



# **Dossier de prolongation pour une durée illimitée de l'autorisation du 03 février 1997 relative au stockage souterrain de produits dangereux non radioactifs**

## **Tierce-expertise**

### **RAPPORT HYDRAULIQUE**



#### **ARTELIA Eau et environnement**

6 rue de Lorraine  
38130 – Echirolles  
France  
Tel. : +33 (0) 4 76 33 43 32  
Fax : +33 (0) 4 76 33 43 74



#### **K-UTEC AG Salt Technologies**

Am Petersenschacht 7  
99706 Sonderhausen  
Germany  
Tel. : +49 3632 610 100  
Fax : +49 3632 610 105



#### **Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG)**

Friederikenstr. 60  
04279 Leipzig  
Germany  
Tel.: 0049-341-33600-220  
Fax: 0049-341-33600-308



## SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>2. VOIES POTENTIELLES ET DEBITS D'INFILTRATION</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUCTION	5
2.2. STOT ENTRE LES MINES AMELIE ET MARIE-LOUISE	5
2.3. FAILLES	8
2.4. SONDAGES	10
2.5. PUIITS	11
2.6. DEBITS D'INFILTRATION	12
<b>3. ENNOYAGE ET ARRIVEE DE LA SAUMURE SAINTE AU NIVEAU DU STOCKAGE</b>	<b>17</b>
3.1. INTRODUCTION	17
3.2. LES PHENOMENES DETERMINANT LA DYNAMIQUE DE L'ENNOIEMENT	17
3.3. EVALUATION DES VALEURS DES PARAMETRES ASSOCIES AUX PHENOMENES D'ENNOIEMENT	22
3.3.1. Estimation des débits d'infiltration	22
3.3.2. Estimation des vides initiaux	22
3.3.3. Estimation des phénomènes de dissolution	23
3.3.4. Estimation des phénomènes de réduction des vides	23
3.3.4.1. COMPACTION INITIALE DES TAILLES FOUDROYES	24
3.3.4.2. CONVERGENCE RESIDUELLE DES TAILLES FOUDROYEES	25
3.3.4.3. CONVERGENCE DES GALERIES	33
3.3.4.4. IMPACT DE L'ENNOYAGE SUR LE FLUAGE	33
3.4. EVALUATION DE LA DATE D'ARRIVEE DE LA SAUMURE SAINTE AU NIVEAU DU STOCKAGE	34
3.4.1. Introduction	34
3.4.2. Principe du calcul	35
3.4.3. Résultats	43
<b>4. SATURATION DU STOCKAGE PAR LA SAUMURE</b>	<b>47</b>
4.1. INTRODUCTION	47
4.2. EVALUATION DE L'EVOLUTION DES VIDES DU STOCKAGE	47
4.2.1. Caractéristiques initiales du stockage	47
4.2.1.1. HYPOTHESE ITASCA	47
4.2.1.2. ANALYSE CRITIQUE	48
4.2.2. Evolution des vides du stockage avant ennoyage	49
4.2.2.1. HYPOTHESES ITASCA	49
4.2.2.2. ANALYSE CRITIQUE	54
4.3. EVALUATION DES DEBITS D'INFILTRATION DANS LE STOCKAGE	56
4.4. EVALUATION DU TEMPS DE SATURATION DU STOCKAGE	57
<b>5. TRANSFERT DE SAUMURE VERS LA NAPPE D'ALSACE</b>	<b>59</b>
5.1. DEBIT DE SAUMURE POLLUEE EN SORTIE DU STOCKAGE	59
5.1.1. Débit entraîné par une différence de pression entre l'amont et l'aval	59
5.1.2. Débit expulsé par la poursuite de la compaction du stockage	59
5.2. DEBIT DE SAUMURE SAINTE EN PROVENANCE DES VIDES MINIERES ET DILUTION	62
<b>6. DILUTION DANS LA NAPPE D'ALSACE</b>	<b>67</b>
6.1. HYPOTHESES DU DOSSIER DE DEMANDE	67
6.2. ANALYSE CRITIQUE	69
6.3. ETUDE DE SENSIBILITE SUR LE FLUX DE SAUMURE POLLUEE SORTANT AU NIVEAU DE LA NAPPE D'ALSACE	71

**7. BIBLIOGRAPHIE****74****TABLEAUX**

Tableau 1. Différentes estimations des débits d'infiltration (dont Dossier de demande en vert et tierce expertise en bleu) .....	13
Tableau 2. Date de remblaiement des puits du secteur Ouest (Lourdé, 2005).....	15
Tableau 3. Synthèse des estimations des vides initiaux .....	23
Tableau 4. Différentes hypothèses de compaction initiale des tailles foudroyées .....	24
Tableau 5. Observations d'affaissement et calcul de la convergence résiduelle associée sur les points de suivi actuels .....	27
Tableau 6. Observations d'affaissement et calcul de convergence résiduelle associée pour des points suivis lors de l'exploitation de la mine .....	28
Tableau 7. Loi de Norton modifiée et paramètres obtenus pour la convergence des tailles foudroyées .....	32
Tableau 8. Loi de Norton et paramètres obtenus par ([53]   INERIS, 2010) .....	33
Tableau 9. Résumé des vitesses de convergences utilisées dans les calculs par l'Inéris ([55]   INERIS, 2011) .....	34
Tableau 10. Evaluations de la vitesse d'ennoyage : Dossier de demande et tierce expertise .....	45
Tableau 11. Volume initial du stockage (données MDP) .....	47
Tableau 12. Répartition des volumes du stockage suivant les scénarios de déstockage (ITASCA).....	48
Tableau 13. Répartition des déchets stockés sur le site de StocaMine (ITASCA) .....	48
Tableau 14. Propriétés du coulis de remplissage (ITASCA) .....	49
Tableau 15. Propriétés du modèle Cam-Clay pour la simulation des déchets REFIOM .....	50
Tableau 16. Volumes de vides résiduels du stockage pour les scénarios 56 % et 93 % .....	54
Tableau 17. Calculs des volumes de vides résiduels du stockage pour le scénario 0% .....	55
Tableau 18. Volumes de vides résiduels du stockage en fonction des scénarios .....	56
Tableau 19. Barrages en bentonite - Année et débit de sortie de la saumure (Itasca).....	61
Tableau 20. Valeurs de dispersivité utilisées dans les modèles BRGM et provenant de la bibliographie. ....	69
Tableau 21. Hypothèses de flux polluant retenues pour le modèle de dispersion de la pollution dans la nappe. ....	71

**FIGURES**

Figure 1. Secteurs Est, Ouest, Amélie et stot (d'après MDP, Mémoire 7-4, 2008) .....	6
Figure 2. Coupe SO-NE présentant la position du stockage par rapport aux travaux miniers et au stot (d'après Mica, 2004).....	7
Figure 3. Réduction locale du stot ([55]   INERIS, 2011) .....	8
Figure 4. Extrait de la coupe Est-Ouest du bassin potassique au droit du site de stockage ([28]   Mica Environnement, 2004) .....	9
Figure 5. Extrait de la coupe Est-Ouest du bassin potassique au droit du site de stockage ([28]   Mica Environnement, 2004) .....	10
Figure 6. Représentation schématique de circulation d'eau à l'extrados d'un puits .....	12
Figure 7. Représentation schématique des phénomènes liés à l'ennoyage de la mine .....	18
Figure 8. Ennoyage de la mine (infiltration et réduction des vides miniers).....	19
Figure 9. Ennoyage de la mine – la saumure arrive au niveau de la zone de stockage.....	20
Figure 10. Ennoyage total de la mine.....	21
Figure 11. Estimation de la convergence résiduelle au point 193 (commune de Bollwiller) .....	25
Figure 12. Schématisation du niveau de saumure dans le forage VAPB2 (d'après MDP).....	29
Figure 13. Carte de l'ennoyage en novembre 2011 repéré par le sondage VAPB2. ....	29

Figure 14. Evolution possible de la convergence résiduelle des tailles foudroyées en fonction de de la profondeur (compaction initiale : 60 %).	31
Figure 15. Evolution possible de la convergence résiduelle des tailles foudroyées en fonction de de la profondeur (compaction initiale : 80 %).	32
Figure 16. Localisation de l'exploitation de la couche inférieure, âge d'exploitation et isohypses de la couche.	36
Figure 17. Localisation de l'exploitation de la couche supérieure, âge d'exploitation et isohypses de la couche.	37
Figure 18. Evolution des volumes excavés en fonction du temps (secteur ouest)	38
Figure 19. Illustration des processus régissant l'évolution des vides miniers dans le temps sur le secteur Ouest.	39
Figure 20. Evolution des vides miniers initiaux après compaction initiale en fonction de la profondeur entre la date de leur création et la situation en 2016.	40
Figure 21. Evolution des vides miniers initiaux (galeries et tailles foudroyées) entre la date de leur création et la situation en 2016.	41
Figure 22. Evolution des vides miniers initiaux (galeries et tailles foudroyées) entre la date de leur création et la situation en 2016.	42
Figure 23. Evolution des vides après compaction initiale de 80% et date d'envoyage – secteur Ouest	44
Figure 24. Evolution des vides après compaction initiale de 80% et date d'envoyage – secteur Amélie	44
Figure 25. Répartition initiale des volumes du stockage (scénario sans déstockage)	48
Figure 26. Répartition des déchets stockés sur le site StocaMine	49
Figure 27. Evolution des vides dans FLAC3D et évolution des vides corrigée pour les galeries des blocs de stockage remplis par le coulis	51
Figure 28. Evolution à long terme des galeries des blocs de stockage remplis par le coulis	52
Figure 29. Evolution des vides pour les blocs de stockage remplis de déchets	53
Figure 30. Evolution à long terme des vides pour les blocs de stockage remplis de déchets	54
Figure 31. Evolution des vides et envoyage dans le stockage ([86]   Itasca, 2015)	57
Figure 32. Paramètres de calcul des concentrations dans les différents compartiments souterrains	60
Figure 33. Hypothèse d'évolution du débit de saumure en provenance des vides miniers en fonction du temps, (MDPA, 2015b)	62
Figure 34. Evolutions du débit de saumure via les 5 puits de la mine Amélie selon différentes hypothèses.	63
Figure 35. Evolutions du débit de saumure saine pour le secteur Amélie	64
Figure 36. Evolutions du débit de saumure saine pour le secteur Ouest	64
Figure 37. Débit et concentration de mercure émergeant du puits Amélie 1 et concentration en mercure dans la nappe – scénario 0% (rapports INERIS)	68
Figure 40. Influence du choix de la taille de la maille sur les concentrations initiales dans le modèle utilisé dans le Dossier de demande	70
Figure 41. Extension du panache de mercure en sortie de puits selon différentes hypothèses de déstockage	72
Figure 42. Comparaison entre l'extension du panache de mercure à proximité d'un puits (Dossier de demande et tierce expertise)	72



## Préambule

L'ensemble des rapports réalisés dans le cadre de la tierce expertise du Dossier de demande de prolongation pour une durée illimitée du stockage de StocaMine a été établi sur la base des informations fournies au groupement ARTELIA / IfG / K-Utec, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité du groupement ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été données sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui sont portés par le groupement dans le cadre des prestations qui lui ont été confiées, peuvent aider à la prise de décision. Le groupement n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité du groupement ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

Le groupement dégage toute responsabilité pour chaque utilisation de rapports en dehors de la destination de la prestation.



# 1. INTRODUCTION

Le rendu de la tierce expertise se compose :

- d'un rapport principal présentant les résultats de la tierce expertise, et répondant aux différents points de la lettre du préfet du 17 février 2015.
- de quatre rapports techniques relatifs aux différents volets de la tierce expertise :
  - un rapport *Géomécanique* ;
  - un rapport *Réévaluation de la composition des colis* ;
  - un rapport *Géochimie et terme source* ;
  - un rapport *Hydraulique*.

Le cadre dans lequel se situe la tierce-expertise est précisé au chapitre 2 du rapport principal.

Le présent rapport correspond au rapport *Hydraulique* de la tierce expertise. Il complète les éléments présentés dans le rapport principal.

De façon plus spécifique, il aborde les points 1, 2 et 3 de la lettre du préfet du 17 février 2015, c'est-à-dire :

- « L'étude de sûreté du confinement des déchets » pour les aspects liés à la perméabilité des barrières naturelle et anthropiques (point 1) ;
- « L'étude du volume et de l'évolution des vides miniers concernés par le stockage et par récurrence la vitesse d'ennoyage attendue » (point 2) ;
- « [...] l'impact du projet sur la qualité des eaux souterraines » (2<sup>ème</sup> partie du point 3).



## 2. VOIES POTENTIELLES ET DEBITS D'INFILTRATION

### 2.1. INTRODUCTION

Le milieu salifère au sein duquel se trouve le stockage constitue initialement un milieu très favorable au confinement des déchets.

Les formations salifères et apparentées (potasse) possèdent comme propriété remarquable une capacité à fluier très significative. Du fait de sa capacité de fluage, le sel se déforme de manière souple sous des efforts variant lentement, sans qu'apparaissent de fractures et s'il peut se briser d'une manière soudaine sous l'effet d'une sollicitation rapide, il va le plus souvent jusqu'à « cicatriser » spontanément les fractures qui y apparaissent. C'est pourquoi les fractures ouvertes sont très rares dans les masses de sel tant qu'elles ne sont pas perturbées par l'homme (Feuga, 2014).

Ces formations salifères, ne présentant pas de discontinuités permettant les circulations d'eau, sont très imperméables et c'est essentiellement pour cette raison qu'elles sont sélectionnées pour accueillir des déchets.

Le rapport *Géomécanique* confirme ce qui précède. En effet le sel gemme non perturbé est étanche, du fait qu'aucun espace poreux interconnecté n'existe dans la masse rocheuse. Le caractère étanche du sel est prouvé à l'aide de mesures de perméabilité et par les observations qui montrent que les fluides sont restés fixés dans le sel pendant au moins 250 millions d'années.

Cependant, l'exploitation d'un gisement de sel ou de potasse ou la création d'un stockage de déchets détruit l'intégrité de la formation salifère notamment du fait de la nécessité de creuser des puits et des galeries. Par ailleurs les travaux miniers peuvent conduire à une sollicitation de failles existantes et permettre la venue d'eau (lorsque celles-ci sont en relation avec un aquifère).

Ainsi les voies d'accès potentielles de l'eau jusqu'au stockage sont les sondages, les puits et les failles qui auraient été réactivées en liaison avec l'exploitation de la mine et/ou lors de séismes.

Pour recenser ces voies potentielles d'infiltration, il importe en premier lieu d'analyser la zone au sein de laquelle ces voies d'infiltration d'eau pourraient atteindre le stockage.

Ainsi, en premier lieu le rôle éventuel du stot séparant les mines Amélie et Marie-Louise est abordé.

Dans les paragraphes suivants, le rôle des voies potentielles d'infiltration est analysé.

### 2.2. STOT ENTRE LES MINES AMELIE ET MARIE-LOUISE

La zone de stockage de StocaMine est située dans le secteur de la mine Amélie<sup>1</sup> qui est séparé du reste du secteur Ouest (Mine Marie-Louise) par un stot, c'est-à-dire une épaisseur de minerai non exploité (Cf. Figure ci-dessous et figure suivante).

<sup>1</sup> Qui, lors de l'exploitation de la potasse, était connectée avec la surface par les puits Amélie 1 et 2, Max, Joseph et Else

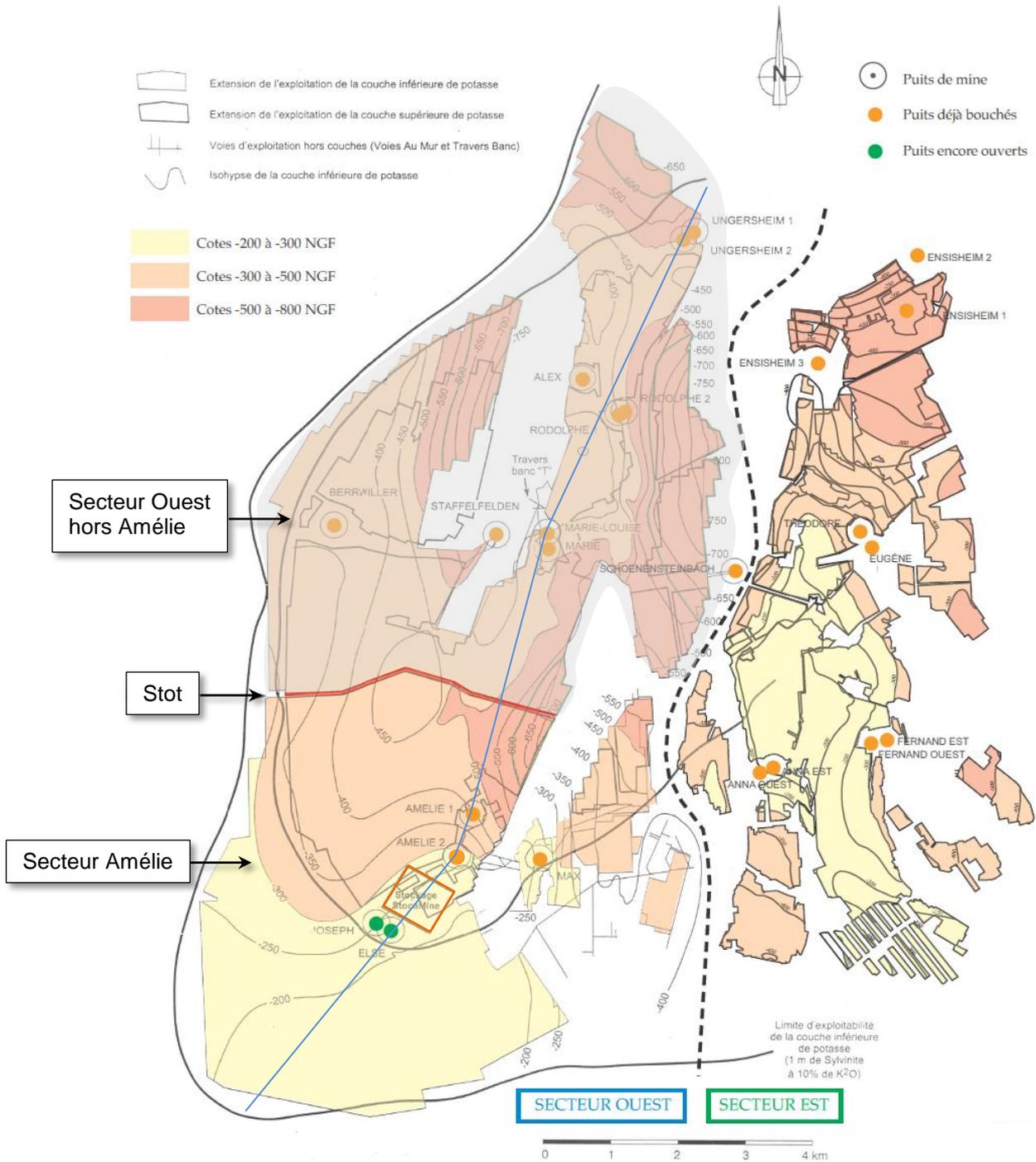
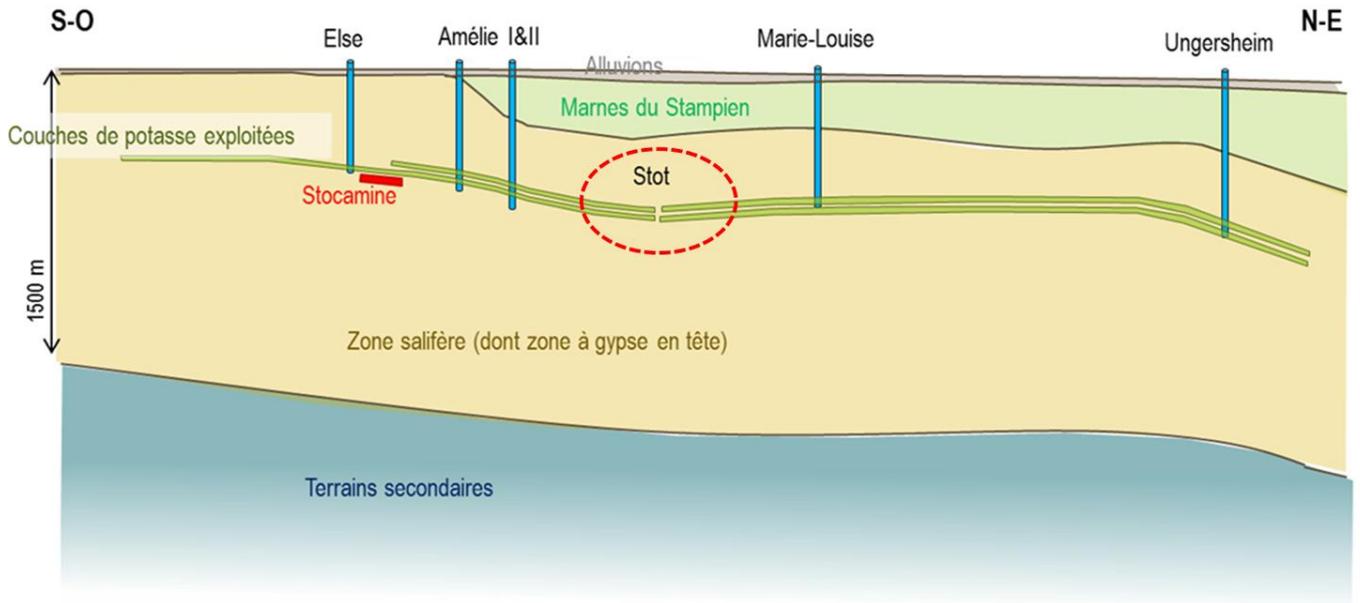


Figure 1. Secteurs Est, Ouest, Amélie et Stot (d'après MDPA, Mémoire 7-4, 2008)

Le tracé de la coupe de la figure suivante correspond au trait bleu représenté sur la figure ci-dessus.

