintes plus lente que la réalité. Ce modèle servant à estimer la contrainte agissant sur les modèles locaux, ce léger biais est pessimiste pour le problème étudié (fermeture moins rapide des vides du stockage).

Enfin, la Figure 4-18 montre l'évolution des contraintes verticales au-dessus du stockage sur une période de 4500 ans. Trois évolutions sont présentées, représentatives des contraintes verticales au-dessus des parties ouest, centrale et est du stockage. Ces évolutions sont la donnée d'entrée des modèles locaux utilisés pour simuler la fermeture mécanique du stockage à long terme.

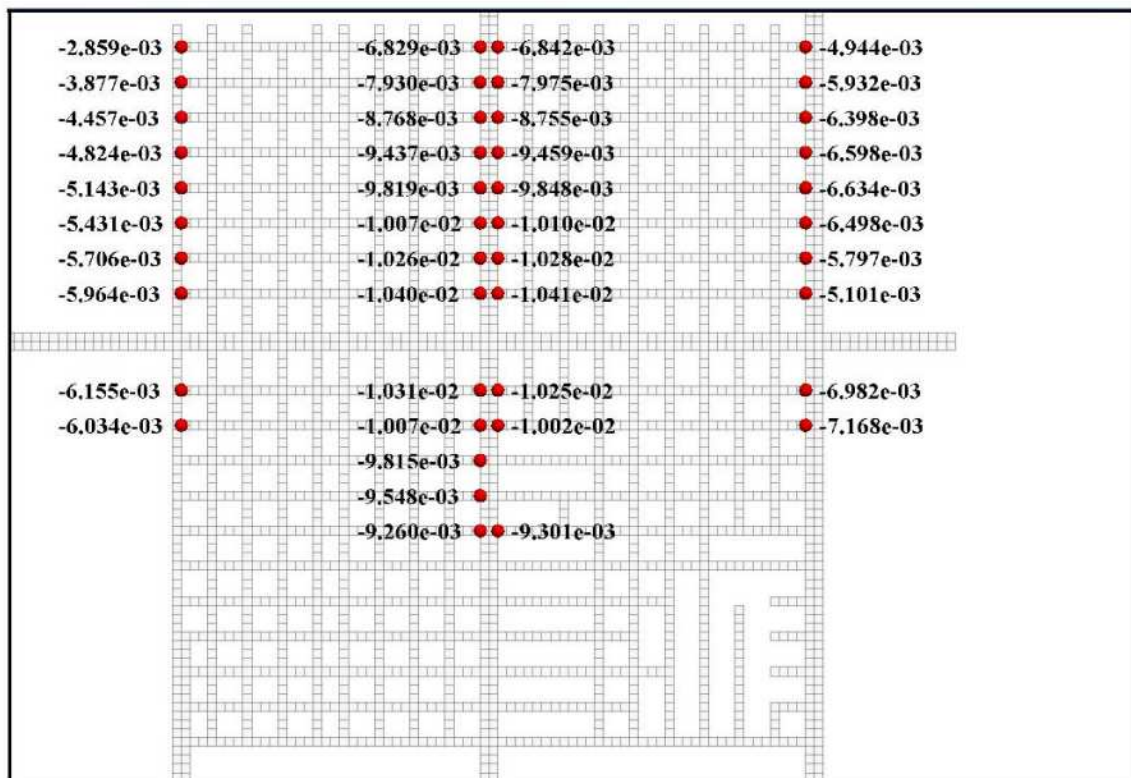
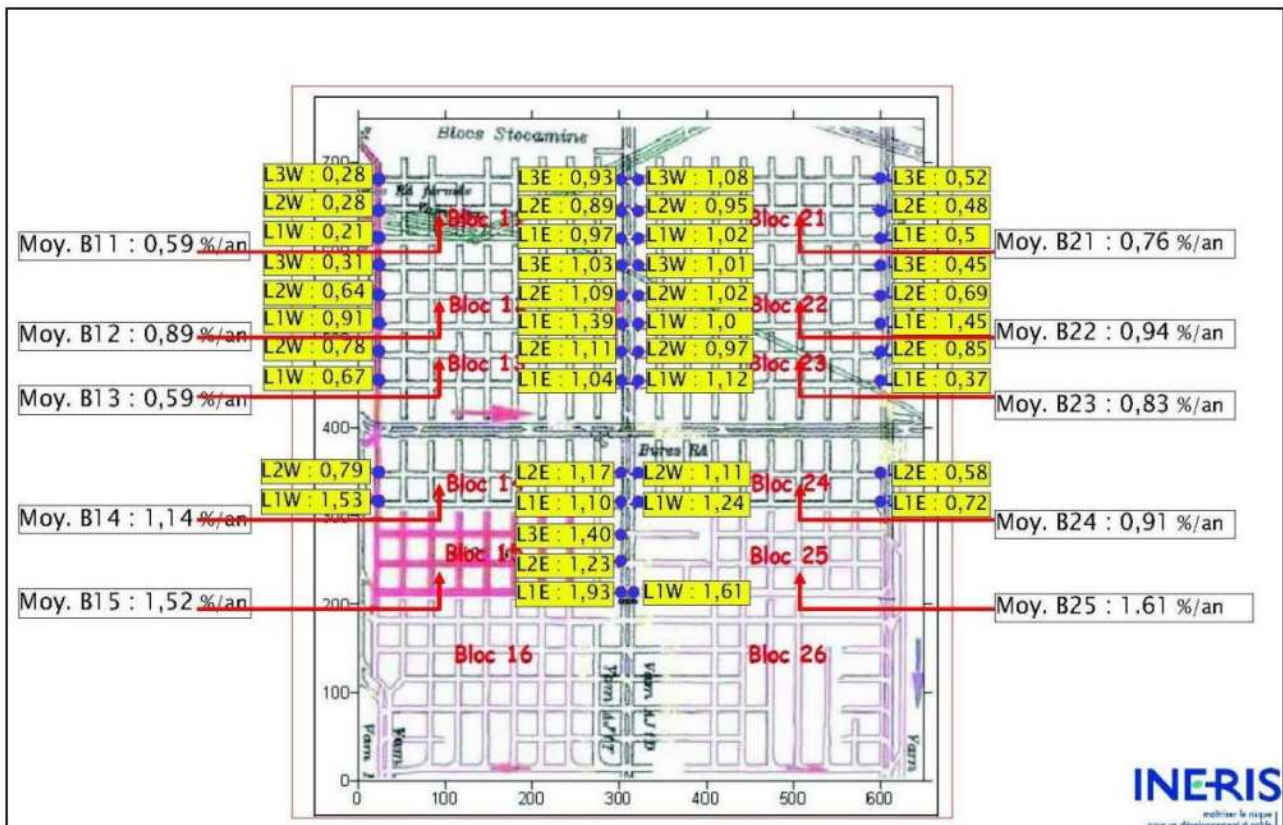


Figure 4-29 : Comparaison entre les convergences expérimentales et celles obtenues avec FLAC3D après 10 ans de fluage (valeurs en %/an).

Convergence verticale moyenne	Mesures (%/an)	FLAC3D, modèle global (%/an)
Ouest (à gauche sur la figure)	0.64	0.50
Centre	1.14	0.94
Est (à droite sur la figure)	0.66	0.62

Tableau 4-4 : Comparaison entre les convergences verticales moyennes.

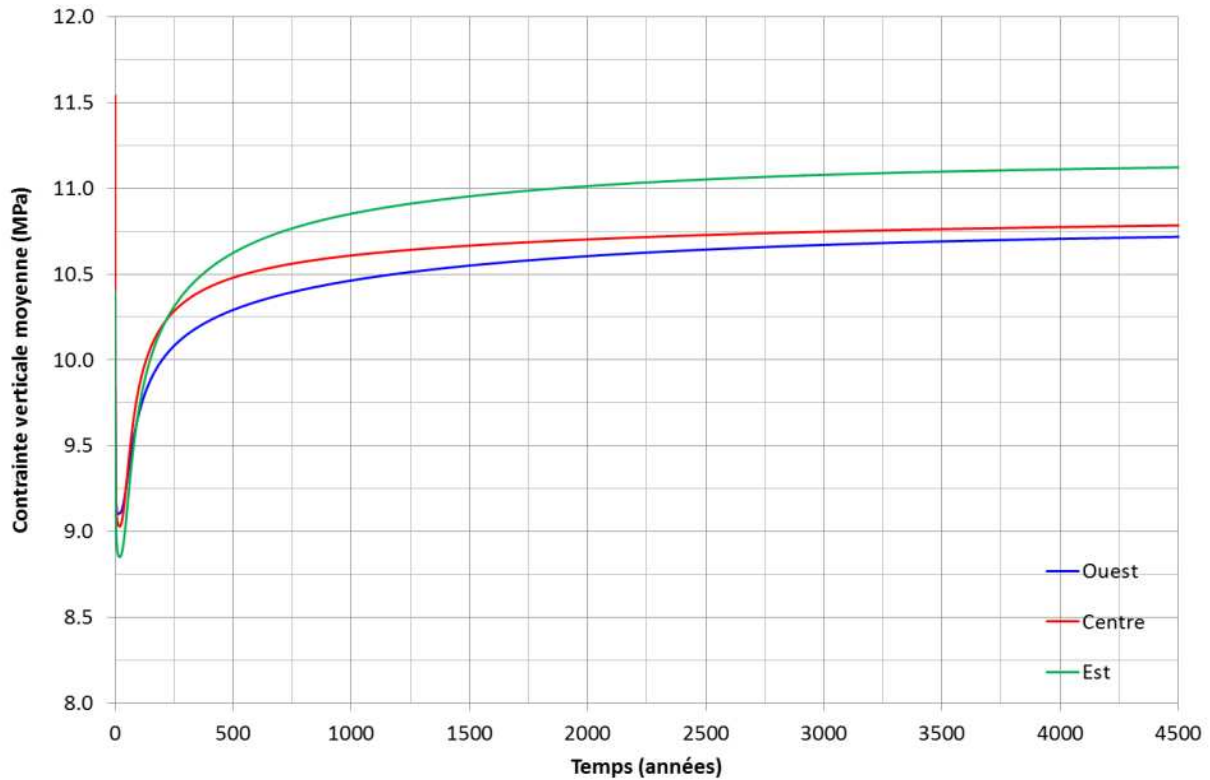


Figure 4-30 : Evolution des contraintes verticales avec le temps sur une période de 4500 ans, 20 m au-dessus des galeries de stockage.

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

5.1. Hypothèses

5.1.1. Les différents cas de calculs

StocaMine a indiqué dans un courrier [4] les différentes hypothèses à étudier sur les dates de remontée de la saumure au droit du stockage. Trois hypothèses sont prises en compte. Ces hypothèses correspondent à des estimations des vides résiduels dans les travaux anciens, et 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 – jusqu'au niveau -400m, puis jusqu'à la nappe. Le Tableau 5-1 récapitule les temps et les pressions correspondant aux trois hypothèses, en utilisant pour la saumure saturée une densité de 1.28.

	Hypothèse 1	Hypothèse 2	Hypothèse 3
Estimation des vides résiduels dans les travaux anciens (%)	30	30	20
Estimation des débits d'arrivée de saumure (m ³ /an)	58 000	22 000	105 000
Arrivée de la saumure au stockage (ans) Pression 0m	421	642	240
Arrivée de la saumure à la cote -400m (ans) Pression 150*1.28 = 192m	477	659	294
Arrivée de la saumure au niveau de la nappe (ans) Pression 600m	505	706	304

Tableau 5-1 : Les hypothèses de remontée de l'eau.

Par ailleurs, StocaMine souhaite l'étude de deux configurations de barrages bentonitiques : d'une part, des barrages simples de longueur 5 m, et d'autre part des barrages doubles, chaque barrage étant constitué de deux noyaux de longueur 5 m. Itasca a proposé de n'étudier la mise en place de barrages doubles que pour le cas « moyen » de remontée de l'eau, qui correspond à l'hypothèse 1 ci-dessus. Il vient donc quatre cas de calcul de l'envahissement du stockage par la saumure :

- Cas 1 : Hypothèse 1, 1 noyau ;
- Cas 2 : Hypothèse 2, 1 noyau ;
- Cas 3 : Hypothèse 3, 1 noyau ;
- Cas 4 : Hypothèse 1, 2 noyaux.

Ces quatre cas sont ceux étudiés ci-dessous.

5.1.2. Les propriétés et la géométrie

StocaMine indique que la perméabilité de la bentonite sera au maximum de 10^{-18} m^2 . Par ailleurs, la masse volumique de la saumure est de 1280 kg/m^3 , et sa viscosité varie de 3 à 2 centiPoises environ entre 0 et 20°C. En se basant sur ces chiffres, il vient une perméabilité de Darcy de la bentonite égale à $6 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$.

Les propriétés de la bentonite du point de vue de l'écoulement non-saturé sont tirées d'un rapport Nagra [5], qui cite les travaux de Brooks et Corey [6]. On considère que le comportement de la bentonite peut être approché par la loi de Brooks-Corey, qui définit les variations de la perméabilité relative et de la pression avec le degré de saturation. Pour mémoire, cette loi s'écrit :

$$S_e(\psi) = \frac{1}{|\alpha\psi|^n} \quad \text{si } \psi < -\frac{1}{\alpha}, \quad (8)$$

$$S_e(\psi) = 1 \quad \text{si } \psi \geq -\frac{1}{\alpha} \quad (9)$$

Et

$$K_r(\psi) = S_e^\kappa \quad (10)$$

Où :

S_e est la saturation effective ;

ψ est la pression exprimée en m ;

K_r est la perméabilité relative ;

α , n et κ sont les paramètres (adimensionnels) de la loi de Brooks-Corey.

Notons que ces caractéristiques ne prennent pas en compte le gonflement de la bentonite lors de sa saturation. Même si celui-ci est moins important a priori en présence de saumure qu'en présence d'eau, il a tendance à diminuer la perméabilité du matériau. Les propriétés de la bentonite sont résumées dans la Tableau 5-2.

Paramètre	Valeur
Masse volumique (kg/m ³)	1280
Perméabilité (m/s)	6 10 ⁻¹²
Porosité (%) [7]	30
Saturation résiduelle (%)	25
Coefficient α	2.67
Coefficient κ	4
Coefficient n	2

Tableau 5-2 : Les propriétés de la bentonite utilisées dans le modèle.

La hauteur des barrages, à partir de sections de 3m de hauteur, est estimée à 5m, en prenant une « garde » de 1m tout autour de la galerie. Une tranche de barrage d'épaisseur 1m est simulée. La Figure 5-1 ci-dessous illustre le maillage utilisé. Le double barrage est simulé par un barrage unique de longueur double. Ceci va dans le sens de la sécurité, puisque l'intervalle entre les deux noyaux constitue un « réservoir » qui doit être rempli avant que le deuxième noyau ne puisse subir la pression de la saumure. La Figure 5-2 illustre le maillage de ce barrage « double », de longueur 10 m.

Les deux modèles de barrage ci-dessous ont une section transversale de 5 m². La section totale de barrages autour du stockage, estimée par StocaMine, est de 660 m². Les débits obtenus par le modèle seront donc multipliés par un facteur 132 pour obtenir les débits entrant dans le stockage.

Les conditions aux limites sont simples : du côté externe, la pression d'eau varie suivant les hypothèses indiquées pour chaque cas ; du côté interne (coté du stockage), une condition de suintement est appliquée : la pression est fixée à zéro quand la saturation atteint 1. 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 que longtemps après la fin des simulations exposées ici.

Les deux frontières latérales et les deux faces horizontales sont des frontières imperméables. Enfin la saturation initiale de la bentonite est estimée à 30%.

Pour les conditions décrites ci-dessus, l'écoulement tend *in fine* vers un état permanent correspondant au débit maximum pouvant traverser le barrage.

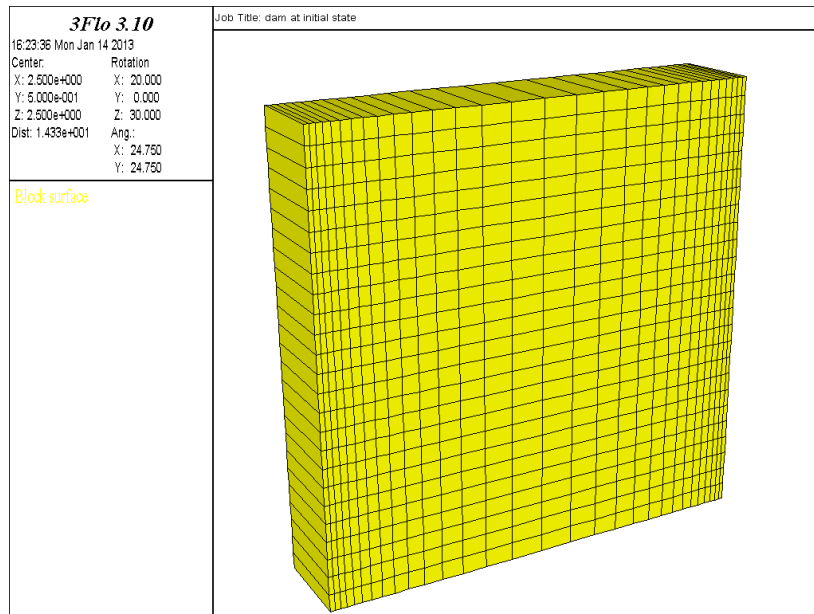


Figure 5-1 : Modèle d'un barrage de longueur 5 m et de hauteur 5m. Tranche d'épaisseur 1m.

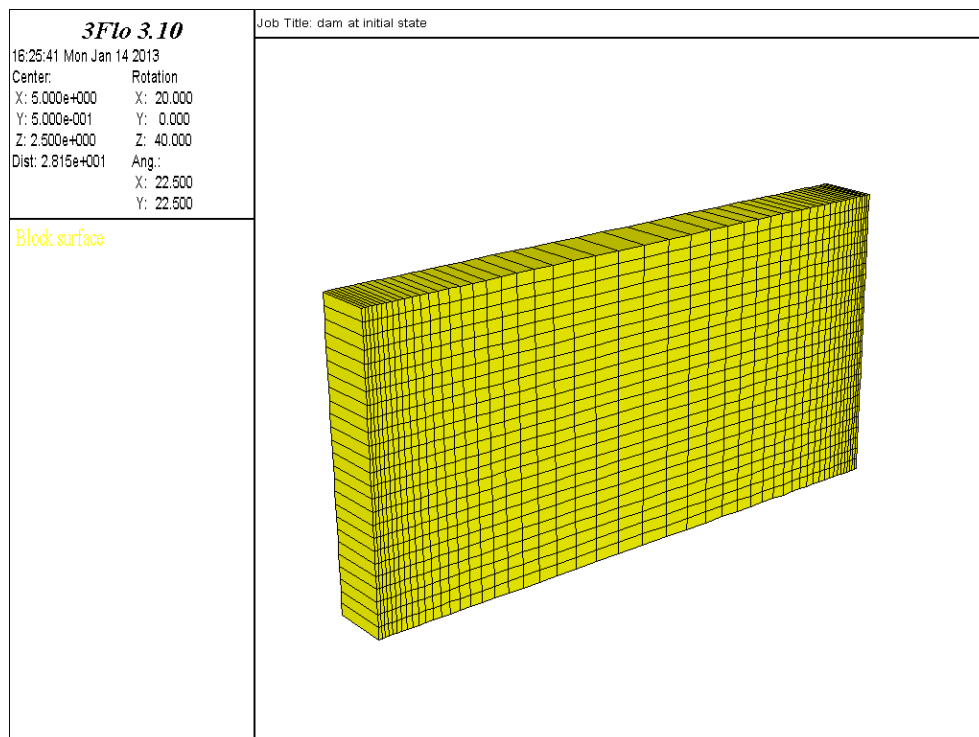


Figure 5-2 : Modèle d'un barrage de longueur 10 m et de hauteur 5m. Tranche d'épaisseur 1m.

5.2. Résultats

Pour chacun des quatre cas de calcul, trois figures illustrent les résultats obtenus. L'ensemble des figures donnent les variations de paramètres dans le temps, avec un temps initial correspondant à l'arrivée de la saumure au stockage (1^{ère} ligne du tableau 4-1). Les figures donnent respectivement :

- La variation de la pression sur la face extérieure : le « moteur » de la saturation
- La variation du volume de saumure dans le barrage : l'évolution de la saturation avec le temps
- La variation du volume total d'eau passant les frontières externe (volume entrant) et interne (volume sortant du barrage et pénétrant dans le stockage).

Les volumes sont ici donnés pour la configuration du modèle, et donc représentent 1/132^{ème} des volumes réels autour du stockage.

Par ailleurs, le débit traversant le barrage une fois l'écoulement permanent atteint est de $3.72 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ pour le barrage simple (cas 1, 2, et 3), et de $1.86 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ pour le barrage double (cas 4). Ces valeurs correspondent à un débit total entrant dans le stockage de $15.5 \text{ m}^3/\text{an}$ pour les cas 1, 2 et 3 et de $7.75 \text{ m}^3/\text{an}$ pour le cas 4.

5.2.1. Cas 1 : Vides résiduels 30%, 58 000 m3/an, barrage simple

Ici, le temps initial correspond à 421 ans après la fermeture du stockage. Le barrage est saturé après 84 ans, soit 505 années après la fermeture du stockage. Cette date correspond aussi au moment où la pression atteint son maximum et où le débit permanent de $15.5 \text{ m}^3/\text{an}$ est atteint.

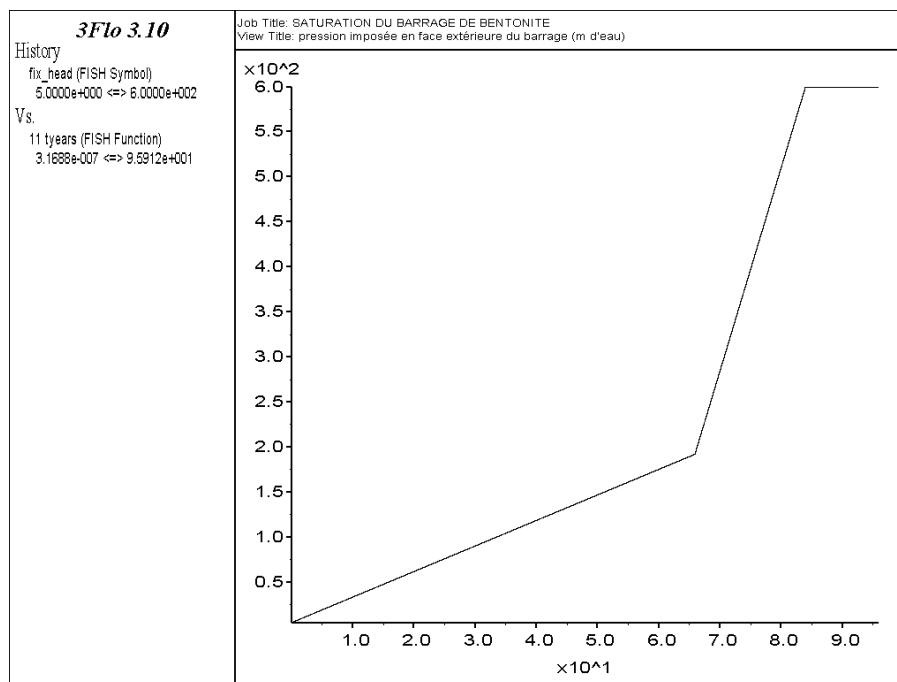


Figure 5-3 : Cas 1, historique de la pression en face externe (m).

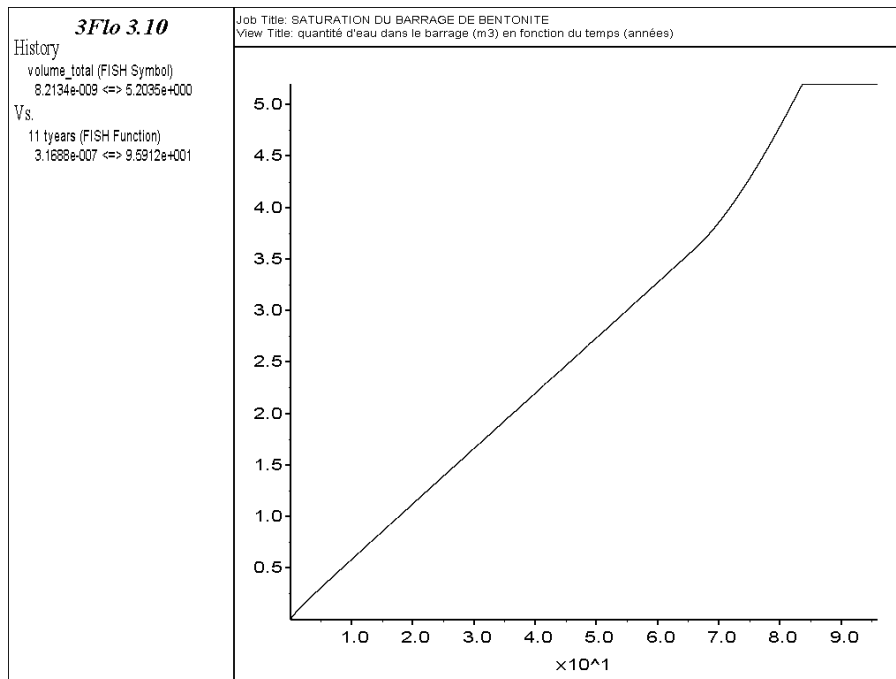


Figure 5-4 : Cas 1, historique du volume de saumure dans le barrage (m3).

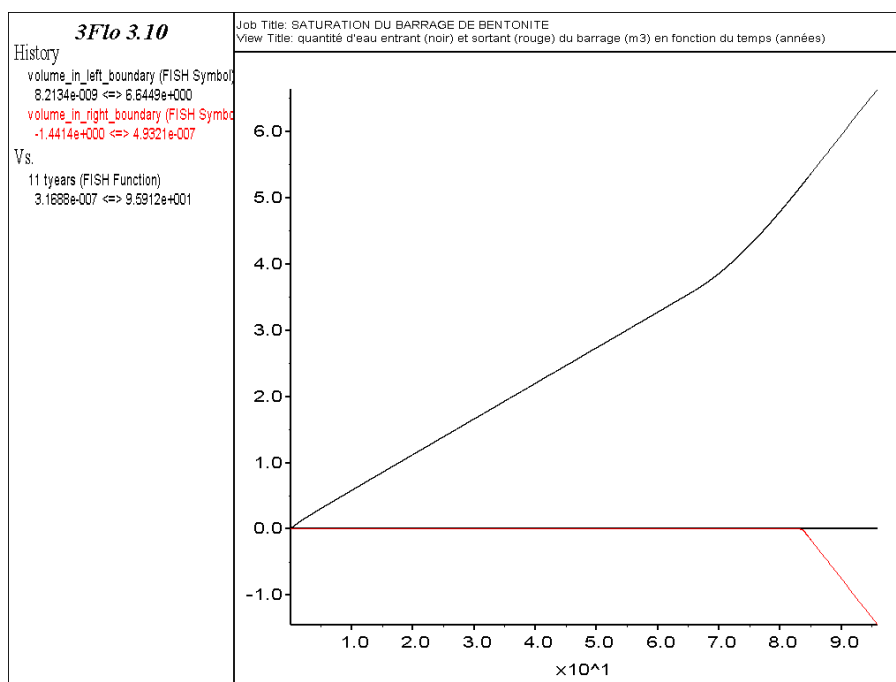


Figure 5-5 : Cas 1, historique du volume total d'eau qui a pénétré dans le barrage (noir) et du volume total d'eau qui est sorti du barrage par sa face interne (rouge). Volumes en m³.

5.2.2. Cas 2 : Vides résiduels 30%, 22 000 m3/an, barrage simple

Ici, le temps initial correspond à 642 ans après la fermeture du stockage. Le barrage est saturé après 55 ans, soit 697 années après la fermeture du stockage. Le débit permanent de 15.5m³/an est atteint après 74 ans, soit 716 années après la fermeture du stockage.

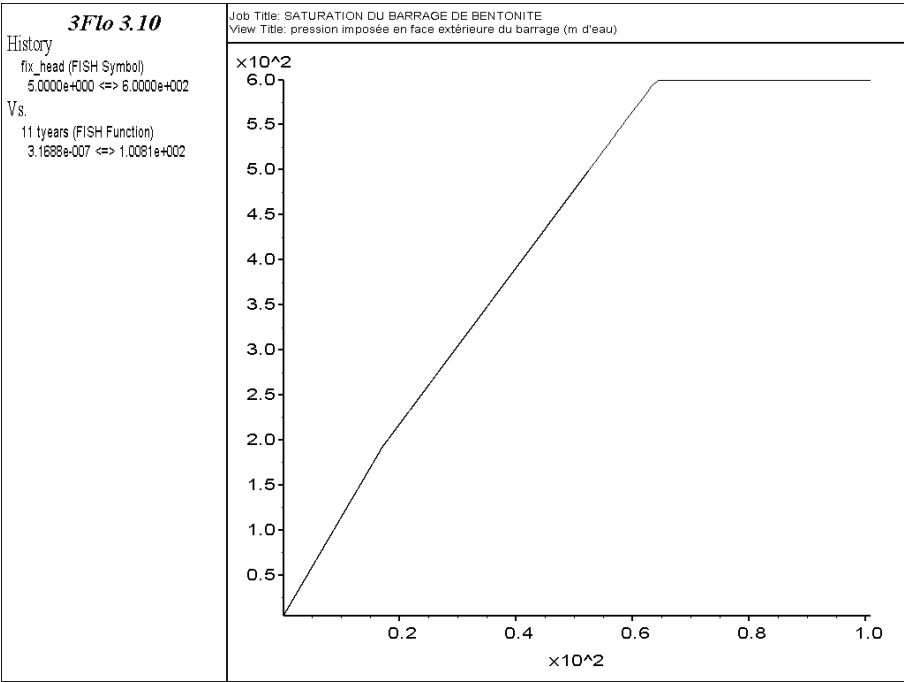


Figure 5-6 : Cas 2, historique de la pression en face externe (m).