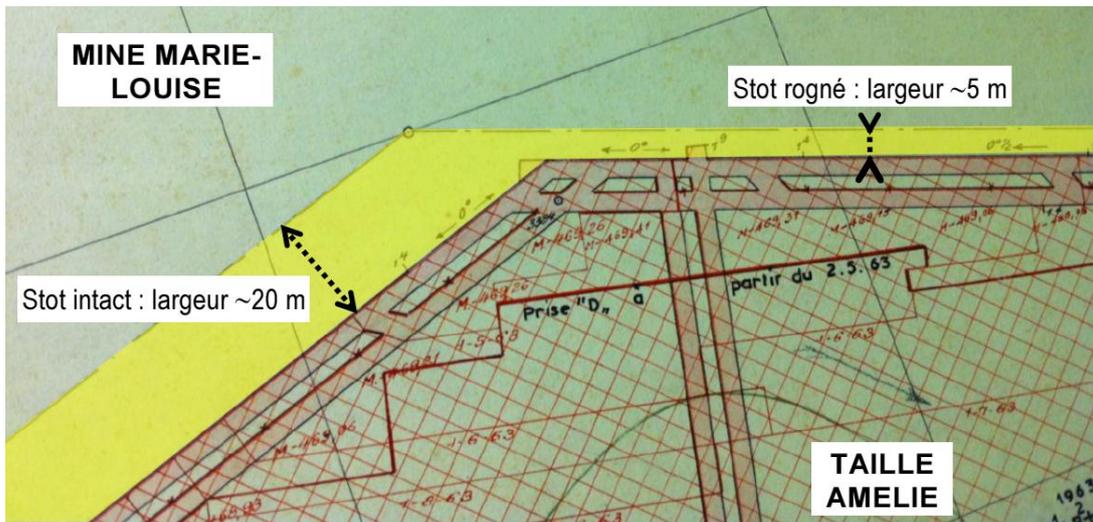


**Figure 2. Coupe SO-NE présentant la position du stockage par rapport aux travaux miniers et au stot (d'après Mica, 2004)**

Selon l'INERIS ([55] | INERIS, 2011), l'isolement hydraulique du secteur de la mine Amélie (dans lequel se situe le stockage de StocaMine) et du reste du secteur Ouest ne peut être garanti du fait de la faible épaisseur du stot par endroit. Par ailleurs l'INERIS a fait une synthèse des différentes analyses effectuées sur le rôle hydraulique du stot. De celle-ci il ressort notamment que :

- ce stot a été percé plusieurs fois par des trous de sondages réalisés pour le bouclage des cheminements topographiques ;
- la position en cul-de-sac du stot au nord de la mine Amélie, i.e. en aval pendage du côté de cette mine (et en amont pendage du côté de la mine Marie-Louise) amène à des analyses relativement différente :
  - o selon Combes & Ledoux (1990) une érosion régressive par de l'eau non saturée qui a tendance à remonter (côté Marie-Louise) pourrait conduire à un percement du stot à très long terme qui ne pourrait en tout état de cause intervenir, qu'après l'ennoyage de la mine Marie-Louise.
  - o par contre, pour MICA (2004), « il est peu probable qu'une quelconque dissolution [de ce stot] intervienne malgré sa situation en amont pendage » car les puits entrants sont trop éloignés du stot pour que l'eau ne soit pas déjà saturée, que ce soit en amont pendage (1 à 4 km) ou en aval pendage (> 2 km) ;
- pour Cesame (2008), l'épaisseur de ce stot (20 à 50 mètres selon les endroits) « apparaît faible au regard de la zone d'influence de l'exploitation (fissuration, décompression des terrains) qui est nette sur une quarantaine de mètres autour de la zone exploitée ». De ce fait, il a sans doute été fissuré « au moins dans la couche supérieure ».

A titre d'illustration, sur la figure ci-dessous (couche inférieure), le stot (coloré en jaune) apparaît à gauche avec sa largeur 'nominale' de 20 m et à droite avec une largeur réduite, son rognage par les travaux miniers de 1963 dans la mine Amélie laissant une largeur résiduelle de l'ordre de 5 m.



**Figure 3. Réduction locale du stot ([55] | INERIS, 2011)**

Enfin, le fait de considérer que le stot ne permet pas la séparation du secteur Amélie avec le reste du secteur Ouest va induire :

- une plus grande dilution de la saumure contaminée qui sortira de la zone de stockage, puisque cette saumure pourrait être diluée avec la saumure - non polluée – des autres mines du secteur ouest (ce qui est un facteur favorable) ;
- un temps d'ennoiement plus faible car l'ennoiement du reste du secteur ouest est plus rapide que pour le secteur Amélie (facteur moins favorable) ;

In fine, indépendamment de la détermination du rôle effectif du stot dans le futur, il n'apparaît pas, au premier abord, qu'une hypothèse soit plus sécuritaire qu'une autre.

Le Dossier de demande considère ainsi une connexion hydraulique entre le secteur Amélie et le secteur Marie-Louise mais retient également le principe d'étudier le cas d'une absence de connexion.

Dans l'approche proposée (dans le Dossier de demande et par la tierce expertise), les deux hypothèses suivantes sont donc considérées :

- Le stot ne permet pas une séparation hydraulique entre le secteur Amélie et le reste du secteur Ouest (l'ensemble du secteur Ouest est alors pris en compte) ;
- Le stot isole hydrauliquement le secteur Amélie du reste du secteur Ouest (seul le secteur Amélie est pris en compte).

### 2.3. FAILLES

Dans le bassin potassique de Mulhouse, le remplissage tertiaire est affecté de plis subméridiens à grands rayons de courbure, parfois interrompus par des failles normales, de même directions que les plis.

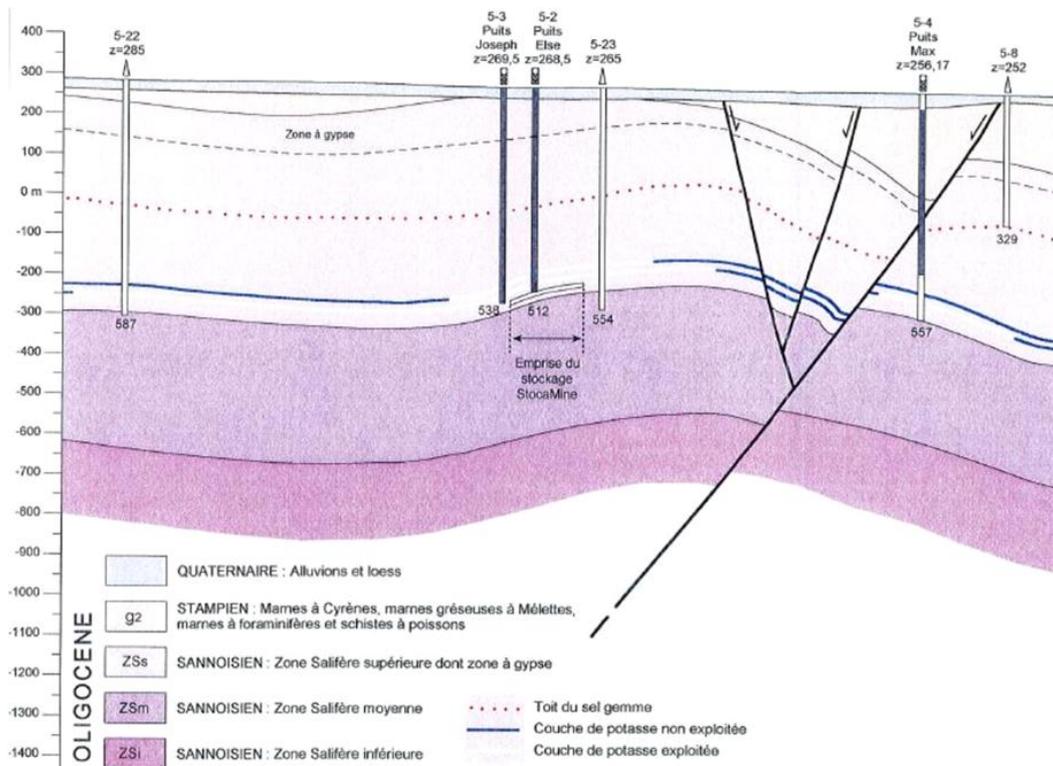
Dans le secteur concerné par le site de stockage (reconnu par les ouvrages Joseph, Else, Amélie I et II), la structure est régulière et se présente sous la forme d'un monoclin à pendage de 6° à 10° vers le NNW. Cette régularité structurale s'interrompt au voisinage du puits Max, c'est-à-dire à 1,5 km de la zone de stockage. Les galeries de communication entre les puits Amélie I, Amélie II et Max ont en effet mis en évidence l'existence d'un accident affectant l'ensemble du bassin

potassique. Le rejet de la faille est de 170 m avec un affaissement du bloc Amélie par rapport au bloc Max.

Cependant au niveau de cette faille, la plus proche du stockage, il a été constaté qu'aucune venue d'eau n'a eu lieu suite aux affaissements miniers ([13], p 64 et figure ci-après).

Par ailleurs, de façon succincte, les études antérieures considèrent qu'aucune faille ne se situe au niveau du bloc hôte.

Actuellement, aucune circulation d'eau pérenne n'a été observée au sein du bloc-hôte au niveau des zones faillées recoupées par des galeries de communication ([28] | Mica Environnement, 2004).



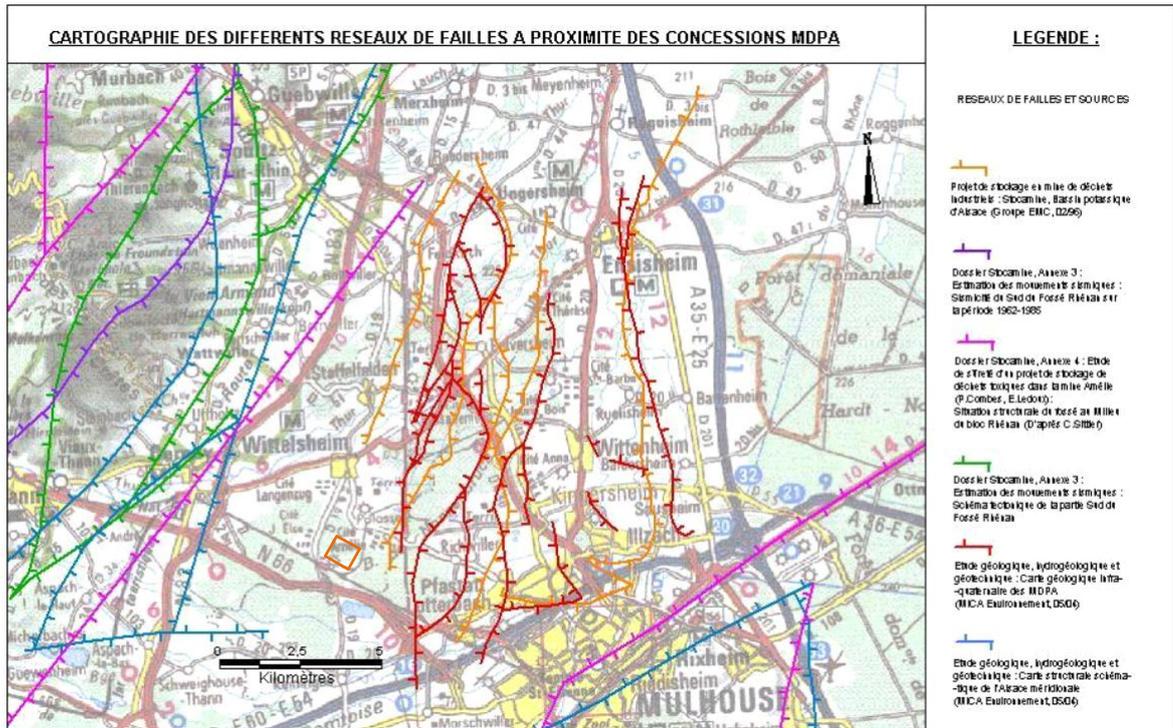
**Figure 4. Extrait de la coupe Est-Ouest du bassin potassique au droit du site de stockage ([28] | Mica Environnement, 2004)**

Le risque qui est donc considéré est, dans le champ lointain par rapport au stockage, la réactivation (future) de failles par un séisme de magnitude 5 à 6 ([55], p73).

L'INERIS a recensé les différents documents décrivant les failles à proximité du stockage. Il apparaît que :

- La localisation des failles (en plan et en profondeur) est variable suivant les documents cités ;
- Un nombre significatif de failles sont situées dans le secteur Ouest (et dans le secteur Amélie).

L'INERIS ([55],76) représente les réseaux de failles affectant le secteur ouest selon différents auteurs (Cf. figure ci-dessous).



**Figure 5. Extrait de la coupe Est-Ouest du bassin potassique au droit du site de stockage ([28] | Mica Environnement, 2004)**

Sur la base d'une étude bibliographique synthétisant<sup>2</sup> les données sur la perméabilité de fractures profondes, et en considérant un certain nombre d'hypothèse sur la géométrie d'une faille (longueur 3 km, distance d'influence 50 m, ...), L'INERIS a estimé le débit de circulation d'eau souterraine à travers une faille réactivée.

Ce débit varierait de 300 à 1000 m<sup>3</sup>/an suivant les hypothèses de perméabilité considérées.

Il peut être noté que le rôle d'une faille réactivée lors d'un séisme significatif n'est évalué qu'en regard<sup>3</sup> du risque de migration possible de saumure potentiellement contaminée, issue de la percolation à travers les déchets stockés (la faille recoupant les vides miniers et jouant un rôle hydrogéologique de drain).

Du fait du contexte géologique et tectonique, la contribution éventuelle à l'ennoiement de failles réactivées par un séisme significatif peut être considérée comme négligeable.

## 2.4. SONDAGES

Les possibilités de circulation d'eau souterraine via les sondages sont particulièrement détaillées par l'INERIS ([55], 23-25) et les principaux éléments exposés ici sont issus de ce document.

L'exploitation de la potasse a nécessité la réalisation de 181 sondages de reconnaissance entre 1904 et 1967 (MDPA, 2008).

<sup>2</sup> réalisée par un expert (F. Cornet)

<sup>3</sup> Le rôle possible d'une faille dans l'ennoiement n'est pas abordé

Tous ces sondages ont été rebouchés, cependant la façon d'effectuer le rebouchage a fortement évoluée à partir de 1913.

La qualité de rebouchage des puits comblés avant 1913 (avant la généralisation du béton) est toutefois probablement médiocre, comme l'atteste la coulée de boue observée au niveau du sondage Cernay II. Ce sondage foré en 1906, a donné lieu près de 80 ans plus tard (en 1984) à une coulée de boue de 20 m<sup>3</sup> lors de son recouplement par l'exploitation de la mine Amélie : sur la base d'un diamètre de foration de 8½ (soit 216 mm) et d'une profondeur de 587 m, ce volume correspond à la vidange intégrale du remplissage de l'ouvrage. Ce sondage a été immédiatement traité par injection de ciment et n'a plus été le siège d'écoulement d'eau, même après le foudroyage du toit de la couche exploitée

Parmi tous les sondages recensés un seul se trouve dans la zone StocaMine, il s'agit du sondage Wittelsheim III (ou WIII).

L'Inéris préconise la mise en œuvre des dispositions suivantes, préalablement à tout stockage illimité :

- entreprendre les investigations nécessaires à une localisation précise du sondage WIII ;
- vérifier ensuite autant que possible si le sondage est rempli d'un matériau solide ou liquide ;
- procéder à son scellement, si le sondage est encore rempli de boue ;
- si la reconnaissance ou le traitement du sondage ne peuvent pas être réalisés pour des raisons techniques ou liées à la sécurité, mettre en place une barrière étanche autour du pilier concerné.

Ce sondage a été traité par injection en 2013 selon le Dossier de demande.

Compte tenu des observations (absence d'écoulement significatif au niveau des sondages), ceux-ci ne devraient pas jouer de rôle significatif pendant la phase d'ennoyage.

Au vu de la façon de reboucher les sondages après 1913 (scellement avec du béton) et aux faibles apports d'eau pour ceux réalisés avant 1913 (ou à la réalisation d'un nouveau rebouchage dans le cas de défaut du rebouchage initial) il peut être considéré qu'il n'y a pas d'apport d'eau significatif via les anciens sondages.

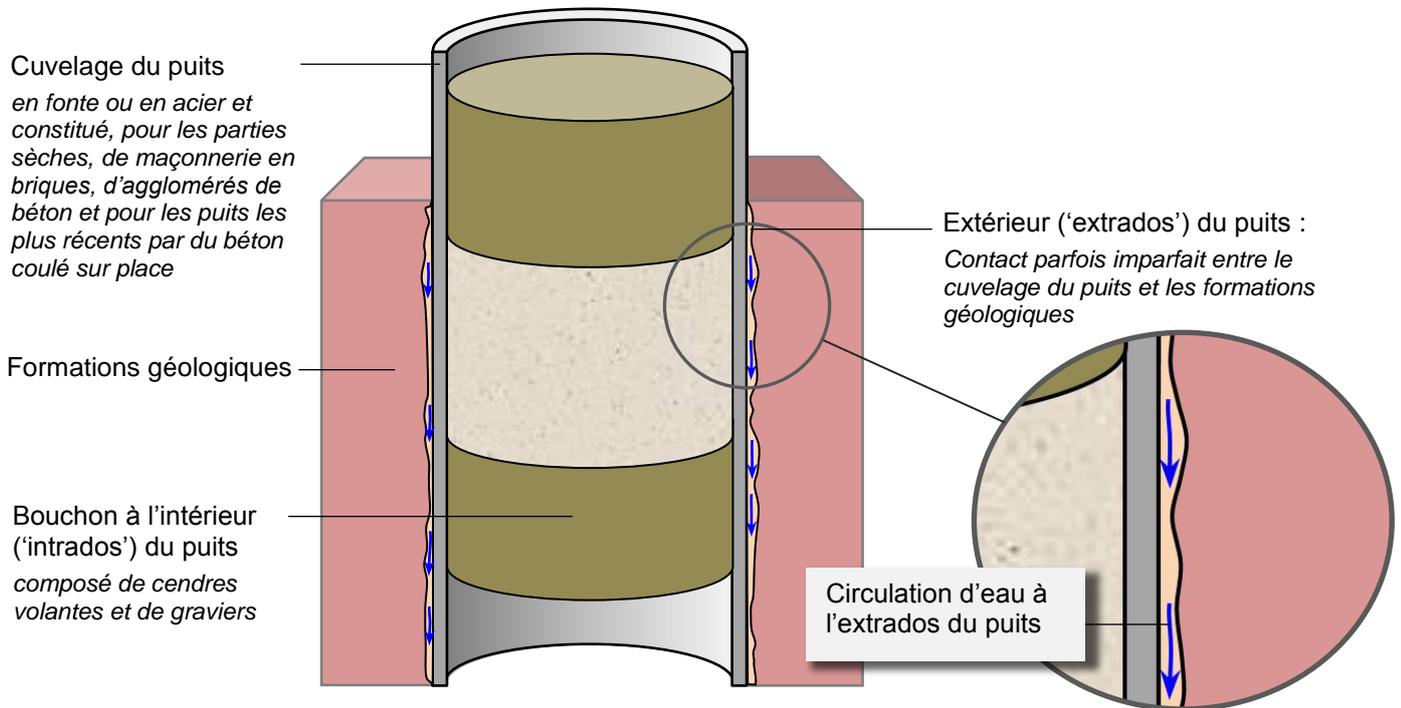
## 2.5. PUIITS

Le secteur ouest comporte 15 puits dont 13 sont rebouchés (seuls les puits Joseph et Else ne sont pas rebouchés).

Le rapport Mica ([28], 2004) décrit les différentes techniques de rebouchage qui ont été mises en œuvre avec notamment le recours aux cendres volantes suite aux difficultés rencontrées lors du rebouchage du puits Alex.

L'efficacité de la nouvelle approche de rebouchage des puits a pu être constatée notamment par les observations effectuées à la base des puits rebouchés (Fernand Est et Anna Est).

L'infiltration au niveau des puits est considérée comme négligeable à travers le bouchon et comme s'effectuant principalement au niveau de l'extrados des puits. La figure suivante schématise ce type d'écoulement qui a lieu lorsque le contact entre le cuvelage du puits et les formations géologiques n'est pas étanche.



**Figure 6. Représentation schématique de circulation d'eau à l'extrados d'un puits**

Le Dossier de demande considère que l'envoyage de la mine se fera principalement par les puits via l'extrados de ceux-ci. La tierce expertise est en accord avec cette analyse.

Il peut être noté également que le Dossier de demande n'étudie pas l'hypothèse d'un envoyage brutal.

## 2.6. DEBITS D'INFILTRATION

Les différentes estimations des débits d'infiltrations via les puits récapitulées dans le document INERIS [55] (§4.1.3, p34-37) reposent sur :

- Des calculs basés notamment sur des estimations de la perméabilité de l'ensemble 'bouchon + extrados'<sup>4</sup> ;
- Des observations (sur une période limitée et sur un nombre restreint de puits) des débits d'infiltration à la base de puits remblayés ;
- Des observations des débits d'exhaure lors de l'exploitation de la mine.

Le tableau suivant recense certaines de ces estimations.

<sup>4</sup> L'INERIS a réalisé un suivi du remblayage des puits Marie et Louise. Les niveaux d'eau dans le puits en cours de remblayage et dans un piézomètre implanté à proximité dans la nappe alluviale ont été suivis pendant plusieurs jours ([50] | INERIS, 2010). Les calculs effectués sont basés sur l'hypothèse que « la descente de l'eau dans le puits est contrôlée par les infiltrations dans le bouchon de cendres et par celles provenant du cuvelage vers la nappe ». L'INERIS obtient une valeur de perméabilité de  $5.8 \cdot 10^{-7}$  m/s qui intègre les infiltrations au travers du bouchon et, pour partie, à l'extrados du cuvelage.

**Tableau 1. Différentes estimations des débits d'infiltration (dont Dossier de demande en vert et tierce expertise en bleu)**

Type d'évaluation	Calcul hydraulique (Darcy)	Observation à la base des puits remblayés	Débits d'exhaure mesurés	Maximun des débits mesurés et des débits estimés	
Référence	Mica 2004 ([28])	Inéris ([50])	Lourdél - note du 12 juillet 2005	Inéris ([55])	
<b>Secteur Amélie</b>					
Amélie 1	552	1 533	2 000 - 3 000	1 466	
Amélie 2	516	1 168		2 920	
Max	492	292	jusqu'à 3 500	3 650	
Joseph	456		47-480	871	
Else	384			871	
<b>sous-total</b>	<b>2 400</b>			<b>6 980</b>	<b>9 778</b>
<b>Reste du secteur ouest</b>					
Alex	410.4		10 000 (37 000 avec venue d'eau d'Alex entre 1964-1967)	27 000	
Rodolphe 1	1 732.8			4 827	
Rodolphe 2	2 768.4			7 727	
Ungersheim 1	2 290.8			1500-5000	6 411
Ungersheim 2	2 936.4				8 173
Berrwiller	2 631.6			3 000-7 000	7 298
Staffelfelden	1 368.0			20 000	20 000
Marie	1 250.4			1 400 - 12 000	3 508
Marie-Louise	1 336.8				9 125
Schoenensteinbach	2 257.2				11 000
<b>Sous-total</b>	<b>18 983</b>	<b>65 000</b>	<b>105 069</b>		
<b>TOTAL</b>	<b>21 383</b>		<b>71 980</b>	<b>114 847</b>	

Note : du fait d'une erreur de sommation ([55], tableau 4, p37) L'INERIS retient la valeur de 104 847 m<sup>3</sup>/an, arrondie à 105 000 m<sup>3</sup>/an au lieu de 114 847 m<sup>3</sup>/an.

Les remarques suivantes peuvent être faites sur les différentes méthodes d'évaluation des débits.

Estimations basées sur un calcul hydraulique

Il existe différentes estimations qui reposent toutes sur :

- un calcul d'écoulement (Darcy),
- des configurations de remblaiement des puits,
- des hypothèses de charge hydraulique,
- une hypothèse de perméabilité de l'ensemble bouchon + extrados issue de l'estimation de l'INERIS effectuée d'après ses observations sur l'évolution mesurée des niveaux d'eau lors du remblaiement des puits Marie et Marie-Louise.

Ces différentes estimations (dont Césame 2006) donnent des résultats similaires (autours de 22 000 m<sup>3</sup>/an pour l'ensemble du secteur ouest).

Il peut être noté que l'estimation de la perméabilité du bouchon + extradados est extrapolée à l'ensemble des puits. Or s'il est possible que la perméabilité des cendres varie peu, cela est probablement moins vrai pour le comportement hydraulique de l'extrados des puits qui dépend du contexte spécifique de chaque puits.

Par ailleurs, les calculs effectués aboutissent à des valeurs de débits plus faibles que les débits effectivement mesurés à la base des puits Amélie 1 et 2.