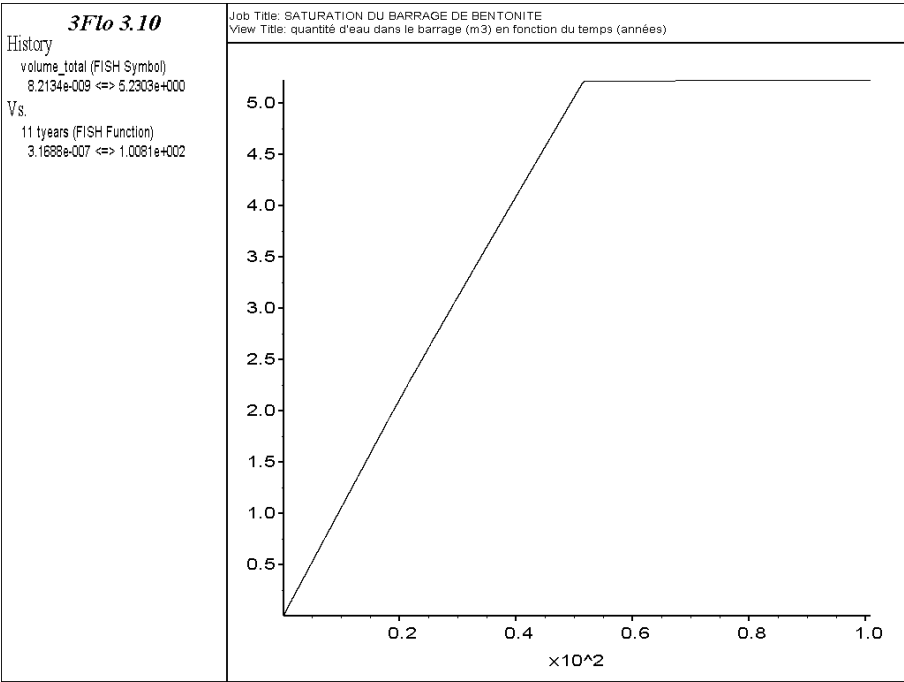


Figure 5-7 : Cas 2, historique du volume de saumure dans le barrage (m3).

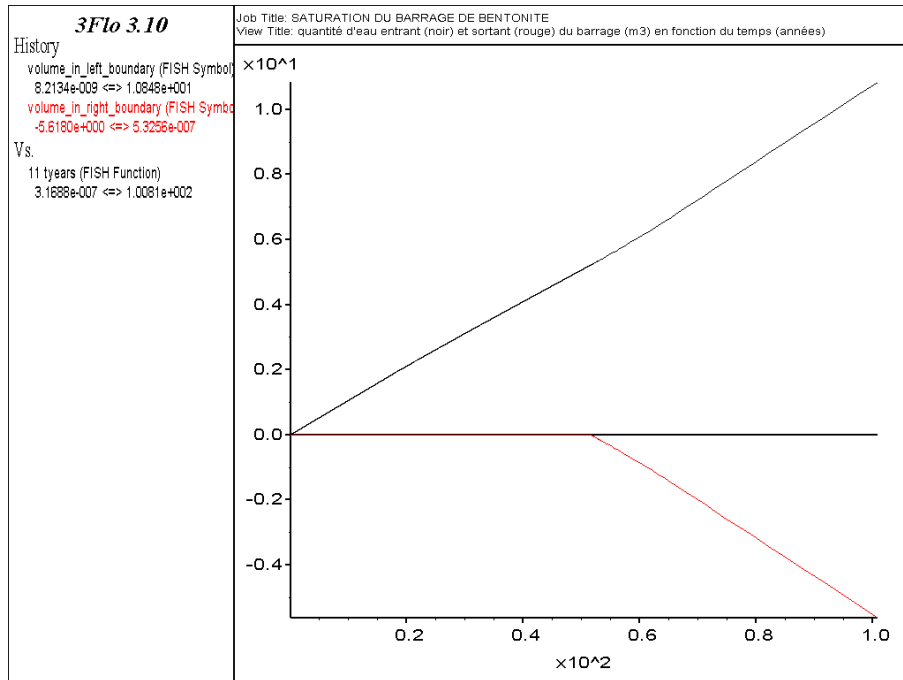


Figure 5-8 : Cas 2, historique du volume total d'eau qui a pénétré dans le barrage (noir) et du volume total d'eau qui est sorti du barrage par sa face interne (rouge). Volumes en m³.

5.2.3. Cas 3 : Vides résiduels 20%, 105 000 m³/an, barrage simple

Ici, le temps initial correspond à 240 ans après la fermeture du stockage. Le barrage est saturé après 72 ans, soit 312 années après la fermeture du stockage. Le débit permanent de 15.5m³/an est atteint en même temps, au moment où la pression atteint sa valeur maximale.

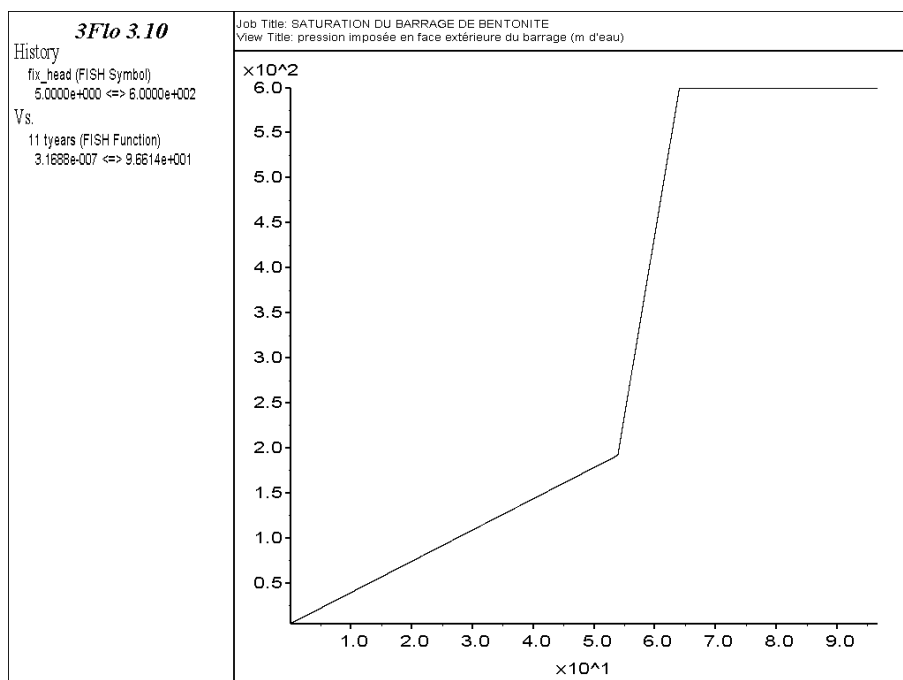


Figure 5-9 : Cas 3, historique de la pression en face externe (m).

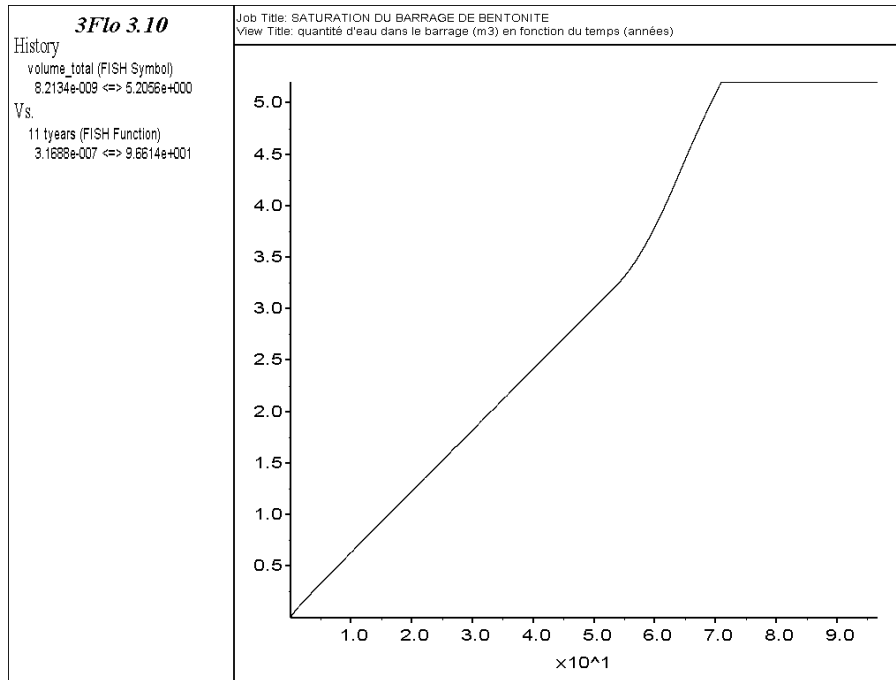


Figure 5-10 : Cas 3, historique du volume de saumure dans le barrage (m3).

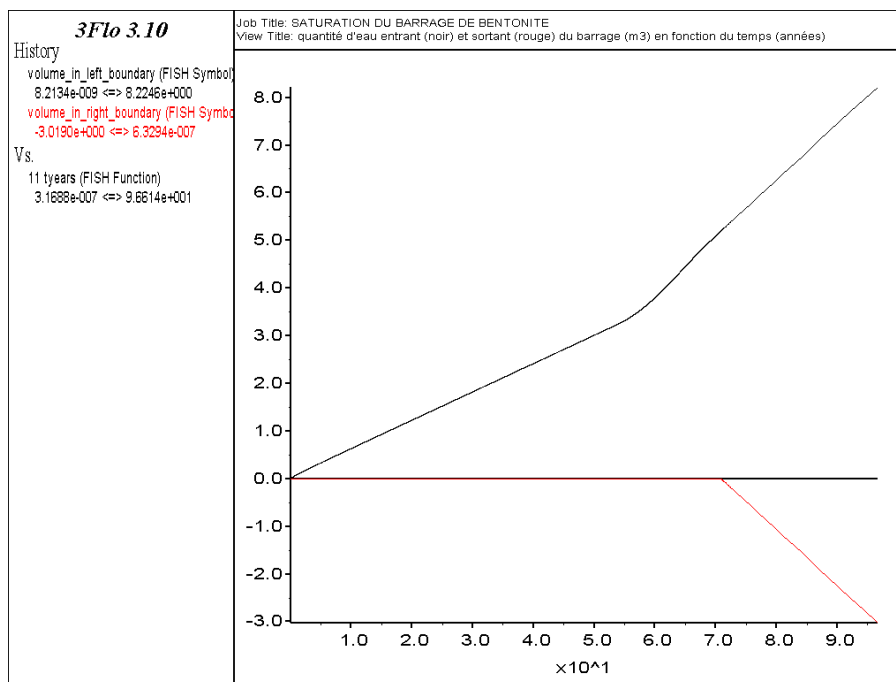


Figure 5-11 : Cas 3, historique du volume total d'eau qui a pénétré dans le barrage (noir) et du volume total d'eau qui est sorti du barrage par sa face interne (rouge). Volumes en m³.

5.2.4. Cas 4 : Vides résiduels 30%, 58 000 m3/an, barrage double

Ici, le temps initial correspond à 421 ans après la fermeture du stockage. Le barrage est saturé après 153 ans, soit 574 années après la fermeture du stockage. Le débit permanent de 7.75m³/an est atteint en même temps.

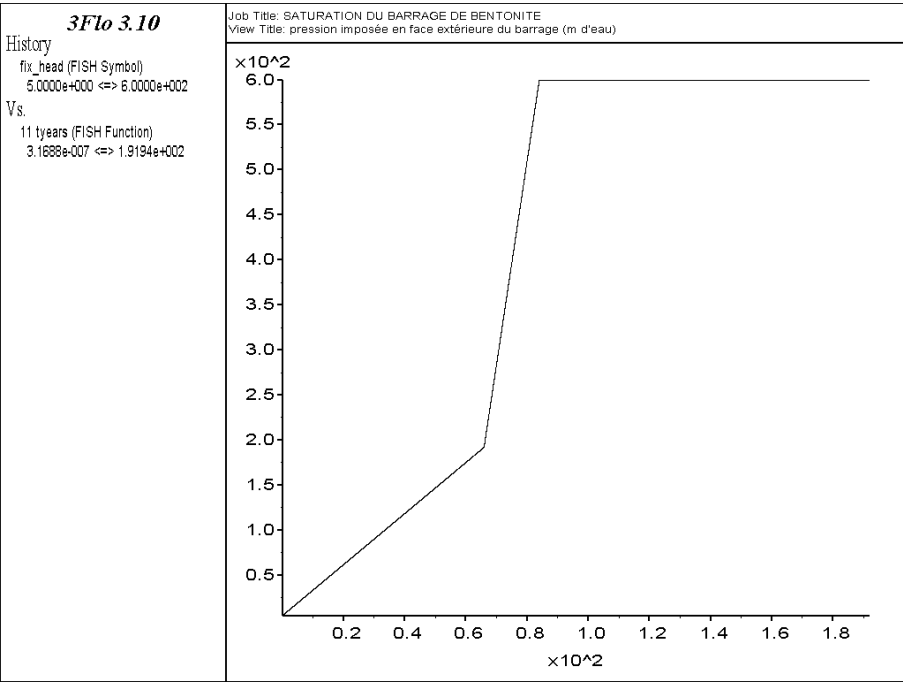


Figure 5-12 : Cas 4, historique de la pression en face externe (m).

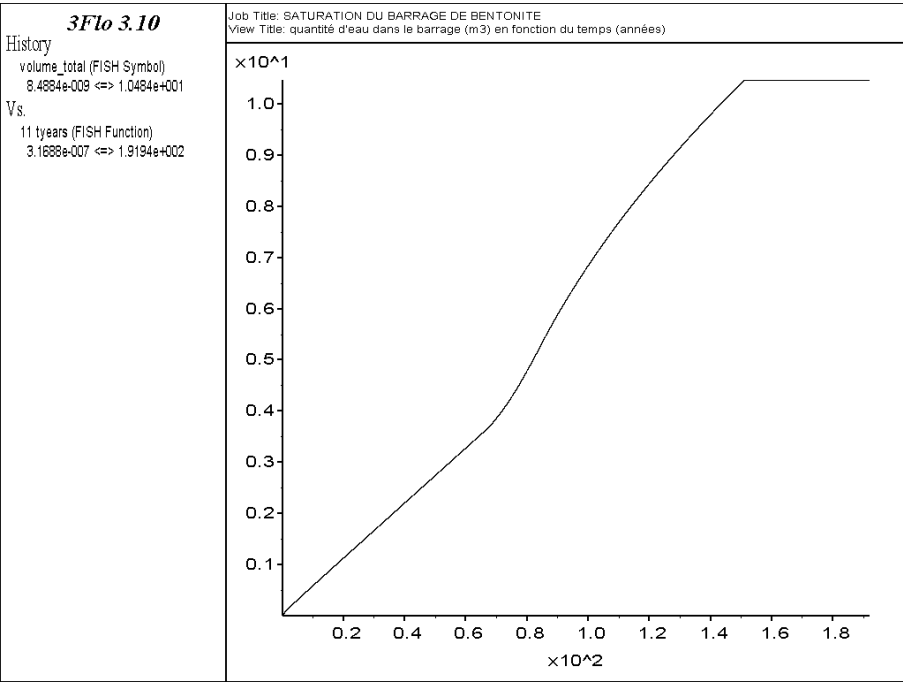


Figure 5-13 : Cas 4, historique du volume de saumure dans le barrage (m3).

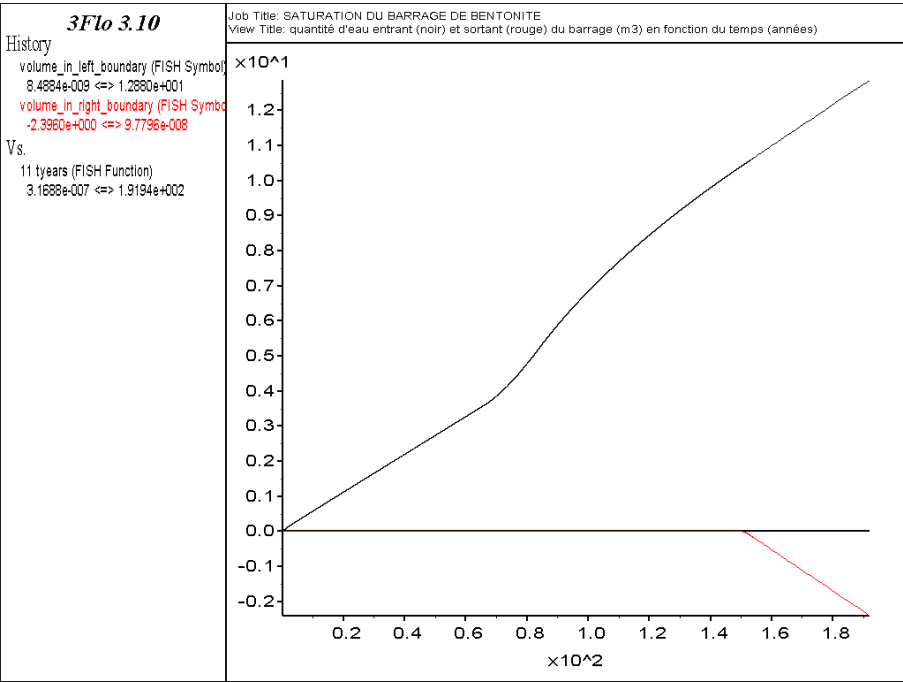


Figure 5-14 : Cas 4, historique du volume total d’eau qui a pénétré dans le barrage (noir) et du volume total d’eau qui est sorti du barrage par sa face interne (rouge). Volumes en m³.

6. SIMULATION DE LA FERMETURE AVANT L'ENNOYAGE

La fermeture du stockage est évaluée en simulant tout d'abord l'évolution de la fermeture des différentes configurations des tunnels du stockage à l'aide de modèles locaux (tunnels vides, partiellement remplis avec des blocs de sel décollés, des déchets et du béton). Leur combinaison permet ensuite d'évaluer la fermeture globale, pour chaque option de remplissage. Dans ce paragraphe, la présence de la saumure *in fine* n'est pas prise en compte. Ces simulations ne sont donc valides que jusqu'au moment où la saumure a complètement envahi le stockage.

6.1. Fermeture des différentes configurations de galeries

Quatre configurations de galeries ont été considérées pour simuler la fermeture mécanique des galeries de stockage au cours du temps :

- Galerie vide ;
- Galerie partiellement remplie avec des blocs de sel décollés du toit - épaisseur de toit décollée de 2 m ;
- Galerie remplie à 70% de déchets ;
- Galerie remplie de béton.

Pour chaque configuration, l'excavation de la galerie est d'abord réalisée en utilisant la méthode de déconfinement explicitée en § 4.3. Cinq pas de déconfinement sont simulés avec des taux de déconfinement successifs de 20, 40, 60, 80 et 100%. Le fluage est ensuite simulé sur une période de 4500 ans. Au cours de ce fluage, la contrainte appliquée sur la frontière supérieure du modèle est mise à jour de façon à tenir compte de l'évolution des contraintes déduite du modèle global (moyenne sur les évolutions des contraintes en parties ouest, centrale et est du stockage). Cette évolution est présentée en Figure 6-1.

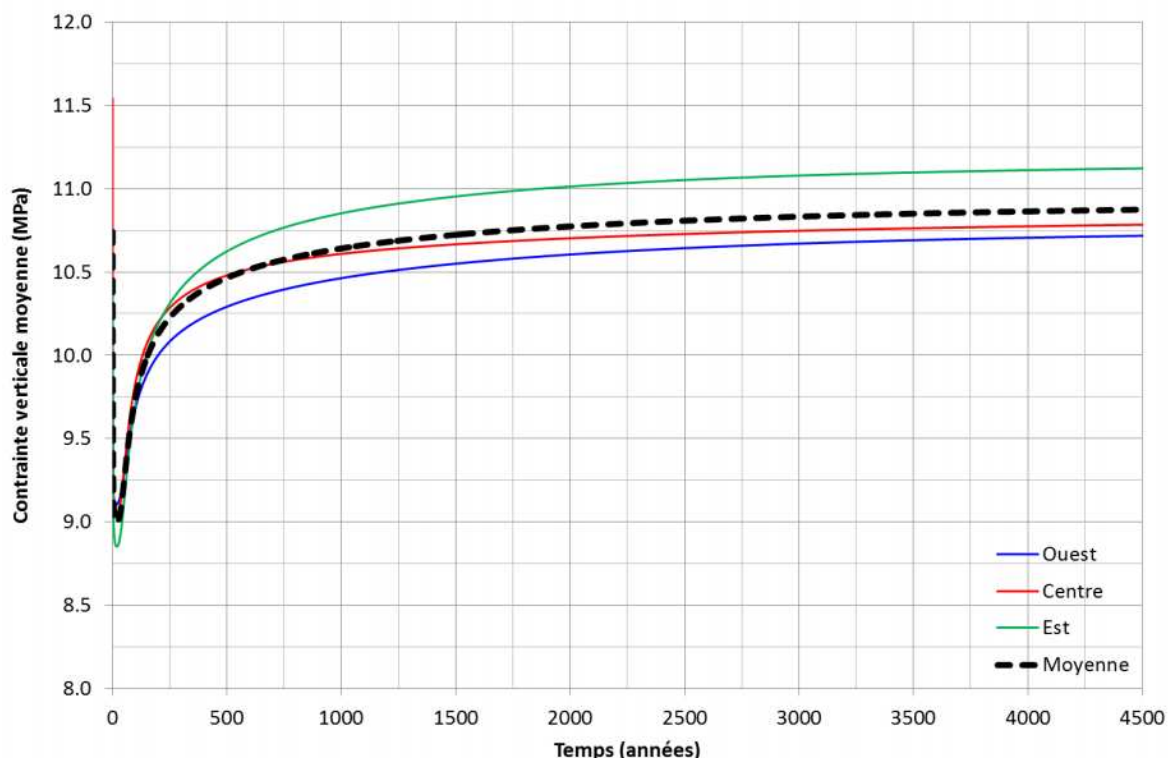


Figure 6-1 : Evolution des contraintes verticales à 20 m au-dessus du stockage. La ligne en pointillés représente l'évolution moyenne.

6.1.1. Galeries vides

Dans le cas des galeries vides, les modèles représentant une intersection de galeries ne peuvent pas simuler une période de fluage supérieure à environ 50-100 ans. En effet, la déformation excessive des éléments volumiques engendrée au niveau des intersections interdit la poursuite de la simulation à cause de la géométrie non conforme qui en résulte.

Afin de pallier à ce problème, il a été décidé de simuler des géométries simplifiées de galeries, en 2D : une première représentant une section perpendiculaire à une des galeries du stockage (avec une largeur d'excavation de 5.5 m) et une seconde représentant une section perpendiculaire à une double voie d'accès au stockage (deux tunnels de 3.8 m de largeur séparés par un pilier de 3.2 m de largeur). Les résultats de tels modèles permettent d'avoir un aperçu pessimiste de la fermeture des galeries au cours du temps, étant donné que dans ce cas, la fermeture sera bien plus lente que dans le cas d'une intersection de deux galeries du stockage.

Les Figure 6-2 et Figure 6-3 présentent les résultats obtenus avec les modèles 2D des deux sections considérées. Les deux courbes représentent :

- Ligne en pointillés : évolution dans le cas où on applique sur la frontière supérieure du modèle un chargement lithostatique,
- Ligne pleine : évolution dans le cas où on applique sur la frontière supérieure du modèle un champ de contraintes variant avec l'évolution des contraintes déduite du modèle global.

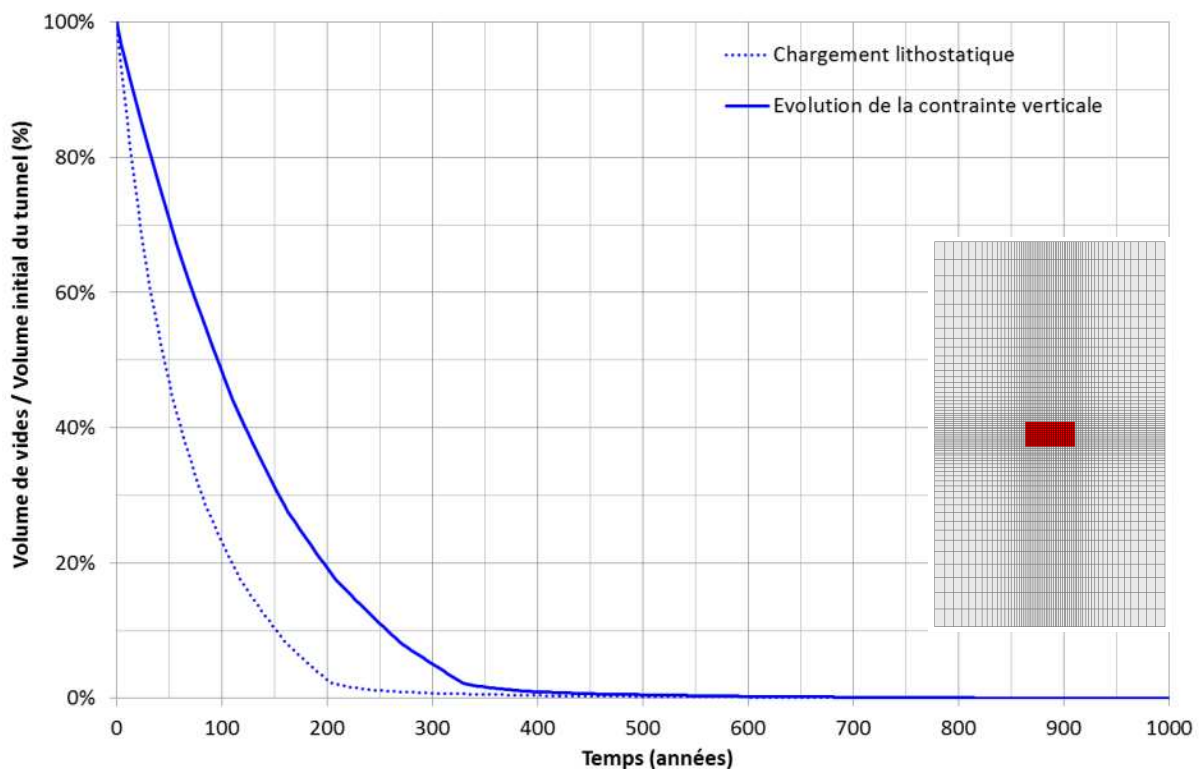


Figure 6-2 : Evolution des vides avec le temps sur les premières 1000 années de fluage pour une section 2D de dimensions 5.5x2.8 m.

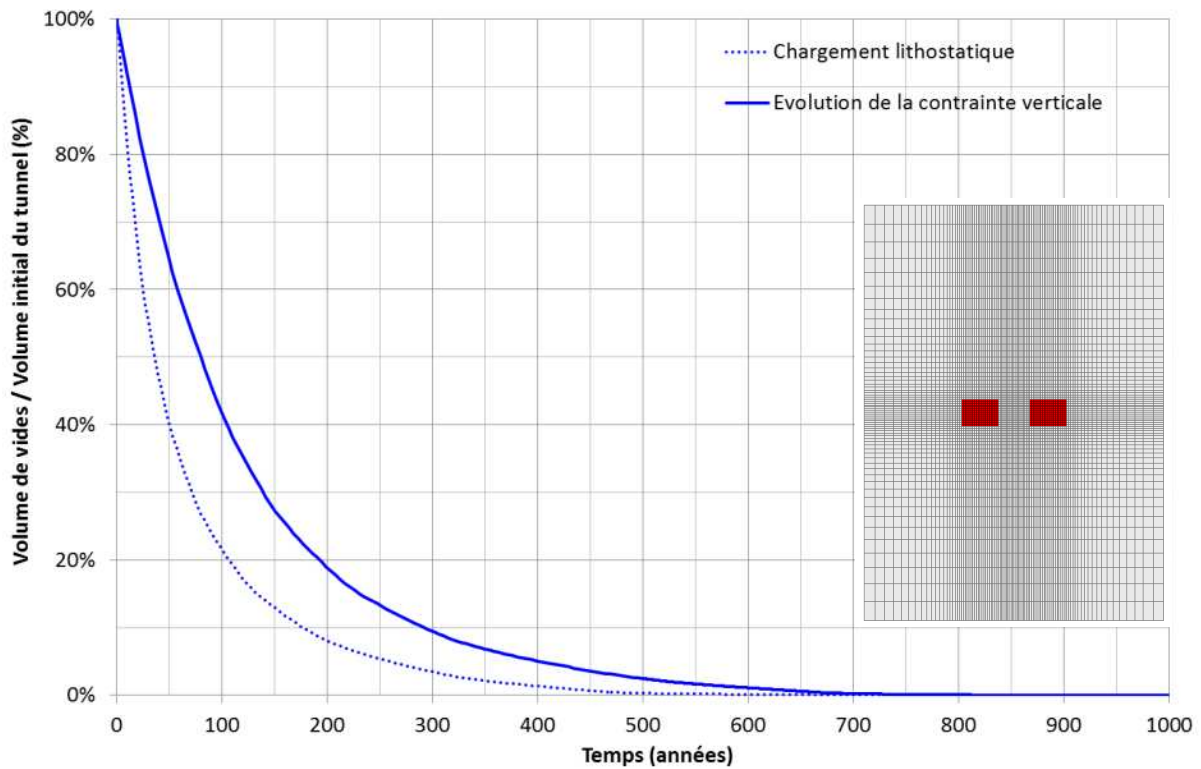


Figure 6-3 : Evolution des vides avec le temps sur les premières 1000 années de fluage pour une section 2D perpendiculaire à une double voie d'accès au stockage.

Un modèle représentant des géométries d'intersections a également été mis en œuvre puis simulé. Dans ce cas, la simulation ne peut couvrir des périodes de fluage que d'environ 50-60 ans. Les modèles et leurs résultats respectifs sont présentés pour chacune des géométries suivantes :

- Intersection entre deux galeries de stockage, de 5.5 m de largeur,
- Intersection entre une galerie de stockage et les tunnels d'une voie double d'accès.