Pour essayer de 'caler' aux observations, l'INERIS ([55], p35) a considéré que les écoulements se faisaient essentiellement à l'extrados et à ajuster une transmissivité de façon à reproduire les débits observés. In fine les débits simulés correspondent aux débits observés pour les puits Amélie 1 et 2 mais ne correspondent pas pour le puits Max. Il peut donc être déduit que la transmissivité à l'extrados des puits dépend fortement du contexte local, et qu'il est hasardeux d'extrapoler les valeurs ajustées pour les puits Amélie 1 et 2 à l'ensemble des puits<sup>5</sup>. En suivant cette approche, l'INERIS aboutit à un débit global de 58 000 m<sup>3</sup>/an (hypothèse moyenne de l'INERIS [55]).

#### Estimations basées sur les débits d'exhaure

Les débits d'exhaure correspondent aux débits d'infiltration et au réseau d'alimentation de la mine. Par ailleurs les puits utilisés en retour d'air contribuent à évacuer l'humidité de la mine. Il est ainsi considéré que les débits d'exhaure constituent un ordre de grandeur a priori réaliste des débits d'infiltration via les puits pendant l'exploitation.

Les valeurs des débits d'exhaure sont présentées de façon diverse selon les références utilisées. Dans le tableau précédent certains puits présentent une gamme de valeurs. Certaines valeurs extrêmes (puits Alex par exemple) correspondent à de fortes venues d'eau qui ont été colmatées par la suite. Dans ce cas, lorsque cela est documenté, c'est la valeur hors épisode ponctuel de fortes venues d'eau qui a été retenue.

Dans le cadre de la présente étude, les estimations basées sur un calcul hydraulique et sur un paramètre de perméabilité de bouchon ne sont pas assez argumentées pour l'ensemble des puits pour être retenues.

L'Ineris retient comme hypothèse de débit d'infiltration le maximum des estimations qu'il a recensées (estimations basées sur des observations et sur des calculs hydrauliques), soit environ 105 000 m<sup>3</sup>/an.

Nous considérons que les estimations basées sur un calcul hydraulique et sur un paramètre de perméabilité de bouchon ne sont pas assez argumentées pour l'ensemble des puits pour être retenues. Par ailleurs, il n'apparaît pas pertinent de prendre en compte certaines valeurs extrêmes observées (puits Alex par exemple) correspondant historiquement à de fortes venues d'eau qui ont été colmatées par la suite.

Selon la tierce expertise, une approche cohérente et sécuritaire consiste à retenir les débits d'exhaure<sup>6</sup> mesurés<sup>7</sup>, hors épisode historique ponctuel de fortes venues d'eau, soit un débit total pour l'ensemble du secteur ouest d'environ 72 000 m<sup>3</sup>/an.

<sup>5</sup> Cette extrapolation ne permet pas de reproduire les débits observés à la base du puits Max remblayé (elle surestime les débits). Il n'est pas dit que cette approche ne sous-estime pas des débits pour d'autres puits.

<sup>6</sup> Ceux-ci correspondent aux débits d'infiltration et au réseau d'alimentation de la mine.

<sup>7</sup> Référence retenue : Note Lourdel du 12 juillet 2005

Ainsi, les débits qui seront pris en compte pour l'étude de la dynamique de l'ennoisement sont ceux correspondant aux débits d'exhaure référencés par Lourdel. Il peut être noté que ces débits, bien qu'inférieurs à ceux pris en compte par l'INERIS, sont cependant surestimés par rapport aux débits s'infiltrant dans les puits lorsque ceux-ci sont remblayés.

Il importe également de déterminer à quelle date ces débits s'infiltrent dans la mine, c'est-à-dire à quel moment les puits ont été remblayés.

Les dates indiquées par Y. Lourdel (note du 12 juillet 2005) ont été retenues.

**Tableau 2. Date de remblaiement des puits du secteur Ouest (Lourdel, 2005)**

<i>Zone ouest :</i>	<i>de :</i>	<i>à :</i>
Alex	1960	04-84
Rodolphe 1	05-84	05-85
Rodolphe 2	08-84	07-85
Ungersheim 2	01-98	04-99
Ungersheim 1	02-98	04-99
Schoenensteinbach	08-98	07-99
Marie	01-99	12-99
Louise	01-99	12-99
Staffelfelden	01-02	10-02
Berrwiller	02-02	09-02
Max	02-04	10-04
Amélie 1		
Amélie 2		
Joseph		
Else		

Ces dates diffèrent parfois de celles indiquées par l'INERIS ([55]), mais après vérification auprès des MDPAs, ce sont bien celles-ci qu'il convient de retenir. En complément, les années de remblayage pour Amélie 1 et Amélie 2 sont respectivement 2006 et 2008.

Par la suite, pour estimer la dynamique d'ennoisement, nous avons fait l'hypothèse d'un remblaiement des puits Joseph et Else en 2020.



### 3. ENNOYAGE ET ARRIVEE DE LA SAUMURE SAINES AU NIVEAU DU STOCKAGE

#### 3.1. INTRODUCTION

Dans un premier temps les différents phénomènes déterminant la dynamique de l'ennoyement sont décrits.

Ensuite les valeurs des paramètres permettant une estimation quantitative de chacun des phénomènes sont estimées ;

Enfin les estimations du temps d'arrivée de la saumure au niveau du stockage et du temps d'ennoyement total de la mine sont évaluées.

Les principales études consultées et abordant de façon significative la problématique de l'ennoyement sont les suivantes :

- Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la Mine Amélie. Approche des problèmes liés à l'hydrogéologie, ENSMP ([4]) ;
- Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique du centre de stockage de StocaMine, Mica, 2004 ([28]) ;
- Note sur l'ennoyement des mines, Y. Lourdel, 12 juillet 2015 ;
- Synthèse sur l'ennoyement de la mine de potasse Secteur Ouest, Césame 2006 ([37]) ;
- L'ennoyement des mines de potasse. Dossier commun aux secteurs Est et Ouest, Césame, 2008 ([39]) ;
- Avis de Geoderis sur le rapport Césame 2008, 26 mai 2008
- Synthèse critique des études hydrogéologiques sur l'ennoyement du site, INERIS, 2010 ([50]) ;
- Etude hydrogéologique de l'ennoyement du site, INERIS, 2011 ([55]).

Les données des tonnages extraits (en fonction de la profondeur et du temps) ainsi que les surfaces exploitées (par couche – CI et CS – et en fonction de la profondeur et du temps) ont été recueillies auprès des MDPAs.

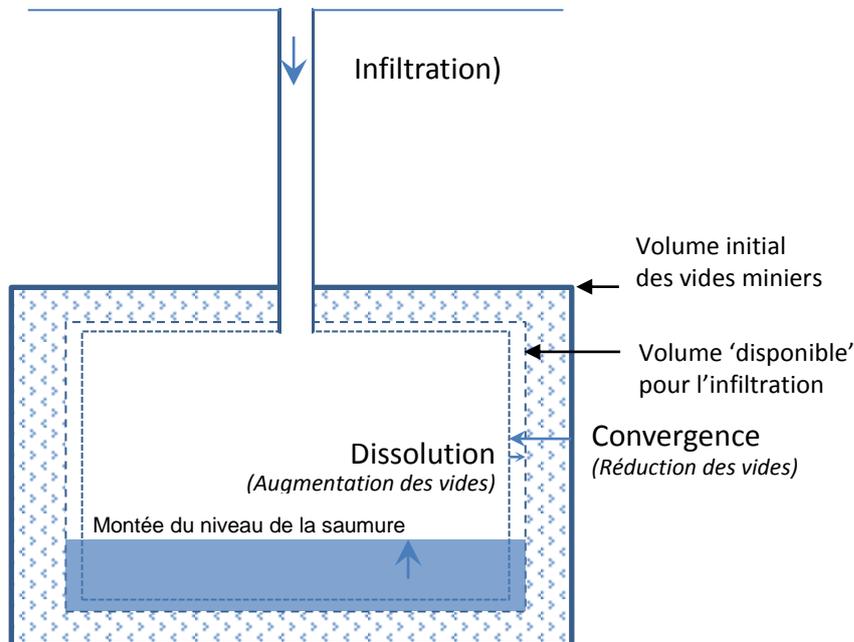
Il est à noter que l'évaluation de la dynamique de l'ennoyement repose sur de nombreuses études de géomécaniques visant à estimer la convergence des différents vides miniers (ces études ne sont pas citées ici, elles sont cependant référencées dans les études citées ci-dessus).

#### 3.2. LES PHENOMENES DETERMINANT LA DYNAMIQUE DE L'ENNOIEMENT

Plusieurs phénomènes influent sur la dynamique de la montée du niveau de la saumure dans la mine.

Le niveau atteint par la saumure va dépendre à la fois des débits d'infiltration mais également des volumes des vides disponibles. Ces vides 'miniers' évoluent sous l'influence de plusieurs phénomènes en relation notamment avec les caractéristiques géomécaniques des formations salifères.

De façon succincte, les phénomènes responsables de la dynamique de la montée du niveau de la saumure sont présentés dans le modèle conceptuel à la figure suivante et décrits succinctement ensuite.



**Figure 7. Représentation schématique des phénomènes liés à l'ennoyage de la mine**

*Note : dans la figure précédente, tous les phénomènes et paramètres indiqués dépendent de la profondeur et du temps<sup>8</sup>*

*La vitesse d'ennoyage (ou de montée du niveau de la saumure dans les excavations minières) dépend :*

- des voies d'accès à la mine et les débits d'infiltrations associés,
- des volumes disponibles (pour l'ennoiement).

*Les volumes disponibles dépendent eux-mêmes :*

- des volumes initiaux résultant de l'excavation des tailles, des galeries et des puits,
- des phénomènes de dissolution (création de vides par dissolution du sel lors de l'arrivée de la saumure),
- des phénomènes de réduction des vides (convergence au sens large, i.e. foudroyage, tassement résiduel et fluage).

*Les phénomènes de réduction des vides dépendent :*

- du tassement initial des tailles foudroyées,
- de la profondeur (la convergence augmente avec la profondeur),
- de la présence d'humidité (la convergence augmente avec la présence d'humidité),
- de la saturation des vides par un fluide (qui va ralentir la convergence).

<sup>8</sup> La dissolution dépend également de la profondeur et du temps, puisque les formations ne pourront se dissoudre qu'en présence d'eau non saturée en sel, présence dépendant de la profondeur et du temps

Les effets potentiels dus à la compressibilité de l'eau et de l'air sont négligés ici. L'INERIS ([55] | INERIS, 2011) a réalisé des calculs pour estimer les impacts associés. Ceux-ci sont estimés comme étant faibles et allant dans le sens d'un ennoisement plus tardif (retard d'ennoiement de quelques années).

Malgré le fait que l'impact de l'humidité sur la convergence n'ait pas été prise en compte dans le Dossier de demande, les phénomènes considérés pour évaluer la vitesse d'ennoiement sont globalement correctement identifiés et décrits dans le Dossier de demande.

La progression de l'ennoiement de la mine est schématisée dans les figures qui suivent.

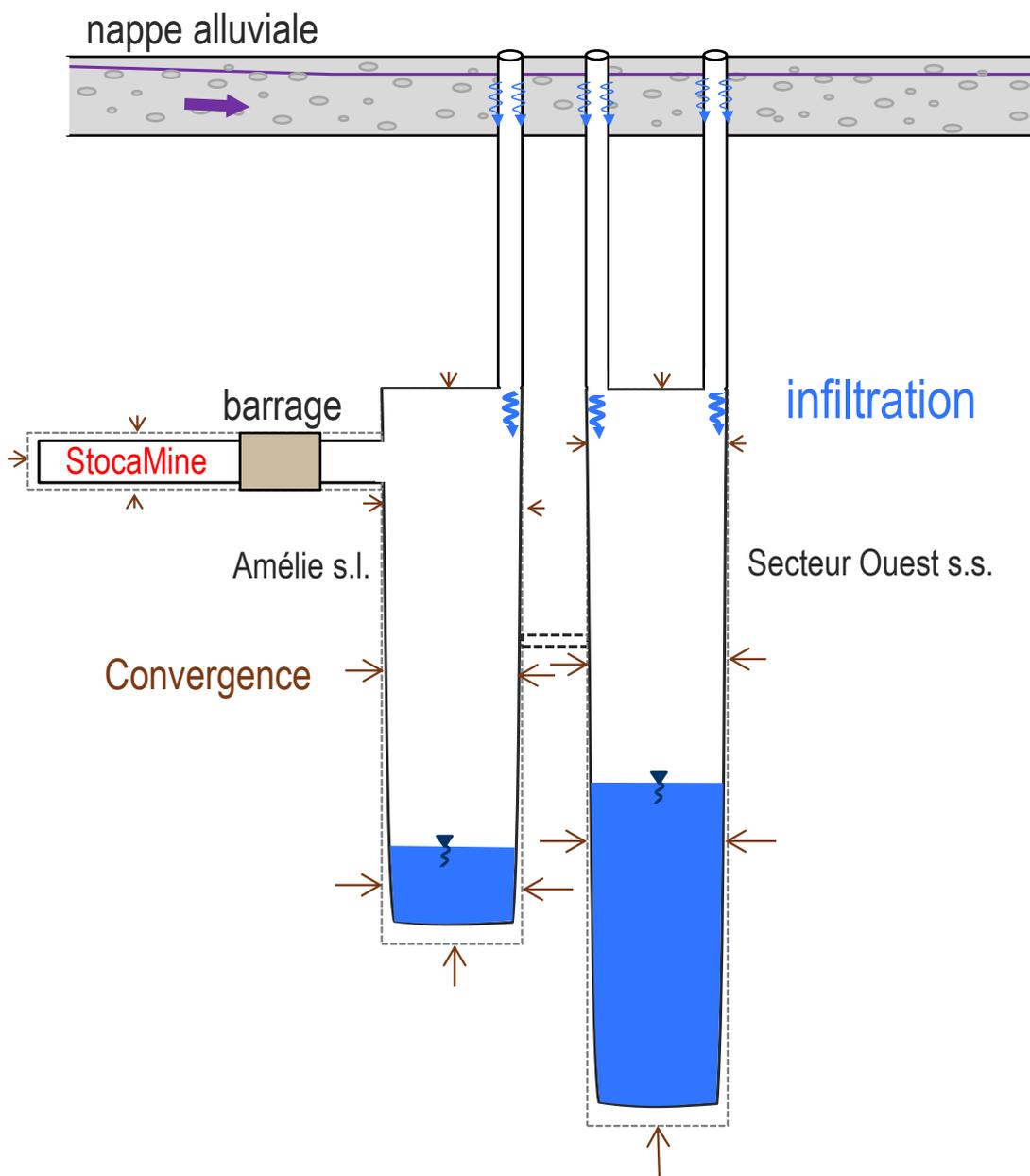


Figure 8. Ennoiement de la mine (infiltration et réduction des vides miniers)

A la figure précédente le niveau de la saumure augment plus rapidement dans la mine Marie-Louise du fait d'une densité de puits supérieure.

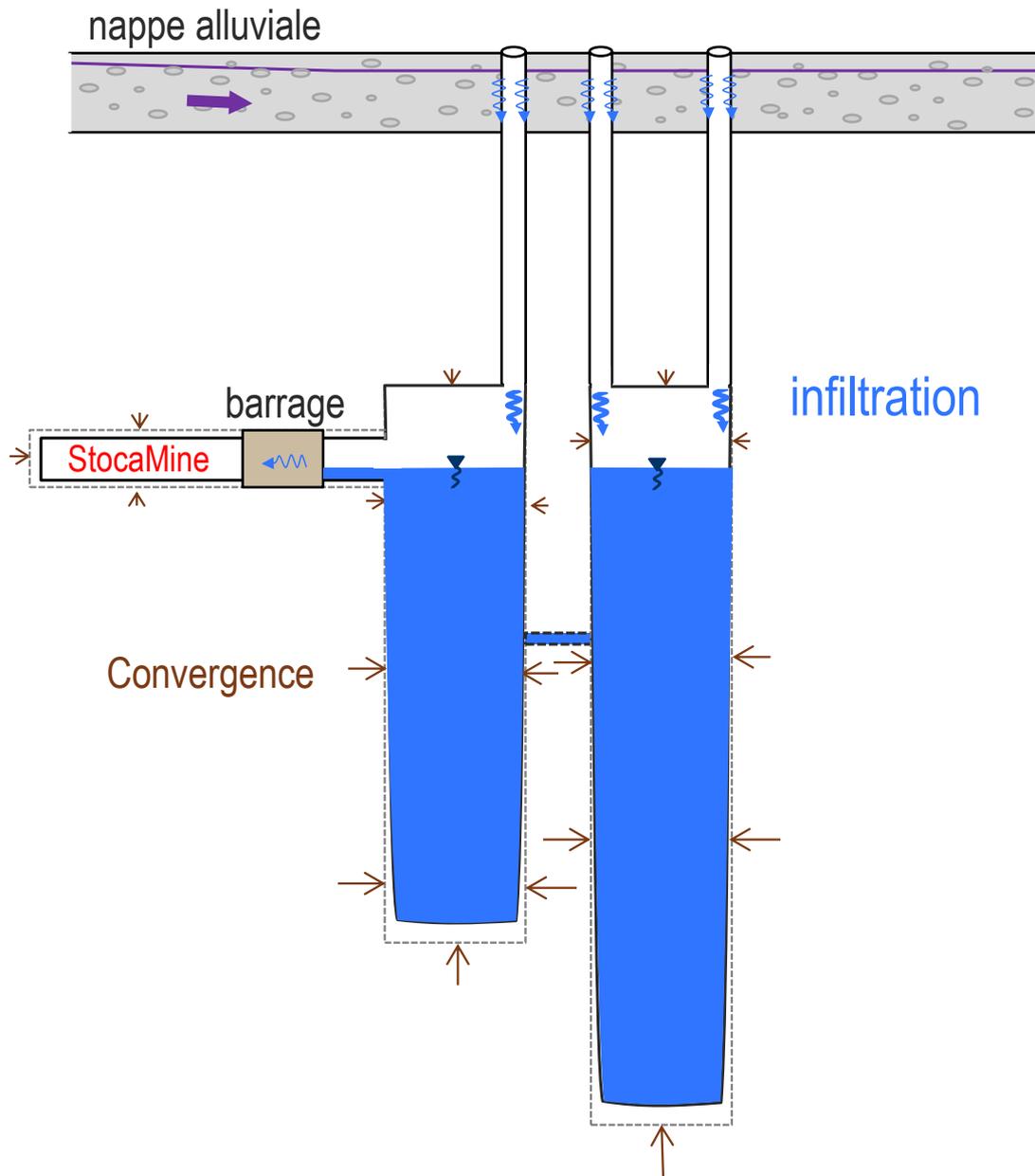
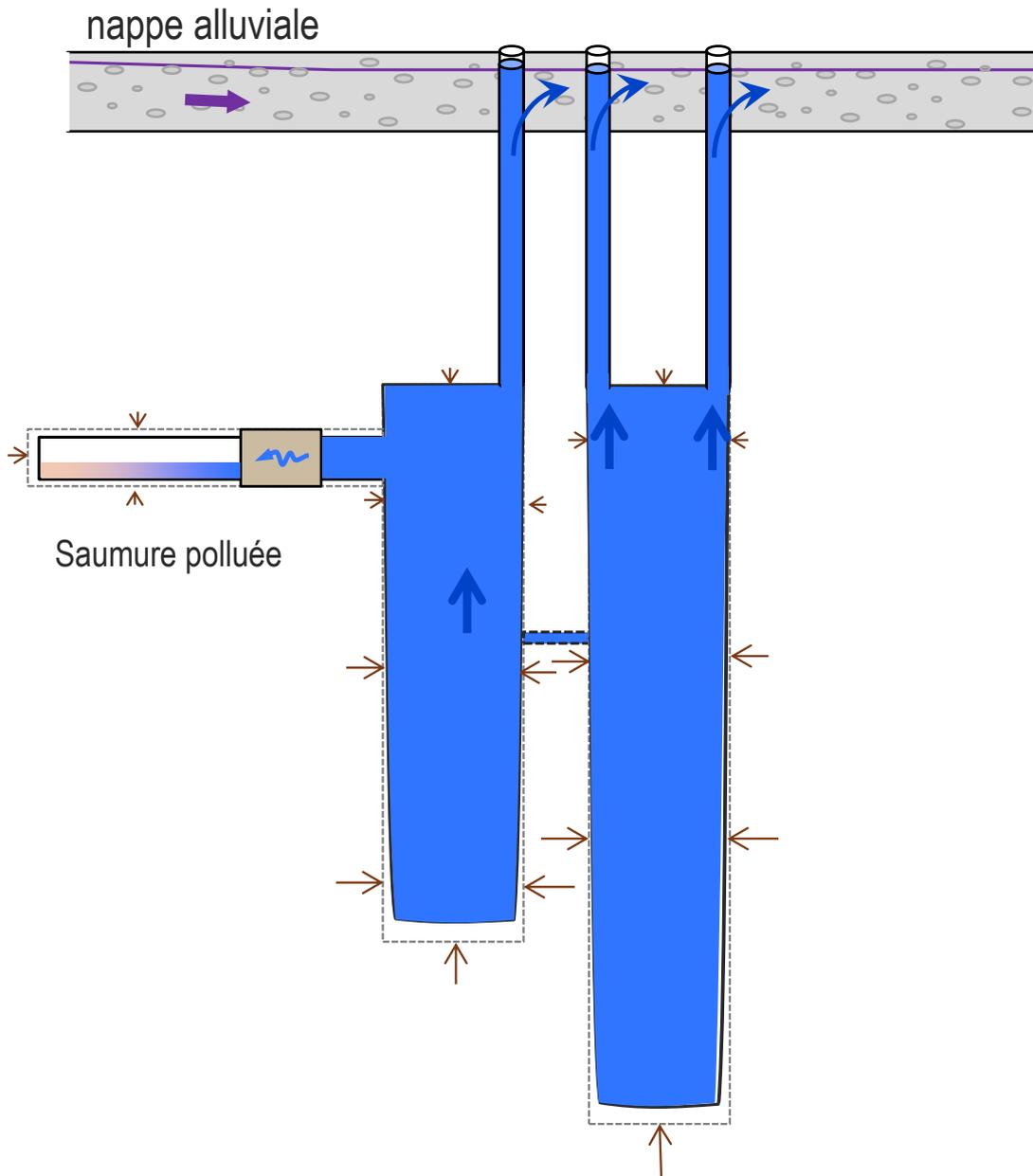


Figure 9. Ennoyage de la mine – la saumure arrive au niveau de la zone de stockage

Sur la figure ci-dessus, le niveau de saumure dans la mine Marie-Louise s'équilibre avec celui de la mine Amélie via le stot (qui ici est supposé ne pas séparer hydrauliquement les deux mines).

La saumure va commencer à entrer dans le stockage via les barrages mais avec des débits très faibles du fait notamment d'une différence de charge hydraulique (entre l'intérieur et l'extérieur du stockage) faible.



**Figure 10. Ennoyage total de la mine**

La mine est totalement ennoyée. Le débit d'entrée de la saumure dans le stockage via les barrages est maximal – mais cependant faible - du fait d'une différence de charge hydraulique (entre l'intérieur et l'extérieur du stockage) maximale.

A partir de ce moment, la convergence résiduelle des vides miniers va induire l'expulsion de la saumure de la mine via les puits (effet 'seringue').