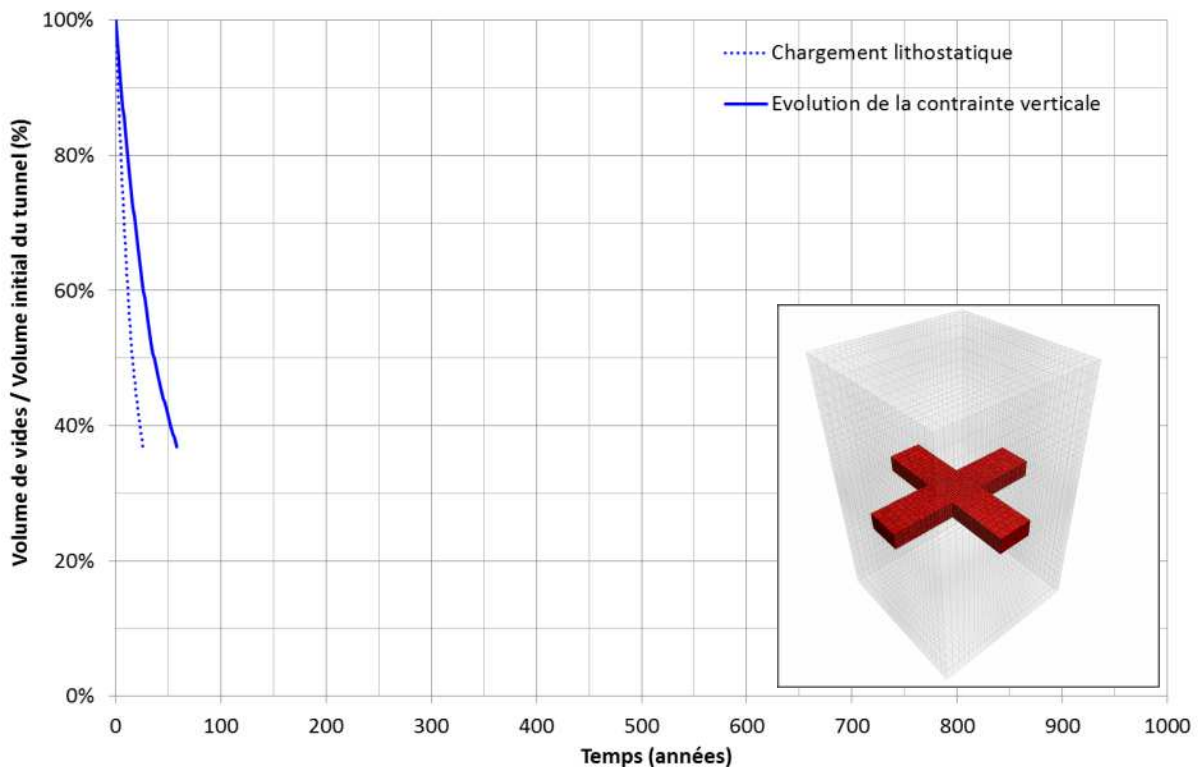


Figure 6-4 : Intersection entre deux galeries de stockage.

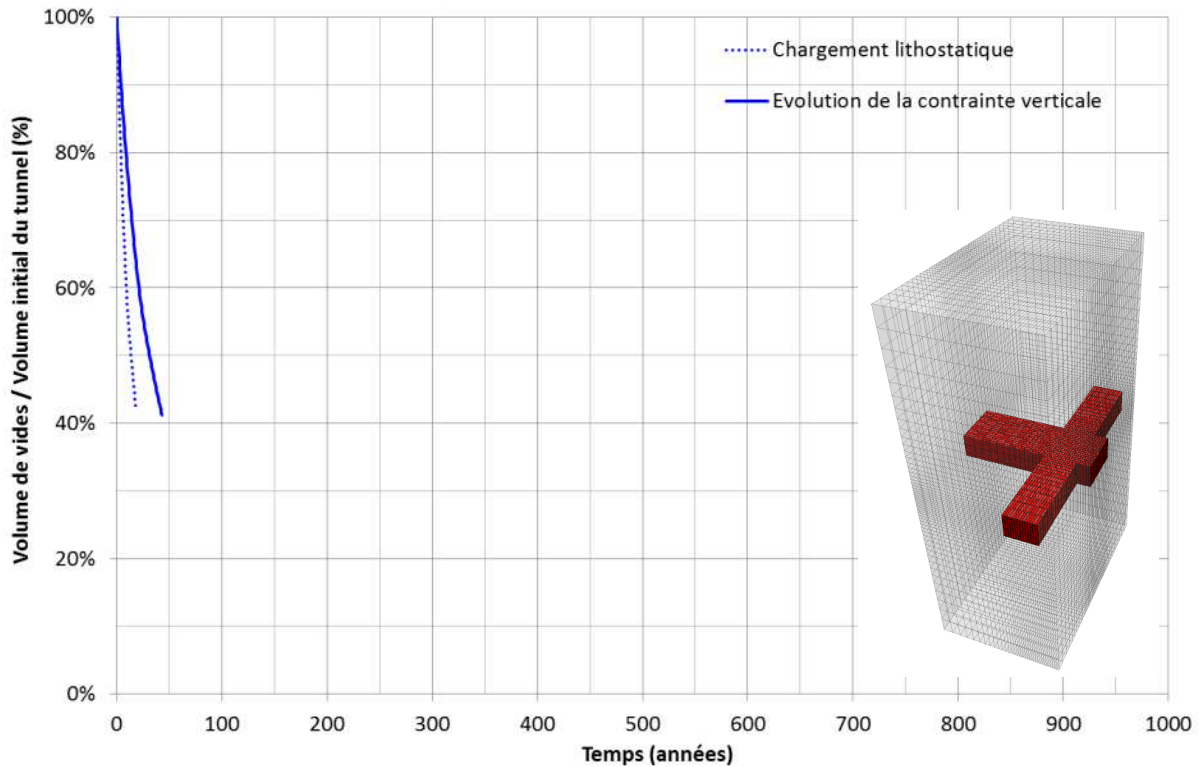


Figure 6-5 : Intersection entre une galerie de stockage et une double galerie d'accès.

Ces deux modèles sont les plus représentatifs du réseau de galeries de stockage qui se compose principalement d'intersections de galeries. Si on compare l'évolution des volumes de vides obtenus par les modèles d'intersections avec ceux des sections 2D, on peut voir que les premiers convergent plus de deux fois plus rapidement que les seconds (Figure 6-6).

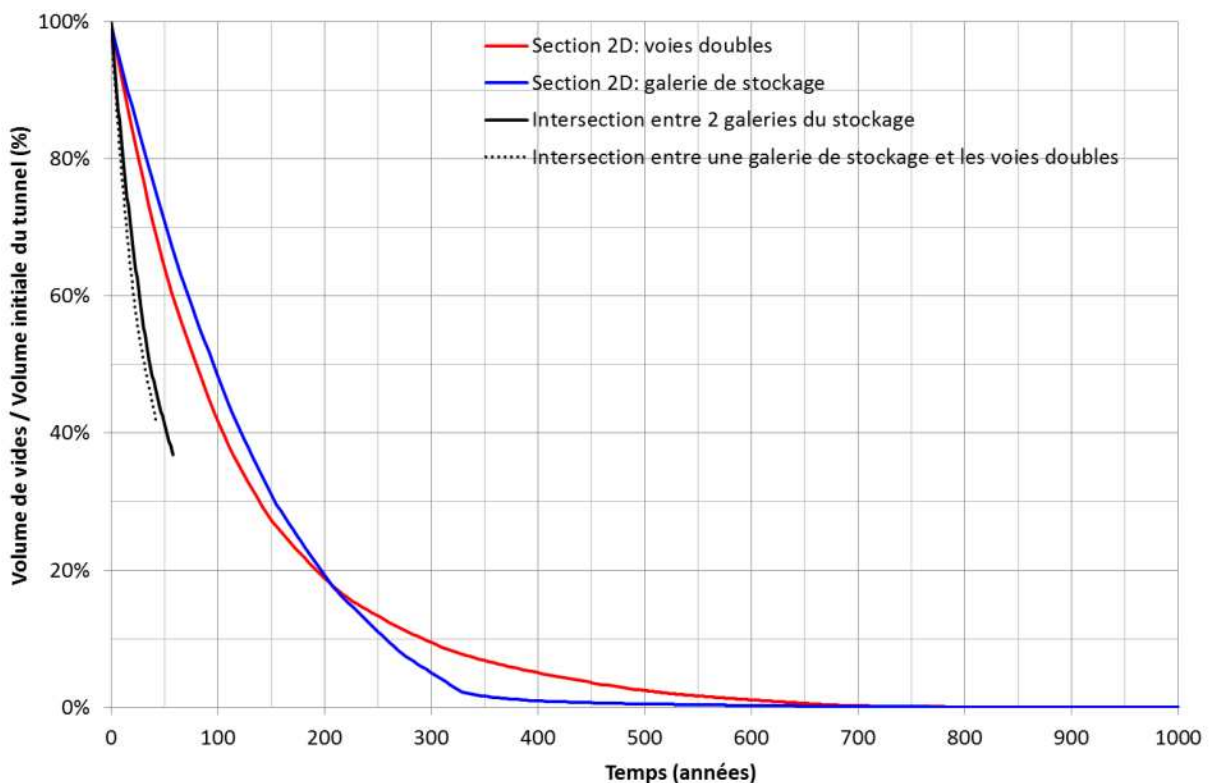


Figure 6-6 : Comparaison entre l'évolution des volumes de vide entre les modèles d'intersection de galeries et les modèles de sections de galeries 2D.

A partir de ces résultats, on peut conclure que :

- Au bout de 800-900 ans, on assiste à la fermeture totale des sections de galerie 2D;
- Le modèle qui simule l'intersection de galerie converge avec une vitesse plus de deux fois supérieure à celle des modèles de sections de galeries 2D. Par exemple, la figure suivante montre que les courbes de fermeture des intersections correspondent assez bien à celles des sections 2D de dimensions 5.5x2.8 m, si un facteur de 0.4 est appliqué sur l'échelle de temps (la vitesse étant alors augmentée d'un facteur égal à $1/0.4 = 2.5$) :

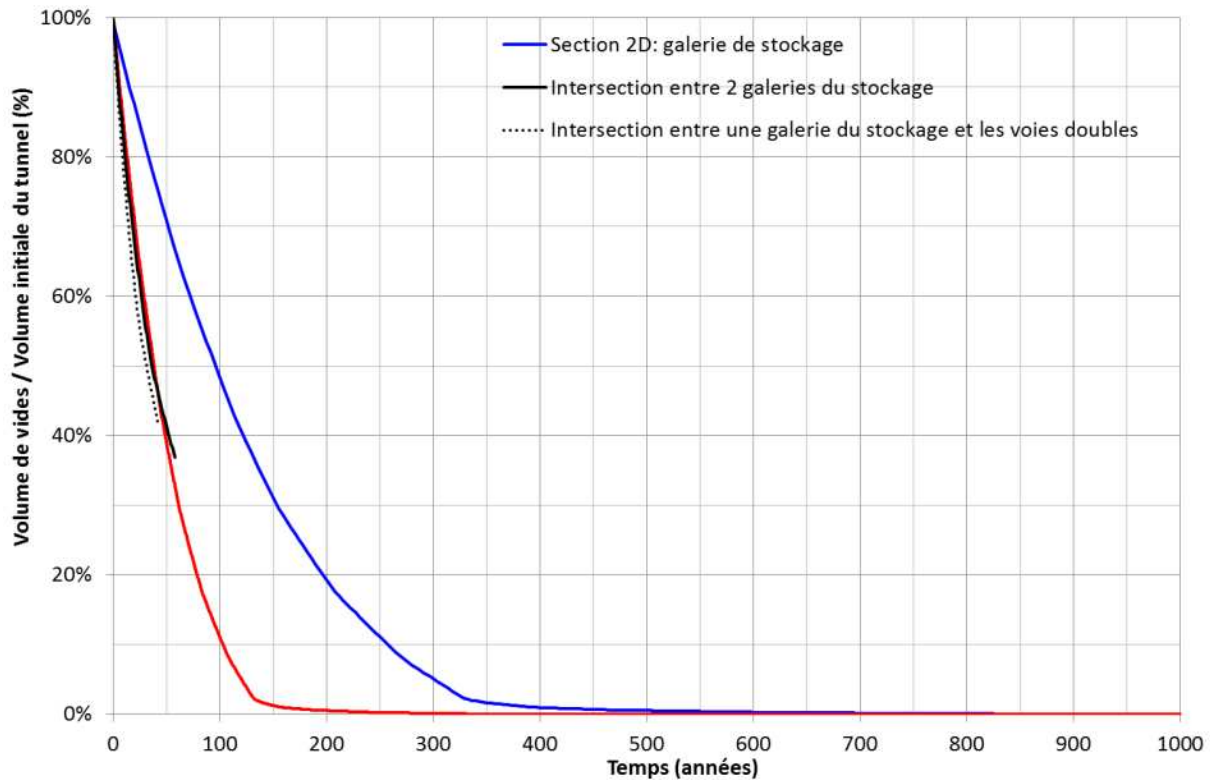


Figure 6-7 : Comparaison entre les courbes de fermeture d'une section 2D d'une galerie de stockage et celles des modèles d'intersection des galeries. La ligne rouge représente la courbe de la section 2D avec un facteur de 0.4 appliqué sur l'axe des abscisses.

- Etant donné que les modèles représentant des intersections de galeries sont les plus représentatifs pour la présente étude, il est clair que la fermeture complète des galeries initialement vides du réseau de stockage est atteinte au bout de 800-900 ans de fluage au maximum.

6.1.2. Blocs de sel décollés du toit

6.1.2.1. Modèle

Parmi les différents modèles mis en œuvre pour simuler la fermeture d'une galerie dans le cas d'un décollement de blocs de sel, le seul modèle permettant de simuler une période de fluage de 4500 ans est un modèle 2D d'une section de galerie de stockage. Les différentes étapes de la simulation sont alors :

- Génération du modèle. La galerie a une hauteur 2 m plus élevée que celle des galeries de stockage (c'est-à-dire $2.8 + 2$ m), afin de tenir compte de la taille des blocs de sel s'étant détachés du toit et étant tombés sur le plancher de la galerie. Ainsi, la géométrie initiale de la galerie est de 5.5x4.8 m ;
- Excavation de la galerie en utilisant la méthode de déconfinement (Figure 6-8) ;

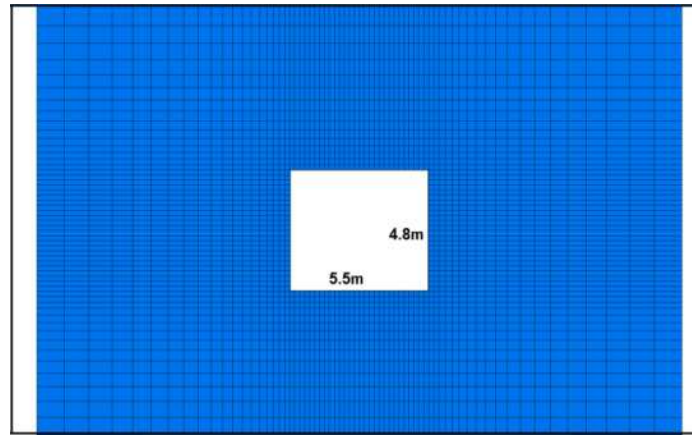


Figure 6-8 : Excavation de la section de galerie.

- Réactivation des blocs de sel dans l'excavation (ces blocs étant donc sur le plancher de la galerie). Le volume initial de ces blocs est calculé en utilisant la formule suivante :

$$V_{ini} = \frac{V_{fall}}{1 - n_0} = \frac{5.5 \cdot 2.0}{1 - n_0} \quad (11)$$

Où V_{fall} est le volume de sel s'étant décollé du toit de la galerie (soit 5.5x2 m) et n_0 la porosité initiale de ces blocs (ceux-ci ne s'entassant pas de façon parfaite en tombant), prise égale à 30%.

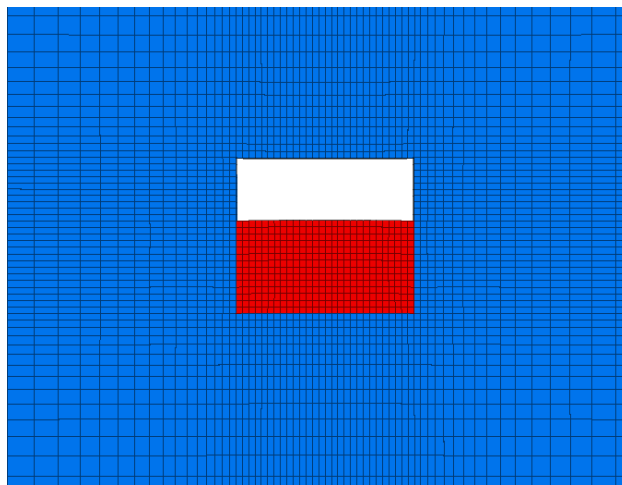


Figure 6-9 : "Ré-activation" des blocs de sel décollés du toit.

- Simulation du fluage sur une période de 4500 ans.

6.1.2.2. Propriétés des blocs de sel décollés

Les blocs décollés sont simulés avec la même loi de comportement utilisée pour le sel (loi de Norton).

A cause du fluage du sel entourant l'excavation, les blocs décollés du toit sont comprimés dans un premier temps par les pénétrations de la galerie. Au cours de ce processus, leurs propriétés de déformation augmentent en même temps que leur porosité diminue. Le changement de porosité est obtenu en suivant la variation de volume de ces blocs. Leur module de Young est ainsi modifié selon la formule suivante :

$$E_i = E_0 \cdot \exp\left(\left(\ln \frac{E_1}{E_0}\right) \frac{V_0 - V_i}{V_0 - V_1}\right) = E_0 \cdot \left(\frac{E_1}{E_0}\right)^{\frac{V_0 - V_i}{V_0 - V_1}} \quad (12)$$

Où :

- V_0 : volume initial du bloc ($n = 30\%$) ;
- V_i : volume actuel du bloc ($10\% < n < 30\%$) ;
- V_1 : volume final pouvant être atteint par le bloc ($n = 10\%$). Cette condition correspond à la compaction maximale du bloc ;
- E_0 : Module de Young initial du bloc ($E = 2.5$ MPa);
- E_i : Module de Young actuel du bloc ($2.5 \leq E \leq 25000$ MPa);
- E_1 : Module de Young final du bloc ($E = E_{\text{salt}} = 25000$ MPa).

L'évolution du module de Young est représentée en Figure 6-10.

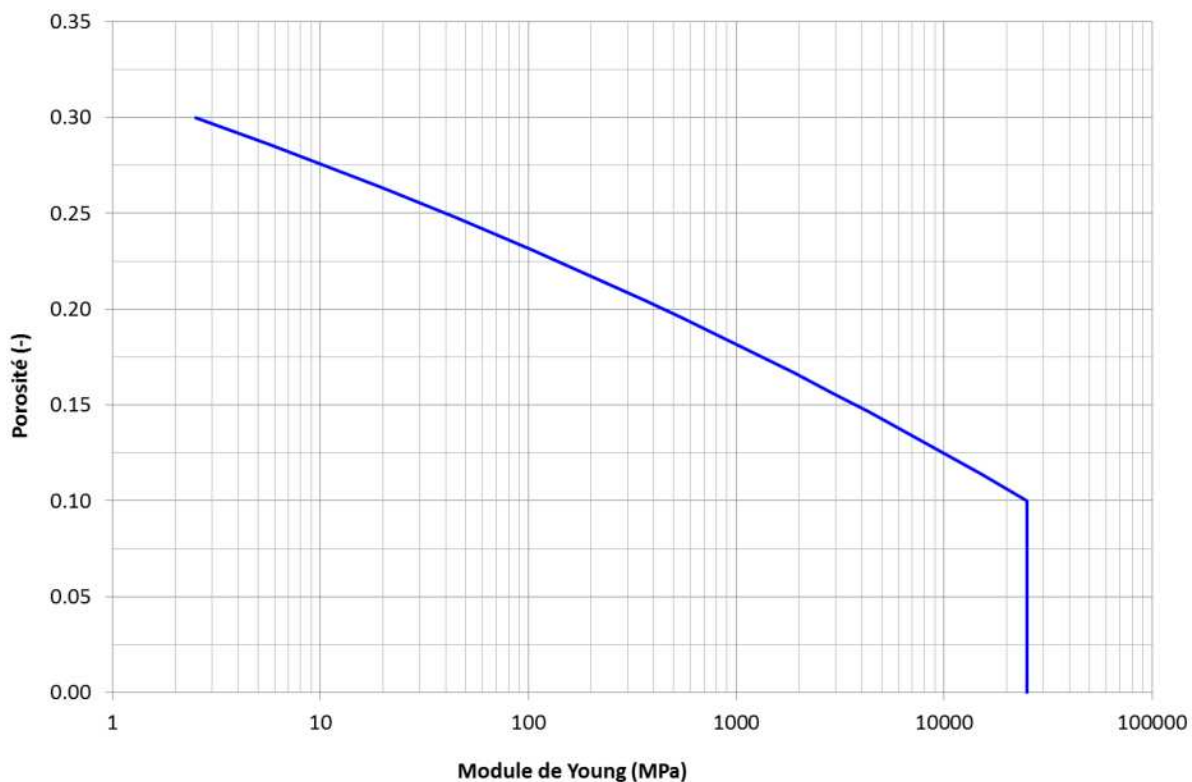


Figure 6-10 : Evolution du module de Young des blocs de sel décollés avec la porosité.

Le coefficient de Poisson est considéré comme étant constant au cours de la compaction et est égal au coefficient de Poisson du sel, soit 0.25.

6.1.2.3. Résultats

Les figures suivantes présentent les résultats après 2000 ans de fluage en termes de porosité des blocs décollés (comprise entre 19 et 20%) et de module de Young correspondant. Les résultats à 4500 ans sont pratiquement identiques à ceux montrés ci-dessous, avec une variation de porosité de moins de 0.2%.

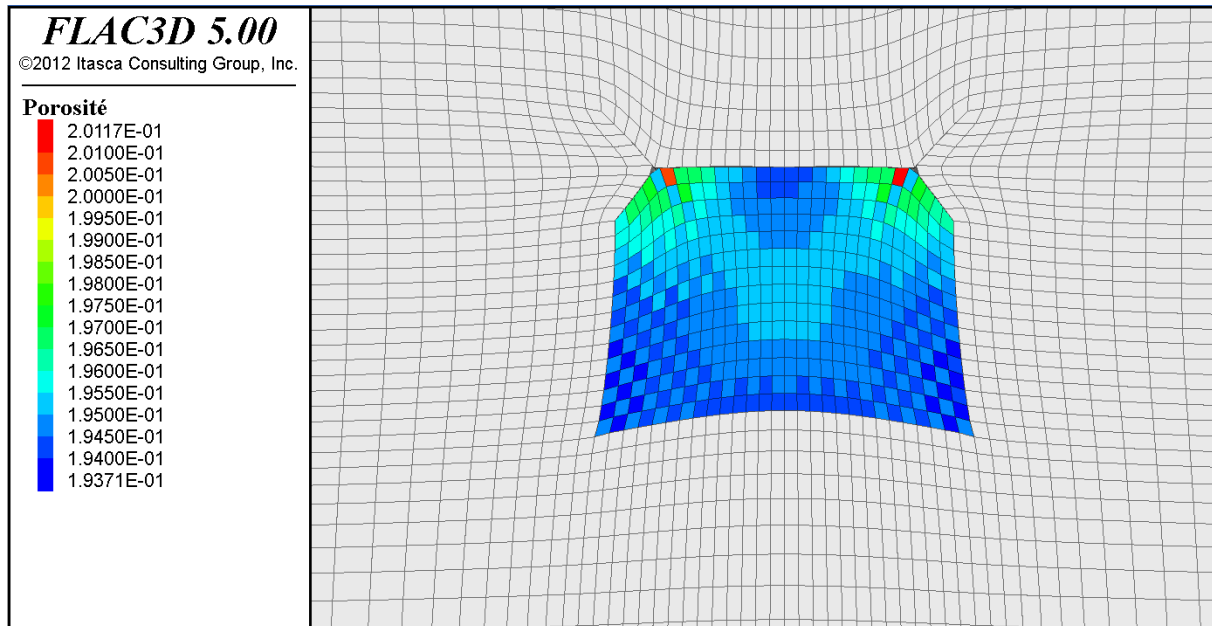


Figure 6-11 : Porosité des blocs de sel décollés après 2000 ans de fluage.

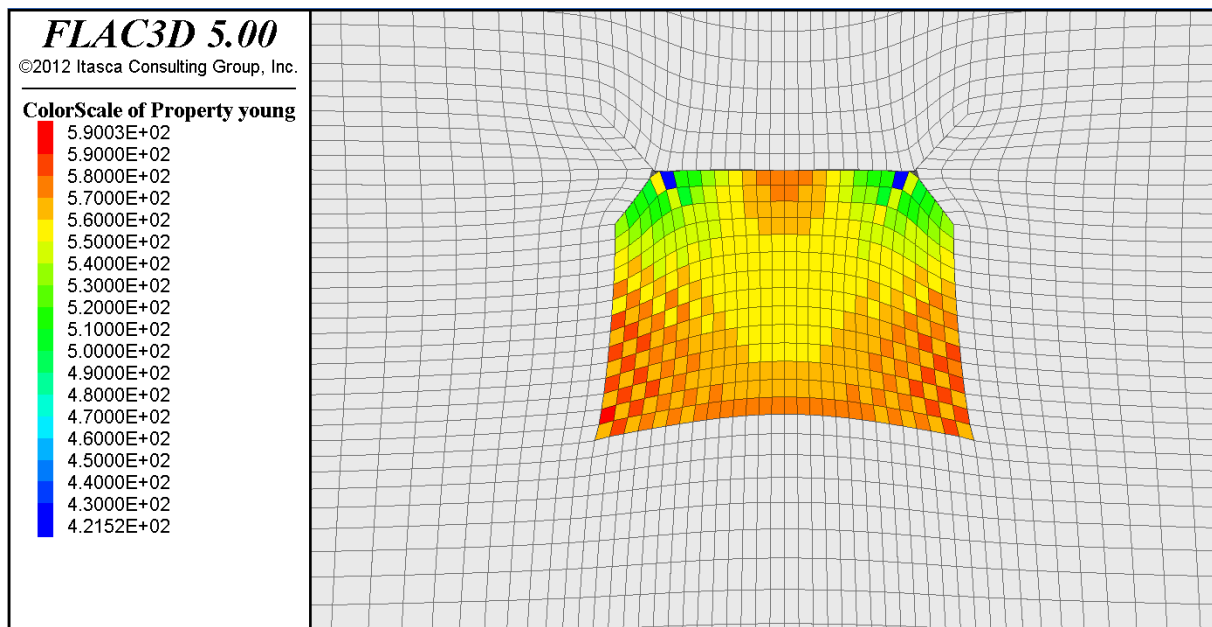


Figure 6-12 : Module de Young des blocs de sel décollés après 2000 ans de fluage.

Au cours du calcul de fluage, les variations de volume 1) des blocs de sel décollés et 2) des vides situés au-dessus de ces blocs, sont constamment enregistrées. Cela permet de tracer l'évolution du volume des vides dans ces deux parties du tunnel. Notons que dans le cas des blocs décollés cette évolution est obtenue en considérant comme volume initial des vides celui correspondant à une porosité de 30%. Comme le volume des solides dans les blocs ne peut pas changer, chaque diminution de volume ultérieure des blocs est représentative d'une réduction des vides dans les blocs.

Les historiques du volume de vides sont donnés en Figure 6-13. On peut observer que l'essentiel de la diminution du volume des vides a lieu sur les premiers 200 ans de fluage. Au cours de cette période, les blocs sont compactés latéralement et perdent environ 10% de leur volume (courbe rouge). Par la suite, le toit de la galerie entre en contact avec ces blocs, ce qui accentue légèrement leur compaction : la réduction de leur volume de vides s'accélère alors que la réduction du volume des vides au-dessus des blocs ralentit. On peut noter qu'à partir de 800 ans de fluage, il n'y a quasiment plus de vides au-dessus des blocs, et la porosité des blocs n'évolue presque plus.

Enfin, la Figure 6-14 montre l'évolution du volume total des vides dans la galerie, calculée à partir de l'évolution des vides dans les deux parties du tunnel.

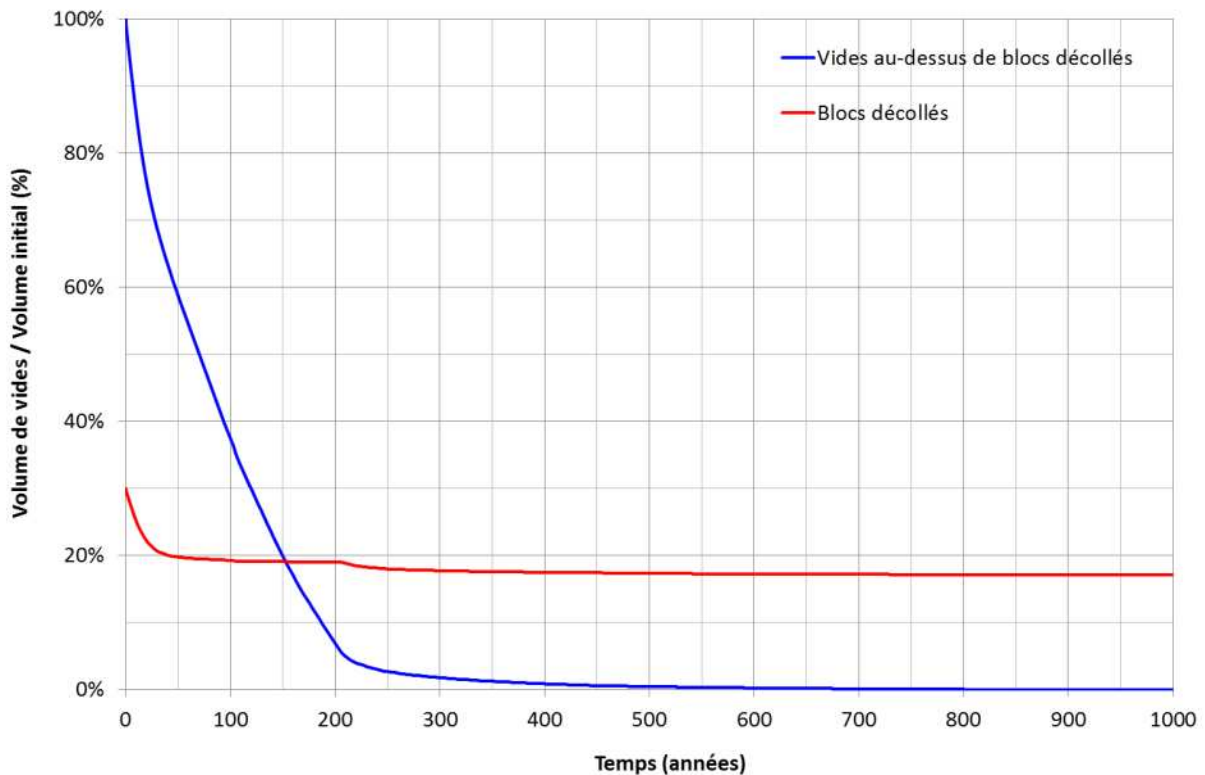


Figure 6-13 : Galerie vide. Evolution du volume des vides sur les premières 1000 années de fluage dans les deux parties du tunnel (blocs de sel décollés et vides au-dessus des blocs) par rapport à leur taille initiale.

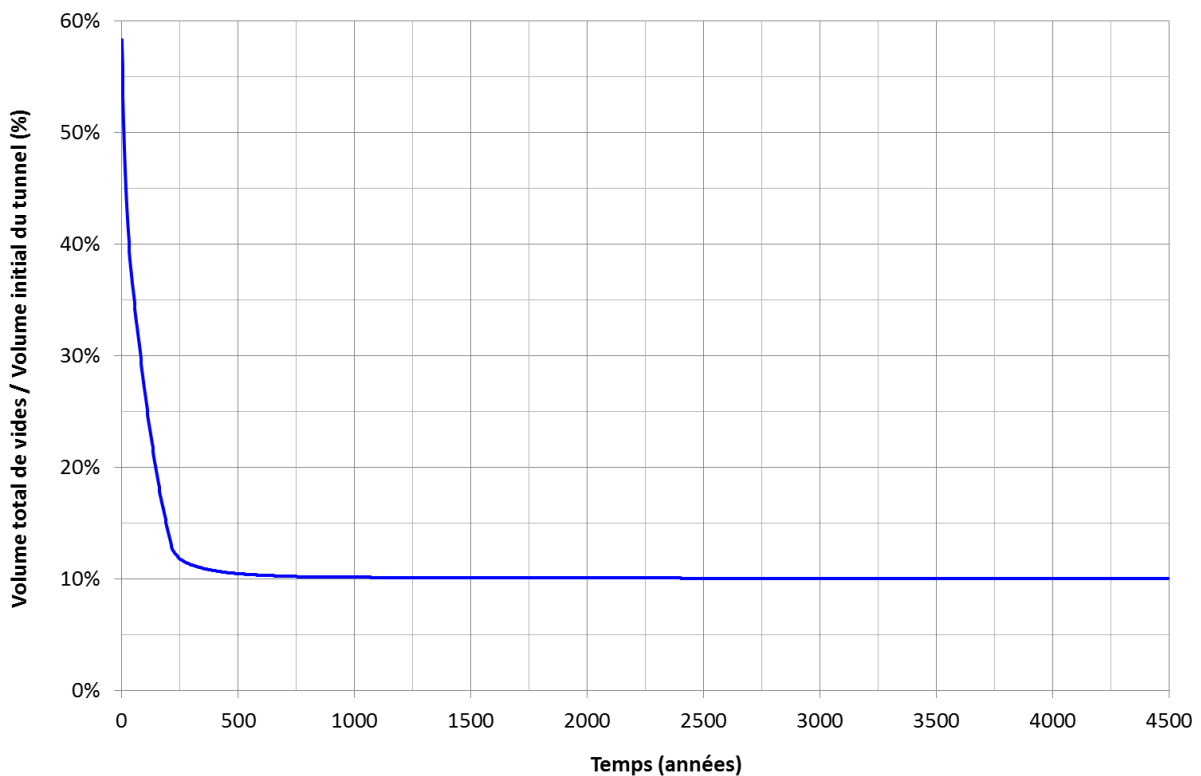


Figure 6-14 : Galerie vide. Variations du volume total de vides (porosité des blocs décollés et vides au-dessus des blocs) en fonction du temps.

6.1.3. Galeries remplies de déchets à 70%

6.1.3.1. Modèle

Le modèle mis en œuvre est un modèle 3D d'une intersection de galeries. Contrairement au cas avec blocs de sel décollés, les déchets occupent une proportion conséquente du volume initial des galeries (plus de 70%). Cette valeur est calculée en considérant le stockage de 2 fûts ou big-bags superposés, soit une hauteur des déchets de 2m sur 2.8m de hauteur de la galerie. Ceci implique que la taille des vides au-dessus des déchets est faible comparé au volume de la galerie, et que par conséquent un modèle peut être lancé sans qu'un problème dû à une distorsion des zones au voisinage de l'intersection n'intervienne.

Les zones volumiques représentant les déchets sont activées dans le modèle à la suite de l'excavation de la galerie (réalisée par la méthode de déconfinement).

La géométrie des déchets est présentée de la Figure 6-15 à la Figure 6-16. Ce type de géométrie a été choisi pour éviter d'avoir des problèmes dus à une mauvaise distorsion des zones au voisinage de l'intersection. Il respecte le rapport de volume entre la galerie et les déchets.

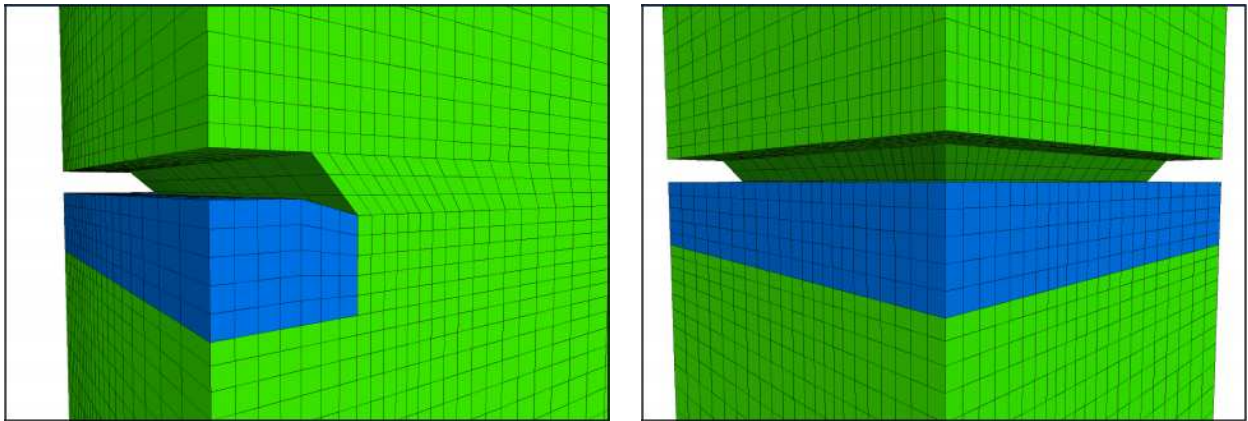


Figure 6-15 : Géométrie du modèle de l'intersection des galeries avec déchets.

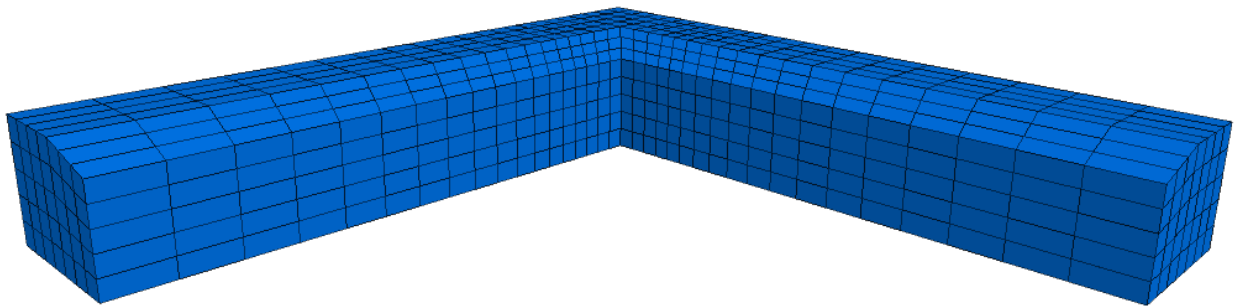


Figure 6-16 : Géométrie des déchets à l'intérieur de la galerie.

6.1.3.2. Propriétés des déchets

En l'absence de données concernant les propriétés mécaniques des déchets, leur comportement est simulé par un modèle élastoplastique de Mohr-Coulomb, dont les propriétés sont données en Tableau 6-1.

Paramètre	Béton B25
Masse volumique : ρ	1850 kg/m ³
Module d'Young : E	150 MPa
Coefficient de Poisson : ν	0.10
Angle de frottement : φ	25°
Cohésion : c	0 MPa
Dilatance : ψ	5°
Résistance en traction : R_t	0 MPa

Tableau 6-1 : Propriétés des déchets.

Dans le cas des déchets, une augmentation du module avec leur compaction (similaire à celle mise en œuvre pour les blocs décollés du toit) produirait des résultats erronés à cause de la déformation plastique qui peut intervenir suite à la plastification des zones. Afin de pallier à ce problème, un module constant et égal à 150 MPa a été assigné à toutes les zones représentant les déchets. Cette valeur a été choisie comme la valeur équivalente qui permettrait d'obtenir la même réduction du volume sur le long terme que dans le cas d'un calcul élastique avec augmentation progressive du module. Dans ce calcul élastique, le module variait entre 2.5 et 2500 MPa (soit de 10^{-4} à 10^{-1} fois le module de Young du sel) pour une variation de la porosité de 30 à 10%, suivant la même formule que celle indiquée en équation 12.

Le coefficient de Poisson des déchets est considéré comme constant et faible (0.10) afin de bien simuler leur compaction volumique.

Notons que l'utilisation d'un comportement purement frottant pour les déchets amènerait à une distorsion importante pendant les premières années de la simulation. En effet, les déchets sont d'abord chargés latéralement par le fluage du sel en absence d'un confinement par le toit (les vides en partie supérieure ne sont pas encore comblés). Afin de se prémunir de ce problème, les déchets sont initialement modélisés avec un modèle élastique, lequel est ensuite remplacé par le modèle de Mohr-Coulomb une fois le contact toit-déchets atteint (environ 100 ans).

6.1.3.3. Résultats

Les résultats de la simulation sont montrés en Figure 6-17 en termes de géométrie du modèle à différents temps de fluage. On peut voir que la plupart des déformations du tunnel ont lieu pendant les 100 premières années de fluage, avant le comblement des vides en partie supérieure par le fluage du sel.

De la même façon que pour les blocs décollés, la Figure 6-18 montre les historiques de la variation du volume des vides dans les deux parties du tunnel : la partie des déchets et la partie des vides supérieurs. Notons que dans le cas des déchets, l'évolution est obtenue en considérant un volume initial des vides correspondant à une porosité de 30% (valeur en accord avec le travail de thèse de Caucheteux [8] sur le REFIOM stabilisé).

De manière globale, la Figure 6-19 montre l'évolution du volume totale des vides dans la galerie, calculée à partir des deux courbes de la Figure 6-18.

A partir de ces résultats, on peut conclure que :

- La compaction des déchets intervient lors des 100 premières années. Ils sont comprimés latéralement sur les 50 premières années. Entre 50 et 100 ans, le toit de la galerie entre en contact avec les déchets, ce qui produit les 2 effets suivants :
 - La diminution du volume des vides dans les déchets s'accélère à cause de la compression latérale et verticale qu'ils subissent,
 - La diminution du volume de vide en toit des déchets ralentit.

- A partir de 200 ans de fluage, la réduction de volume de vides devient faible, avec une variation de 2.3% du volume du tunnel seulement entre 200 et 4500 ans.

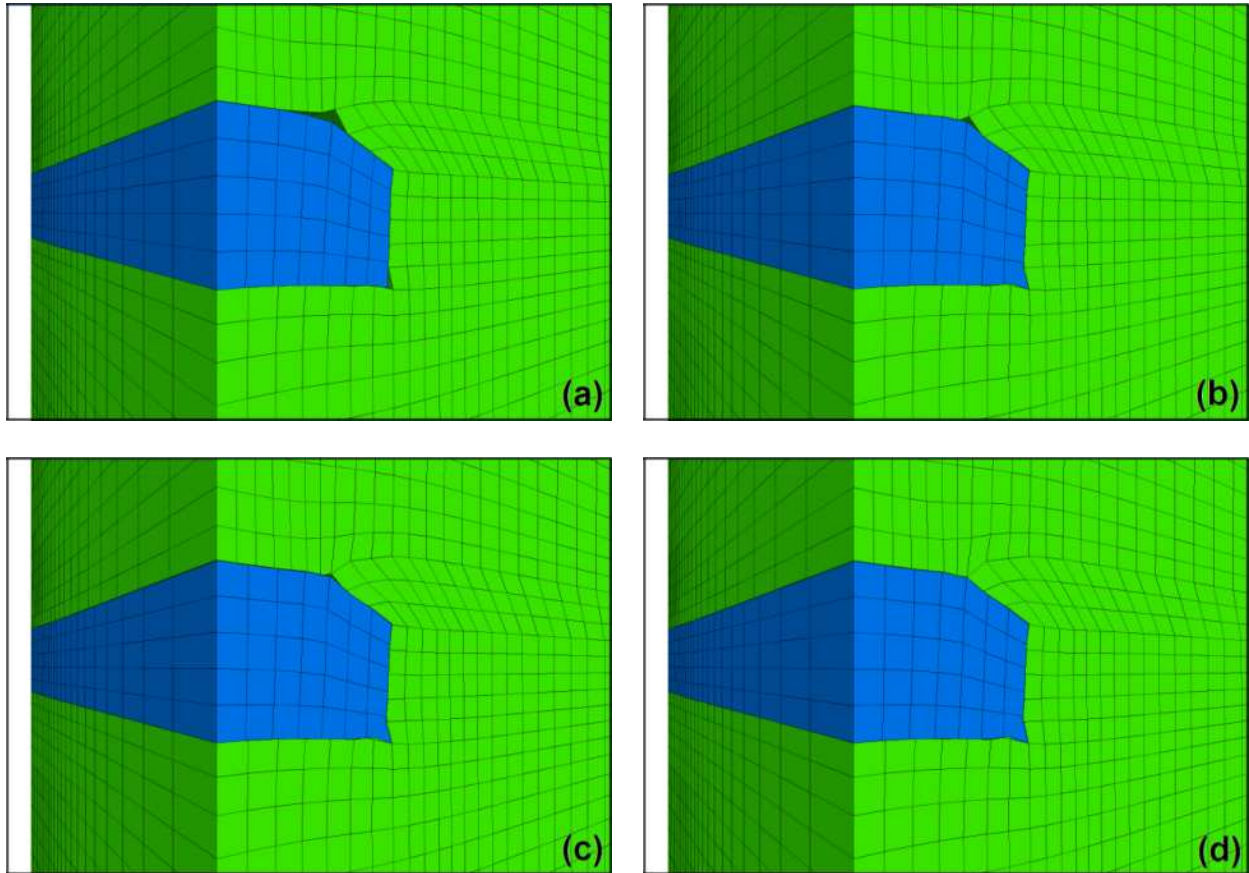


Figure 6-17 : Géométrie du modèle après 100 ans (a), 500 ans (b), 1000 ans (c) et 2000 ans (d).

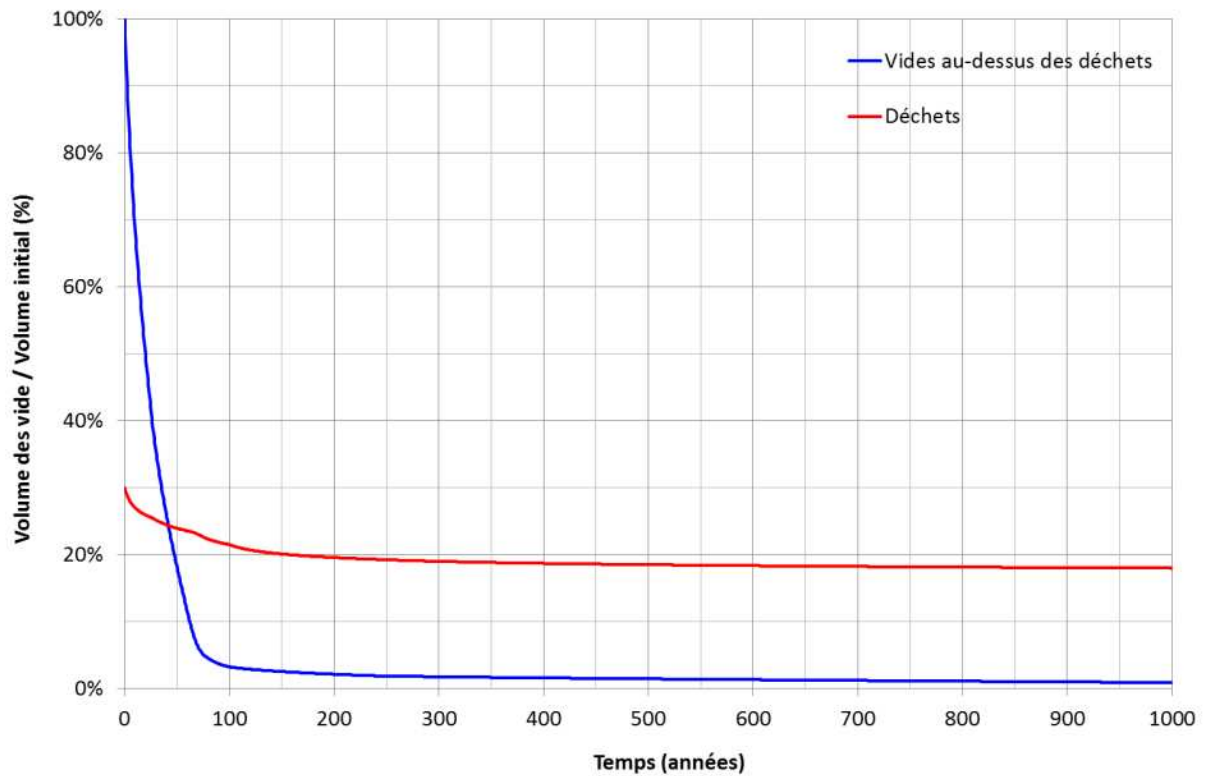


Figure 6-18 : Galerie avec déchets. Variations du volume de vides au-dessus des déchets et du volume de vides dans les déchets en fonction du temps, sur les premières 1000 années de fluage.

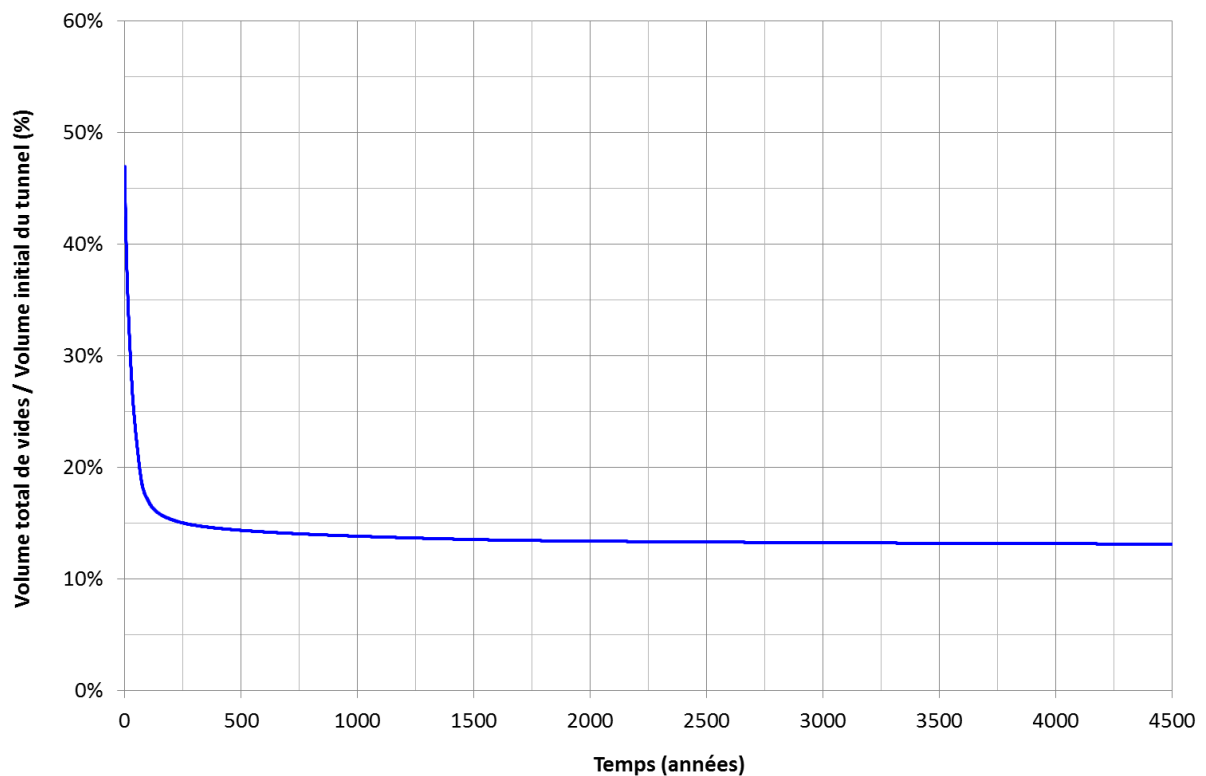


Figure 6-19 : Galerie avec déchets. Variations du volume total de vides (porosité des déchets et vides au-dessus des déchets) en fonction du temps.

6.1.4. Remplissage des tunnels avec du béton

6.1.4.1. *Modèle*

L'étude sur la fermeture des galeries remplies par le béton a été réalisée à l'aide d'un modèle local, dont la géométrie prend en compte le croisement entre deux galeries du stockage.

Le remplissage avec béton est simulé après l'excavation des galeries par déconfinement progressif. Bien que le retour d'expérience sur les galeries souterraines montre qu'en moyenne seulement 95% du volume des galeries est rempli par le béton (donnée fournie par StocaMine [4]), les 5% de vides restant en partie supérieure des galeries disparaîtront très rapidement (quelques années) à cause du fluage du sel. Ainsi, pour simplifier le calcul, nous avons considéré que l'ensemble de la section de tunnel est remplie de béton.

6.1.4.2. *Propriétés du béton de remplissage*

Le béton de remplissage que StocaMine souhaite utiliser est un béton de cendres volantes. Sur la base d'une étude réalisée précédemment par l'Université d'Artois sur différents produits de comblement et d'injection [9], StocaMine a indiqué la formulation « Complex 2 » comme la plus pertinente pour remplir les vides du site de stockage. Cette formulation est constituée en majorité de cendres de lit fluidisé circulant produites à Carling, avec des liants composés de 92% de Sodéline et 8% de chaux vive 0/90 BTS. La résistance mécanique de ce coulis a été mesurée à court et à long terme (90 jours) sur trois demi-éprouvettes 4x4x16 par le Laboratoire Génie Civil et Geoenvironnement (LGCgE) de l'Université d'Artois. Les résultats de ces essais sont reportés en Tableau 6-2.

Age (jours)	Résistance à compression
3	-
7	0.72
14	1.29
28	1.91
90	3.03

Tableau 6-2 : Résistance à compression du béton « Complex 2 ».

A partir de ces données, le béton est modélisé dans le modèle numérique par un modèle de Mohr-Coulomb avec une résistance moyenne en compression de 3 MPa. Le Tableau 6-3 résume l'ensemble des propriétés utilisées.

Paramètre	Béton B25
Masse volumique : ρ	1446 kg/m ³
Module d'Young : E	15.33 GPa
Coefficient de Poisson : ν	0.25
Angle de frottement : ϕ	38°
Cohésion : c	0.73 MPa
Dilatance : ψ	10°
Résistance en compression : R_c	3 MPa
Résistance en traction : R_t	0.25 MPa

Tableau 6-3 : Propriétés du béton « Complex 2 ».

En absence de données sur la déformabilité du béton, nous nous sommes basés sur les formules de l'Eurocode 2 [10] pour dériver la valeur du module d'Young. Notons que ce document donne des indications pour des bétons de résistance nettement supérieure à celle du Complex 2 (valeurs comprises entre 20 et 98 MPa de résistance moyenne en compression).

Le module d'élasticité du béton à court terme est estimé comme le module sécant mesuré entre $\sigma_c = 0$ et $0,4 f_{cm}$ à l'aide de la relation suivante :

$$E_{cm} (GPa) = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} \quad (13)$$

où f_{cm} est la résistance moyenne du béton en MPa. Pour notre calcul nous avons considéré une résistance moyenne égale à la résistance à 90 jours (3 MPa), sachant que le temps pour lequel béton atteint cette résistance est largement inférieur au temps auquel le béton sera chargé par le fluage du sel.

En réalité, au cours du fluage, les propriétés du béton évoluent avec le temps. Ainsi le module d'Young évolue de 15.3 GPa jusqu'à 2 GPa environ au bout de 2000 ans, en accord avec la courbe de la Figure 6-20, calculée à partir des formulations données en Annexe B de l'Eurocode 2 [10], en considérant une humidité relative du milieu ambiant de 50%, et un âge du béton au chargement égal à 90 jours. Numériquement, le module est modifié tous les 1000 cycles, ce qui permet de suivre avec précision l'évolution recherchée.

L'angle de frottement φ est pris égal à 38° et la cohésion est directement déduite de la résistance en compression simple R_c :

$$c = R_c \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \quad (14)$$

avec :

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

De plus, la résistance en traction est estimée égale à un douzième de la résistance en compression, soit 0.25 MPa.

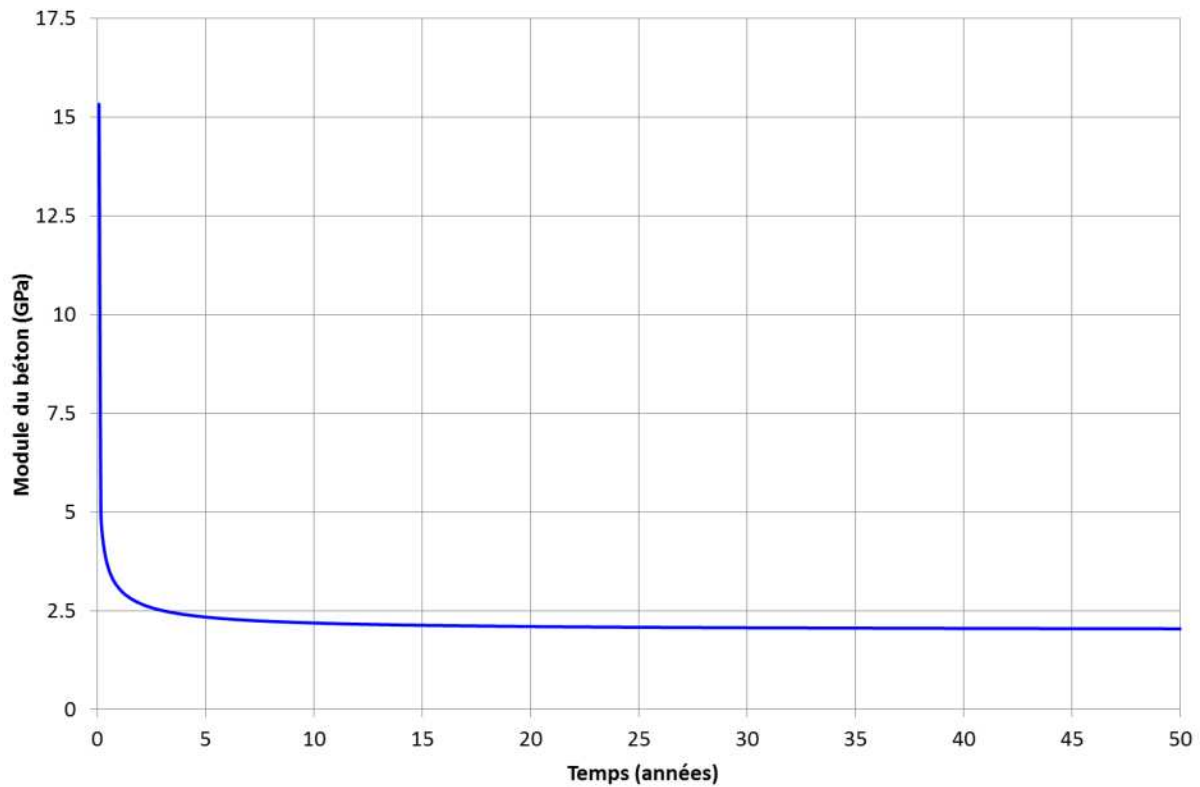


Figure 6-20 : Courbe d'évolution du module du béton sur les 50 premières années.

6.1.4.3. Résultats

Au cours du calcul en fluage, la variation de volume du béton est constamment enregistrée. Cela permet de tracer l'évolution du volume des vides internes. Pour ce calcul nous avons considéré une porosité initiale du béton de 5%. L'évolution obtenue est donnée en Figure 6-21. Ces résultats montrent des variations très petites des vides avec le temps, de l'ordre de 0.35% sur 4500 ans. On peut aussi noter que les vides diminuent plus rapidement aux petits temps à cause de la variation plus rapide du module du béton et de l'état anisotrope initial de la contrainte dans le sel autour de l'excavation (qui représente le « moteur » du phénomène du fluage). La mise en compression du béton par le fluage du sel réduit petit à petit le déviateur de contrainte dans le sel et donc la vitesse de fluage (Figure 6-22). En conséquence, la vitesse de variation du volume de vides dans le béton ralentit, et devient très faible à partir de 800-1000 ans de fluage.