### 3.3. EVALUATION DES VALEURS DES PARAMETRES ASSOCIES AUX PHENOMENES D'ENNOIEMENT

#### 3.3.1. Estimation des débits d'infiltration

Les différentes évaluations des débits d'infiltrations et celle retenue par la tierce expertise ont été présentées et discutées au paragraphe 2.6.

#### 3.3.2. Estimation des vides initiaux

Le calcul des vides créés par l'exploitation minière peut être réalisé de deux façons :

- soit, à partir des surfaces et de la hauteur moyenne des couches exploitées (Combes et Ledoux, 1990, référence manquante, cité dans ([50] | INERIS, 2010) p. 55) ; les volumes des voies et galeries sont alors négligés ;
- soit, à partir du tonnage extrait et de la masse volumique du minerai ([28] | Mica Environnement, 2004), ([55] | INERIS, 2011).

Dans le premier cas, les estimations concernant les volumes excavés ainsi que les surfaces et hauteurs moyennes exploitées sont<sup>9</sup> :

- pour le secteur Ouest, un volume total de  $298.10^6 \text{ m}^3$  (Combes et Ledoux, 1990, référence manquante, cité dans ([50] | INERIS, 2010) p. 55) ;
- pour la mine Amélie (Combes et Ledoux, 1990, référence manquante, cité dans ([50] | INERIS, 2010) p. 55) :
  - en couche supérieure, une superficie de  $9\,880\,000 \text{ m}^2$  et une hauteur de 1,5 m,
  - en couche inférieure, une superficie de  $24\,040\,000 \text{ m}^2$  et une hauteur de 4 m.

Pour ce qui concerne l'estimation des vides initiaux à partir du tonnage extrait, les estimations de tonnage sont les suivantes :

- $423.10^6 \text{ T}$  pour le secteur Ouest ((MDPA, 2008a), p. 5 et ([55] | INERIS, 2011) p. 38)
- $190.10^6 \text{ T}$  pour la mine Amélie ((MDPA, 2008a), p. 5 et ([55] | INERIS, 2011) p. 38)

Les hypothèses concernant la masse volumique du minerai sont les suivantes :

- $\rho = 2,1 \text{ T/m}^3$  ([28] | Mica Environnement, 2004) p. 34 ; ce choix n'est pas justifié.
- $\rho = 2,2 \text{ T/m}^3$  ([50] | INERIS, 2010) p. 56, en considérant une masse volumique du sel pur de  $2,16 \text{ T/m}^3$  et la présence de quelques impuretés.
- $\rho = 2,1 \text{ T/m}^3$  ([55] | INERIS, 2011) p. 38, en considérant la densité de la sylvinite, et que l'essentiel des travaux miniers s'est développé dans cette formation.

Le tableau suivant synthétise les différentes hypothèses et les résultats associés.

<sup>9</sup> Dans les estimations basées sur les surfaces exploitées le volume des galeries est négligé. De fait ce volume est relativement faible les tailles foudroyées représentent (95,5% du volume total et en voies et galeries 4,5% du volume total ([55] | INERIS, 2011).

**Tableau 3. Synthèse des estimations des vides initiaux**

		Mine Amélie	Secteur Ouest
Calcul à partir de l'estimation des surfaces et hauteurs moyennes		110.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	298.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Calcul à partir de l'estimation du tonnage et de la masse volumique	ρ = 2,1	90.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	201.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
	ρ = 2,2	86.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	192.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>

Selon le tableau précédent les estimations diffèrent nettement suivant la méthode d'évaluation utilisée.

Le Dossier de demande retient les hypothèses et l'évaluation de l'INERIS basées sur un calcul effectué à partir du tonnage extrait et de la masse volumique du minerai ([28] | Mica Environnement, 2004), ([55] | INERIS, 2011).

Le volume considéré est d'environ 200 000 000 m<sup>3</sup> pour l'ensemble du secteur Ouest et d'environ 90 000 000 m<sup>3</sup> pour le secteur Amélie.

La méthode utilisée par l'INERIS pour estimer les volumes des vides créés par l'exploitation minière est pertinente et utilise les données les mieux renseignées. Il est en effet considéré que les informations relatives au tonnage extrait sont plus fiables que celles relatives à la hauteur des couches exploitées.

Le volume total des vides initiaux est ainsi de 200 Mm<sup>3</sup> pour le secteur ouest.

### 3.3.3. Estimation des phénomènes de dissolution

Le Dossier de demande considère que les infiltrations correspondent à de l'eau douce et donc que le potentiel de dissolution est maximal. Il est par ailleurs considéré que la dissolution du sel du fait de l'eau d'ennoyage est répartie de manière homogène dans les tailles ennoyées.

Le phénomène de dissolution se traduit alors par la création de vides souterrains qui est estimée à 24% du volume d'eau introduit ([55] | INERIS, 2011).

Il peut être noté que B. Feuga ([49], 2010) retient une valeur de 18%.

L'INERIS estime la dissolution à 24% des volumes d'eau introduit.

D'autres références donnent des valeurs proches.

La valeur de l'INERIS peut donc être retenue d'autant plus que l'effet de la dissolution reste minime (Cf. calcul de la tierce expertise relatif à l'évaluation de la vitesse d'ennoyage).

### 3.3.4. Estimation des phénomènes de réduction des vides

Au sein de la mine, les vides créés (tailles foudroyées et galeries) vont se réduire par :

- compaction initiale puis par convergence résiduelle (tailles foudroyée) ;
- convergence (galeries).

L'estimation quantitative de ces différents phénomènes est abordée dans les paragraphes suivants.

### 3.3.4.1. COMPACTION INITIALE DES TAILLES FOUDROYES

La compaction initiale des vides miniers foudroyés est la compaction que subissent les terrains dans les premières années qui suivent l'extraction du minerai dans les tailles.

La valeur relative de cette compaction initiale par rapport aux vides créés lors de l'exploitation fait l'objet de plusieurs hypothèses qui sont présentées ci-après.

**Tableau 4. Différentes hypothèses de compaction initiale des tailles foudroyées**

Compaction initiale des vides créés par l'exploitation	Référence	Commentaire
≈ 65 - 75%	(BRGM, 2007) citée dans (MDPA, 2008) p. 71 et ([53]   INERIS, 2010) p. 58	La compaction globale est évaluée en cartographiant les affaissements en surface. Ceux-ci sont obtenus en soustrayant la topographie de 1885 à celle de 2006 <sup>10</sup> . Les résultats obtenus vont de 65% à 75% <sup>11</sup> . Il est à noter cependant que l'incertitude de la cartographie est estimée à 0,5 m d'après le BRGM.
80%	([55]   INERIS, 2011) p. 45	Cette valeur correspond à une hypothèse 'plausible' selon l'Ineris qui la retiendra dans la suite de son évaluation de l'évolution des vides miniers.
90%	([37]   Cesame, 2006) p.10, ([28]   Mica Environnement, 2004) p.156	Il est indiqué que cette valeur est choisie sur la base de l'observation des affaissements. Cependant aucune donnée d'observation n'est présentée.
95%	(MDPA, 2008) p. 14	Cette valeur est basée sur un 'profil type d'affaissement' théorique et dont les valeurs ne sont pas argumentées.

L'hypothèse d'une compaction initiale de 80% est retenue comme hypothèse de référence par l'INERIS.

A part les valeurs de compaction initiale basées sur les calculs effectués par soustraction de la topographie de 1886 et celle de 2006 (65-75%), aucune valeur n'est argumentée dans les documents consultés.

La valeur retenue par l'INERIS (80%) est présentée comme une hypothèse plausible mais n'est pas argumentée par des observations locales<sup>12</sup>.

<sup>10</sup> Il s'agit donc ici de la compaction initiale suivie d'une convergence résiduelle jusqu'à la date de 2006

<sup>11</sup> Réalisé par INERIS ([53] | INERIS, 2010) et repris par ARTELIA

<sup>12</sup> Le Dossier de demande mentionne des volumes résiduels estimés entre 10 à 30% des vides initiaux (Annexe 4, §2.4.2.2)

## 3.3.4.2. CONVERGENCE RESIDUELLE DES TAILLES FOUDROYEES

Pour estimer la convergence résiduelle des tailles foudroyées, l'INERIS se base sur des chroniques d'observation d'affaissement en surface<sup>13</sup> (qui correspondent à une convergence des vides en profondeur) ([53] | Ineris, 2010 §7.6.1, p51).

Les exemples donnés dans le corps du rapport ([53] | Ineris, 2010) montrent une courbe en S qui met en évidence un affaissement rapide suivi d'une évolution lente dans la phase d'affaissement résiduel.

L'INERIS indique que « L'affaissement résiduel est quasi-linéaire pour l'ensemble des courbes. Sa vitesse est voisine de 1 cm par an, quelle que soit la courbe. ».

L'INERIS en déduit une « vitesse relative de 0.1 à 0.2% par an », en se basant, d'une part, sur des hauteurs de vides initiaux entre 4 et 5.5 m (dépendant de l'exploitation, respectivement, que de la couche inférieure ou des deux couches) et, d'autre part, sur la vitesse d'affaissement résiduel estimée à 0.7 – 1 cm/an.

Pour illustrer l'approche retenue, l'INERIS divise l'affaissement actuel (e.g. 1 cm) par la hauteur *initiale* des vides (e.g. 5.5 m) ce qui donne une valeur de  $0.01/5.5 = 0.18\%$ .

Ce raisonnement est erroné puisqu'en réalité la vitesse de convergence *résiduelle* doit faire référence au volume restant lors de la mesure de l'affaissement résiduel, c'est-à-dire au volume existant *après* la phase de compaction initiale due au foudroyage des terrains. Ceci est illustré ci-dessous en reprenant un des exemples cités dans le rapport INERIS.

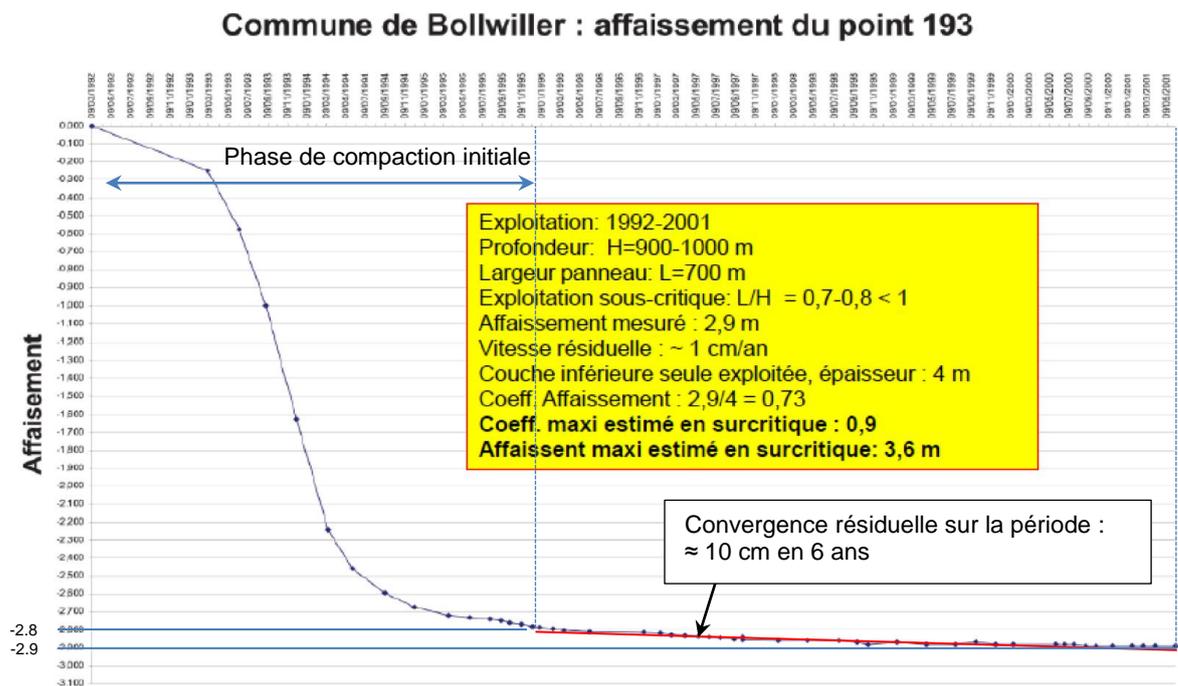


Figure 11. Estimation de la convergence résiduelle au point 193 (commune de Bollwiller)

Sur la figure ci-dessus :

<sup>13</sup> 6 courbes sont présentées en Annexe E de ce rapport. Elles correspondent aux communes de Bollwiller (points 143, 193 et 210), Pulversheim (point 30) et Reininguer (point 173)

- L'affaissement maximal est estimé à 3.6 m
- L'affaissement après la phase de compaction initiale peut être estimé à  $\approx 2.8$  m
- Le taux de compaction initiale est ainsi de  $2.8/3.6 \approx 78$  %
- Sur la période 1995-2001, l'affaissement résiduel est de 10 cm soit 1.67 cm/an

La vitesse de convergence résiduelle doit être estimée relativement à la hauteur des vides restants après compaction initiale (i.e.  $3.6 \text{ m} - 2.8 \text{ m} = 0.80 \text{ m}$ ) :

Vitesse de convergence résiduelle sur la période 1995-2001  $\approx 1.67 \text{ cm/an} / 80 \text{ cm} \approx 2.2\%/an$

Sur la figure précédente, la valeur de la compaction initiale ou encore la pente de la convergence résiduelle peuvent être discutées, cependant l'ordre de grandeur de la convergence résiduelle (autour de 2%) est très différent de ce qui est obtenu par l'INERIS (de 0.1% à 0.2%/an).

Par ailleurs, l'Ineris :

- considère une vitesse résiduelle constante alors que celle-ci va diminuer dans le temps (l'approche est ici sécuritaire puisque les vides vont se refermer plus vite dans le calcul que dans la réalité) ;
- ne prend pas en compte une variation de la convergence résiduelle en fonction de la profondeur alors qu'il est reconnu, notamment par l'INERIS, que la réduction des vides due au fluage du sel (intervenant dans la convergence résiduelle des tailles foudroyées) varie de façon très significative avec la profondeur ;
- retient parmi ses estimations de vitesses relatives de 0.1 à 0.2% par an, la valeur de 0.1% par an (ce qui n'est pas sécuritaire, au moins pour ce qui concerne la vitesse d'envoyage, puisque les vides résiduels seront plus importants avec une hypothèse de convergence résiduelle de 0.1%/an que pour une hypothèse de 0.2%/an, et qu'en conséquence les débits d'infiltration mettront plus de temps pour les remplir).

Le Dossier de demande considère une vitesse de convergence résiduelle des vides des tailles foudroyées basée sur le rapport Ineris [53]. L'Ineris estime cette vitesse à partir des chroniques observations des affaissements en surface mesurées sur une dizaine d'années.

L'estimation de l'Ineris (0.1% /an) sous-estime de façon significative la convergence résiduelle des tailles foudroyées. Il en résulte que les volumes résiduels, 'disponibles' à l'envoie, seront plus importants (qu'en l'absence de sous-estimation de ce paramètre).

Cette estimation, pour une même compaction initiale et un même débit d'envoyage, induira in fine une vitesse d'envoyage plus faible et donc une date à laquelle la saumure arrivera au niveau de la zone de stockage plus tardive.

Au vu des différentes estimations de la compaction initiale et de la convergence résiduelle, la tierce expertise estime qu'une estimation de la convergence résiduelle des tailles foudroyée devrait être effectuée en prenant en compte :

- l'ensemble de toutes les observations disponibles ;
- le fait que la convergence résiduelle varie de façon très significative avec la profondeur

A titre d'illustration les données suivantes pourraient être considérées :

- les mesures d'affaissement réalisées par le cabinet Jung en 2014<sup>14</sup>.
- les mesures d'affaissement réalisées juste après le passage des travaux miniers et présentées dans le rapport de l'Inéris ([53] | Ineris, 2010)
- les mesures de niveau de saumure dans le sondage VAPB2 en novembre 2015<sup>15</sup>.

A titre d'illustration, les paragraphes suivants décrivent, à partir des données précitées, les calculs possibles (tierce expertise) permettant d'estimer les taux de convergence à partir des différentes sources de données. La répartition des valeurs obtenues avec la profondeur a ensuite permis de calibrer une relation convergence résiduelle / profondeur pour les tailles foudroyées.

#### Mesures d'affaissement de 2014

Une estimation de la convergence résiduelle a été réalisée à partir des mesures d'affaissement réalisées par le cabinet Jung en 2014. Cette estimation est réalisée par intégration de l'évolution des vides miniers jusqu'à la date de mesure (2014).

Les travaux miniers situés à l'aplomb des mesures d'affaissement ont concernés la couche inférieure et la couche supérieure, soit une épaisseur totale d'environ 5,5 m. L'intégration de la compaction prend en compte des hypothèses de compaction initiale de 60 % et de 80%. Pendant la durée entre l'âge des travaux et la mesure (2014), des tests sont réalisés avec différents taux de convergence des vides résiduels. Le taux de convergence qui correspond le mieux aux observations d'affaissement correspondant est alors retenu. On obtient alors des couples (compaction initiale / convergence résiduelle) cohérents avec les mesures d'affaissement obtenues.

Le tableau suivant présente les différents points de mesures utilisés et les résultats obtenus en termes de taux de convergence résiduelle.

**Tableau 5. Observations d'affaissement et calcul de la convergence résiduelle associée sur les points de suivi actuels**

Nom du point	STAF1	STAF2	WITT6	WITT7	WITT4	WITT	WITT5	STAF5	STAF6	WITT1	WITT2	BOLL3
Affaissement en mètre (les affaissements négatifs ne sont pas pris en compte)	0.004	0.005	0.004	0.001	0.01	0.009	0.01	0.005	0.006	0.013	0.014	0.005
Profondeur de la couche inférieure	651	653	669	677	692	696	698	700	700	743	757	882
Profondeur de la couche supérieure	671	673	689	697	712	716	718	720	720	763	777	902
Age de la couche inférieure	1981	1981	1960	1965	1975	1970	1973	1957	1957	1977	1977	1997
Age de la couche supérieure	1974	1974	1957	1951	1960	1960	1960	1952	1951	1966	1966	1978
Taux de convergence avec une compaction initiale de 60 %	0.3%	0.4%	0.3%	0.1%	0.9%	0.8%	0.9%	0.4%	0.5%	1.4%	1.6%	0.3%
Taux de convergence avec une compaction initiale de 80 %	0.6%	0.8%	0.8%	0.1%	2.5%	2.2%	2.4%	2.0%	1.7%	2.6%	2.6%	0.7%

<sup>14</sup> Ces valeurs ont été mesurées sur une période de courte durée et doivent donc être considérées avec prudence

<sup>15</sup> Mesures dont ne disposait pas l'Ineris

**Mesures d'affaissement des points 30 et 193 (cités dans rapport [53])**

Lors de l'exploitation de la mine, des suivis d'affaissement ont été réalisés : deux de ces suivis sont situés à l'aplomb immédiat des travaux miniers et sont utilisés pour illustrer la compaction initiale et l'affaissement résiduel ([53] | INERIS, 2010). Ces mesures ont un intérêt particulier puisqu'elles montrent la compaction initiale des travaux après foudroyage. En revanche, les mesures sont situées dans des zones où l'exploitation est « sous-critique », c'est-à-dire que la largeur de l'exploitation est inférieure à la profondeur et ainsi la hauteur d'affaissement en surface n'est pas tout à fait représentative de la réduction des vides miniers (MDPA, 2008b).

Le tableau suivant présente les taux de convergence résiduelle après la compaction initiale sur les points 193 et 30 ([53] | INERIS, 2010) (MDPA, 2008b).

**Tableau 6. Observations d'affaissement et calcul de convergence résiduelle associée pour des points suivis lors de l'exploitation de la mine**

Points présentés dans INERIS 2011 [53] page 52	Hauteur résiduelle après compaction (m)	Affaissement (m/an) après la compaction initiale	Profondeur (m)	Taux de convergence
Point 193	0.8	0.017	950	2.2%
Point 30	1.235	0.031	1000	2.5%

**Mesures de l'ennoyage sur le sondage VAPB2**

Le sondage VAPB2 apporte des informations intéressantes et plus directes que celles issues des observations de surface.

Le sondage de VAPB2 a recoupé les anciens travaux miniers foudroyés de la couche supérieure et de la couche inférieure de potasse. Un niveau de saumure s'établissant à 893 mètres de profondeur, soit environ - 640 m NGF, a été rencontré dans la couche inférieure<sup>16</sup> (Cf. figure ci-après).

Le niveau de saumure mesuré dans le forage VAPB2 résulte :

- du volume d'eau infiltré via les puits Amélie 1 et 2 depuis l'arrêt de l'exhaure de ces puits<sup>17</sup> ;
- des vides disponibles à l'ennoiement sur la période s'étendant depuis l'arrêt des puits jusqu'à maintenant (2015).

Ce niveau de saumure représente d'après les plans des travaux miniers, une surface ennoyée d'environ 40 000 m<sup>2</sup>. Cette surface correspond à un volume initial excavé de 140 000 m<sup>3</sup> (en considérant une hauteur moyenne de la couche inférieure de 3.5 m<sup>18</sup>).

<sup>16</sup> La couche de potasse supérieure étant sèche ce qui semble relativement logique à cette profondeur puisque mes infiltrations d'eau se font à la base des puits et progressent d'abord au sein de la couche inférieure.

<sup>17</sup> Le volume est estimé en prenant en compte, sur la période s'étendant depuis l'arrêt de l'exhaure de ces puits jusqu'à 2015, comme débit d'infiltration les débits d'exhaure mesurés aux puits Amélie 1 et 2. Cela correspond à un volume total de 15 000 m<sup>3</sup> sur la période considérée.

<sup>18</sup> Cette hauteur moyenne est estimée à partir volume des vides initiaux (déduit du tonnage extrait et de la masse volumique) divisée par la surface exploitée correspondante.