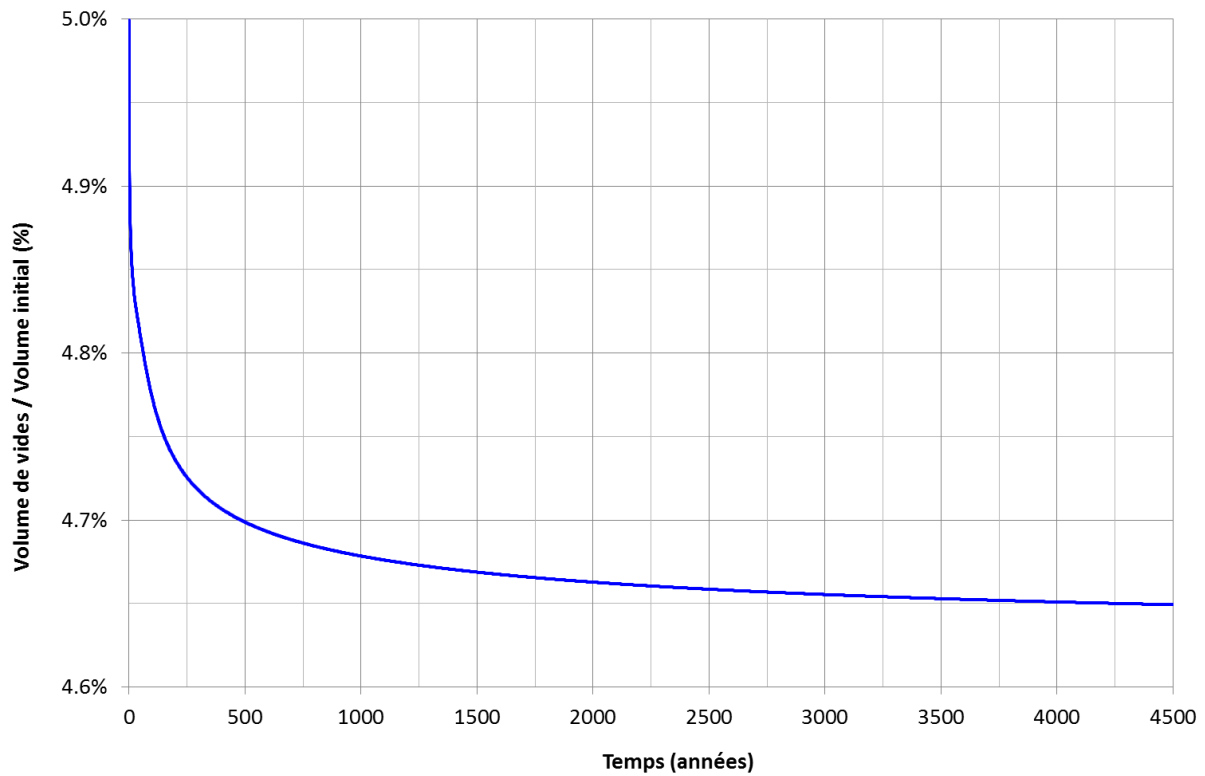


Figure 6-21: Galerie avec béton. Variations du volume des vides dans le béton en fonction du temps.

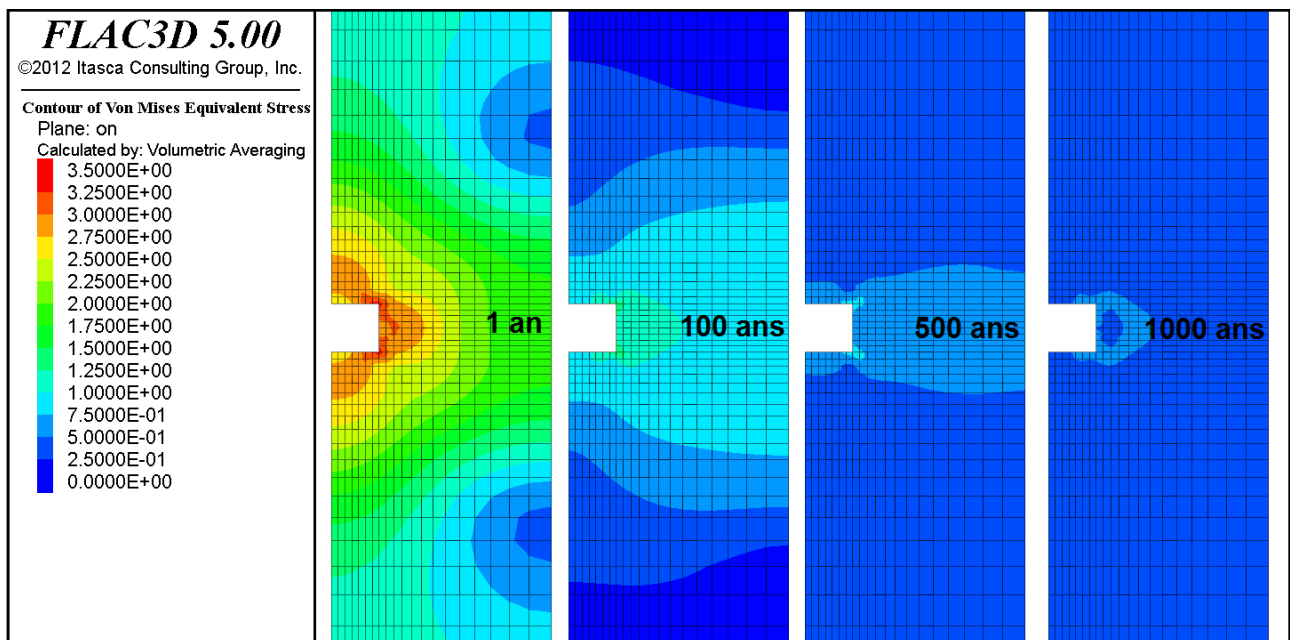


Figure 6-22 : Evolution de la contrainte déviatorique en MPa (contrainte de Von Mises, définie en équation (2)) en fonction du temps.

6.2. Fermeture globale du stockage

Le stockage est isolé par différents barrages de bentonite 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 sature progressivement les bouchons de bentonite. Le stockage commence alors à être envahi par un flux d'eau qui devient constant une fois que les barrages sont entièrement saturés et que la remontée des eaux dans les anciens travaux est totalement achevée (voir paragraphe 5). L'eau entrant en contact avec les déchets se charge alors en éléments polluants.

Une fois que le stockage est complètement noyé, l'éventuelle réduction des volumes de 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 égale à la pression externe exercée sur les bouchons, 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.

Dans le cas où aucune réduction des vides n'intervient une fois que le stockage est noyé par la saumure, aucun flux sortant n'est possible. Toutefois, cette condition n'est pas probable puisque, à part les tunnels vides pour lesquels on assiste à la fermeture complète au bout de 800-900 ans, les tunnels avec béton ou déchets continuent à se déformer, même très lentement, à cause de la compressibilité de leur remplissage. Dans ce cas on peut alors considérer le taux de fermeture du stockage comme un majorant du flux sortant, puisqu'il ne tient pas compte de la compressibilité de la saumure.

Un autre phénomène rentre 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 ultérieur de la date de sortie de la saumure, qui dépend du débit d'arrivée de l'eau sur la face interne des barrages, et de leur porosité (30%, voir paragraphe 5).

Le but de ce paragraphe est d'estimer le taux de fermeture du système de stockage, qui dépend des trois options de remplissage suivantes :

- Option 1 : uniquement les blocs vides et le bloc 15 (endommagé par le feu) sont remplis de béton ;
- Option 2 : option 1 + les galeries de service utilisées pour accéder au stockage ;
- Option 3 : option 2 + les galeries utilisées pour stocker les déchets.

Le taux de fermeture global du stockage dépend des géométries aussi bien que des conditions de remplissage des galeries qui composent le stockage (galeries vides, galeries contenant des déchets ou remplies de béton). Les résultats des simulations des modèles locaux présentés dans les paragraphes précédents sont donc 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 des galeries de stockage fournis par StocaMine. Le stockage est composé de trois parties principales :

- Blocs de stockage vides et bloc 15 : $98\,000\text{ m}^3$, dont $2\,000\text{ m}^3$ sont remplis de déchets ;
- Blocs de stockage : $133\,000\text{ m}^3$. La proportion de déchets stockés est égale à 42 000 tonnes. Si on prend en compte une masse volumique unitaire de 1850 kg/m^3 , le volume occupé par les déchets est alors égal à $22\,700\text{ m}^3$. Comme les déchets sont entreposés par superposition de 2 barils ou 2 big-bags de 1 m de hauteur chacun, seuls 2 m sur les 2.8 m de la hauteur des

galeries sont occupés par les déchets. Le volume total des galeries utilisées pour le stockage est ainsi calculé de la façon suivante :

$$V_{t,w} = \frac{22\,700\text{m}^3}{2/2.8} = 31\,800\text{m}^3 \quad (14)$$

La partie restante de ces blocs de stockage (environ 101 200 m³) est donc vide, avec un volume de :

$$V_{t,v} = 133\,000 - 31\,800 = 101\,200\text{m}^3 \quad (15)$$

- Galeries de service : ce sont les galeries doubles utilisées pour accéder aux blocs de stockage. Leur volume est évalué à 65 000 m³.

Pour pouvoir utiliser les résultats des modèles locaux afin de déduire le taux de fermeture du stockage, il faut d'abord normaliser l'évolution des volumes de vide avec le temps par rapport au volume de galerie initial. L'évolution des volumes de vide de chacune des trois parties données par StocaMine (blocs vides, blocs de stockage et galeries de service) est donc calculée en multipliant leur évolution normalisée de vide par leur volume initial respectif. La Tableau 6-4 regroupe pour ces trois parties du stockage le modèle local qui leur correspond.

Partie du stockage		Volume	Modèle local: description
Blocs vides	Blocs vides	98 000	-
Blocs de stockage	Galerie de déchets	31 800	Croisement des 2 galeries de stockage remplies par les déchets
	Galerie vide	101 200	Section 2D perpendiculaire à une galerie de stockage
Galerie de service		65 000	Section 2D perpendiculaire aux voies doubles

Tableau 6-4 : Volume et modèle local correspondant au trois parties du stockage.

Notons que la prise en compte des résultats des modèles locaux des sections 2D pour les galeries vides des blocs de stockage et pour les galeries de service constitue une hypothèse pessimiste. Comme il a été vu précédemment, les sections 2D convergent plus lentement que les intersections de galeries. Le volume de vides calculé au moment où l'eau envahit le stockage est surestimé, ce qui implique également une surestimation du flux de saumure contaminée sortant à cause du fluage du sel.

Dans le cas du remplissage des galeries avec béton, l'évolution normalisée des vides obtenue sur le model local du croisement des galeries complètement remplies par béton est prise en compte.

Pour les galeries avec déchets, nous avons considéré une hypothèse pessimiste de remplissage par le béton : le béton est supposé ne pas remplir les vides entre les déchets. Dans ce cas alors, l'évolution du vide est déduite de la façon suivante :

- Pour les déchets du bloc 15 (2000 m³) l'évolution des vides suit l'évolution normalisée des vides dans les déchets, obtenue par le modèle de croisement des galeries de stockage remplies par les déchets (courbe rouge en Figure 6-18) ;
- Pour les galeries de déchets des blocs stockées (31800 m³), l'évolution des vides est déduite de l'évolution normalisée de vides dans les déchets pour 70% du volume de ces galeries (en considérant 2m de déchets pour 2.8m de hauteur de section) et de l'évolution normalisée des vides dans le béton pour le restant 30% de volume des galeries.

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.

La Figure 6-23 présente l'évolution normalisée des volumes de vides pour les modèles locaux pris en compte.

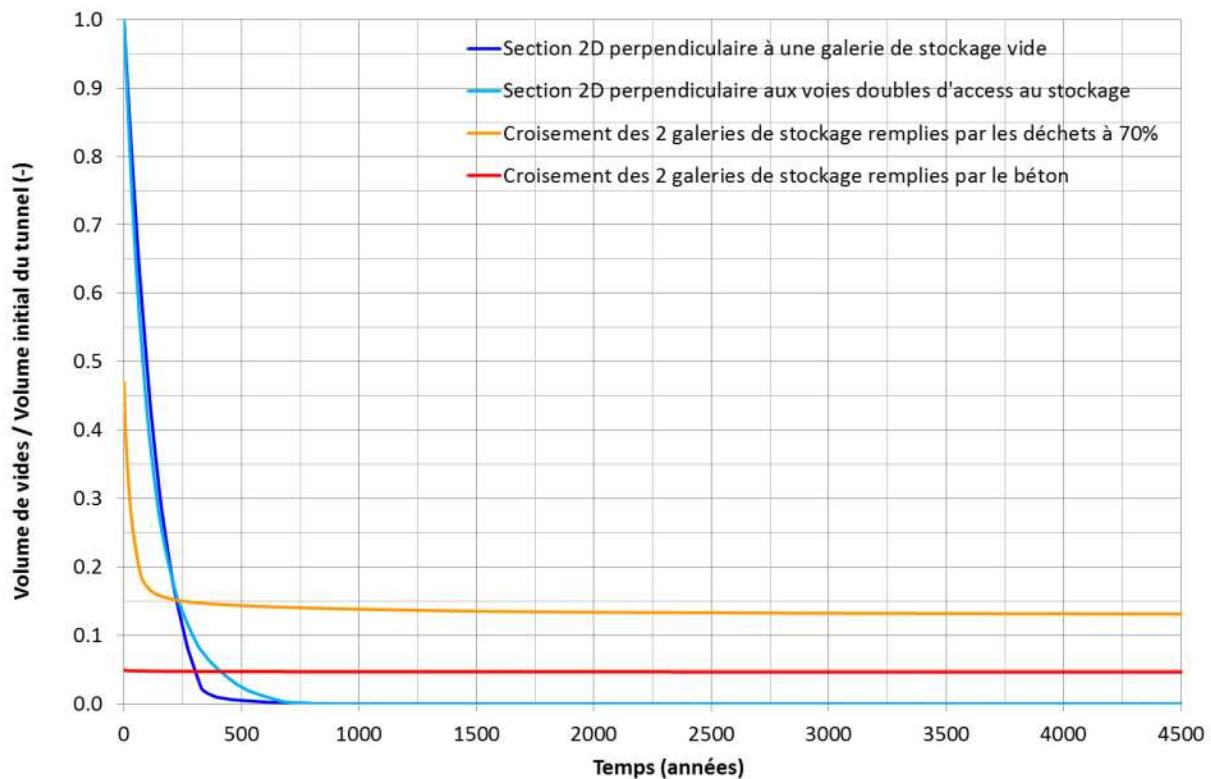


Figure 6-23 : Evolution normalisée des volumes de vide avec le temps pour les modèles locaux pris en compte.

6.2.1. Première option de remplissage

La première option de remplissage considère les blocs vides du stockage et le bloc 15 comme remplis de béton. Pour rappel, à l'état initial, le bloc 15 contient 2000 m³ de déchets.

Le volume de vides global résultant et le taux de fermeture des vides ($\Delta V/\text{an}$) sont présentés respectivement en Figure 6-24 et en Figure 6-25. Ces résultats montrent que le taux de fermeture décroît exponentiellement avec le temps avec une tendance quasi linéaire dans un plan semi-logarithmique jusqu'à 800-900 ans. A partir de ce moment les tunnels vides sont complètement fermés et la variation des vides du stockage ne dépend plus que de la compressibilité du béton et des déchets stockés.

Le volume des vides à long terme est de l'ordre d'environ 9 000 m³ avec un taux de fermeture inférieur à 0,3 m³/an à partir de 800 ans, moment auquel les tunnels vides se ferment complètement.

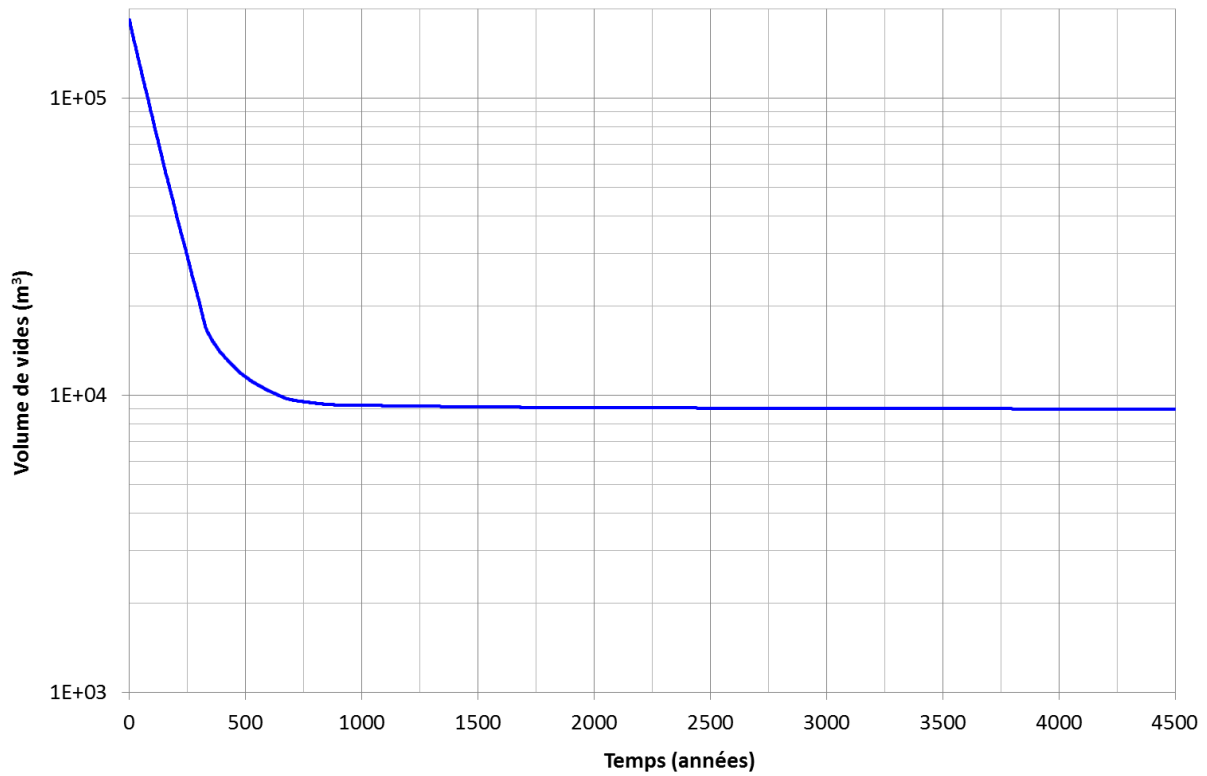


Figure 6-24 : Première option de remplissage béton – Volume de vides dans le stockage en fonction du temps.

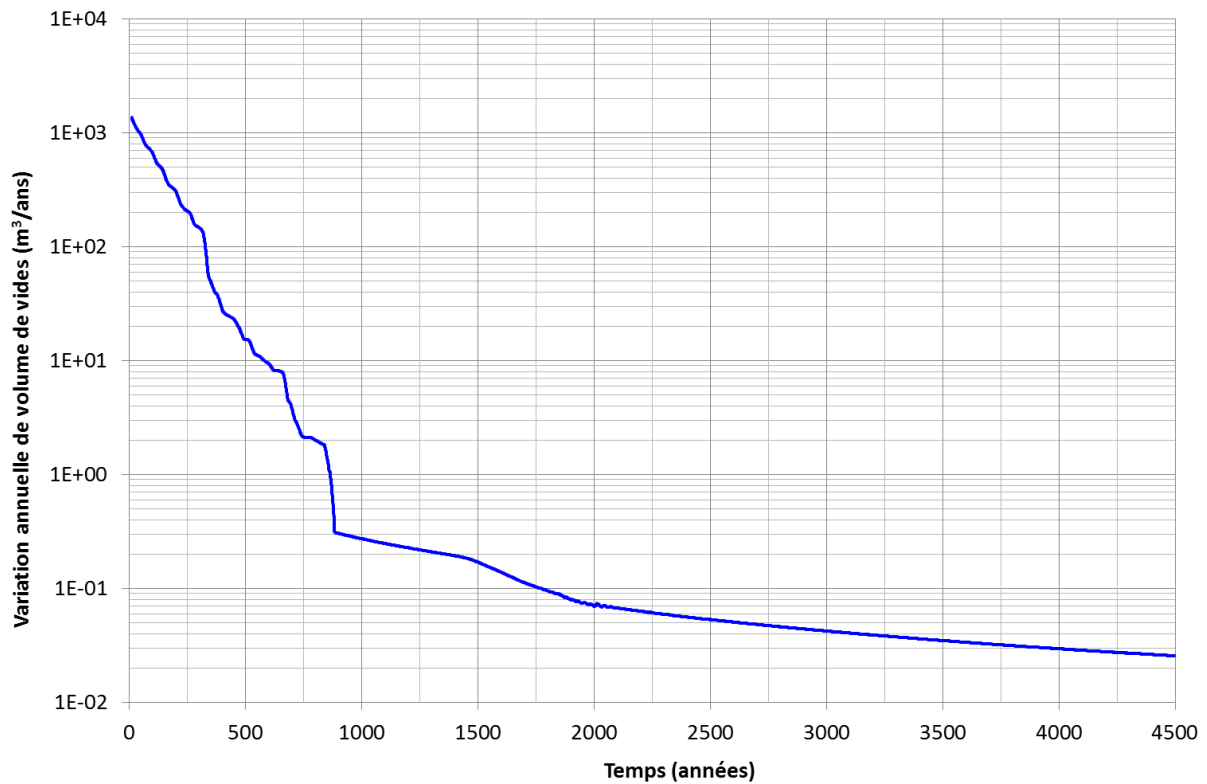


Figure 6-25 : Première option de remplissage béton – Taux de fermeture des vides (m³/an) en fonction du temps.

6.2.2. Seconde option de remplissage

La seconde option de remplissage considère le remplissage par du béton des blocs vides du stockage (plus le bloc 15) et des galeries de service utilisées pour accéder au stockage.

Le volume de vides global résultant et le taux de fermeture de ces vides ($\Delta V/\text{an}$) sont présentés respectivement en Figure 6-26 et en Figure 6-27. Le volume de vides à long terme est d'environ $12\,000\text{ m}^3$. Ce volume est plus grand que celui de la première option, du fait que les galeries de service ne sont plus complètement fermées après 800-900 ans, mais qu'elles conservent une porosité résiduelle (porosité du béton). Si on regarde le taux de fermeture, celui-ci est également plus faible, et ce pour la même raison, jusqu'à 800 ans. A partir de ce moment, l'évolution devient presque la même, vu que la fermeture du stockage à très long terme dépend surtout de la compressibilité des déchets (celle du béton intervenant aussi dans une moindre mesure).

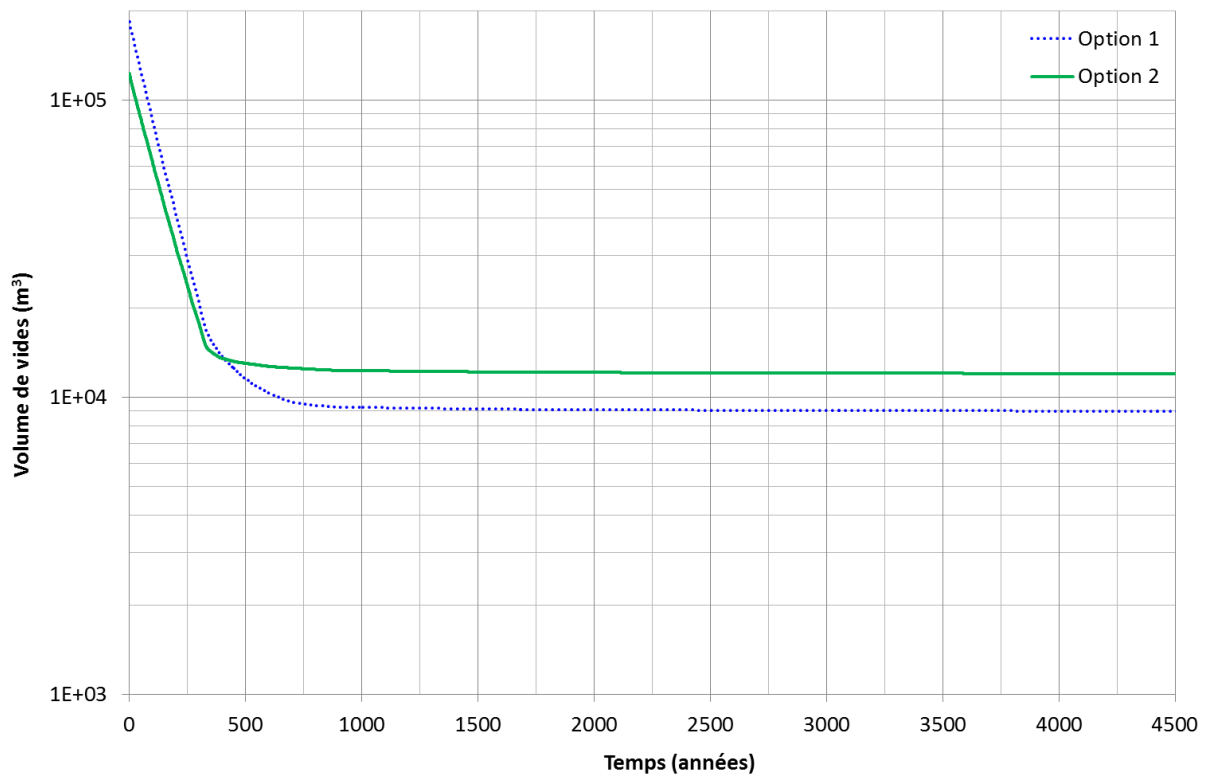


Figure 6-26 : Seconde option de remplissage – Volume de vides dans le stockage en fonction du temps et comparaison avec l'option précédente.

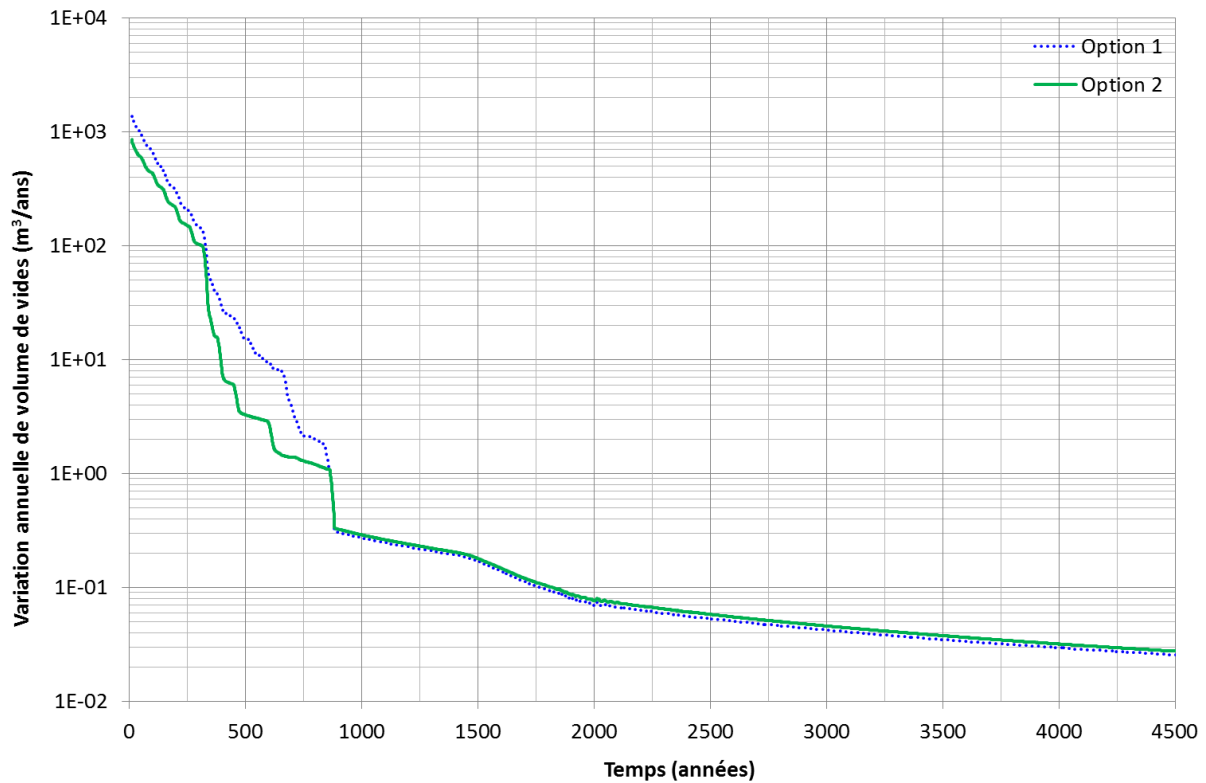


Figure 6-27 : Seconde option de remplissage béton – Taux de fermeture des vides (m^3/an) en fonction du temps et comparaison avec l'option précédente.

6.2.3. Troisième option de remplissage

La troisième option de remplissage considère un remplissage complet du stockage par le béton. Le volume de vides global résultant et le taux de fermeture de ces vides ($\Delta V/\text{an}$) sont présentés respectivement en Figure 6-26 et en Figure 6-27. Le volume de vides à long terme est d'environ $17\,000\text{ m}^3$. Les conclusions sont les mêmes que celles formulées pour la deuxième option de remplissage :

- le volume global des vides aux petits temps est le plus petit des trois options étudiées, vu comblement de tout le stockage par le béton ;
- le volume global des vides à long terme est le plus grand des trois options étudiées, vu la présence de la porosité résiduelle du béton ;
- le taux de fermeture est nettement plus faible que pour les deux premières options, jusqu'à 800 ans, puis il est sensiblement le même, étant gouverné par la compression des déchets.

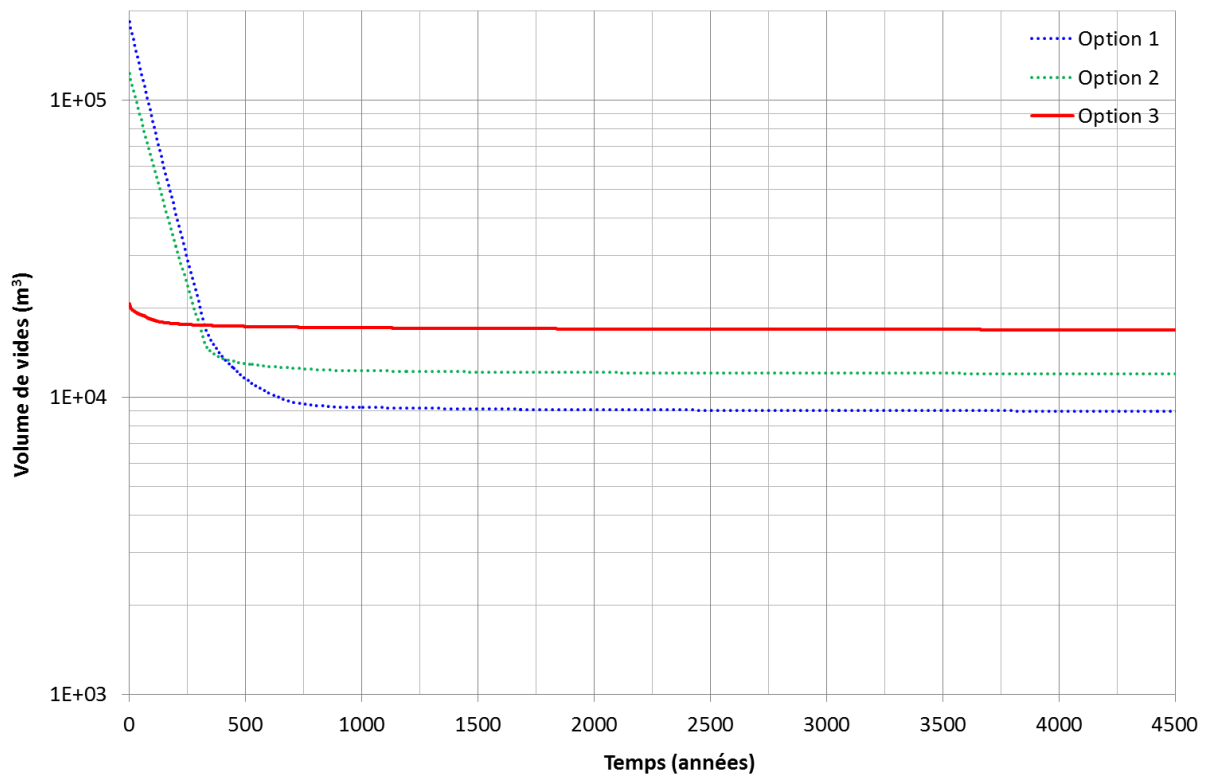


Figure 6-28 : Troisième option de remplissage – Volume de vides dans le stockage en fonction du temps et comparaison avec les options précédentes.

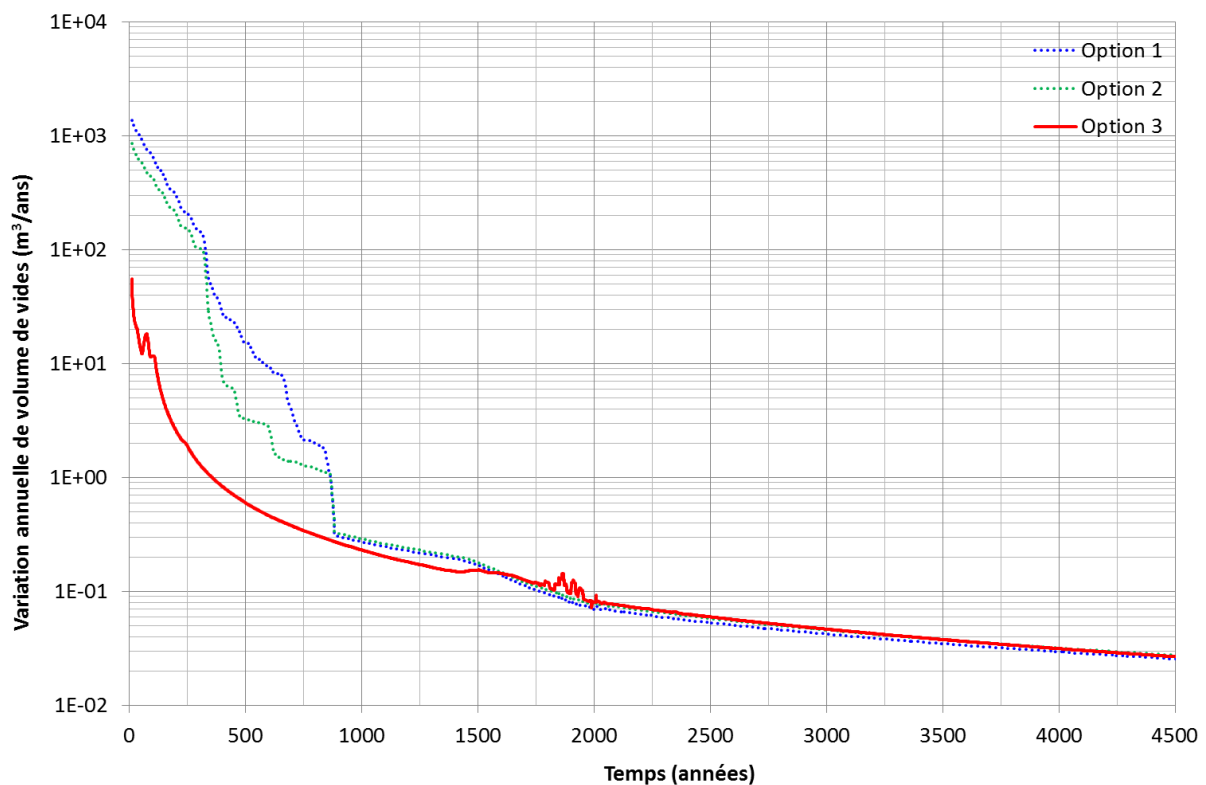


Figure 6-29 : Troisième option de remplissage béton – Taux de fermeture des vides (m³/an) en fonction du temps et comparaison avec les options précédentes.

6.3. Estimation de la date d'envoyage du stockage

Les résultats ainsi obtenus permettent de déterminer le temps auquel le stockage sera complètement envoyé par la saumure. Ce temps dépend du volume de vides encore existants dans le stockage (calculé dans les paragraphes précédents pour les trois options de remplissage), du temps auquel la saumure sera remontée jusqu'au niveau des barrages et de son débit entrant à travers les barrages. Ces données sont disponibles pour les 4 cas de remontée de la saumure décrits en Paragraphe 5 et sont résumées dans le Tableau 6-5.

Cas de remontée de la saumure	1	2	3	4
Barrage	Simple	Simple	Simple	Double
Débits d'arrivée de saumure (m ³ /an)	58 000	22 000	105 000	58 000
Arrivée de la saumure au stockage (ans)	421	642	240	421
Atteinte du régime permanent (ans)	505	716	312	574
Débit permanent (m ³ /ans)	15.5	15.5	15.5	7.75
Volume d'eau déjà entré dans le stockage au début du régime permanent (m ³)	6	326	17	15

Tableau 6-5 : Temps et débits d'envoyage du stockage pour les 4 cas pris en compte.

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 de la Figure 6-30 à la Figure 6-32 pour les trois options de remplissage du site. De plus, le Tableau 6-6 fournit les différents temps d'envoyage ainsi calculés.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Première option de remplissage	1100	1300	900	1750
Seconde option de remplissage	1300	1500	1100	2100
Troisième option de remplissage	1600	1800	1400	2750

Tableau 6-6 : Temps d'envoyage du stockage pour les 4 cas de remontée de la saumure et les trois options de remplissage avec béton.

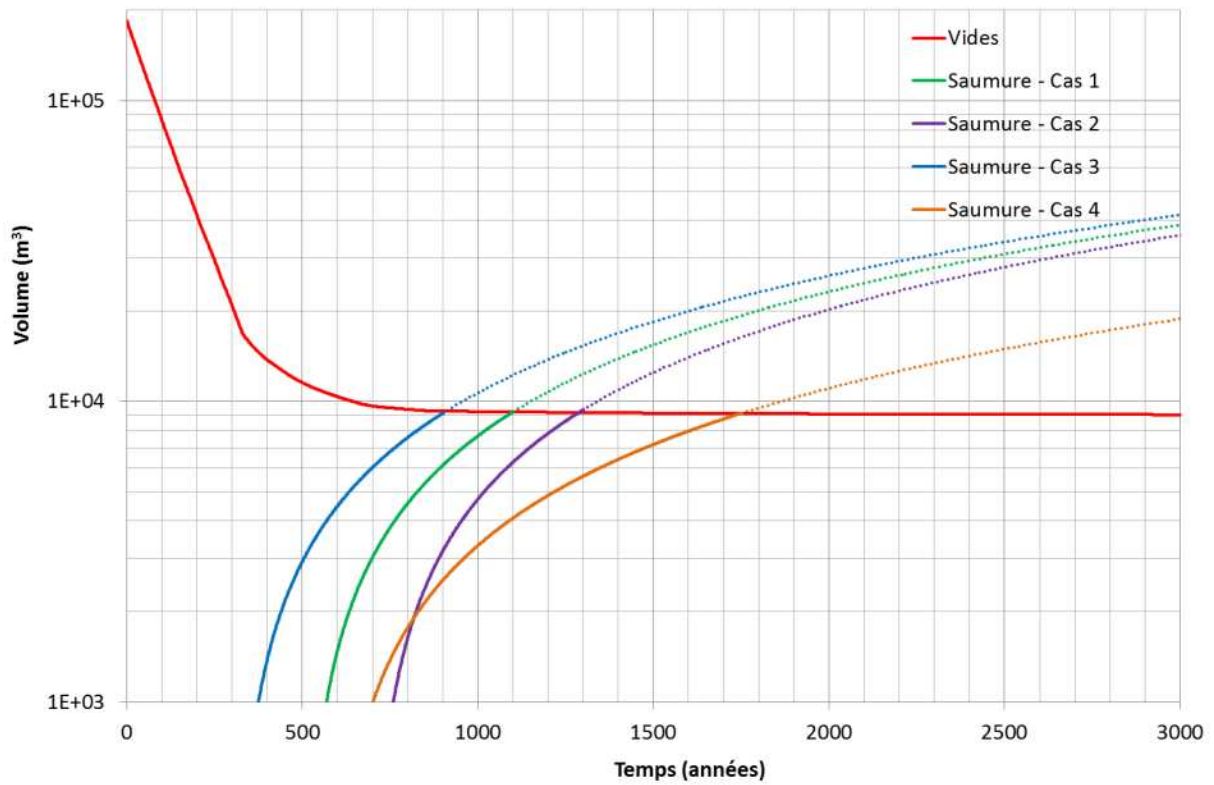


Figure 6-30 : Première option de remplissage avec béton : évolution du volume des vides et de la saumure.

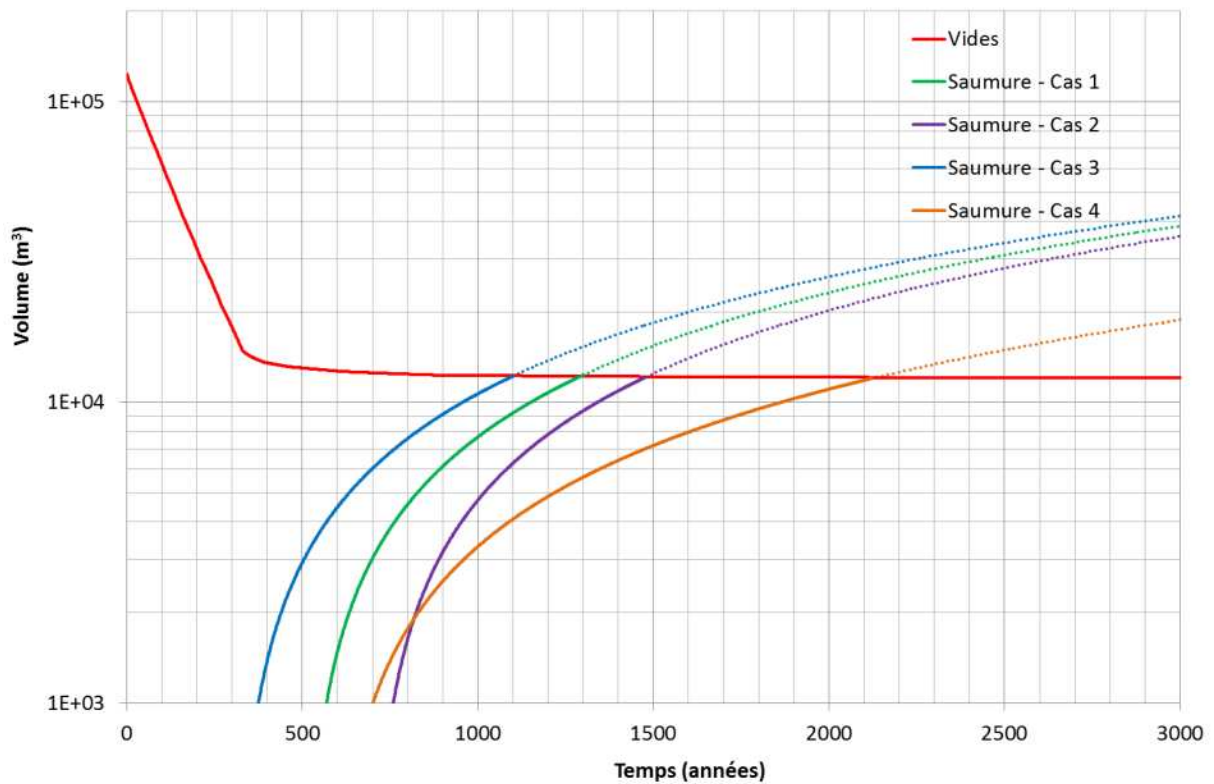


Figure 6-31 : Seconde option de remplissage avec béton : évolution du volume des vides et de la saumure.

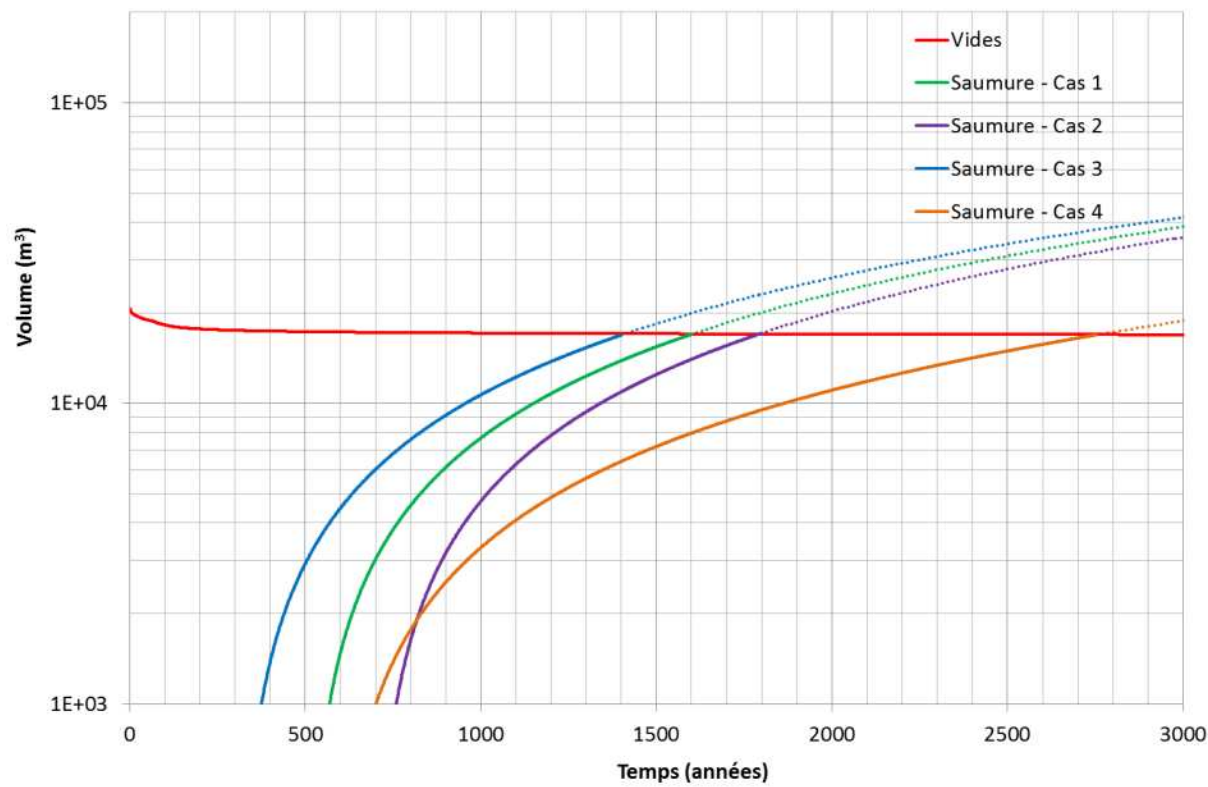


Figure 6-32 : Troisième option de remplissage avec béton : évolution du volume des vides et de la saumure.

7. 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. La pression de la saumure peut alors contribuer à ralentir le fluage du sel, en procurant un confinement supplémentaire qui diminue la contrainte déviatorique dans le sel près du stockage. Des études précédentes, menées par l'INERIS ([1] et [2]) indiquent que le taux de fermeture pourrait être réduit d'au moins un facteur 10, sous une pression de 6 MPa environ et une contrainte lithostatique de 12 MPa à 550 m de profondeur. La valeur de la pression a été calculée en prenant en compte une densité de la saumure de 1.2 (350-360 g/L de sel) et une profondeur de l'interface saumure/eau située au niveau du toit de la formation de sel, soit 300 m de profondeur. On rappelle qu'une contrainte déviatorique divisée par 2, produit un taux de fluage 16 fois plus faible, l'exposant de la loi de Norton étant égal à 4.

Bien que cette conclusion soit évidente pour le cas des galeries vides, elle doit être relativisée pour les galeries remplies par déchets ou béton. En effet, dans ce cas le nouvel état de contraintes effectives ainsi instauré peut ne pas être compatible avec la résistance du matériau de remplissage (béton ou déchets) et donc engendrer une accélération de la réduction des vides, suite à la plastification de ce matériau.

Les résultats présentés dans le paragraphe 6.3 permettent d'obtenir les dates auxquelles le stockage sera complètement noyé. Si on considère le cas le plus pessimiste de remontée de la saumure (cas 3, avec débit maximal d'arrivée de la saumure et barrages simples) les dates sont respectivement 900, 1100 et 1400 ans pour les trois options de remplissage étudiées. Des valeurs plus réalistes peuvent être obtenues avec le cas 1, qui prend en compte un débit moyen d'arrivée de saumure, et barrages simples. On obtient alors 1100, 1300 et 1600 ans respectivement pour les trois options de remplissage.

De nouvelles simulations ont donc été 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.

Le paragraphe 7.1 décrit ces nouvelles simulations. Les résultats ainsi obtenus sur les modèles locaux sont présentés seulement pour le cas d'une date d'ennoyage de 900 ans, sachant que les autres dates donnent des résultats similaires.

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

Les simulations ont été lancées sur les modèles locaux 3D des intersections de galeries remplies de déchets ou de béton. La pression de la saumure est simulée à partir de la date d'ennoyage du stockage par l'introduction d'un champ de pressions interstitielles constant et égal à la pression hydrostatique de la saumure dans les déchets ou le béton, calculée de la façon suivante :

$$p_{saumure} = (h_{eau} \cdot \rho_{eau} + h_{saumure} \cdot \rho_{saumure}) \cdot 9,81 = 5,89 \text{ MPa} \quad (16)$$

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 (1000 kg/m³) et de la saumure (1200 kg/m³).

En ce qui concerne les modèles locaux des sections de galeries de stockage vides (sections 2D perpendiculaires aux galeries vides du stockage et aux galeries d'accès doubles), l'effet de la pression de saumure n'a pas été pris en compte. En effet, dans le cas des tunnels vides on assiste à une fermeture complète avant la date d'envahissement du stockage. Une réouverture de ces tunnels

sous l'effet de la pression peut donc survenir seulement si la pression de la saumure est supérieure à la contrainte dans le sol perpendiculairement aux parois des tunnels. Comme cette contrainte se rapproche de la valeur géostatique à la profondeur du stockage (de l'ordre de 11,5 MPa, quasi isotrope) au cours du fluage, une pression de saumure de l'ordre de 6 MPa n'a pas d'effet significatif.

En théorie, les simulations devraient tenir compte de l'effet de l'augmentation progressive de la pression de la saumure de zéro jusqu'à la valeur maximale. Toutefois, les résultats des précédentes simulations ont montré que le rapport $\Delta V_{vide} / V_{vide}$ du stockage qui est directement relié à l'augmentation de pression par l'intermédiaire du module volumétrique de l'eau est de l'ordre de $3 \cdot 10^{-5}$ par an à 900 ans. En d'autres termes, si on considère un module de la saumure égal à 2 GPa, l'augmentation de pression jusqu'à la valeur hydrostatique prend moins de 100 ans. Comme cette durée reste petite par rapport à l'échelle de temps de l'ensemble de la simulation, une pression équivalente à la valeur hydrostatique est appliquée dans son intégralité à partir de la date d'ennoyage considérée.

Par ailleurs, la pression hydrostatique est un minorant de la pression qui s'applique dans le stockage en cas de débit sortant. En effet, une perte de charge survient du fait de la présence des barrages. De fait, nous verrons plus bas que les pertes de charges en jeu sont effectivement négligeables.

Les résultats des nouvelles simulations sont montrés en Figure 7-1 et Figure 7-2 en termes de l'évolution normalisée du volume des vides pour les deux modèles locaux des intersections de galeries remplies de déchets et du béton respectivement. De plus la Figure 7-3 montre l'évolution des vides dans les déchets par rapport à la taille initiale des déchets. Cette évolution sera prise en compte pour calculer la variation des vides des déchets du stockage dans les parties stockées puis remplies par le béton.

Les évolutions obtenues précédemment sans prendre en compte l'effet de la saumure sont aussi montrées sur les graphes.

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 (Figure 7-1 et Figure 7-3). 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 de l'axe du tunnel. 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 sont donc entraînées, causant une accélération de la fermeture de ces galeries.

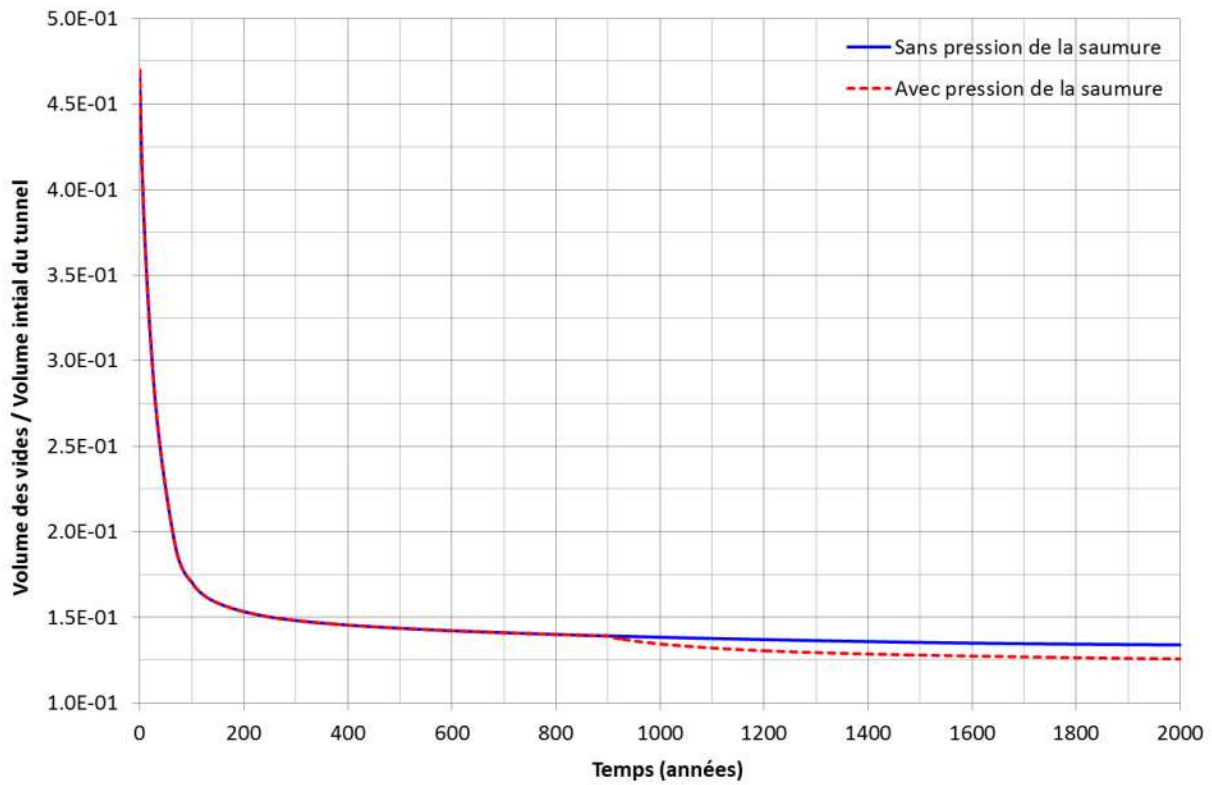


Figure 7-1 : Intersection de galeries avec déchets – évolution normalisée du volume des vides, avec et sans effet de la pression de saumure.

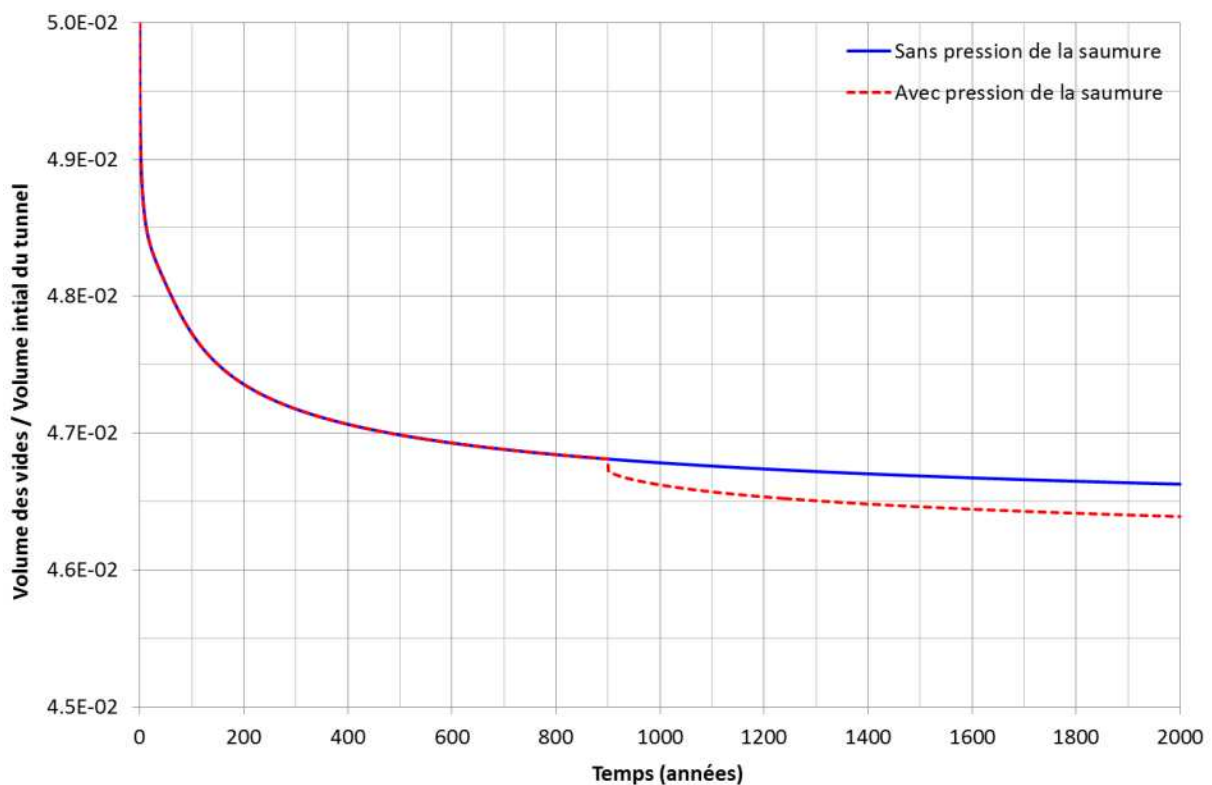


Figure 7-2 : Intersection de galeries avec béton – évolution normalisée du volume des vides, avec et sans effet de la pression de saumure.