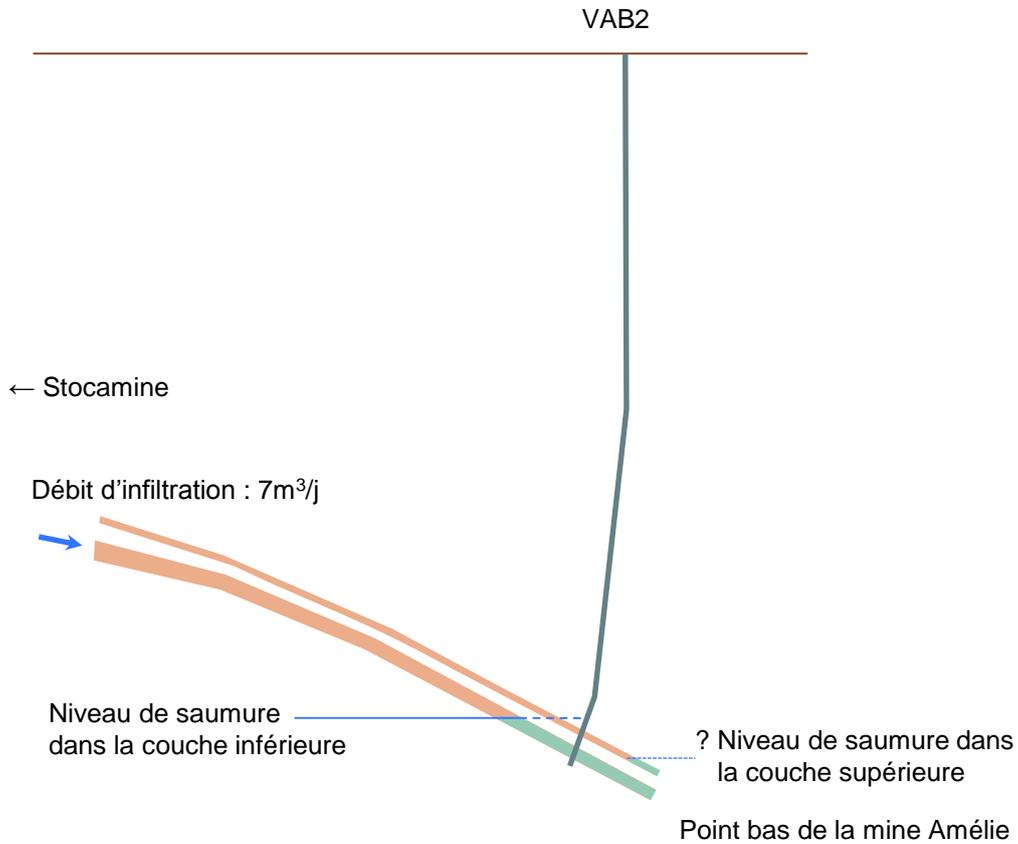


Figure 12. Schématisation du niveau de saumure dans le forage VAPB2 (d'après MDPA)

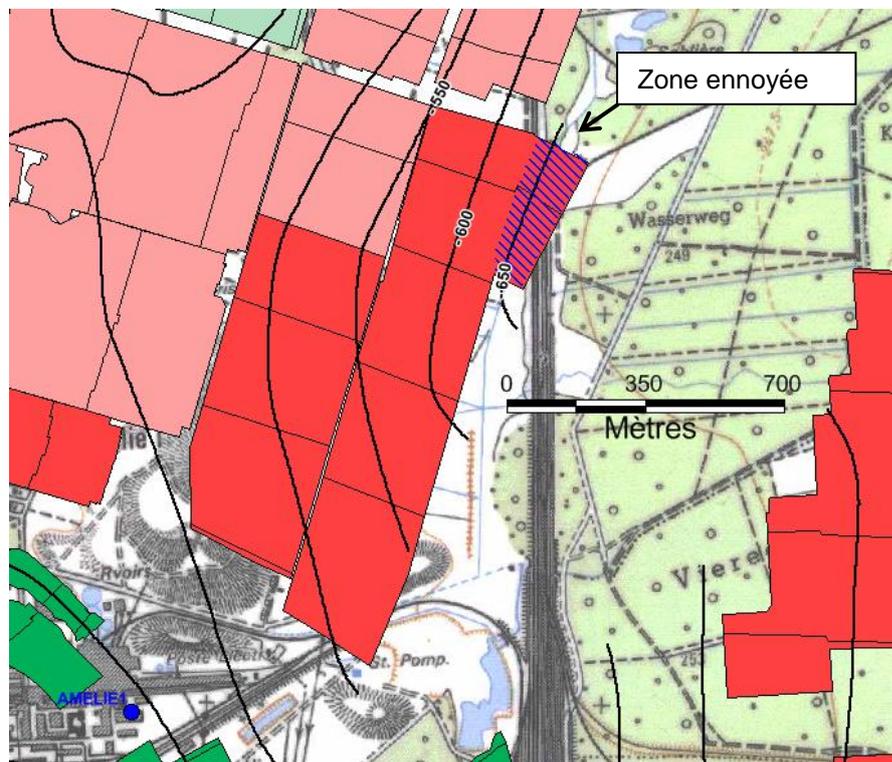


Figure 13. Carte de l'ennoyage en novembre 2011 repéré par le sondage VAPB2.

L'ennoyage dans cette zone provient des puits Amélie 1 et 2 (Liberda, 2011) dont les débits sont relativement bien connus, puisque les débits d'exhaure ont été mesurés jusque récemment, juste avant l'arrêt de l'exhaure. Les débits des puits Amélie 1 et 2 envoyant la zone reconnue par VAPB2 sont respectivement de 140 m<sup>3</sup>/mois et de 100 m<sup>3</sup>/mois depuis 2011<sup>19</sup>. En novembre 2011, les MDPA estiment à partir de ces mesures que depuis l'arrêt de l'exhaure, l'ennoyage est d'environ 5 000 m<sup>3</sup> (Liberda, 2011), sur ces mêmes hypothèses, on estime que l'ennoyage est d'environ 16 500 m<sup>3</sup> en novembre 2015.

Pour la zone considérée, le volume des vides a évolué de 140 000 m<sup>3</sup> (volume excavé au moment de l'exploitation minière en 1980)<sup>20</sup> à 16 500 m<sup>3</sup> à novembre 2015.

En considérant une hypothèse de compaction initiale, on peut déduire le taux de convergence résiduelle associé permettant d'obtenir un volume des vides miniers remplis de saumure de 16 500 m<sup>3</sup> en novembre 2015<sup>21</sup>.

Ainsi, pour les deux hypothèses de compaction initiale considérée (60% et 80%), le taux de convergence résiduelle est respectivement de 2,5%/an et 0,7%/an.

### Exemple d'établissement d'une relation Convergence résiduelle / Profondeur pour les tailles foudroyées

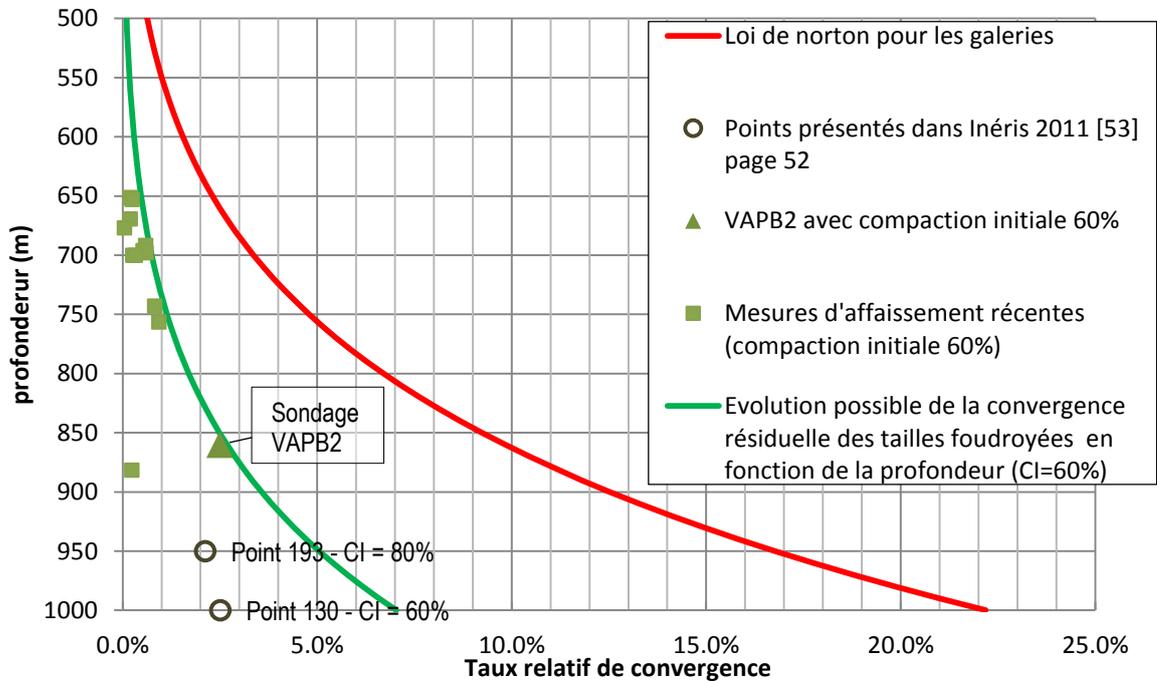
Les convergences résiduelles déduites des points d'observation récents d'évolution de la topographie<sup>22</sup> (■), des points d'observation anciens d'évolution de la topographie (○) et du niveau de saumure dans le forage VAPB2 (▲) ont été reportées en fonction de la profondeur sur les figures suivantes et en considérant deux hypothèses de compaction initiale (60% et 80%). Deux relations possibles d'évolution de la convergence résiduelle en fonction de la profondeur pour les tailles foudroyée ont ensuite été calées en s'appuyant sur un comportement de type Norton (augmentation de la convergence fonction puissance de la profondeur).

<sup>19</sup> L'exhaure du puits Amélie 1 s'est arrêtée en avril 2007 mais a repris ponctuellement en entre 2009 et 2010. L'exhaure du puits Amélie 2 s'est arrêtée en décembre 2011 (MDPA).

<sup>20</sup> Un calcul similaire a été réalisé par MDPA (MDPA, 2015a). Ce calcul donne des résultats dans les mêmes ordres de grandeur que ceux de la tierce expertise. Les différences entre les hypothèses considérées sont marginales et correspondent aux incertitudes associées aux différents paramètres.

<sup>21</sup> Les autres paramètres étant fixés (taux de dissolution, facteur de réduction de la convergence résiduelle du fait de la saturation des vides par la saumure, facteur d'augmentation de la convergence du fait de l'humidité).

<sup>22</sup> Relativement peu fiables au vu de la faible étendue de la période de mesure



**Figure 14. Evolution possible de la convergence résiduelle des tailles foudroyées en fonction de de la profondeur (compaction initiale : 60 %).**

La courbe verte est globalement cohérente avec l'ensemble des observations, et notamment avec la mesure du niveau de saumure actuel dans le sondage VAPB2. Cette courbe est systématiquement 'à droite' des observations et sera donc sécuritaire<sup>23</sup>. En effet le taux de convergence résiduel sera plus élevé et donc la réduction des vides sera plus importante, ce qui induira une vitesse d'envoyage plus élevée<sup>24</sup>.

Comme la reproduction des observations dépend du couple (compaction initiale ; convergence résiduelle) et que des valeurs de compaction initiale de l'ordre de 80% ont pu être observées, une autre relation a été établie en considérant une compaction initiale de 80% (Cf. 0).

La courbe violette est cohérente avec les points peu profonds mais ne correspond pas aux points d'observation 193 et 30 (Cf. paragraphe précédent). Par ailleurs, elle n'est pas cohérente avec la mesure actuelle du niveau de saumure réalisée par MDPA (sondage VAPB2). Cependant elle passe largement 'à droite' des données les plus 'fiables' (i.e. sondage VAPB2 et suivi des affaissements sur une dizaine d'années aux points 30 et 193).

<sup>23</sup> Pour une compaction initiale de 60%

<sup>24</sup> Que ce qui pourrait être déduit de chaque taux de convergence résiduelle déduit des observations

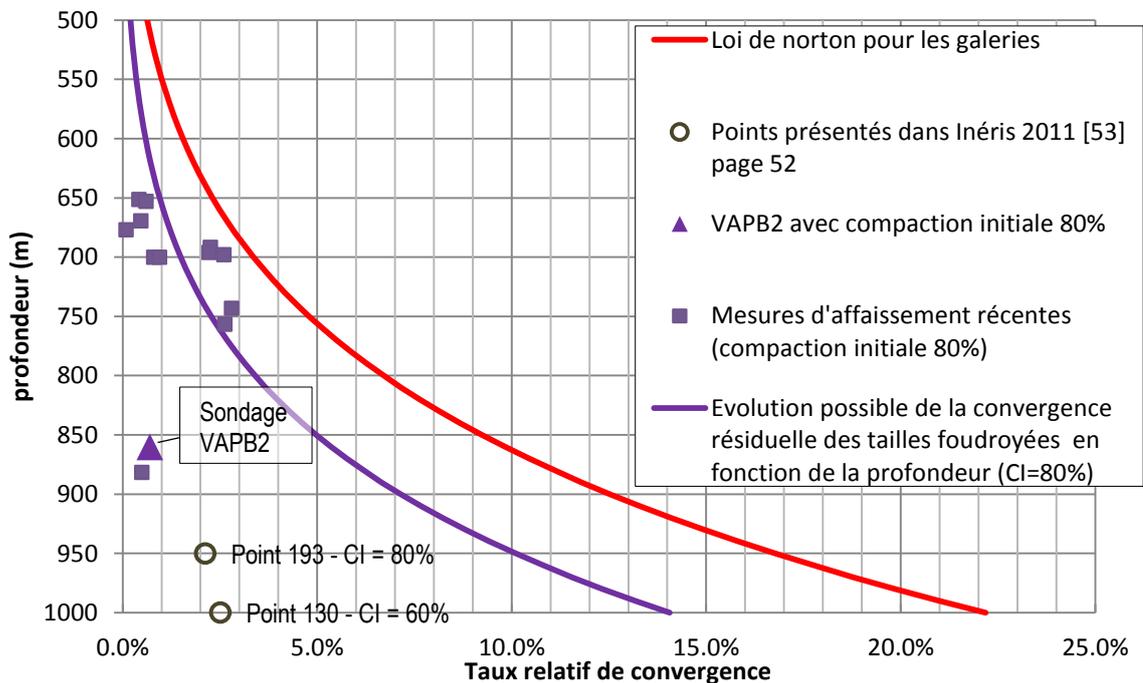


Figure 15. Evolution possible de la convergence résiduelle des tailles foudroyées en fonction de de la profondeur (compaction initiale : 80 %).

Les relations présentées précédemment peuvent être discutées mais il apparaît préférable d'établir de telles relations (évolution de la convergence résiduelle *en fonction de la profondeur* et en exploitant au mieux les observations disponibles) malgré leurs imperfections plutôt que de considérer une convergence résiduelle très faible (0.1%/an en milieu 'sec'), ne correspondant pas aux observations et ne dépendant pas de la profondeur.

Cette dernière approche induira une dynamique de réduction des vides plus lente et des temps d'envoyage plus long.

Le tableau suivant reprend les paramètres de formulation de Norton utilisée pour décrire le comportement de la convergence résiduelle en fonction de la profondeur pour les tailles foudroyée.

Tableau 7. Loi de Norton modifiée et paramètres obtenus pour la convergence des tailles foudroyées

	'Loi' de convergence résiduelle des tailles foudroyées (CI=60%)	'Loi' de convergence résiduelle des tailles foudroyées (CI=80%)	Loi pour les galeries non foudroyées
As (1/day) Reference rate	0.0001	0.0002	0.0065
ns Stress exponent	5	5	4
Ks (K) Constante d'Arrhenius	4700	4700	4700
T (K) Température /m	0.033	0.033	0.033
T° au sol	291.45	291.45	291.45

Pour estimer la convergence résiduelle des tailles foudroyées, qui nous semble sous-estimée, la tierce expertise recommande de prendre en compte :

- l'ensemble de toutes les observations disponibles (et notamment les informations du forage VAPB2) ;
- le fait que la convergence résiduelle varie de façon significative avec la profondeur.

### 3.3.4.3. CONVERGENCE DES GALERIES

Pour les galeries de mine, les observations sont nombreuses (notamment au droit du stockage), et donnent un taux de convergence « de l'ordre de 1% par an en moyenne pour les [vides] (autour de 550 m de profondeur) ».

Le calcul de la convergence des voies et galeries non-foudroyées a été fait avec à la loi de Norton<sup>25</sup> ([76] | Itasca, 2013) ([53] | INERIS, 2010). La loi est calée sur les observations de convergences réalisées au niveau du stockage. Le tableau suivant présente la loi de Norton et les paramètres utilisés retenus par l'Inéris (Dossier de demande).

**Tableau 8. Loi de Norton et paramètres obtenus par ([53] | INERIS, 2010)**

$$\underline{\dot{\epsilon}}^{\text{vp}} = A \exp(-B/T) (Q/Q_0)^n \frac{\partial Q}{\partial \sigma}$$

$\underline{\dot{\epsilon}}^{\text{vp}}$  = vitesse de déformation viscoplastique,  $Q$ : déviateur de contrainte (contrainte effective de Mises, en MPa)  
 $A, B, n$  : paramètres du modèle ;  $Q_0 = 1$  MPa

Paramètres élastiques		Paramètres viscoplastiques (modèle de Norton)		
E : Module de Young MPa	Coefficient de Poisson (-)	A (/ jour)	B (Kelvin)	n (-)
25000	0,25	0,022	4700	4,0

La loi d'évolution des vides résiduels des galeries indiquée dans le Dossier de demande est considérée par la tierce expertise (sur la base d'observations dans de nombreuses mines de sel) comme appropriée et les paramètres vraisemblables (Cf. Rapport *Géomécanique* de la tierce expertise).

### 3.3.4.4. IMPACT DE L'ENNOYAGE SUR LE FLUAGE

Lorsque la mine est complètement ennoyée, du fait de la pression hydrostatique qui diminue le déviateur de contrainte d'un facteur 2,2 (masse volumique de la saumure 2,2 plus faible que les

<sup>25</sup> Certains experts discutent des mérites comparés de la loi de Norton par rapport à celle de Lemaitre. Sans trancher sur le sujet, il apparaît que la loi de Norton est plus sécuritaire (du fait que la loi de Lemaitre considère une réduction du taux de convergence relatif avec le temps à l'inverse de la loi de Norton qui considère un taux constant). Par ailleurs ce point a très peu d'impact sur l'évaluation globale au vu des incertitudes fortes existant sur les autres phénomènes et paramètres associés

terrains encaissants), la vitesse de convergence est diminuée d'un facteur  $2,2^4$  soit environ d'un facteur 23 ([55] | INERIS, 2011)<sup>26</sup>.

L'Inéris retient les valeurs présentées dans le tableau ci-après<sup>27</sup>.

**Tableau 9. Résumé des vitesses de convergences utilisées dans les calculs par l'Inéris ([55] | INERIS, 2011)**

Type de vides miniers	Avant ennoyage	Après ennoyage
Voies	2% par an	0,09% par an
Tailles foudroyées	0,1% par an	0,01% par an

Au moment de l'ennoiement et avant l'ennoiement complet, la convergence des vides augmente transitoirement d'un facteur 2 (Cf. IFG, 2015). Ce phénomène n'est pas pris en compte dans le Dossier de demande. Il peut être noté cependant que ce phénomène a un impact minime sur la vitesse d'ennoyage.

Le Dossier de demande prend en compte une réduction de la convergence lorsque les vides sont saturés de saumure. Cette réduction dépend de la diminution du déviateur de contrainte.

La tierce expertise est en accord globalement avec cette approche.

Il est à noter toutefois que les arrondis de calcul effectués de l'Inéris ne sont pas cohérents entre voies et galeries et ne vont pas dans un sens sécuritaire.

### 3.4. EVALUATION DE LA DATE D'ARRIVEE DE LA SAUMURE SAIN AU NIVEAU DU STOCKAGE

#### 3.4.1. Introduction

Le Dossier de demande évalue une durée d'ennoyage de l'ordre de 300 ans pour le secteur ouest<sup>28</sup> (Annexe 4 - §2.4.2.2.C et ([55] | Ineris, 2011)).

L'Inéris mentionne qu'il ne connaît pas la répartition des travaux miniers par tranche de profondeur pour justifier une approche simplifiée.

Or des données détaillées existent et ont été fournies par les MDPA<sup>29</sup> à la tierce expertise (répartition des vides miniers en fonction de la profondeur et date des excavations). Il n'est pas exclu que de telles données aient pu être disponibles en 2011.

Pour estimer cette durée d'ennoyage l'Inéris a considéré notamment les hypothèses suivantes.

<sup>26</sup> Dans le rapport ([53] | INERIS, 2010), l'Inéris, sur la base d'hypothèses proches considère un facteur de réduction de  $2^4$  soit un facteur 16

<sup>27</sup> Uniquement pour les tailles foudroyées l'Inéris a arrondi la valeur de convergence de 0.0043% (facteur de 1/23 par rapport à la valeur non ennoyée) à 0.01%/an (facteur de 1/10) (soit plus du double de la valeur estimée)

<sup>28</sup> Et de 240 ans pour que le niveau de saumure atteigne le niveau du stockage

<sup>29</sup> En 2015

- Pour ce qui concerne la caractérisation des vides miniers en 2010 :
  - Un âge moyen des travaux miniers (soit 48 ans pour le secteur ouest et 57 ans pour le secteur Amélie) ;
  - Une profondeur moyenne des travaux miniers (soit 627 m pour le secteur ouest et 641 m pour le secteur Amélie)
  - Des vides miniers totalement fermés mécaniquement au-delà de 750 m ;
  - Des voies âgées en moyenne de 50 ans ou plus totalement fermés mécaniquement<sup>30</sup>.
- Pour ce qui concerne les vitesses de convergences :
  - les valeurs indiquées dans le rapport [53] (Inéris, 2010).

L'approche moyennante développée ne prend pas en compte une évolution des vides miniers qui dépend de la profondeur.

Du fait que des informations détaillées relative à la répartition des travaux miniers en fonction de la profondeur ont été fournis à la tierce expertise et que des relations entre les taux de convergence et la profondeur ont pu être proposées, la tierce expertise a mené un calcul détaillé pour évaluer la pertinence de l'approche simplifiée indiquée dans le Dossier de demande.

### 3.4.2. Principe du calcul

Une évaluation détaillée de la vitesse d'envoyage repose non seulement sur :

- une estimation des débits d'infiltration,
- une quantification des phénomènes d'évolution des vides miniers (compaction initiale des tailles foudroyées, convergence en fonction de la profondeur, dissolution) ;

mais également sur :

- la détermination de la répartition des vides miniers initiaux (i.e. lors de l'excavation) en fonction de la profondeur et de leur date de 'création' ;

Ce dernier point est présenté dans les paragraphes qui suivent.

A partir des cartes des travaux miniers fournis par les MDPa (Cf. 0 et 0), les profondeurs des volumes de vides initiaux (dont la date de 'création' est connue) ont été cartographiés.

Les figures suivantes présentent la localisation des surfaces exploitées en fonction de leurs âge et les isohypses de la couche exploitée pour la couche inférieure et la couche supérieure.

L'altitude de la couche inférieure est issue des isohypses (i.e. iso-altitude) cartographiées par les MDPa. L'altitude de la couche supérieure est déduite en ajoutant un espacement moyen de 20 mètres (information issue des différentes coupes géologiques au droit du site).

---

<sup>30</sup> Ce qui aboutit, en particulier, à considérer que les voies des secteurs Joseph et Else sont totalement fermées (Cf. Tableau 13, [55]) ce qui n'est pas le cas ne serait-ce que parce que les opérations de déstockage se poursuivent en 2016 et empruntent ces voies.