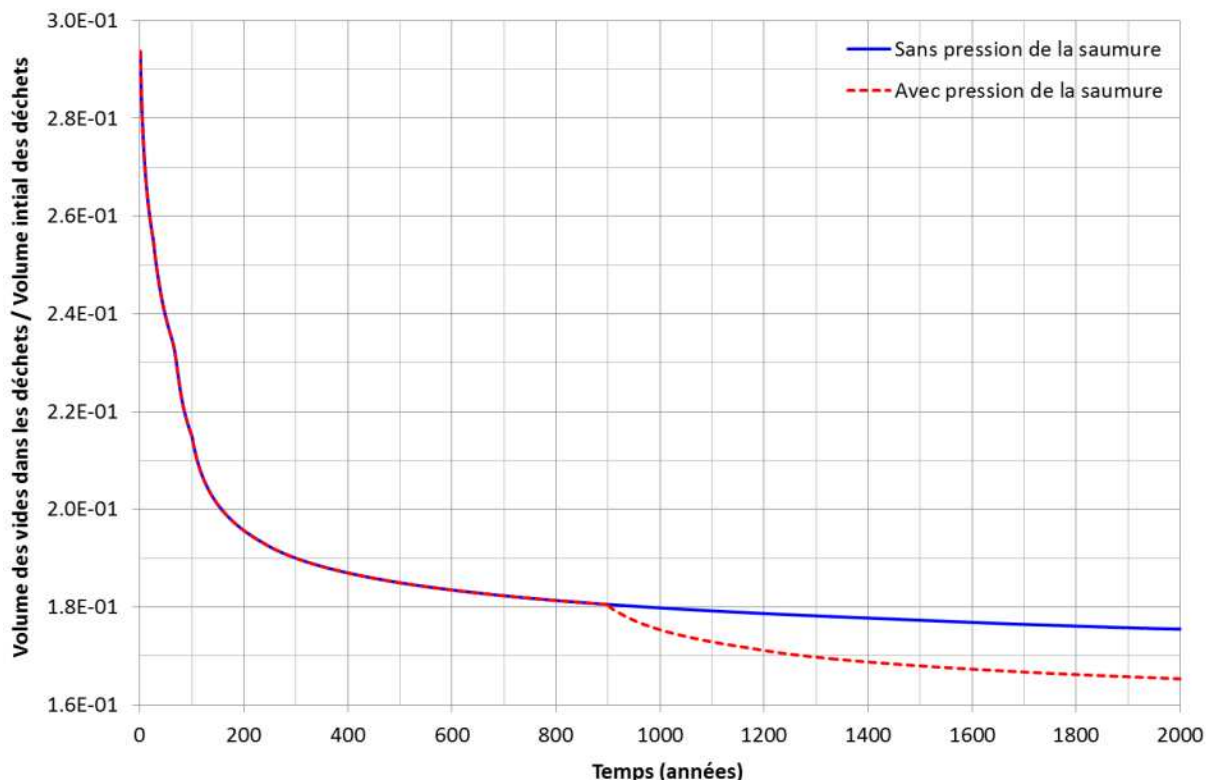


Figure 7-3 : Intersection de galeries avec déchets – évolution normalisée du volume des vides dans les déchets (uniquement), avec et sans effet de la pression de saumure.

7.2. Evaluation du flux potentiel de saumure contaminée à l'extérieur des barrages en bentonite

Les résultats obtenus sur les modèles locaux avec l'effet de la pression de la saumure sont utilisés pour déterminer le taux annuel de fermeture du stockage. Le calcul est fait en prenant en compte pour les trois options de remplissage la date à laquelle la pression de l'eau intervient. L'évolution du volume total de vides dans le stockage est obtenue comme étant la combinaison des fermetures des différentes galeries le composant.

Les taux de fermeture ainsi calculés à partir du moment de l'ennoyage du stockage représentent le flux potentiel de saumure en sortie, en considérant les hypothèses suivantes :

- La saumure est considérée comme incompressible. De fait, son module volumique (de l'ordre de 3 GPa) est tel que « l'emménagement » 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 à 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, après saturation, de 15.5m³ par an en entrée dans le stockage. Comme le montrent les figures ci-dessous (Figure 7-5, Figure 7-7 et Figure 7-9), le taux de fermeture du stockage est initialement de l'ordre de 1 m³/an (après l'ennoyage) et de l'ordre de 0.2 m³/an après 2000 ans, quelle que soit l'hypothèse de remplissage avec béton prise en compte. La perte de charge due aux barrages peut donc être estimée de l'ordre de 400 kPa au tout début avec une réduction très rapide jusqu'à 80 kPa à 2000 ans, valeurs qui ne peuvent qu'avoir une influence marginale sur les résultats de l'étude.

Un autre effet important pourrait être pris en compte : la fixation des polluants dans les barrages en bentonite. Notons que la bentonite est connue pour ses capacités de piégeage des polluants par interaction géochimique. Celles-ci ne sont pas prises en compte ici.

Par ailleurs, 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 bouchons peuvent contenir (990 m^3 en considérant un volume de barrages d'environ 3300 m^3 avec une porosité de 30%). 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 990 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 bouchons 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.

Le calcul de la propagation du front de contaminant depuis le lieu de dépôt jusqu'au barrage, puis au travers d'un barrage de bentonite, 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 495 m^3 . 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 – ce temps peut être important si les galeries d'accès sont remplies de béton.

7.3. Fermeture du stockage après ennoyage total : cas 3

Le cas 3 est le cas le plus pessimiste de remontée de la saumure (débit maximal et barrages simples). L'évolution du volume total de vides ainsi que le taux annuel de variation du volume de vides sont illustrés, pour les différentes options de remplissage, de la Figure 7-4 à la Figure 7-9. Notons l'effet de l'eau au moment de l'ennoyage sur le taux annuel de fermeture du stockage : le taux augmente d'environ un ordre de grandeur presque instantanément.

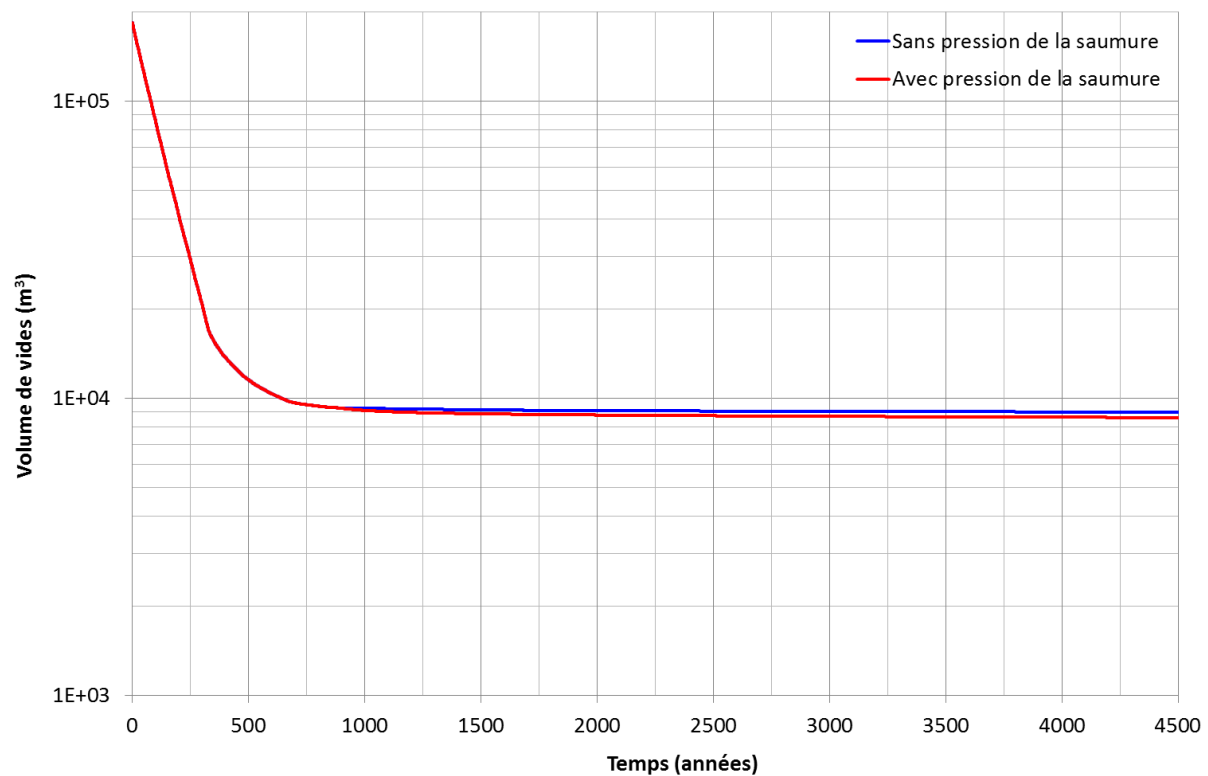


Figure 7-4 : Option 1 - Evolution du volume de vides du stockage.

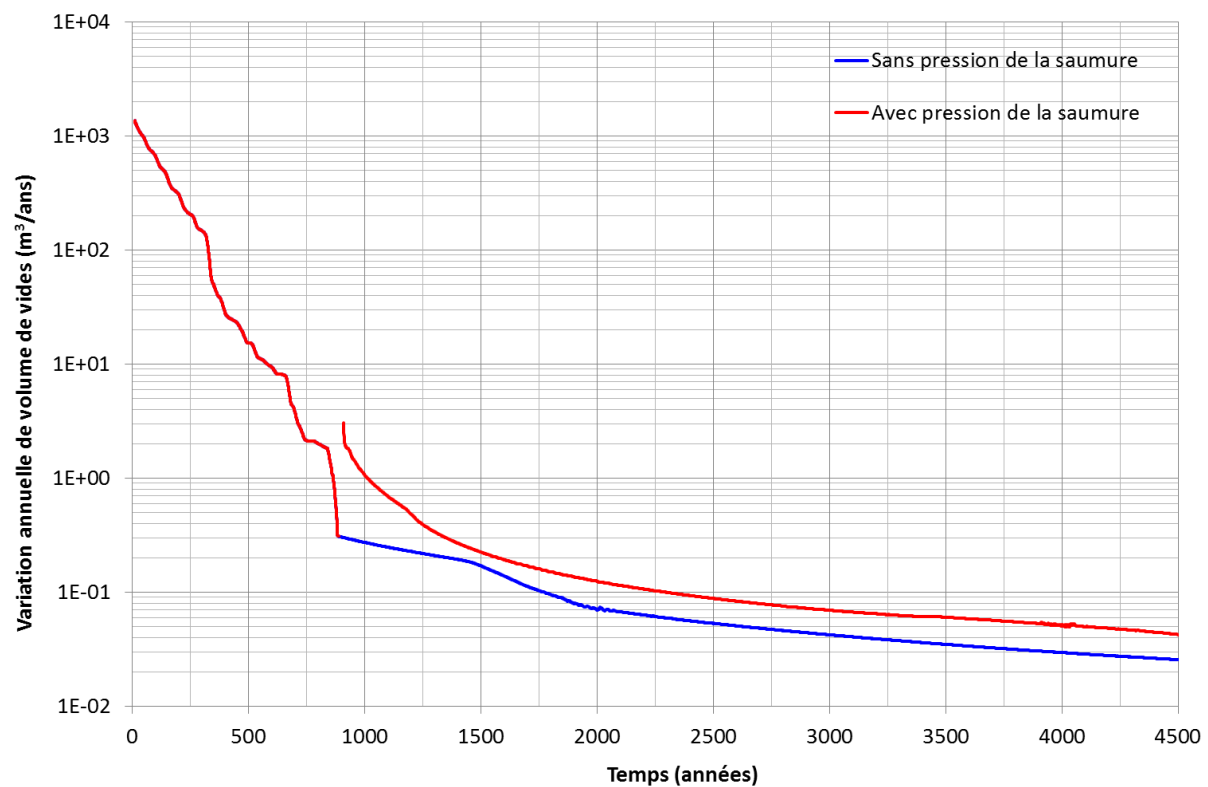


Figure 7-5 : Option 1 – Variation annuelle du volume de vides du stockage.

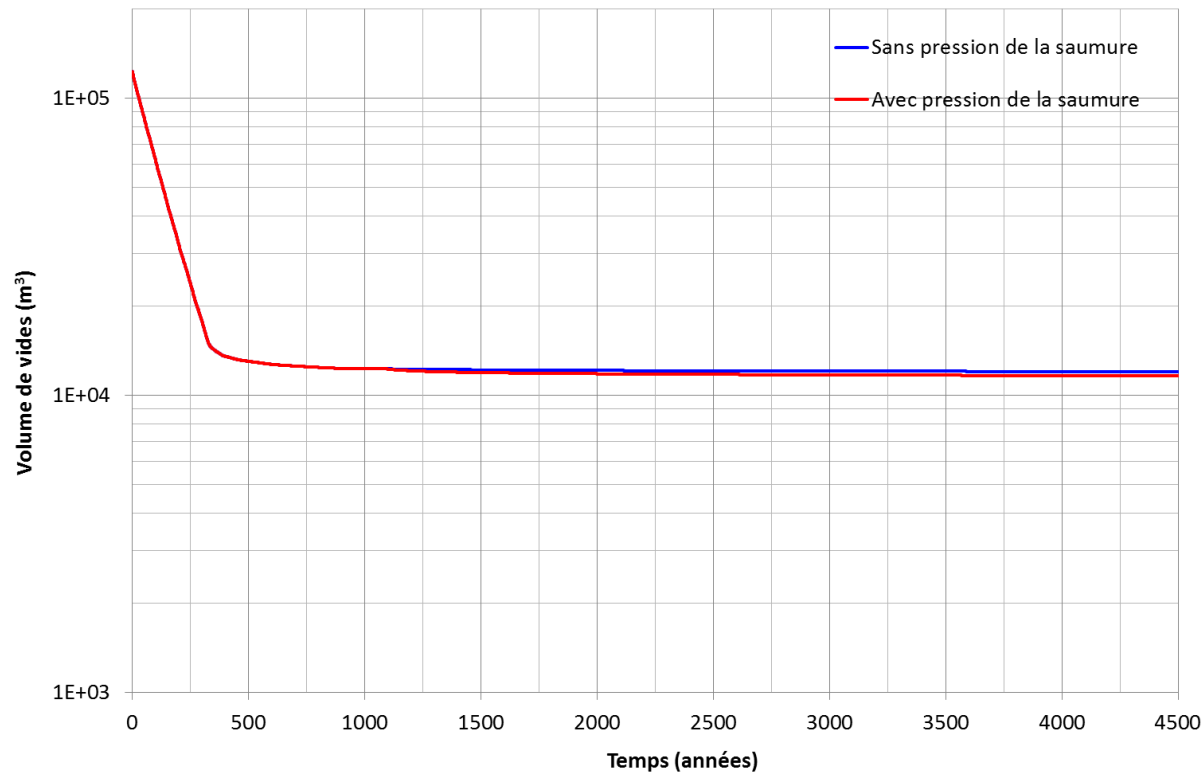


Figure 7-6 : Option 2 - Evolution du volume de vides du stockage.

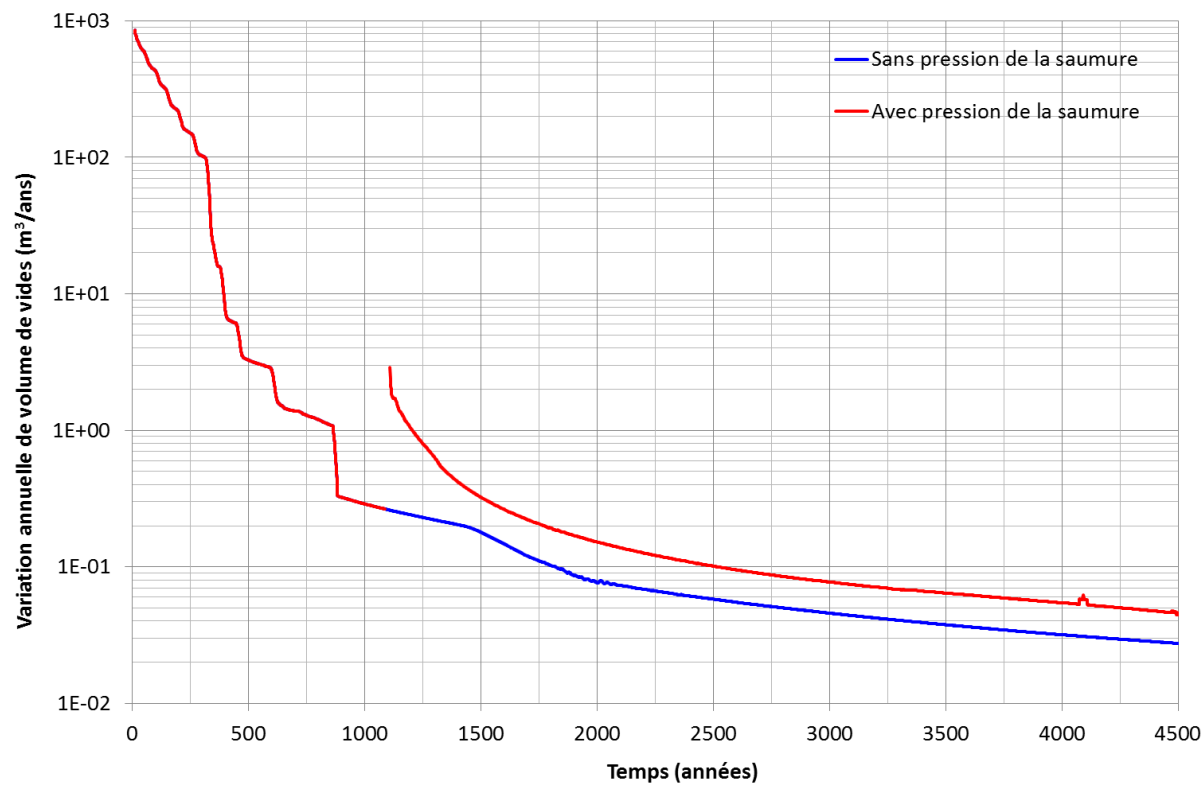


Figure 7-7 : Option 2 – Variation annuelle du volume de vides du stockage.

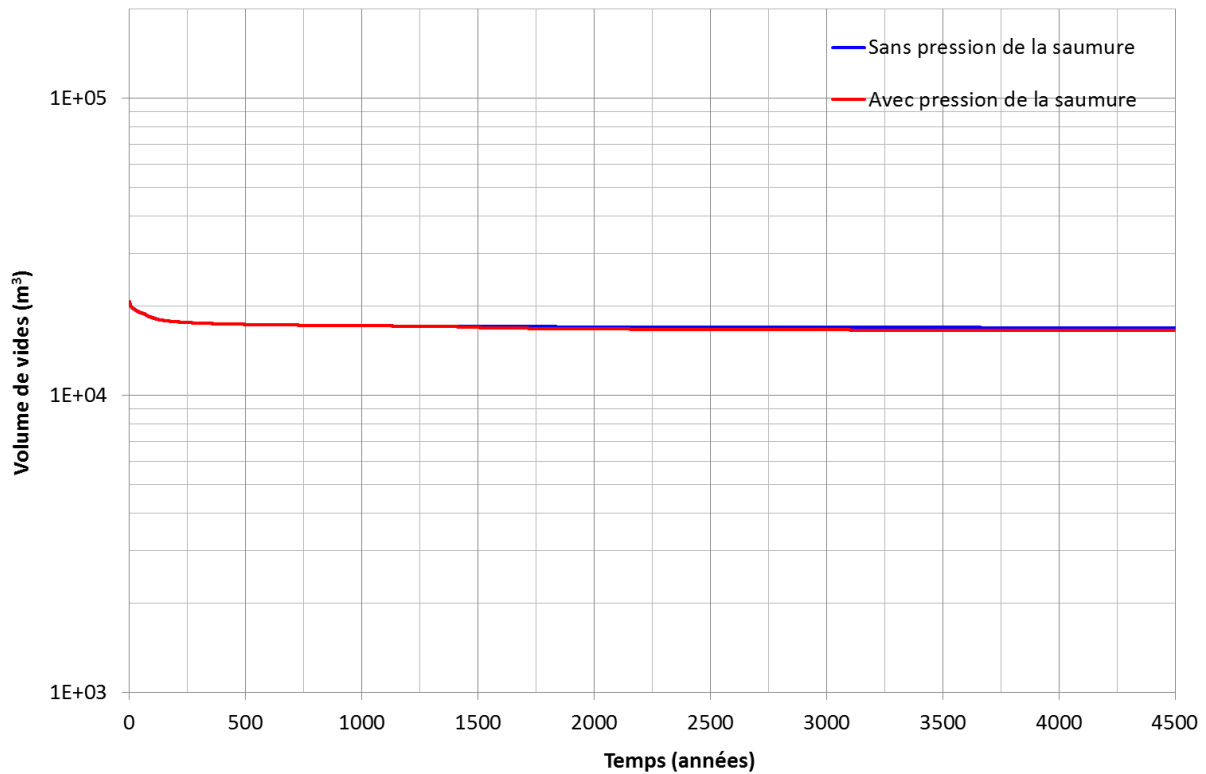


Figure 7-8 : Option 3 - Evolution du volume de vide du stockage.

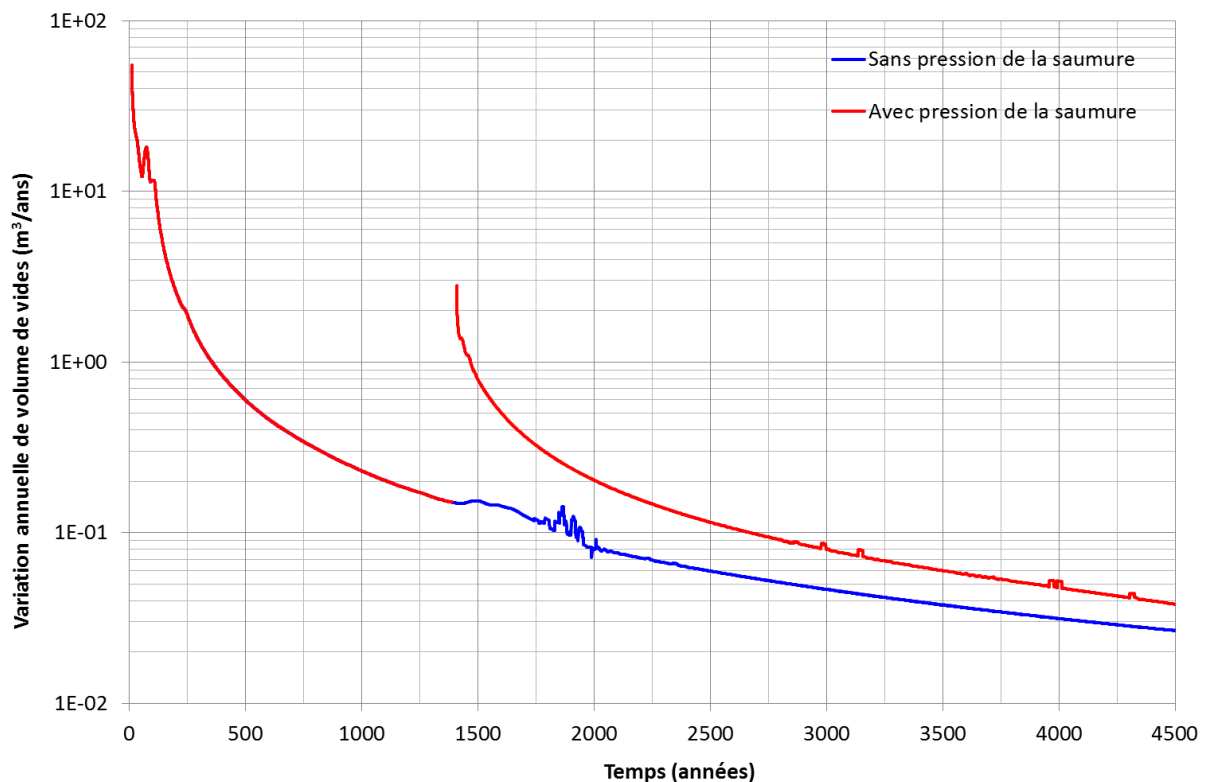


Figure 7-9 : Option 3 – Variation annuelle du volume de vides du stockage.

A partir de ces courbes, la date de sortie de la saumure contaminée est calculée pour les trois options de remplissage comme le moment auquel on atteint une réduction cumulée des vides de 495 m³ par rapport au volume des vides au moment de l'ennoyage complet du stockage.

Les résultats de ce calcul sont fournis en Tableau 7-1. En conclusion, pour cette hypothèse d'ennoyage très pénalisante, le débit de sortie de la saumure polluée sera inférieur à 0,104 m³/an, à partir d'un temps supérieur à 2250 ans après l'excavation du stockage, quelle que soit l'option de

remplissage prise en compte. Notons aussi qu'un remplissage plus poussé du stockage retarde la sortie de la saumure contaminée et donc réduit le flux potentiel à cette date.

Option de remplissage avec béton	1	2	3
Date d'ennoyage du stockage (ans)	900	1100	1400
Volume de vides à l'ennoyage (m ³)	9 246	12 229	17 049
Date de sortie de la saumure contaminée (ans)	2249	2649	3981
Flux potentiels de saumure contaminée (m ³ /an)	0.104	0.092	0.048

Tableau 7-1 : Cas 3 - Année et débit de sortie de la saumure contaminée.

7.4. Fermeture du stockage après ennoyage total : cas 1

Un deuxième calcul des flux potentiels de saumure contaminée a été réalisé en considérant un scénario plus réaliste pour le stockage, avec un débit d'arrivée de la saumure de 58000 m³/an et des barrages simples (cas 1 du Tableau 6-5).

Les résultats sont reportés de la Figure 7-10 à la Figure 7-15 pour les trois options de remplissage avec béton.

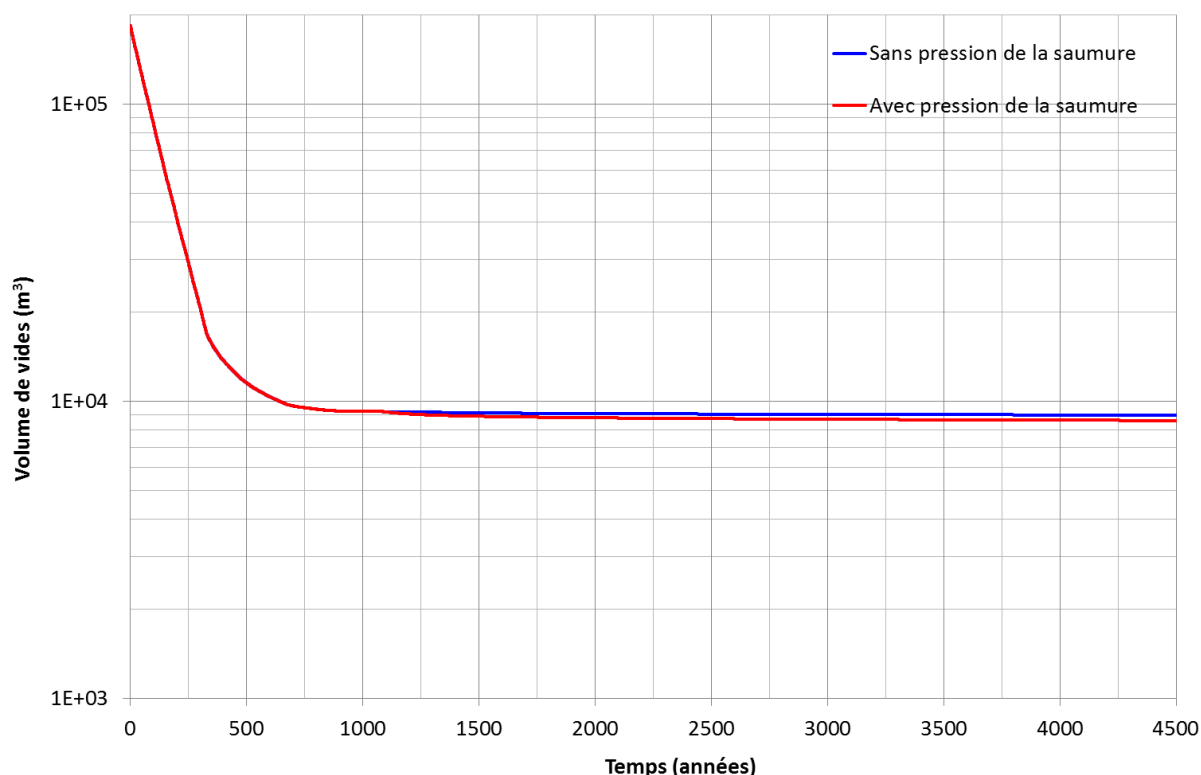


Figure 7-10 : Option 1 : Date d'ennoyage = 1100 ans - Evolution du volume de vide du stockage.

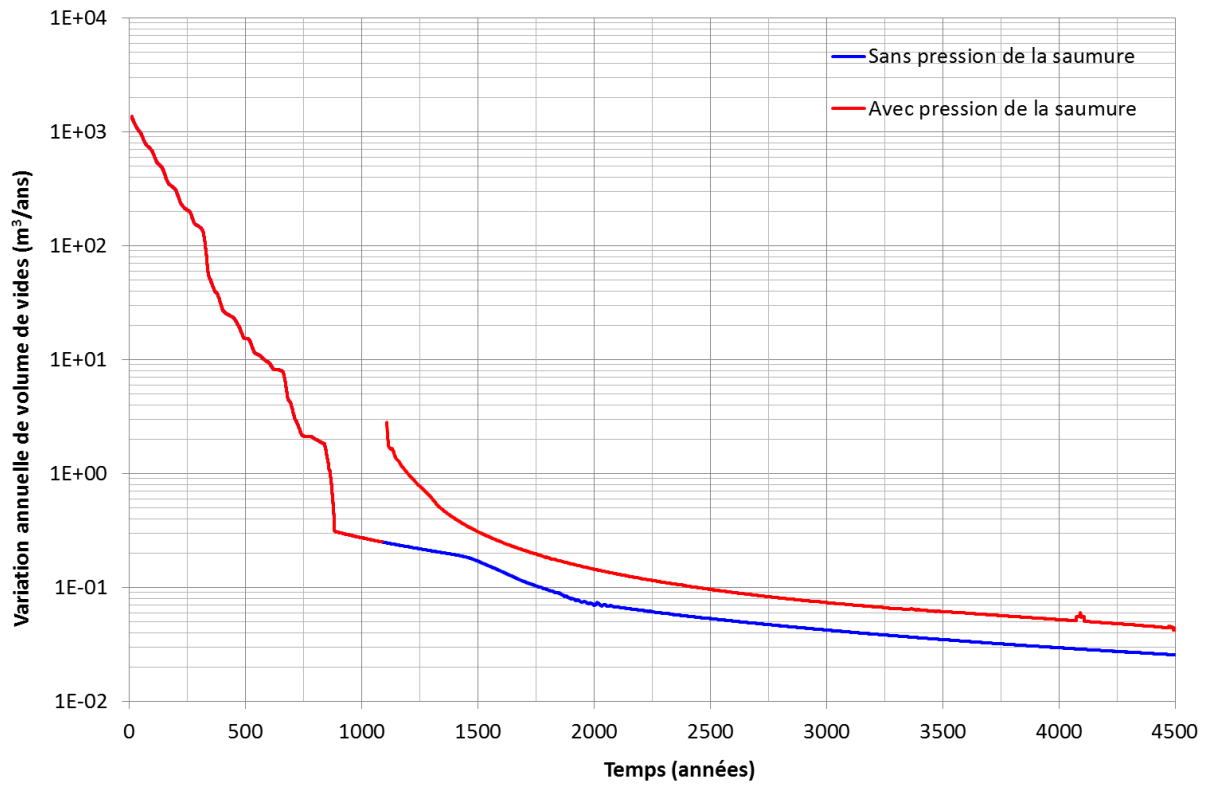


Figure 7-11 : Option 1 : Date d'ennoyage = 1100 ans – Variation annuelle du volume de vide du stockage.