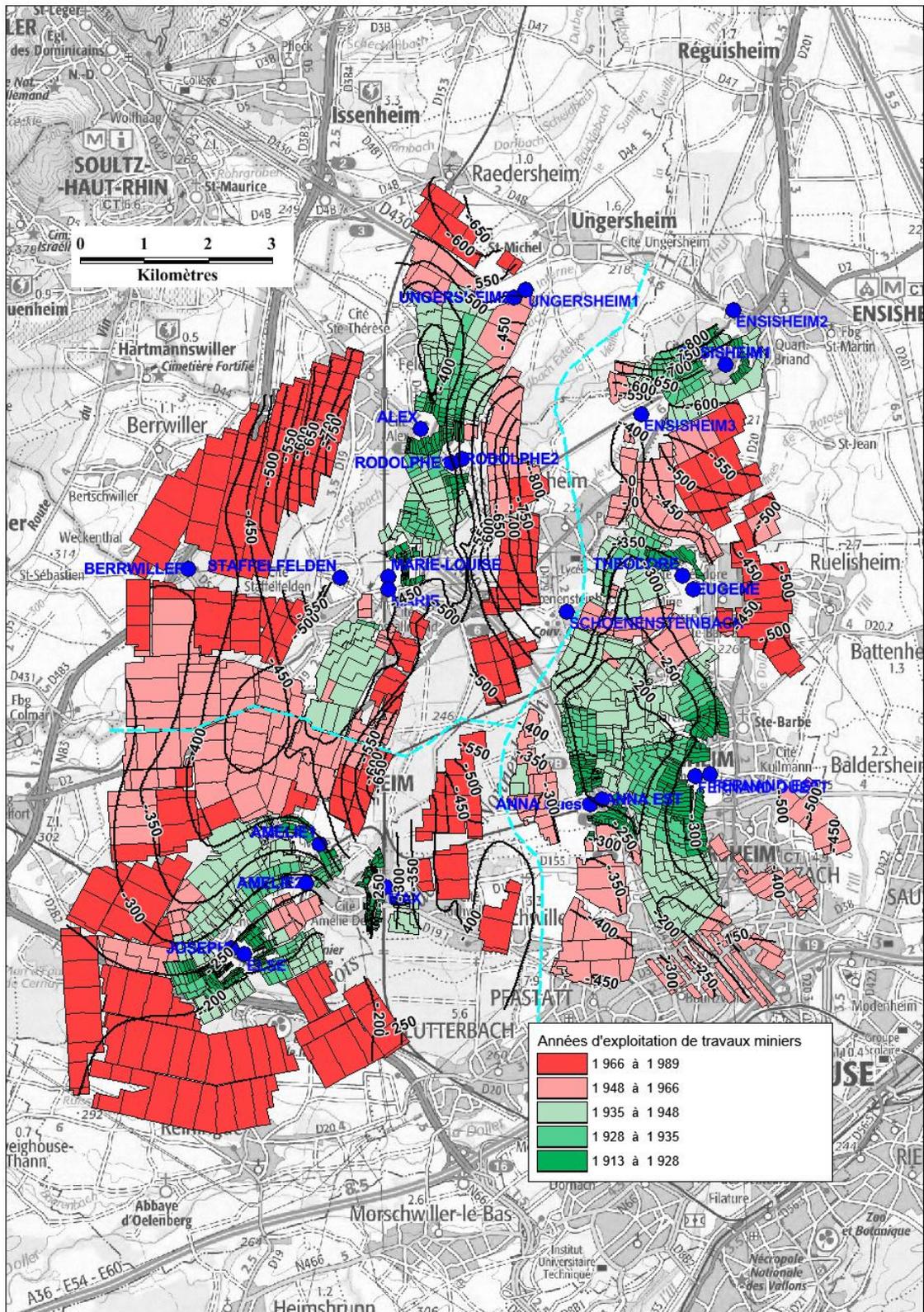


Figure 16. Localisation de l'exploitation de la couche inférieure, âge d'exploitation et isohypses de la couche.

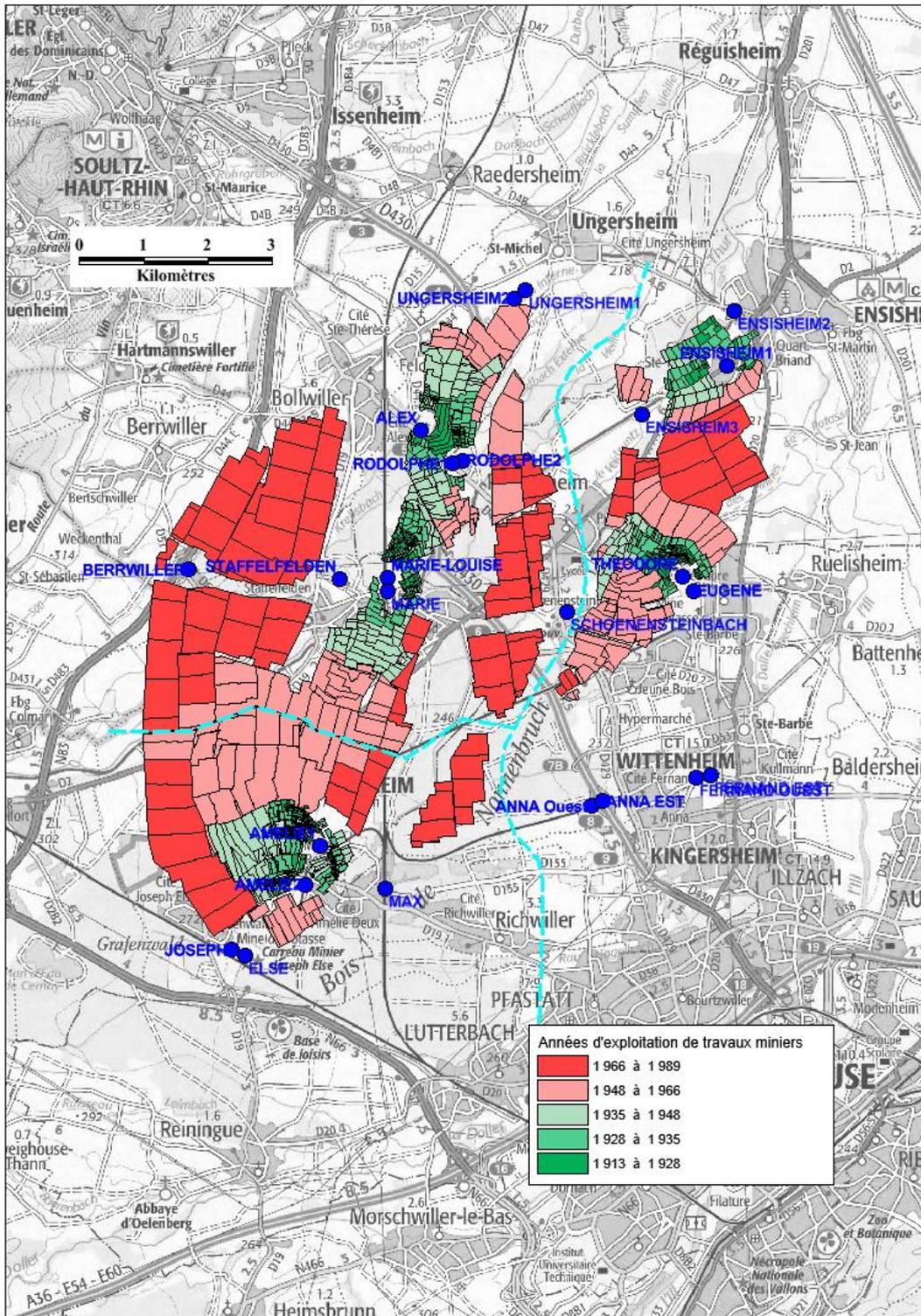
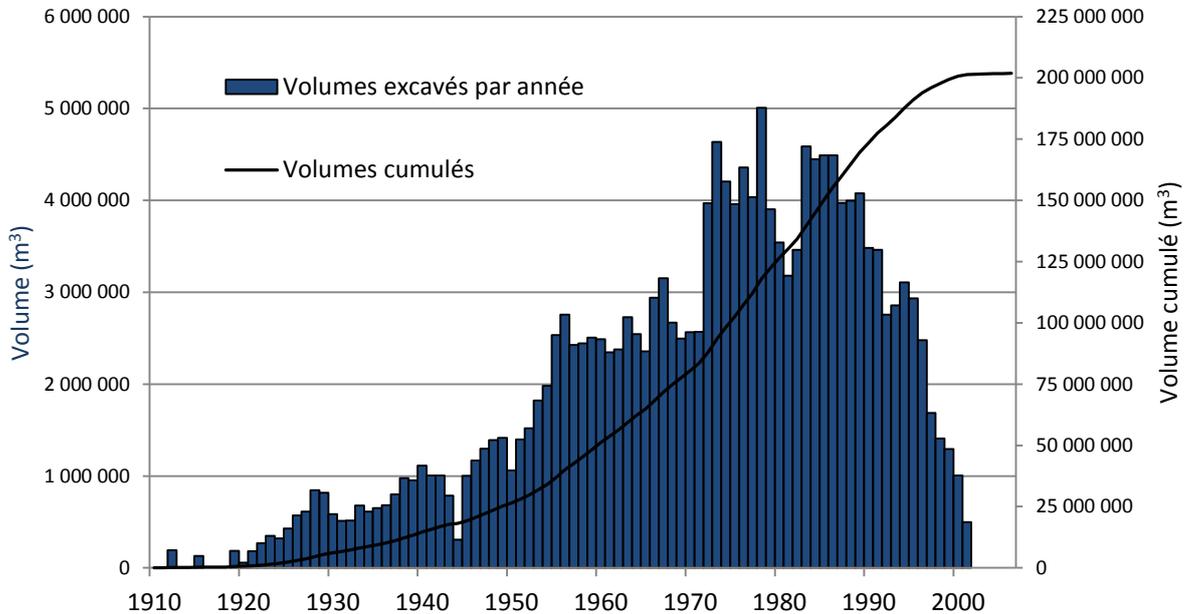


Figure 17. Localisation de l'exploitation de la couche supérieure, âge d'exploitation et isohypses de la couche.

L'ensemble des informations saisies a été introduit dans une feuille de calcul<sup>31</sup>.

A titre d'illustration, le graphique suivant, issu de la feuille de calcul, présente l'évolution des vides miniers initiaux pour le secteur ouest en fonction de leur date d'excavation<sup>32</sup>.



**Figure 18. Evolution des volumes excavés en fonction du temps (secteur ouest)**

A partir de la feuille de calcul référençant les volumes excavés en fonction de la profondeur (et ayant comme attribut la date de leur 'création') une routine détermine l'évolution du niveau de saumure en fonction du temps.

Les principales étapes du calcul sont comme suit :

- à partir des volumes excavés, les volumes de vides après compaction initiale sont calculés (suivant les différentes hypothèses de compaction initiale) ;
- avant que l'ennoisement ne commence (en 1991), les vides évoluent (se réduisent) en fonction des lois de convergences résiduelles dépendant de la profondeur (et distinctes pour ce qui concerne les galeries et les tailles foudroyées) ;
- au début de l'ennoisement<sup>33</sup>, les débits à infiltrer la première année vont d'abord occuper les vides les plus profonds à cette date ;
- les vides miniers évoluent alors selon différents 'modes' :
  - en mode 'sec', les taux de convergences précités s'appliquent,
  - en mode humide (c'est-à-dire lorsque le volume est partiellement rempli de saumure) les taux de convergences en milieu 'sec' sont augmentés d'un facteur 2 (Cf. IFG, 2015) ;

<sup>31</sup> Où les volumes excavés initialement sont classés en fonction de la profondeur et ont comme attribut la date de 'création' de l'excavation.

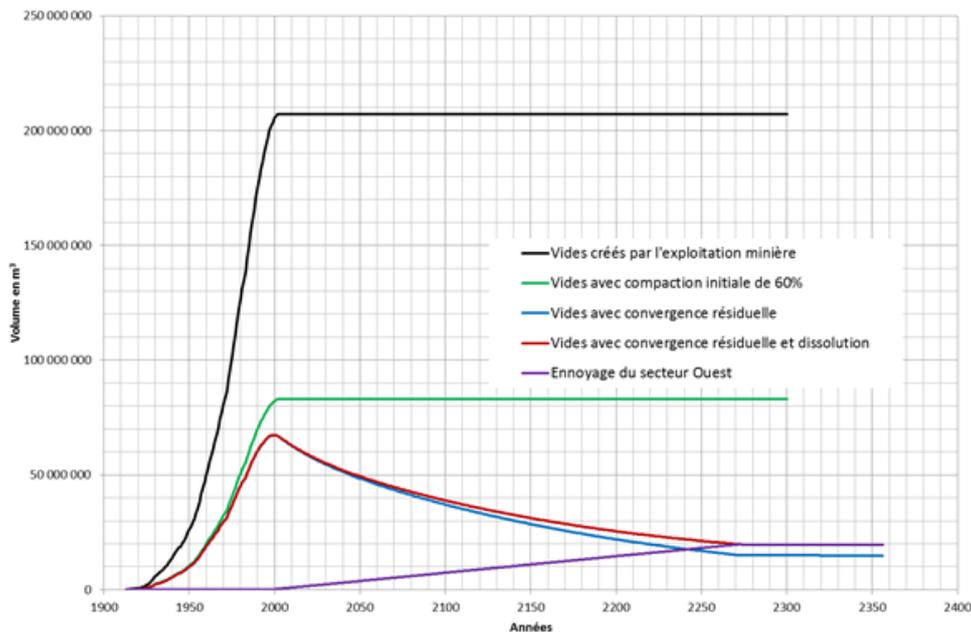
<sup>32</sup> Les volumes des voies/galeries non-foudroyées et des tailles foudroyées sont répartis selon le rapport 4,5%/95,5% (respectivement) proposé par les différents auteurs (e.g. [55] | INERIS, 2011).

<sup>33</sup> Les débits d'infiltrations augmentent progressivement en fonction de l'arrêt progressif de l'exhaure des puits du secteur ouest

- en mode saturé (c'est-à-dire lorsque le volume est totalement rempli de saumure) les taux de convergences en milieu 'sec' sont diminués<sup>34</sup> d'un facteur  $2,2^4$  ;
- L'année suivante, les volumes des vides disponibles à cette date sont actualisés (en fonction notamment de l'impact des débits infiltrés précédemment) et le processus itératif se poursuit.

Dans cette approche, les eaux d'ennoyage sont supposées se répartir équitablement dans les vides les plus bas de la mine, sans distinction par secteur de la mine. Cette hypothèse n'a pas de conséquence significative sur le résultat de l'ennoyage du stockage de StocaMine. En revanche, une prise en compte plus fine de la répartition spatiale des vides et en particulier de l'altitude des connexions entre les différents bassins versants de la mine permettrait de mieux comparer les résultats de ce calcul avec les observations de l'ennoyage effectuées par exemple au sondage VABP2.

La figure suivante présente à titre d'illustration la part des différents processus d'évolution des vides miniers (pour une hypothèse de compaction initiale de 60%).



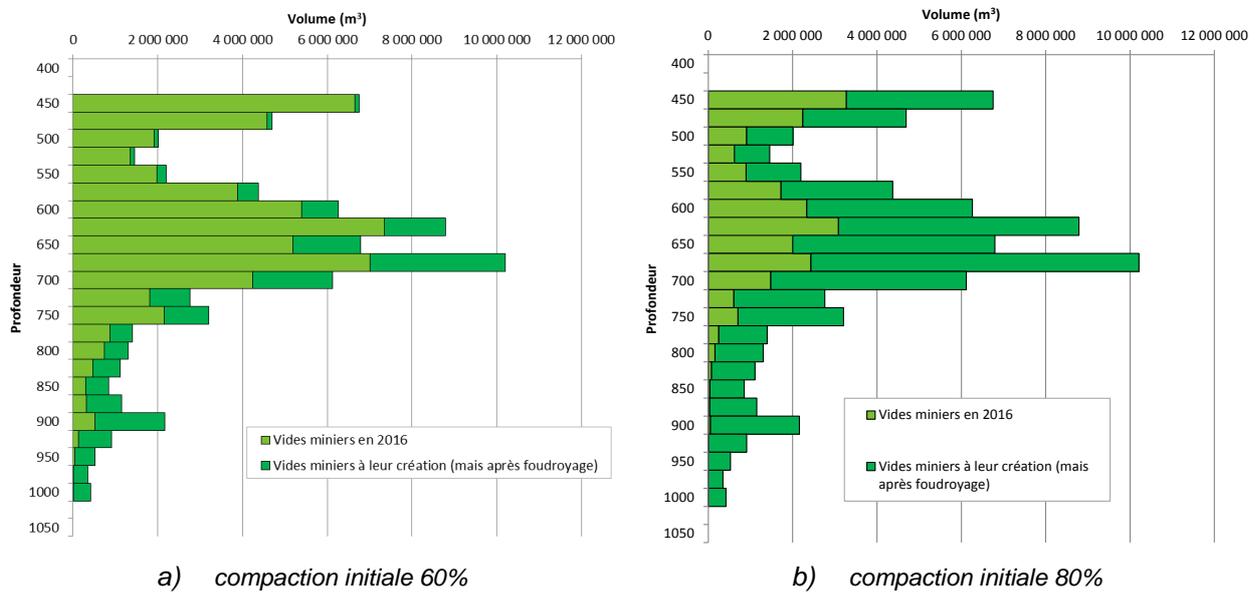
**Figure 19. Illustration des processus régissant l'évolution des vides miniers dans le temps sur le secteur Ouest.**

Sur cette figure, il peut être noté que :

- la dissolution a un rôle relativement mineur ;
- la convergence résiduelle a un impact très significatif sur la diminution des vides miniers ;
- lorsque la mine est totalement ennoyée (vers 2270 ans dans l'exemple de la figure ci-dessus), le volume des vides miniers évolue très peu.

La figure suivante présente à titre d'illustration la répartition des vides en fonction de la profondeur lors de l'exploitation (après foudroyage) et les vides actuels (2016) résultant principalement des phénomènes de convergence.

<sup>34</sup> Lorsque la mine est complètement ennoyée, du fait de la pression hydrostatique qui diminue le déviateur de contrainte d'un facteur 2,2 (masse volumique de la saumure 2,2 plus faible que les terrains encaissants), la vitesse de convergence est diminuée d'un facteur  $2,2^4$  soit d'un facteur 23 ([55] | INERIS, 2011).

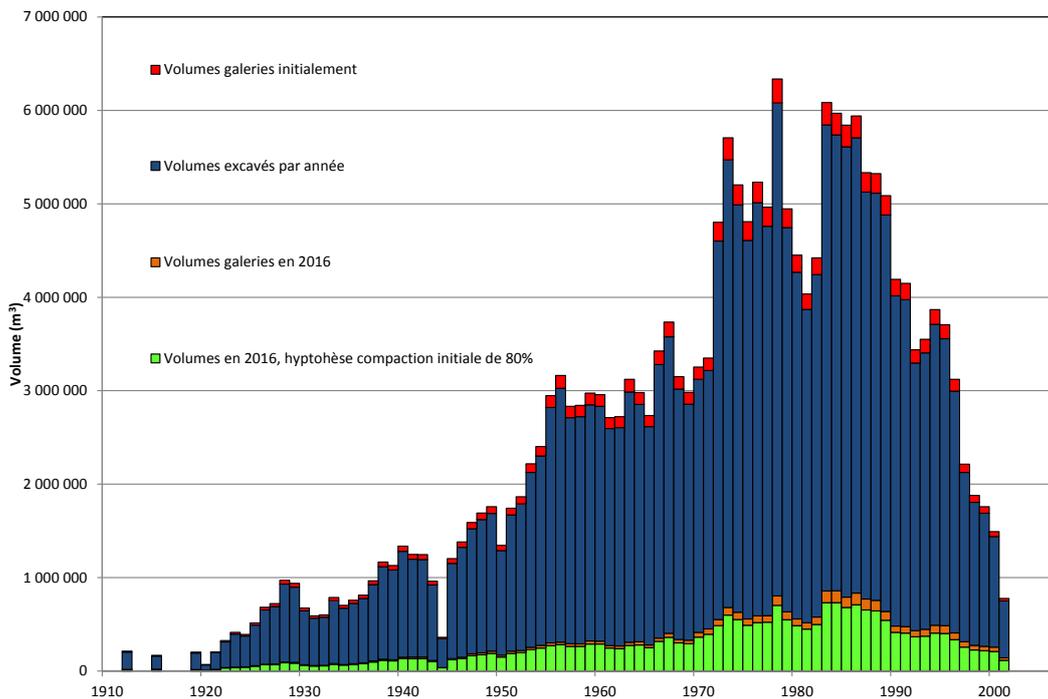


**Figure 20. Evolution des vides miniers initiaux après compaction initiale en fonction de la profondeur entre la date de leur création et la situation en 2016.**

Sur cette figure, l'impact de l'évolution de la convergence avec la profondeur apparaît clairement. Il peut être noté aussi que tous les vides ne sont pas fermés mécaniquement en-dessous de 750 m (hypothèse du Dossier de demande) bien que ces vides représentent une partie relativement faible de l'ensemble des vides disponibles en 2016.

Par ailleurs, la figure précédente met en évidence le rôle très important des hypothèses de compaction initiale dans la dynamique d'évolution des vides résiduels.

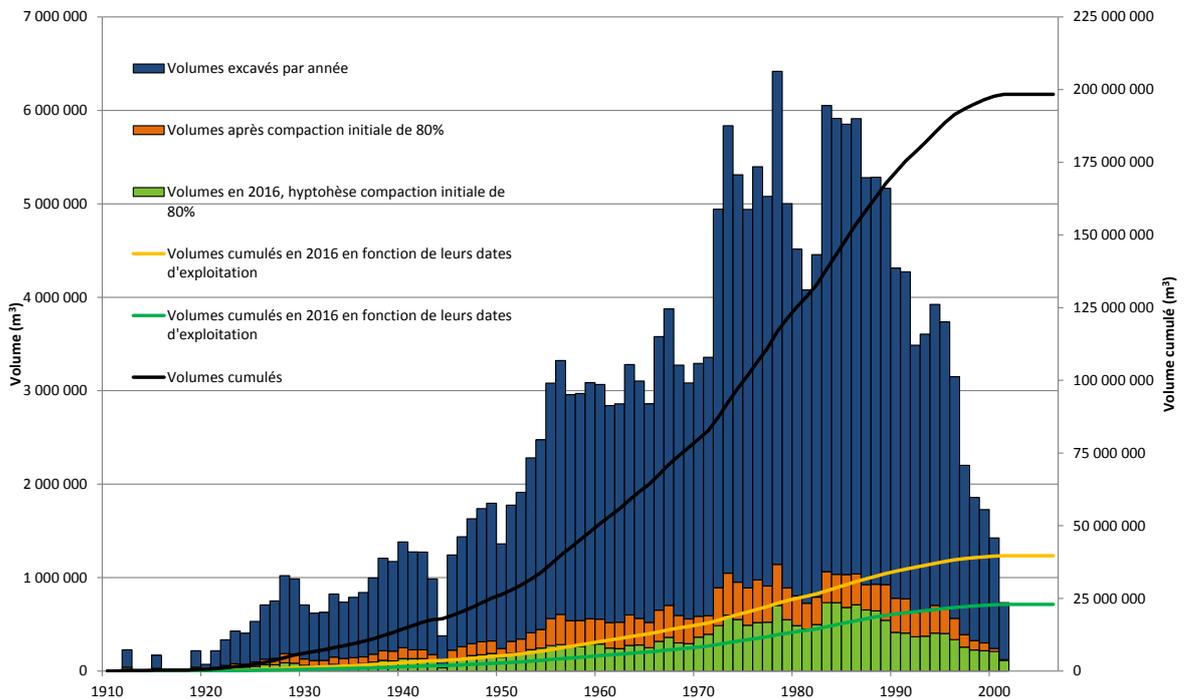
La figure suivante illustre les volumes initiaux et disponibles en 2016 pour les galeries et les tailles foudroyées.



**Figure 21. Evolution des vides miniers initiaux (galeries et tailles foudroyées) entre la date de leur création et la situation en 2016.**

La figure ci-après (hypothèse de compaction initiale de 80%) présente, pour les tailles foudroyées, les volumes initiaux, ceux obtenus après compaction initiale et les volumes de vides en 2016 en fonction du temps. Le cumul de ces volumes est également représenté.

Sur cette figure, la part des galeries dans les vides miniers disponibles en 2016 reste faible (ce qui est logique du fait de la répartition initiale entre galeries et tailles foudroyées). Il apparaît également que tous les vides ne sont pas mécaniquement fermés 50 ans après leur création (hypothèse du Dossier de demande) bien que le volume des vides créés il y a plus de 50 ans soit relativement faible.



**Figure 22. Evolution des vides miniers initiaux (galeries et tailles foudroyées) entre la date de leur création et la situation en 2016.**

De façon plus globale, par rapport aux hypothèses du Dossier de demande :

- Les volumes de vides en-deçà de 750 m sont faibles ;
- Les volumes de vides de plus de 50 ans sont faibles ;
- Les phénomènes de dissolution et d'augmentation de la convergence avec la présence d'humidité sont faibles devant la convergence des vides miniers.

Cependant, les différences les plus notables entre la présente approche et celle du Dossier de demande sont les suivantes :

- l'INERIS considère que les vides résiduels sont actuellement de 30 Mm<sup>3</sup> et ne prend pas en compte les phénomènes de convergence entre le début de l'exploitation minière et maintenant ;
- mais surtout, les taux de convergence résiduelle des tailles foudroyées sont très différents (entre le Dossier de demande et les évaluations de la tierce-expertise). Ceci va avoir un impact notamment sur les débits d'exhaure de saumure non polluée sur le long terme (débits qui vont contribuer à diluer la saumure polluée sortant du stockage).

In fine, les volumes disponibles à l'envoyage sont sensiblement différents entre le Dossier de demande et l'évaluation détaillée de la tierce expertise (volumes plus faibles dans ce dernier cas), ce qui va induire, toutes choses étant égales par ailleurs, une vitesse d'envoyage de la mine plus rapide.

### 3.4.3. Résultats

Les graphiques suivants présentent l'évolution des vides miniers et de l'ennoyage dans le temps pour le secteur Ouest et pour la mine Amélie seule (en fonction du rôle effectif ou non du stot).

Le calcul a été réalisé pour les deux hypothèses de comportement des tailles foudroyées (compaction initiale et convergence résiduelle associée) ce qui permet d'étudier la sensibilité du phénomène de convergence des vides sur les résultats obtenus.

Dans le cas d'une hypothèse d'une compaction initiale des terrains foudroyés de 80 % (cela correspond à l'hypothèse de référence de l'Inéris) et en adoptant une approche très sécuritaire la saumure arriverait au niveau du stockage dans environ 70 ans et la mine serait totalement ennoyée au bout de 120 ans pour le secteur Ouest (respectivement 190 ans et 425 ans dans le cas du secteur Amélie).

Les calculs effectués en prenant en compte une hypothèse d'une compaction initiale des terrains foudroyés de 60 % conduisent à estimer que la saumure arriverait au niveau du stockage dans environ 170 ans et la mine serait totalement ennoyée au bout d'environ 250 ans pour le secteur Ouest (respectivement 345 ans et 885 ans dans le cas du secteur Amélie).

Les figures suivantes présentent l'évolution des vides et de l'ennoyage au cours du temps dans le cas d'une hypothèse de compaction initiale des terrains foudroyés de 80 % en considérant les secteurs ouest et le seul secteur Amélie.

Comme cela a été évoqué précédemment, ces figures mettent en évidence un ennoisement plus rapide du secteur ouest, par rapport au secteur Amélie seul.

Le calcul de l'ennoyage montre une grande sensibilité des résultats aux paramètres de convergence des vides miniers. Les investigations en cours (suivi du niveau de saumure dans le sondage VAPB2 en 2015) ainsi que la réalisation éventuelle d'un autre sondage dans le secteur Ouest (hors Amélie), devrait permettre d'infirmer ou de confirmer certaines des hypothèses (notamment les couples possibles compaction initiale / convergence résiduelle), en comparant les résultats du calcul avec les observations de terrain.

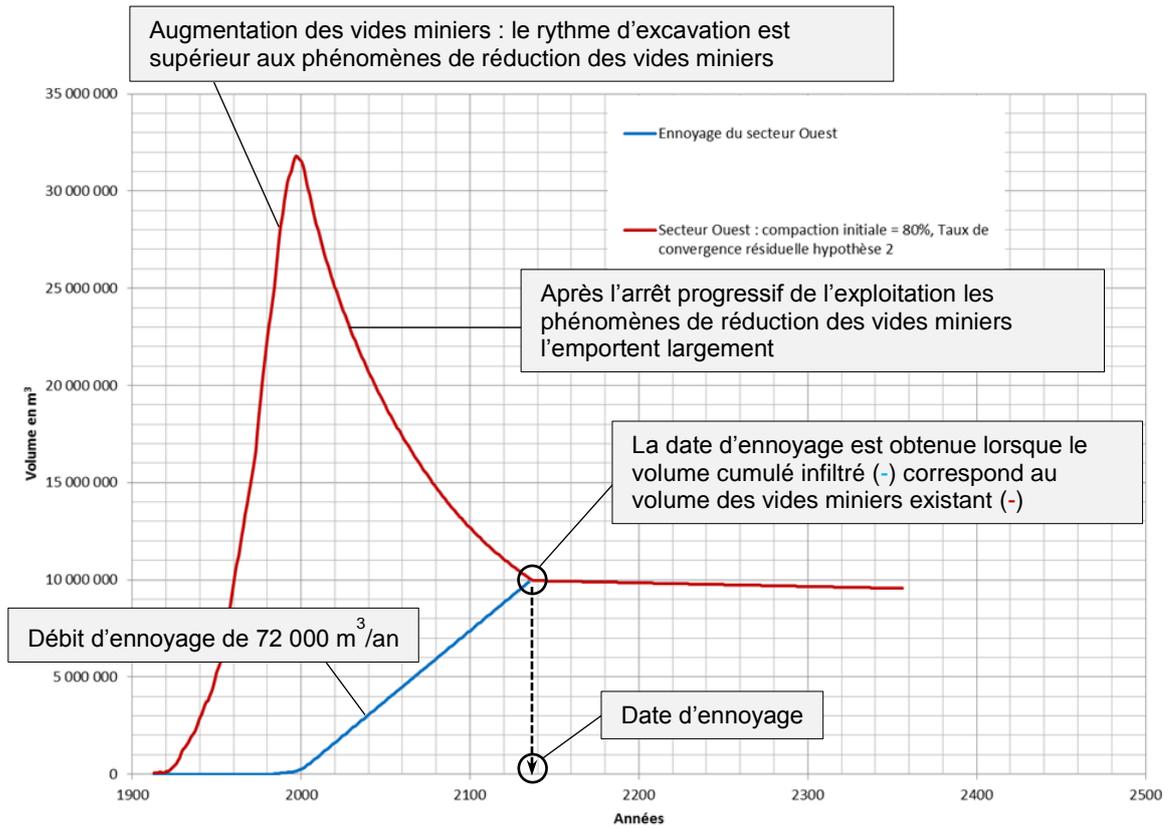


Figure 23. Evolution des vides après compaction initiale de 80% et date d'ennoyage – secteur Ouest

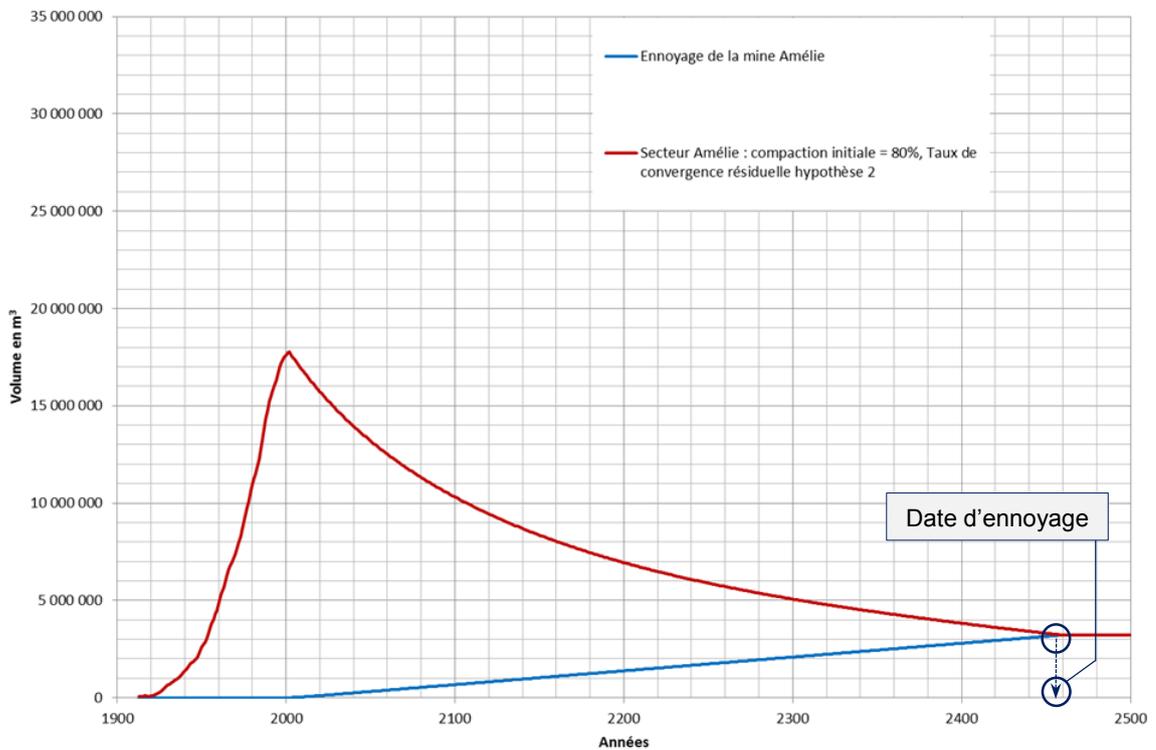


Figure 24. Evolution des vides après compaction initiale de 80% et date d'ennoyage – secteur Amélie

Les valeurs obtenues dans le calcul détaillé présenté ici et reposant sur une approche très sécuritaire aboutisse à des vitesses d'envoyage relativement inférieures à celles indiquées dans le Dossier de demande.

**Tableau 10. Evaluations de la vitesse d'envoyage : Dossier de demande et tierce expertise**

Secteur Ouest	Dossier de demande	Tierce expertise <i>(Calcul détaillé et approche sécuritaire avec une compaction initiale des terrains foudroyés de 80%)</i>
Atteinte du niveau du stockage	240 ans	72 ans
Envoiyage complet de la mine	300 ans	120 ans



## 4. SATURATION DU STOCKAGE PAR LA SAUMURE

### 4.1. INTRODUCTION

Le Dossier de demande considère que les barrages envisagés seront conçus de telle façon que la saumure polluée ne pourra sortir du stockage avant 1000 ans (i.e. après saturation des vides du stockage).

Le temps de saturation des vides disponibles dans le stockage dépend du débit d'infiltration et du volume des vides disponibles pour la saumure.

La seule évaluation de la performance des barrages (qui détermine le débit d'infiltration dans le stockage) et du volume des vides disponibles à la saumure dans le stockage (qui correspond à la porosité du coulis de remplissage et à celle des déchets) réside dans les études Itasca<sup>35</sup>.

Dans les paragraphes qui suivent, ces éléments sont analysés avant d'en déduire une évaluation du temps de saturation du stockage.

### 4.2. EVALUATION DE L'EVOLUTION DES VIDES DU STOCKAGE

#### 4.2.1. Caractéristiques initiales du stockage

##### 4.2.1.1. HYPOTHESE ITASCA

Les volumes initiaux des différentes parties du stockage sont connus de MDPA. Ils se répartissent de la façon suivante:

**Tableau 11. Volume initial du stockage (données MDPA)**

	Volume initial (m <sup>3</sup> )
galerie de service	51 764
blocs de stockage vides	73 150
blocs remplis par les déchets	118 041
bloc 15	16 940
Volume total du stockage	259 895

Le bloc 15 contient 1780 tonnes de déchets, qui représentent un volume de 3 939 m<sup>3</sup>. ITASCA considère un taux de remplissage de la partie occupée par les déchets de 67 % environ (comme pour les autres blocs), et en déduit que le volume du bloc 15 se décompose en 5 860 m<sup>3</sup> de blocs remplis par les déchets et 11080 m<sup>3</sup> de blocs vides.

ITASCA recalcule alors les volumes initiaux des différentes parties du stockage, en fonction des différents scénarios de déstockage envisagés. Les résultats sont synthétisés ci-après.

<sup>35</sup> Les éléments relatifs à la saturation des vides du stockage sont issus des études ITASCA ([86] | Itasca, 2015) ([76] | Itasca, 2013), qui tiennent compte des caractéristiques des barrages et du coulis de remplissage envisagés par MDPA

**Tableau 12. Répartition des volumes du stockage suivant les scénarios de déstockage (ITASCA)**

	Volume initiaux du stockage (m <sup>3</sup> )		
	sans destockage	scénario 56 %	scénario 93%
galerie de service	51 764	51 764	51 764
blocs de stockage vides	84 230	91 284	96 927
blocs remplis par les déchets	123 901	116 847	111 204
Total	259 895	259 895	259 895

Par ailleurs, le tableau suivant indique les quantités et volumes de déchets stockés, avant déstockage.

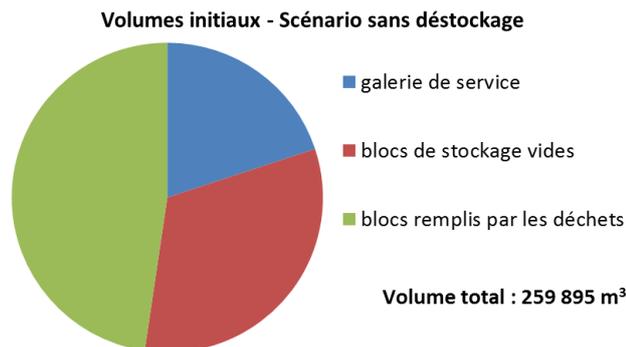
**Tableau 13. Répartition des déchets stockés sur le site de StocaMine (ITASCA)<sup>36</sup>**

	Déchets initialement présent dans le stockage			
	Quantité (tonnes)	Masse volumique (t/m <sup>3</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	%
Refiom	21 714	0.41	52 961	64%
Déchets amiantés	4 254	0.40	10 635	13%
Autres	19 689	1.00	19 689	24%
Total	45 657		83 285	100%

#### 4.2.1.2. ANALYSE CRITIQUE

Les valeurs des volumes initiaux du stockage données par ITASCA résultent de calculs simples réalisées à partir de données MDPa a priori fiables. Ces valeurs apparaissent ainsi vraisemblables.

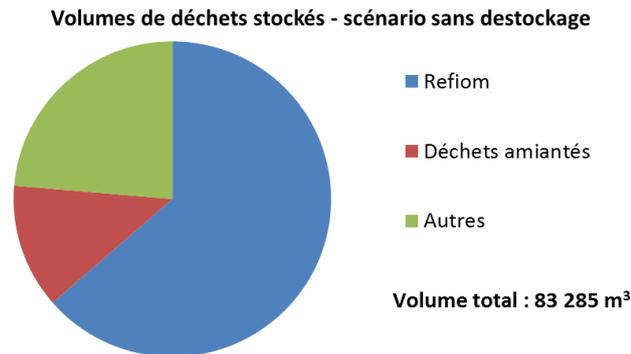
Le graphique ci-après représente la répartition des volumes initiaux du stockage pour le scénario sans déstockage.

**Figure 25. Répartition initiale des volumes du stockage (scénario sans déstockage)**

On constate que les blocs remplis de déchets représentent près de la moitié des volumes du stockage.

La répartition du volume de déchets par type de déchet est représentée sur la figure ci-après.

<sup>36</sup> Ces chiffres diffèrent légèrement par rapport à ceux indiqués dans le Dossier de demande (quantité totale de déchets = 43 970.96 t). Ceci aura cependant très peu d'impact pour l'évaluation des vides du stockage.



**Figure 26. Répartition des déchets stockés sur le site StocaMine**

Les Réfiom (résidus d'incinération) représentent ainsi 64% du volume de déchets stockés. La différence entre le volume de déchets stockés (83 285 m<sup>3</sup>) et le volume des blocs « remplis » par les déchets correspond au taux de remplissage moyen de ces blocs, d'environ 67%.

## 4.2.2. Evolution des vides du stockage avant ennoyage

### 4.2.2.1. HYPOTHESES ITASCA

#### Propriétés du coulis de remplissage

Le béton de remplissage envisagé par MDPA est un béton de cendres volantes. Des tests en laboratoire ont été réalisés sur des bétons de cendres de formulation identique ou proche de celle envisagée par MDPA<sup>37</sup>.

D'après les résultats des essais réalisés sur le coulis de formulation « Complex 94 », la porosité du coulis est d'environ 69%.

En considérant un comportement du coulis correspondant à un modèle élastoplastique parfait de Mohr-Coulomb, et en combinant les résultats des tests de laboratoire réalisés, ITASCA évalue les propriétés du coulis de remplissage. Les valeurs considérées par ITASCA sont synthétisées dans le tableau ci-après.

**Tableau 14. Propriétés du coulis de remplissage (ITASCA)**

Paramètre	Coulis de remplissage
Masse volumique : $\rho$	810 kg/m <sup>3</sup>
Module d'Young : E	225 GPa
Coefficient de Poisson : $\nu$	0,30
Angle de frottement : $\varphi$	30°
Cohésion : c	0,87 MPa
Dilatance : $\psi$	0°
Résistance en compression : R <sub>c</sub>	3 MPa
Résistance en traction : R <sub>t</sub>	0,25 MPa

<sup>37</sup> Il s'agit de tests réalisés d'une part, par le Laboratoire Génie Civil et Geoenvironnement de l'Université d'Arbois, sur un béton de formulation « Complex 2 », correspondant à la formulation indiquée par MDPA comme étant la plus pertinente, et d'autre part, par le LERM (Laboratoire d'étude et de Recherche sur les Matériaux), sur un béton de formulation « Complex 94 ».

Propriétés des déchets

Seuls les déchets de type Réfiom ont été caractérisé d'un point de vue mécanique en laboratoire<sup>38</sup>.

La porosité initiale des Réfiom est très élevée, de l'ordre de 84%.

Les résultats des essais réalisés sur ces déchets ont conduit ITASCA à considérer un modèle de comportement de Cam-Clay pour ces déchets. ITASCA a réalisé un calage sous le logiciel FLAC3D afin de reproduire au mieux les résultats des essais de laboratoire (résultats des essais œdométriques et des essais triaxiaux). Le jeu de propriétés obtenu est présenté dans le tableau ci-après.

**Tableau 15. Propriétés du modèle Cam-Clay pour la simulation des déchets REFIOM**

Description	Paramètre	Valeur
Masse volumique	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	410
Pente de la courbe de normale consolidation	$\lambda$ (-)	0,531
Pente de la courbe de re-compression	$\kappa$ (-)	0,106
Coefficient de Poisson	$\nu$ (-)	0,05
Pression de référence	$p_1$ (MPa)	0,003
Volume spécifique à la pression de référence sur la courbe de normale consolidation	$v_\lambda$	6,25
Coefficient du modèle	$M$	3,3

Les déchets Réfiom représentent 64% du volume des déchets du stockage. Le comportement des déchets amiantés et des déchets lourds peut être sensiblement différent, avec notamment pour les déchets amiantés un potentiel de compaction nettement supérieur aux déchets Réfiom.

Néanmoins, en première approximation, ITASCA extrapole les résultats obtenus sur les Réfiom à l'ensemble des déchets.

Fermeture du stockage : comportement du coulis

La fermeture des vides du stockage a été évaluée par ITASCA à partir de modèles locaux permettant de simuler l'évolution des vides dans les différentes configurations rencontrées dans le stockage :

- galerie de service partiellement remplies par le coulis,
- galeries des blocs de stockage partiellement remplies par le coulis,
- galeries des blocs de stockage partiellement remplies par les déchets.

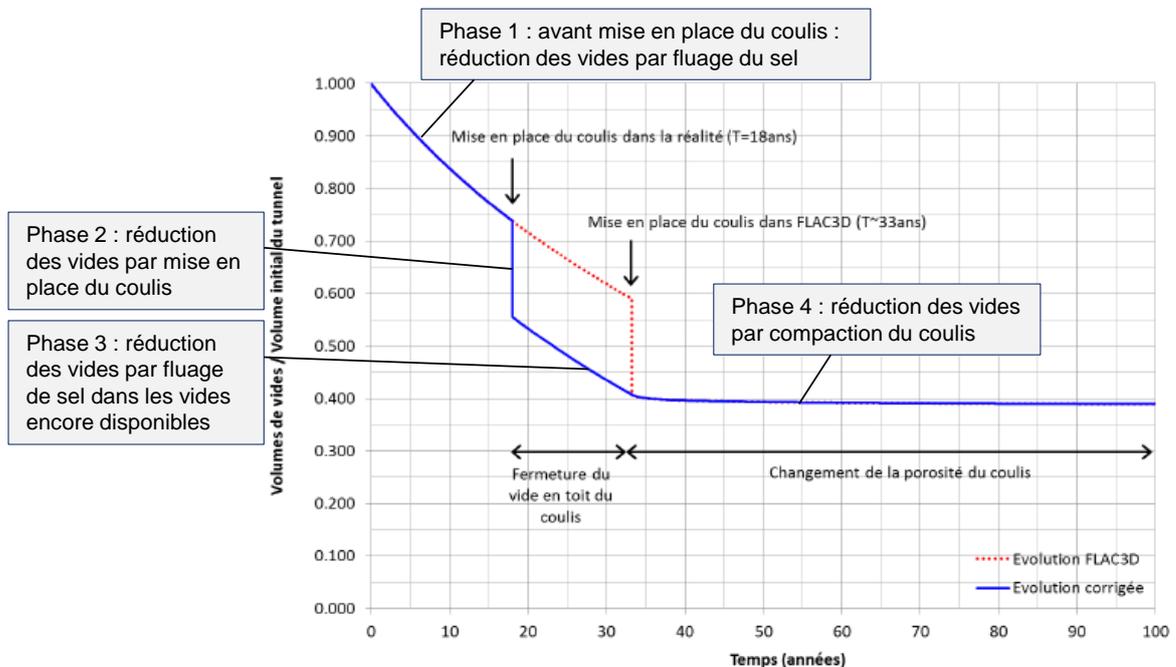
D'après MDPA, le taux de remplissage en coulis peut être estimé de l'ordre de 80% pour les blocs de stockage (ceux-ci étant quasiment horizontaux et donc plus difficiles à combler) et de 90% pour les galeries de services.

Les jeux de paramètres considérés pour les déchets et pour le coulis de remplissage sont ceux présentés précédemment. En particulier, la porosité initiale du coulis est considérée égale à 69%

<sup>38</sup> Il s'agit d'une campagne de mesures des propriétés physico-mécaniques des déchets Réfiom réalisée par ASGA-GeoRessources

(valeur issue des essais en laboratoire) et la porosité initiale des déchets est prise égale à la porosité mesurée sur les Réfiom, soit 84%.

Les résultats obtenus par ITASCA pour les galeries des blocs de stockage partiellement remplies par le coulis sont présentés ci-après.