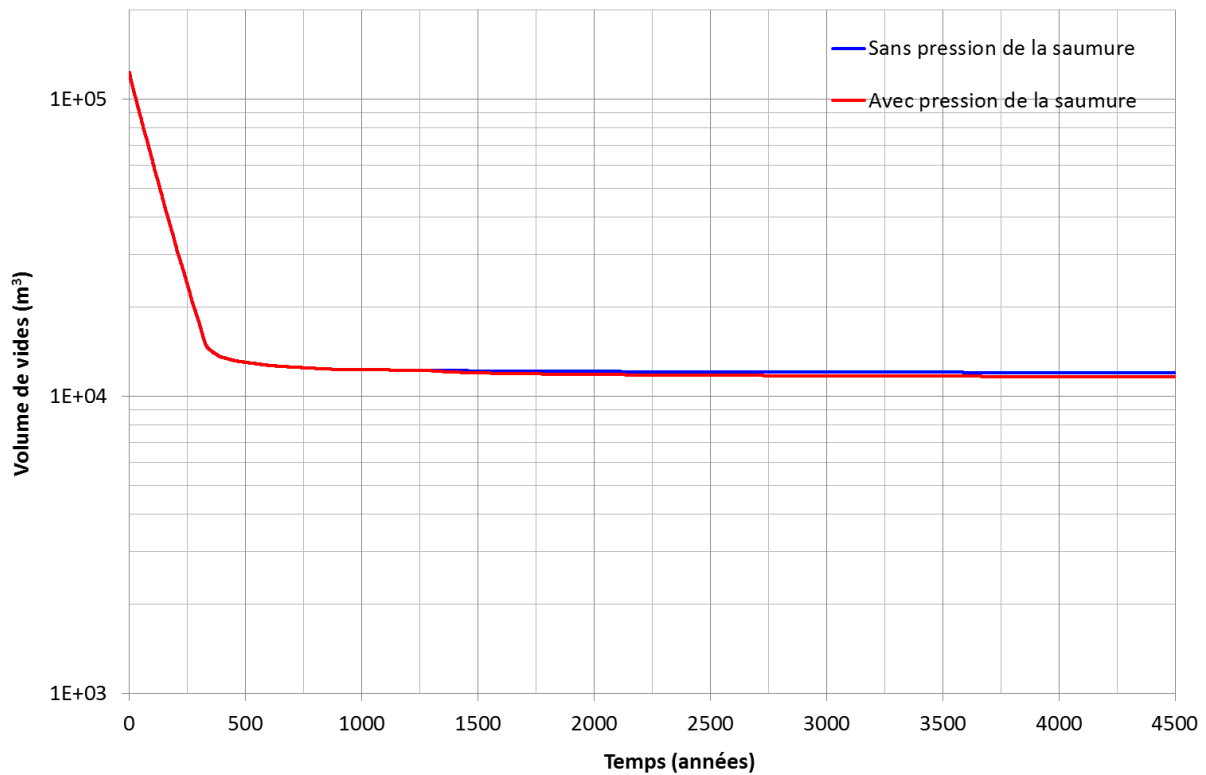


Figure 7-12 : Option 2 : Date d'ennoyage = 1300 ans - Evolution du volume de vide du stockage.

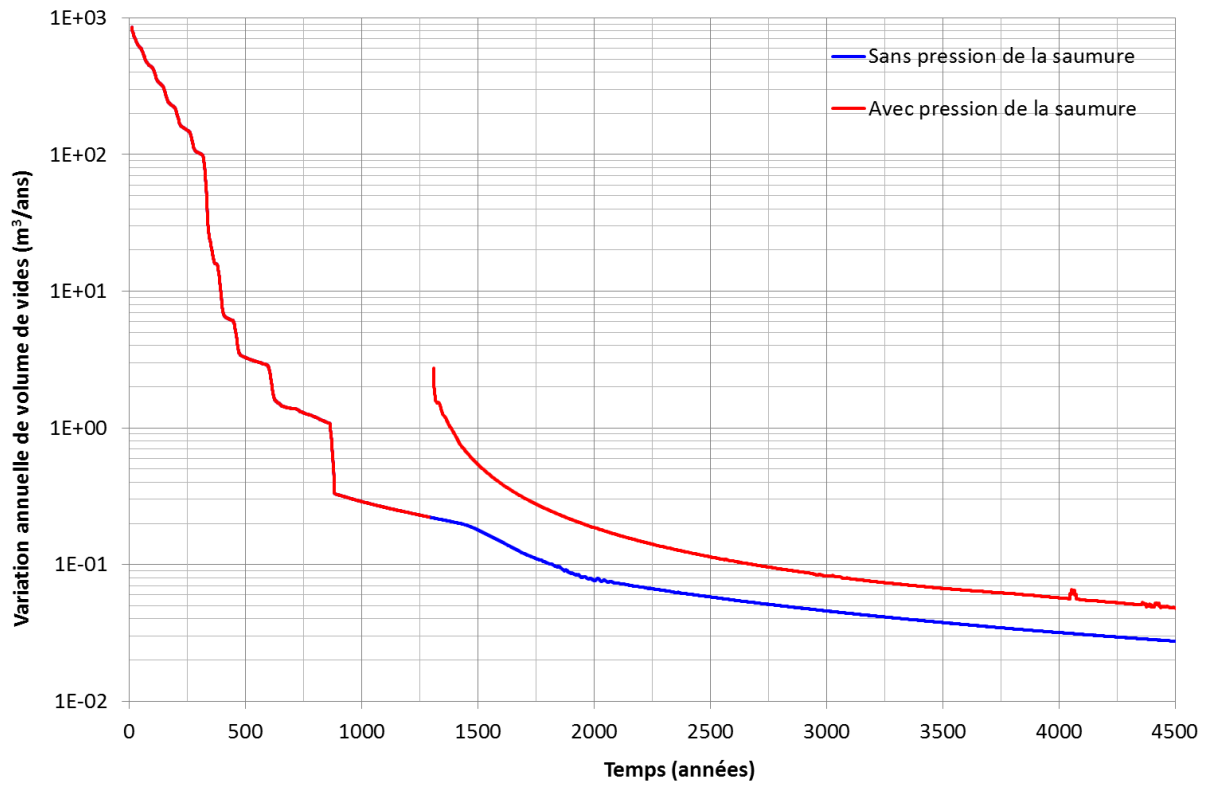


Figure 7-13 : Option 2 : Date d'envoyage = 1300 ans – Variation annuelle du volume de vide du stockage.

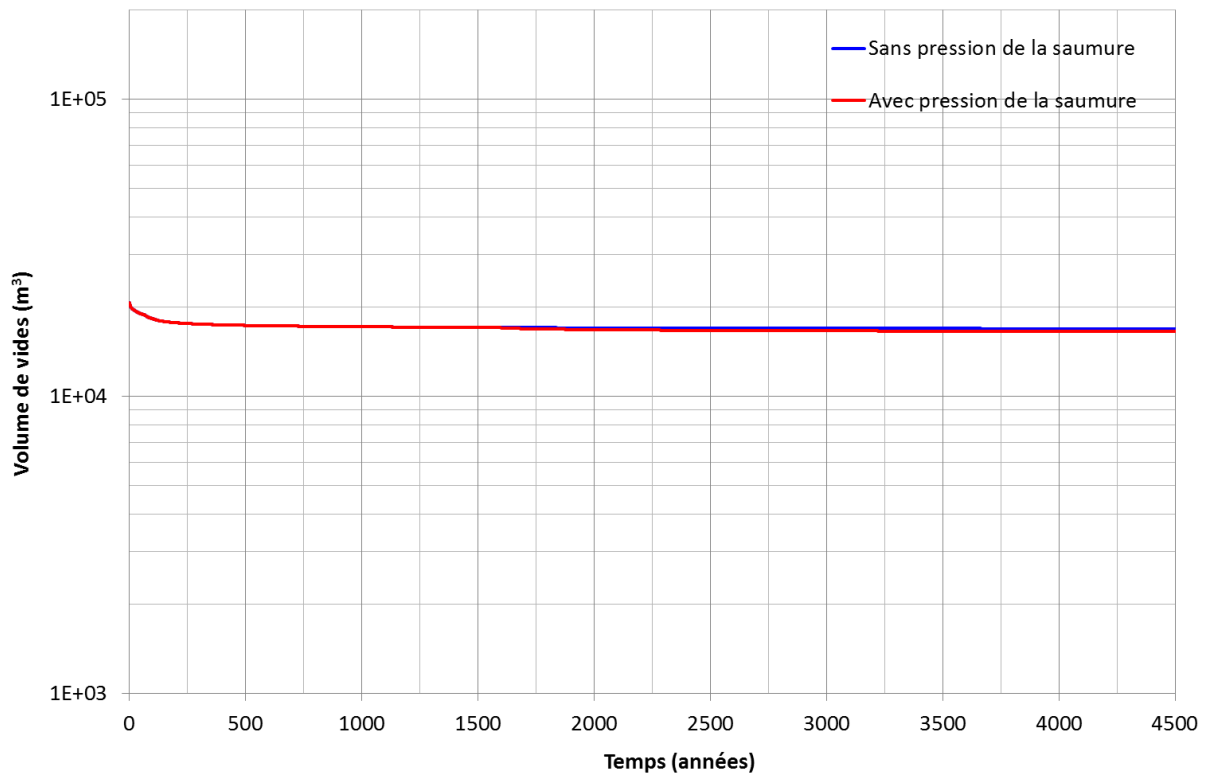


Figure 7-14 : Option 3 : Date d'envoyage = 1600 ans - Evolution du volume de vide du stockage.

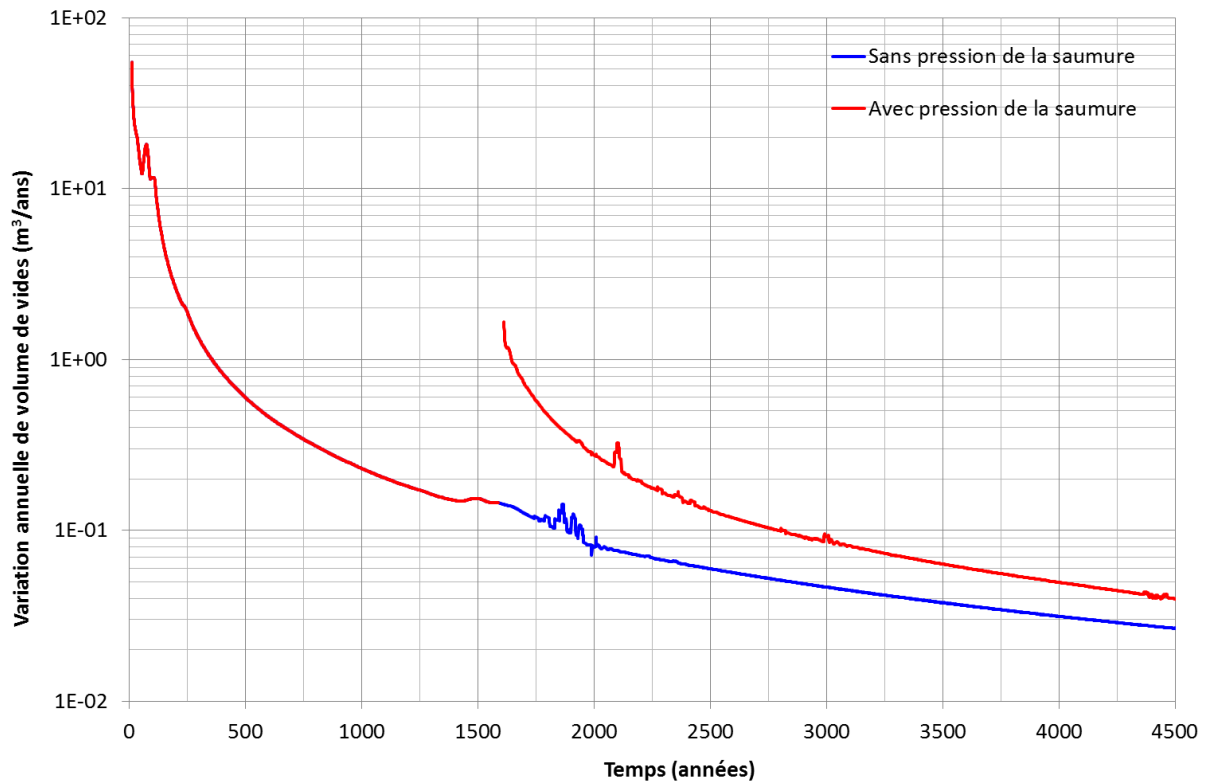


Figure 7-15 : Option 3 : Date d'ennoyage = 1600 ans – Variation annuelle du volume de vide du stockage.

Le calcul de la date de sortie de la saumure contaminée ainsi que du flux potentiel est fait en considérant la date à laquelle on observe une réduction cumulée des vides de 495 m³ par rapport à l'ennoyage du stockage. Les résultats sont détaillés dans le Tableau 7-2.

En conclusion, pour cette hypothèse réaliste, le débit de sortie de la saumure contaminée sera inférieur à 0.08 m³/an, à partir d'un temps supérieur à 2900 ans après l'excavation du stockage.

Option de remplissage avec béton	1	2	3
Date d'ennoyage du stockage (ans)	1100	1300	1600
Volume de vides à l'ennoyage (m ³)	9 196	12 182	16 991
Date de sortie de la saumure contaminée (ans)	2909	3342	> 4500
Flux potentiels de saumure contaminée (m ³ /an)	0.076	0.071	< 0.040

Tableau 7-2 : Cas 1 - Année et débit de sortie de la saumure contaminée.

7.5. Flux massique des polluants sortant des barrages

Bien que l'impact de la fermeture du stockage sur la pollution de l'aquifère d'Alsace ne soit pas étudié dans la présente étude, une approche simplifiée est ici prise en compte pour évaluer à partir des données disponibles le flux massique de polluants sortant des barrages. Nous considérons en particulier le risque de contamination des déchets contenant du mercure (Hg).

La concentration de mercure à la source (C_{Hg} en kg/m³) au sein du stockage isolé par les barrières est estimée en considérant que tout le mercure contenu dans le stockage (la masse M_{Hg} , de l'ordre de 54 000 kg) passe en solution :

$$C_{Hg} = \frac{M_{Hg}}{V_{vides}} \quad (17)$$

Où V_{vides} est le volume des vides du stockage au moment où le stockage sera complètement noyé. Vu l'hypothèse à la base de cette relation (dissolution complète du mercure au moment de l'ennoyage), la valeur obtenue représente certainement un majorant de la concentration réelle. Notons aussi que l'équation (17) ne pose aucune contrainte sur la concentration maximale de mercure dans la saumure, alors que cette valeur ne peut pas dépasser la valeur de la concentration à la saturation.

Le flux massique du mercure (q_{Hg} en kg/an) sortant des barrières peut être alors estimé sur la base du débit sortant de la saumure q_s calculé précédemment aux paragraphes 7.3 et 7.4, en utilisant la relation suivante:

$$q_{\text{Hg}} = C_{\text{Hg}} \cdot q_s \quad (18)$$

Le Tableau 7-3 et le Tableau 7-4 résument les résultats du calcul pour les deux cas de remontée de la saumure au droit du stockage pris en compte dans l'étude : le cas 3 avec un débit d'arrivée de la saumure de 105 000 m³/an et le cas 1 avec un débit de 58 000 m³/an. Les résultats sont fournis pour les trois options de remplissage des vides avec le béton afin de montrer l'influence du remplissage sur le flux massique de mercure sortant des barrages.

Option de remplissage avec béton	1	2	3
Date d'ennoyage du stockage (ans)	900	1100	1400
Volume de vides à l'ennoyage (m ³)	9 246	12 255	17 049
Concentration de mercure dans la saumure C_{Hg} (kg/m ³)	5.84	4.41	3.17
Date de sortie de la saumure contaminée (ans)	2249	2694	3981
Flux de saumure contaminée sortant des barrages (m ³ /an)	0.104	0.092	0.048
Flux massique du mercure sortant des barrages (kg/an)	0.60	0.41	0.15

Tableau 7-3 : Calcul du flux massique de mercure sortant des barrages pour le cas 3 de remontée de la saumure (105 000 m³/an).

Option de remplissage avec béton	1	2	3
Date d'ennoyage du stockage (ans)	1100	1300	1600
Volume de vides à l'ennoyage (m ³)	9 196	12 182	16 991
Concentration de mercure dans la saumure C_{Hg} (kg/m ³)	5.87	4.43	3.18
Date de sortie de la saumure contaminée (ans)	2909	3342	> 4500
Flux de saumure contaminée sortant des barrages (m ³ /an)	0.076	0.071	< 0.040
Flux massique du mercure sortant des barrages (kg/an)	0.45	0.32	< 0.13

Tableau 7-4 : Calcul du flux massique de mercure sortant des barrages pour le cas 1 de remontée de la saumure (58 000 m³/an).

A partir de ces résultats, on peut conclure que :

- le flux de mercure sortant du stockage reste toujours inférieur à 0.6 kg/an (valeur obtenue dans le cas du débit maximal d'arrivée de la saumure et avec un remplissage minimal du stockage avec le béton) ;
- le remplissage complet du stockage (option de remplissage 3) réduit le flux massique du mercure d'environ 75% par rapport au cas d'un remplissage des seuls blocs vides (option 1). Le remplissage des galeries de service seules permet, lui, de réduire le flux massique d'environ 30%.

8. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était la prédiction des flux potentiels de saumure contaminée pouvant sortir, à long terme, du stockage de Wittelsheim.

8.1. Méthode, résultats intermédiaires

Le « chargement » qui produit le fluage et donc *in fine* les flux sortants est la contrainte due au poids des terrains sus-jacents. Cette contrainte est perturbée par l'existence de deux niveaux d'exploitation datant du 20^{ème} siècle dans le toit immédiat du stockage. Le fluage du sel étant très fortement dépendant de la contrainte, il est intéressant d'évaluer aussi précisément que possible ce chargement. Pour cela, un modèle global du stockage et des travaux sus-jacents a été construit et utilisé. Il montre que la contrainte que subit le stockage est effectivement réduite de 2 MPa environ dans les décades qui suivent l'exploitation, puis revient lentement vers la valeur lithostatique – au bout de 2000 ans, la contrainte est encore inférieure de 0,9 MPa environ à sa valeur lithostatique initiale.

En parallèle, la mise en saturation progressive des barrages de bentonite a été étudiée, pour les quatre jeux d'hypothèses définis au préalable, en termes de vitesse de remontée de la saumure dans les travaux, et de longueur de barrage utilisée autour du stockage. Il faut de 3 à 7 siècles pour que l'écoulement de la saumure vers le stockage atteigne son débit permanent (et maximum), lequel varie de 15.5m³/an pour des barrages simples de 5m de longueur à 7,75m³ par an pour des barrages doubles de 10m de longueur totale.

L'évolution des contraintes calculée par le modèle global est utilisée comme condition aux limites pour des modèles locaux des différentes configurations de galeries présentes dans le stockage. Ici, la très forte convergence initiale des excavations produit dans certains cas des distorsions de maillage qui interdisent de mener la simulation à son terme. Pour ces cas, la géométrie réelle (intersections de galeries vides) a été remplacée par une géométrie plus simple (section de galerie sans intersection) qui amène à retarder la convergence, et donc à surestimer les flux potentiels à long terme. Les comportements des différentes configurations de galeries sont combinés, en fonction des options de remplissages définies par StocaMine, pour obtenir l'évolution du volume total de vides dans le stockage.

Une première étape de simulation permet d'obtenir l'évolution du stockage avant la mise en pression de la saumure. Il faut 6 siècles dans le pire des cas pour que les vides du stockage se remplissent après établissement du régime permanent. L'échéance de début de la montée en pression de la saumure est de ce fait au minimum de 9 siècles. Dans la plupart des cas, les vides ne sont pas remplis avant 1100 ans.

La montée en pression de la saumure dans le stockage, après la fin de l'envahissement, est rapide (quelques décades). Nous considérons que cette montée en pression est immédiate. La saumure présente pourrait contribuer à ralentir la convergence des vides résiduels dans les parties de galeries initialement vides. Toutefois, ces galeries ont déjà été complètement fermées par le fluage au moment de l'envahissement du stockage. La ne saumure joue donc aucun rôle dans ces galeries refermées, puisque la valeur de la pression hydrostatique reste largement inférieure aux contraintes dans le sol autour des galeries.

Au contraire, la saumure a l'effet inverse lorsqu'elle envahi un « poreux » (déchets, ou blocs de sel décollés du toit, béton). La vitesse de diminution du volume des vides peut être multipliée par un facteur 10. Ce « sursaut » de la convergence est dû à la rupture (ou à la réactivation de la rupture)

des matériaux soumis à la pression de saumure. Il est « effacé » par la capacité d'emmagasinement des barrages de bentonite, que la saumure polluée doit traverser avant d'atteindre le reste des anciennes exploitations. Un calcul simplifié pessimiste montre en effet que le retard dû aux barrages est au minimum de 13 siècles.

8.2. Retour sur les hypothèses considérées dans l'étude

La prédiction exacte des flux potentiels de saumure contaminée demanderait l'utilisation de nombreuses données qui ne sont pas matériellement disponibles. En leur absence, l'étude s'est basée sur une approche progressive du problème, en veillant à choisir des hypothèses pénalisantes – c'est-à-dire produisant une surestimation des flux à très long terme – à chaque fois qu'une incertitude subsistait. Une liste des hypothèses pessimistes est détaillée ci-dessous :

- La fermeture des galeries vides du stockage a été estimée sur la base des simulations en deux dimensions des sections des tunnels. Ces modèles sous-estiment la vitesse de fermeture des tunnels (par rapport à des simulations 3D) et pourraient donc donner lieu à une surestimation du flux de saumure contaminée qui est généré une fois que le stockage est complètement ennoyé. Toutefois, comme la fermeture des tunnels 2D intervient avant l'envahissement complet du stockage, cette hypothèse de travail, bien que pessimiste, n'affecte pas les résultats de l'étude.
- La pression de la saumure à l'intérieur du stockage a été appliquée dans son intégralité à partir de la date d'ennoyage. En réalité, la pression augmente progressivement au cours du temps en raison de la réduction des vides du stockage ainsi que du débit d'entrée de la saumure à travers des bouchons. Comme nous l'avons détaillé précédemment, cette période transitoire ne persiste que pour quelques dizaines d'année. L'effet de la pression de saumure est globalement une forte augmentation de la convergence du stockage, par la rupture en cisaillement des matériaux qu'il contient : remplissage, déchets, et blocs tombés du toit. Une application instantanée de la pression précipite ce phénomène, et produit une surestimation des plastifications dans ces matériaux. Le taux de fermeture, moteur des flux sortants calculés dans l'étude, est donc surestimé, au moment de la montée en pression de la saumure dans le stockage.
- Nous avons fait l'hypothèse que la saumure est incompressible, avec un module volumique de 2 GPa. En réalité ce module est typique d'une eau « pure » sans la présence d'air en solution. L'introduction du sel (tel que dans le cas de la saumure), ainsi que l'effet de la température (qui est de 35° au niveau du stockage), amènent probablement à une valeur du module plus faible. Dans ce cas, une partie de la réduction de volume du stockage pourrait être compensée par la compressibilité de la saumure, ce qui donc amènerait à une valeur plus faible du débit de sortie de la saumure contaminée.
- Les résultats sur la date de sortie de la saumure contaminée ainsi que sur le débit maximal à cette date sont obtenus en considérant une réduction du volume du stockage de l'ordre d'environ 500 m³ à partir de la date d'ennoyage. Cette valeur est une estimation du volume de fluide sain au sein des bouchons qui doit être remplacé par la saumure contaminée avant que cette dernière vienne en contact avec l'extérieur du stockage et donc avec les flux circulant dans les anciens travaux. Mais de fait une partie des galeries contenant les barrages seront également remplies par un béton, en particulier de part et d'autre des barrages, ceci afin d'assurer la stabilité de la bentonite lors de la montée en pression de la saumure, qui sera appliquée seulement sur la face extérieure, avant l'envahissement du stockage. Il en résulte que le volume de « fluide sain » qui devra être « chassé » par la saumure contaminée sera bien supérieur à 500 m³, retardant d'autant la sortie de la saumure contaminée.

- Le calcul du flux massique du mercure à travers les barrages considère une dissolution totale et homogène de tout le contenu en mercure des déchets dans le volume de saumure contenu par le stockage, à la date de fin de l'envahissement. En réalité, la diffusion du mercure ne pourra jamais être complètement homogène. La saumure immédiatement contre les faces internes des barrages (saumure qui sortira dans un premier temps) aura une teneur en mercure plus faible par rapport à la saumure en contact direct avec les déchets.
- L'étude ne considère pas le phénomène de fixation des polluants dans les barrages en bentonite. Cette interaction géochimique, typique de la bentonite, aide à réduire sensiblement le flux massique des polluants en sortie du barrage.

StocaMine est actuellement en train d'acquérir des éléments complémentaires qui pourraient être utilisés pour vérifier les hypothèses faites dans la présente étude. Il s'agit d'une nouvelle série de mesures réalisées soit sur le sel entourant le stockage (mesure de la porosité résiduelle dans les anciens travaux miniers à partir de deux sondages carottés à 500 et 900m de profondeur – mesures de perméabilité du sel) soit sur la résistance mécanique des déchets (essais œdométriques et de compression triaxiale réalisés en laboratoire).

8.3. Choix du remplissage

Les propriétés mécaniques du béton utilisées dans l'étude (déformabilité et résistance, tenue dans le temps) ont été déduites de la résistance à la compression mesurée en laboratoire, par des essais de compression triaxiale réalisés par l'Université d'Artois. Une valeur de porosité de 5% a été choisie à défaut d'informations sur cette propriété.

Il reste que l'utilisation d'hypothèses différentes pour ces caractéristiques aurait conduit à des résultats différents. L'influence de ces propriétés sur les flux potentiels du stockage peut être résumée de la manière suivante :

- Porosité. La porosité intervient de deux façons différentes sur les résultats. Comme elle affecte directement le volume des vides du stockage, elle influence la date d'envahissement du stockage et la concentration en mercure de la saumure contaminée. A compressibilité du béton égale, une porosité plus grande permettrait de retarder la date d'envahissement (et la date de sortie des polluants), et donc de réduire la valeur du flux annuel au travers des bouchons. De plus, comme la concentration de mercure serait plus faible, le flux massique de polluants serait plus petit que celui calculé dans cette étude. C'est la porosité résiduelle qui est ici en jeu, après plus d'un millénaire de compression par le fluage du sel.
- Compressibilité. Un béton moins compressible (module volumique plus fort) pourrait être envisagé pour le remplissage du stockage afin de limiter la réduction des vides internes avec le temps. Comme pour la porosité, cela permettrait de retarder la date d'envahissement et de réduire la concentration en mercure de la saumure.
- Résistance au cisaillement. L'envahissement du stockage et la montée en pression de la saumure causent la rupture du béton en cisaillement à cause de son état de contrainte anisotrope (la contrainte le long de l'axe des galeries est nettement inférieure aux autres contraintes). Cette rupture entraîne une accélération de la réduction de volume et donc une accélération du taux de fermeture du stockage. Il n'est pas envisageable de mettre en place un béton assez résistant pour ne pas plastifier lors de l'envahissement par la saumure. A l'inverse, si l'essentiel de la contrainte de cisaillement dans le remplissage a disparu avant l'arrivée de la saumure, celle-ci n'aura plus d'effet négatif. Deux possibilités :

- une résistance en cisaillement très faible (cohésion et frottement réduits) entraînerait la rupture du matériau de remplissage bien avant l'envahissement du stockage.
- De même, l'utilisation d'un matériau susceptible de fluage sous cisaillement permettrait de réduire fortement la contrainte de cisaillement.

En résumé, le matériau « idéal » est poreux, peu compressible à très long terme, et ne supporte pas de cisaillement significatif – à long terme également. Bien entendu, la nécessaire faisabilité de mise en place du matériau amène d'autres contraintes tout aussi importantes qui sortent du cadre de ce travail.

8.4. Flux de saumure polluée et de mercure

La diminution annuelle de volume du stockage – qui produit le flux sortant - est évaluée à 0,104 m³/an au pire, à une échéance de 22 siècles, dans le cas d'un remplissage avec béton des seuls blocs vides. Une valeur plus réaliste est probablement 0,08 m³/an, à une échéance de 29 siècles. Compte tenu de la teneur en mercure du stockage, ces résultats amènent à un flux massique de mercure sortant des barrages d'environ 0.6 kg/an au pire 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 sont prises en compte. Ces valeurs sont valables pour le cas d'un remplissage en béton des seuls blocs vides. Le remplissage des galeries de service permet de réduire le flux massique de mercure d'environ 30%. Enfin, le remplissage conjoint des galeries de service et des blocs stockés réduit le flux massique de 75% par rapport aux valeurs données ci-dessus.

Les valeurs données ici restent des ordres de grandeur, au vu des hypothèses que leur calcul a nécessité. Elles sont bien sûr sujettes à révision en fonction de la disponibilité future de nouvelles données - propriétés du sel ou des déchets - ou de nouveaux choix de conception – niveau de remplissage, propriétés du béton et barrages par exemple.