**Figure 27. Evolution des vides dans FLAC3D et évolution des vides corrigée pour les galeries des blocs de stockage remplis par le coulis**

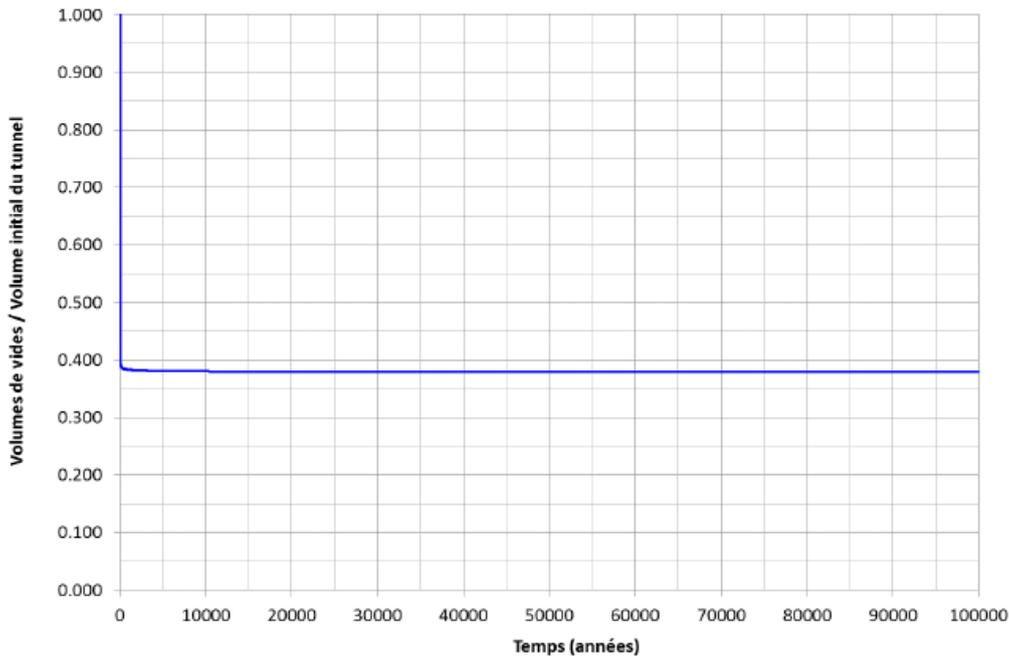
La date de mise en place des coulis envisagée par MDPa est de 18 ans après la réalisation des excavations. Pour des raisons numériques, la mise en place du coulis de béton a été décalée sous FLAC3D.

La courbe de réduction des vides obtenue a ensuite été corrigée. Cette courbe se décompose en 4 phases :

- Phase 1 : réduction des vides préalablement à la mise en place du coulis, pendant les 18 premières années, sous l'effet du fluage du sel. A  $t=18$  ans, le ratio de volume de vides résiduels par rapport au volume initial est d'environ 74%.
- Phase 2 : mise en place du coulis dans 80 % du volume disponible. A l'issue du remplissage, le ratio de volume de vides résiduels par rapport au volume initial est d'environ 55,5 % et se décompose de la façon suivante :
  - o Vides non remplis par le coulis :  $74\% \times 20\% = 14,8\%$
  - o Vides correspondant à la porosité du coulis :  $74\% \times 20\% \times 69\% = 40,8\%$
- Phase 3 : fermeture des vides en toit de coulis (disparition rapide des vides non remplis par le coulis par fluage du sel pendant environ 30 ans). Le ratio de volume de vides résiduels par rapport au volume initial est alors d'environ 40,8 % (correspondant à la porosité du coulis)

- Phase 4 : compaction du coulis sous l'effet du confinement et changement de porosité du coulis. A partir de cette date (t=38 ans environ), le coulis stabilise les parois du stockage et stoppe le fluage. L'évolution du volume des vides, liée à l'augmentation des contraintes sur le coulis, devient très lente en raison des propriétés mécaniques du coulis. Le ratio de volume de vides résiduels par rapport au volume initial est d'environ 39 % au bout de 100 ans et 38% au bout de 1000 ans (vides correspondant à la porosité du coulis)

La figure ci-après illustre la faible évolution du volume de vides sur le long terme.

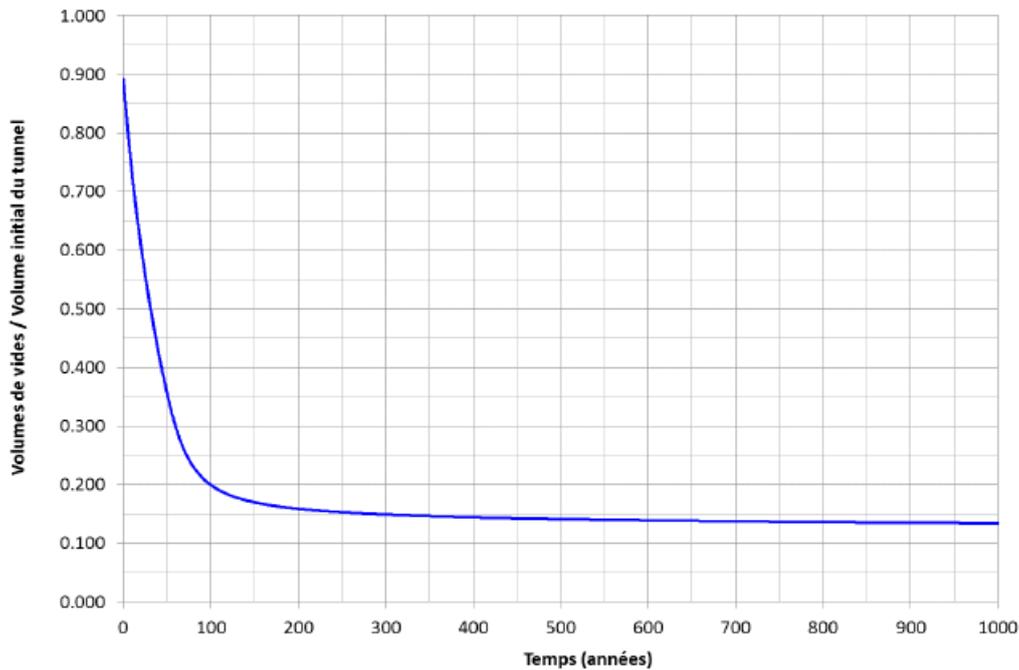


**Figure 28. Evolution à long terme des galeries des blocs de stockage remplis par le coulis**

Les courbes obtenues par ITASCA pour les galeries de service partiellement remplies de coulis sont similaires à celles obtenues pour les galeries des blocs de stockage remplis par le coulis. Le ratio de volume résiduel par rapport au volume initial calculé est d'environ 51 % au bout de 100 ans et 50 % au bout de 1000 ans (vides correspondant à la porosité du coulis). Cette différence s'explique du fait d'une réduction des vides moins importante pendant la première phase (avant mise en place du coulis), compte de tenue de la géométrie des galeries (il s'agit de voies doubles), et du fait d'un taux de remplissage par le coulis plus important (taux de remplissage de 90%).

#### Fermeture du stockage : comportement des déchets

Les résultats obtenus pour les blocs remplis de déchets sont présentés ci-après.



**Figure 29. Evolution des vides pour les blocs de stockage remplis de déchets**

Le taux de remplissage des blocs est de 67% environ. La porosité initiale des colis est considérée comme étant égale à celle des Réfiom, soit 84%. Le ratio initial de volume de vides par rapport au volume des blocs est de 89 % environ. Ces vides se décomposent de la façon suivante :

- Volume non rempli par les déchets : 33 %
- Volume correspondant à la porosité des déchets :  $67\% \times 84\% = 56,3\%$

Le volume des vides diminue relativement rapidement (pendant les 200 premières années) puis se stabilisent doucement sous l'effet du comportement des refioms. Le ratio de volume de vides résiduels par rapport au volume initial des blocs des blocs est d'environ 20% au bout de 100 ans et 13 % au bout de 1000 ans.

La figure ci-après illustre la faible évolution du volume de vides sur le long terme.

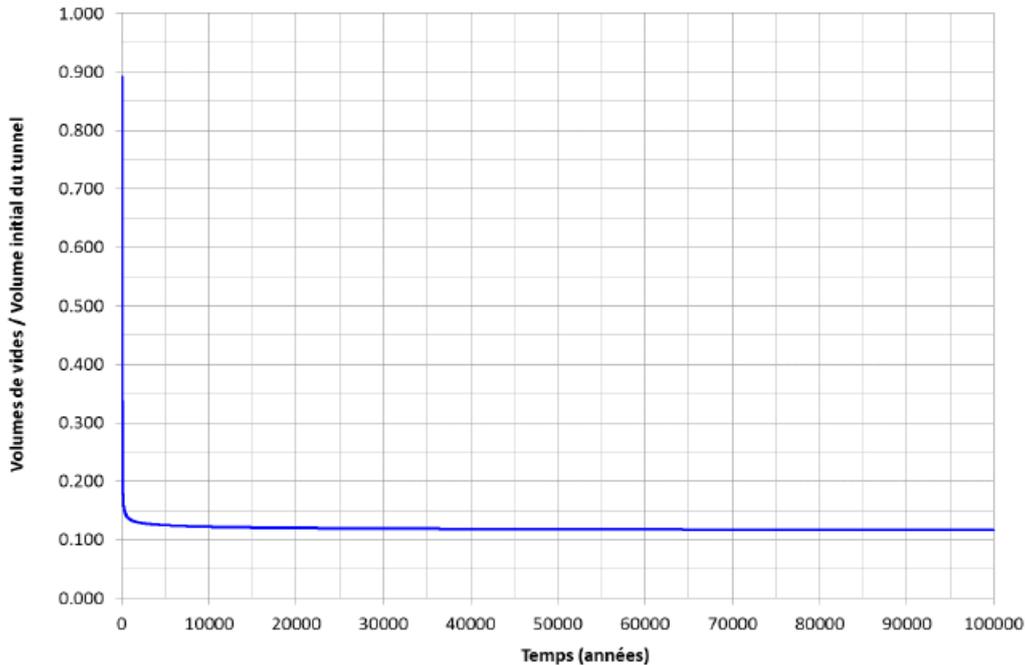


Figure 30. Evolution à long terme des vides pour les blocs de stockage remplis de déchets

Sur la base des résultats de ces modèles locaux, ITASCA a calculé l'évolution du volume de vides résiduels et du taux de compaction dans le stockage pour les scénarios de déstockage 56 % et 93%. Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 16. Volumes de vides résiduels du stockage pour les scénarios 56 % et 93 %

	Volume de vides résiduels (m <sup>3</sup> )	
	scénario 56%	scénario 93%
t = 1 000 ans	76 400	77 800
t = 100 000 ans	73 700	75 100

#### 4.2.2.2. ANALYSE CRITIQUE

##### Propriétés du coulis de remplissage

Les types et les propriétés de coulis de remplissage sont discutés dans le rapport *Géomécanique* de la tierce-expertise. Les conclusions sont rappelées ci-dessous.

« [...] les mesures planifiées [relatives au remplissage] doivent être spécifiées plus en détail pour éviter de « nouveaux » impacts négatifs. En effet, les options de matériaux avec des mortiers de remplissage se composent de quantités significatives d'eau, qui sera extraite par pression au cours de la convergence, directement dans la zone de stockage.

- **La réalisation d'un remblai « sec » est impérative du point de vue de la sûreté.**

Les autres options de matériaux de remblayage sont, par exemple, le sel broyé, du gravier ou des matériaux à grains fins (par exemple, des cendres volantes, qui peuvent être déposées par un procédé pneumatique dans les vides du stockage). »

##### Propriétés des déchets

ITASCA a calé les propriétés des Réfiom à partir de tests réalisés en laboratoire et a considéré en première approximation ces propriétés comme valables pour l'ensemble des déchets. Or, les déchets amiantés et déchets « lourds » ne présentent à l'évidence pas le même comportement que les Réfiom, qui présentent des caractéristiques intéressantes en terme de résistance à la compaction et de maintien d'une certaine porosité.

Il est ainsi probable que la porosité résiduelle dans les déchets amiantés et lourds soit inférieure à la porosité résiduelle dans les Réfiom, ce qui aboutira à un volume de vides résiduel dans le stockage inférieur à ce qui est calculé par ITASCA.

Dans le paragraphe suivant, l'hypothèse d'une porosité résiduelle très faible est testée, de façon à évaluer l'impact de ce paramètre sur l'évolution des vides du stockage.

#### Fermeture du stockage

ITASCA considère pour de la fermeture du stockage les scénarios de déstockage de 56 % et 93%. Toutefois, dans le cadre des options étudiées en termes d'impact sur la nappe d'Alsace, le scénario sans déstockage a également été pris en compte.

L'évolution des vides du stockage dans le cadre du scénario 0% est ainsi calculée ici, sur la base des résultats des modèles locaux d'ITASCA :

- dans un premier temps, en considérant, comme ITASCA, que l'ensemble des déchets se comportent comme les Réfiom (scénario 0%),
- dans un second temps, en considérant que la porosité résiduelle dans les déchets amiantés et lourds sera négligeable (scénario 0% bis).

Les résultats sont présentés ci-après.

**Tableau 17. Calculs des volumes de vides résiduels du stockage pour le scénario 0%**

	<b>Scénario 0%</b> <b>prise en compte de tous les blocs remplis par les déchets</b>		
	Ratio vides résiduel / volume initial (1000 ans)	Volume initial (m <sup>3</sup> )	Vides résiduel (m <sup>3</sup> ) t=1000 ans
galerie de service	50%	51 764	25 882
blocs de stockage vides	39%	84 230	32 429
blocs remplis par les déchets	13%	123 901	16 107
<b>Total</b>		<b>259 895</b>	<b>74 418</b>
	<b>Scénario 0% bis</b> <b>prise en compte des blocs remplis par les réfioms uniquement</b>		
	Ratio vides résiduel / volume initial (1000 ans)	Volume initial (m <sup>3</sup> )	Vides résiduel (m <sup>3</sup> ) t=1000 ans
galerie de service	50%	51 764	25 882
blocs de stockage vides	39%	84 230	32 429
blocs remplis par les déchets	13%	78 800	10 244
<b>Total</b>		<b>214 794</b>	<b>68 555</b>

En considérant les taux de compaction indiqués par ITASCA, les volumes de vides résiduels à  $t=100\ 000$  ans sont d'environ  $71\ 400\ \text{m}^3$  dans le premier cas, et  $65\ 800\ \text{m}^3$  dans le second cas.

Le tableau ci-après synthétise les volumes de vides résiduels en fonction des hypothèses considérées.

**Tableau 18. Volumes de vides résiduels du stockage en fonction des scénarios**

	Volume de vides résiduels ( $\text{m}^3$ )			
	scénario 56%	scénario 93%	scénario 0%	scénario 0% bis
t = 1 000 ans	76 400	77 800	74 400	68 550
t = 100 000 ans	73 700	75 100	71 400	65 800

### 4.3. EVALUATION DES DEBITS D'INFILTRATION DANS LE STOCKAGE

Une fois que la saumure a saturé les vides miniers inférieurs et qu'elle arrive aux portes du stockage, elle commence à s'infiltrer au travers des barrages du fait de la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur du stockage.

Assez rapidement (entre 60 et 80 ans selon [86] p. 22 | Itasca, 2015)<sup>39</sup>, la saumure atteint la pression hydrostatique de 6 MPa à l'extérieur du stockage, et s'infiltrer au travers des barrages.

En effet, en quelques dizaines d'années la perméabilité du sel redevient nulle, même dans la zone endommagée par l'excavation ([86] p. 22 | Itasca, 2015) (Cf. également le rapport *Géomécanique* de la tierce expertise). Les perméabilités non-nulles qui permettent l'écoulement sont alors celles des barrages et des couches de marnes que le stockage recoupe.

Par ailleurs, les calculs effectués par Itasca montrent que infiltration de saumure au travers des couches de marnes est globalement négligeable ([86] p. 29 | Itasca, 2015).

L'infiltration se fait alors uniquement au travers des barrages. Les paramètres pris en compte pour le calcul des débits d'infiltration sont les suivants :

- surface totale de  $660\ \text{m}^2$  perpendiculairement à l'écoulement,
- barrages : un noyau de 5 m de bentonite,
- perméabilité des barrages :  $10^{-18}\ \text{m}^2$  pour les barrages en bentonite et de  $10^{-19}\ \text{m}^2$  pour les barrages en béton Sorel.

Les calculs montrent qu'en régime permanent (i.e. lorsque que la pression de saumure a atteint 6 MPa), les débits varient de  $1,41\ \text{m}^3/\text{an}$  pour des barrages en béton Sorel, à  $13,55\ \text{m}^3/\text{an}$  pour les barrages en bentonite ([86] p. 29 | Itasca, 2015).

*Note : Le remplissage des galeries à l'amont des barrages par du sel concassé (option ne faisant pas partie du Dossier de demande) devrait permettre de réduire considérablement ces débits : en effet, les essais de laboratoire ont montré que le sel concassé retrouvait les propriétés hydrauliques du sel massif (i.e. une perméabilité quasi nulle, voire nulle), en moins d'une centaine d'années. La présence d'un massif de sel de 20 m en amont des barrages permettrait alors de*

<sup>39</sup> Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que ce qui a été évalué par la tierce expertise (Cf. §3. avec une durée entre l'arrivée de la saumure au niveau du stockage et l'ennoiement total de la mine variant de 50 à 80 ans suivant les hypothèses de compaction initiale des tailles foudroyées considérées (pour l'ensemble du secteur ouest)

garantir l'étanchéité du stockage à l'infiltration de la saumure (Cf. analogues naturel présentés par rapport Géomécanique de la tierce expertise).

#### 4.4. EVALUATION DU TEMPS DE SATURATION DU STOCKAGE

Dans une approche considérée comme sécuritaire (§3.2.1.1.c, p100 de l'annexe 4 de l'étude d'impact), le Dossier de demande indique que les barrages seront conçus de façon à ce que la saumure polluée se puisse sortir du stockage avant 1000 ans pour que les effets sur la nappe soient acceptables. Cette date de 1000, prise comme référence sur la base du résultat que l'on veut obtenir n'est pas cohérente avec le projet présenté (c'est-à-dire avec des barrages tels que présentés au paragraphe 6.1.2.1 de l'étude d'impact et un remblayage des vides du stockage présenté au paragraphe 6.1.2.4.).

En effet, il a été montré que les propriétés hydrauliques des barrages atteignent leur pleine efficacité après environ 30 années. La perméabilité globale des barrages envisagés sera alors de l'ordre de  $10^{-18} \text{ m}^2$ .

Quelques soient les hypothèses d'ennoyage, les barrages auront atteint leur maximum d'intégrité hydromécanique à l'arrivée de la saumure.

Une mesure de comblement par un coulis poreux sera réalisée dans les galeries et voies vides (tel qu'indiqué aux paragraphes 3.2.3 de la demande et 6.1.2.4 de l'étude d'impact du projet).

Itasca a alors calculé par simulation numérique que l'ennoyage du stockage serait effectif dans environ 6 000 ans ([86] | Itasca, 2015) dans le cas retenu d'un barrage en bentonite.

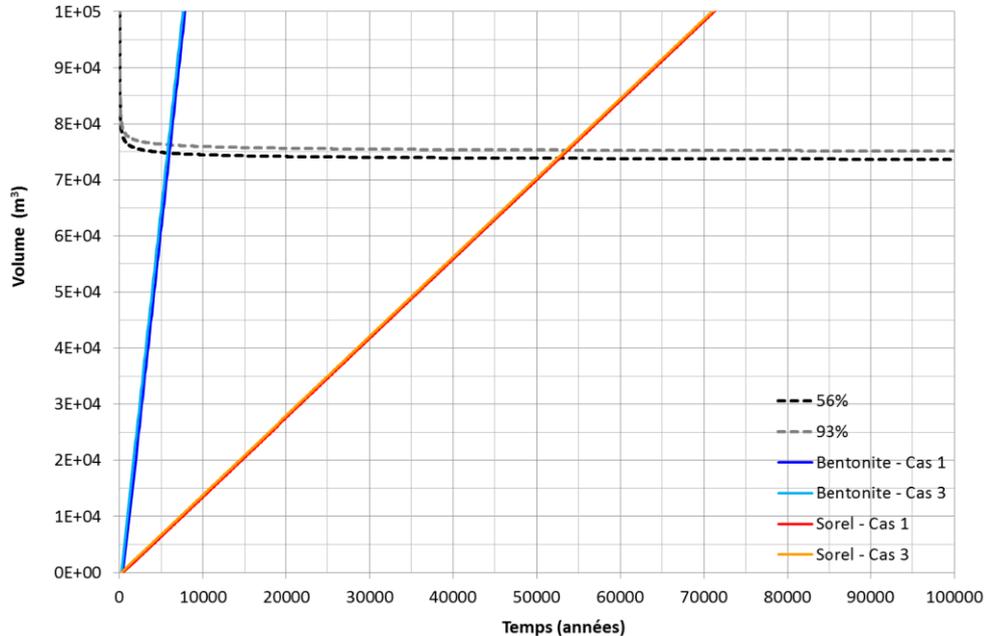


Figure 31. Evolution des vides et ennoyage dans le stockage ([86] | Itasca, 2015)

Note : Il peut être noté que dans le cas d'un barrage en béton SOREL le temps de saturation du stockage dépasse les 50 000 ans.

La tierce expertise recommande de prendre en compte dans le Dossier de demande, l'évaluation détaillée et argumentée du temps de saturation du stockage faite par Itasca.



## 5. TRANSFERT DE SAUMURE VERS LA NAPPE D'ALSACE

### 5.1. DEBIT DE SAUMURE POLLUEE EN SORTIE DU STOCKAGE

#### 5.1.1. Débit entraîné par une différence de pression entre l'amont et l'aval

Dans les schémas sans barrage hydraulique, ([86] | Itasca, 2015), ([28] | Mica Environnement, 2004) la possibilité d'entraînement de la saumure polluée par la différence de charge hydraulique qui existe entre l'amont et l'aval de la mine a été étudiée. Il a été montré que ce phénomène n'est pas prépondérant comparativement au phénomène d'expulsion de la saumure par la poursuite de la compaction du stockage. Ce point est précisé dans le rapport principal de la tierce expertise au §8.2.2.

Dans le schéma avec présence de barrages (schéma considéré dans le Dossier de demande), les différences de charges entre l'amont et l'aval du stockage seront beaucoup plus faibles qu'entre l'amont et l'aval de la mine, ce phénomène est donc d'autant plus négligeable.

#### 5.1.2. Débit expulsé par la poursuite de la compaction du stockage

La saumure polluée peut être expulsée par la poursuite de la compaction des matériaux poreux exogène (coulis et déchets) du stockage sous réserve que les pertes de charges dues à la faible perméabilité du barrage soient négligeables.

##### Impact des pertes de charges dues au barrage

L'INERIS ne considère pas de pertes de charges, alors qu'Itasca les évalue. Les différents calculs effectués considèrent comme négligeable la perte de charge du fluide lors de son passage à travers les barrières. En effet, Itasca calcule ces pertes de charges comme étant égales à 33 kPa (à comparer avec une contrainte déviatorique de 6.1 MPa) avec les hypothèses suivantes ([86] p. 74 | Itasca, 2015).

*Note : On notera qu'avec une perméabilité de  $10^{-21} \text{ m}^2$ , que la barrière de sel concassé devrait retrouver après moins d'une centaine d'année, la perte de charge devient de 72 MPa selon ces mêmes hypothèses : les pertes de charges deviennent supérieures à la contrainte des terrains et devrait donc empêcher la sortie de la saumure polluée. D'où l'intérêt potentiel d'étudier la possibilité de mise en place de barrage de sel concassé (crushed salt).*

##### Date à laquelle la saumure polluées est expulsée et débit de sortie associé (Dossier de demande)

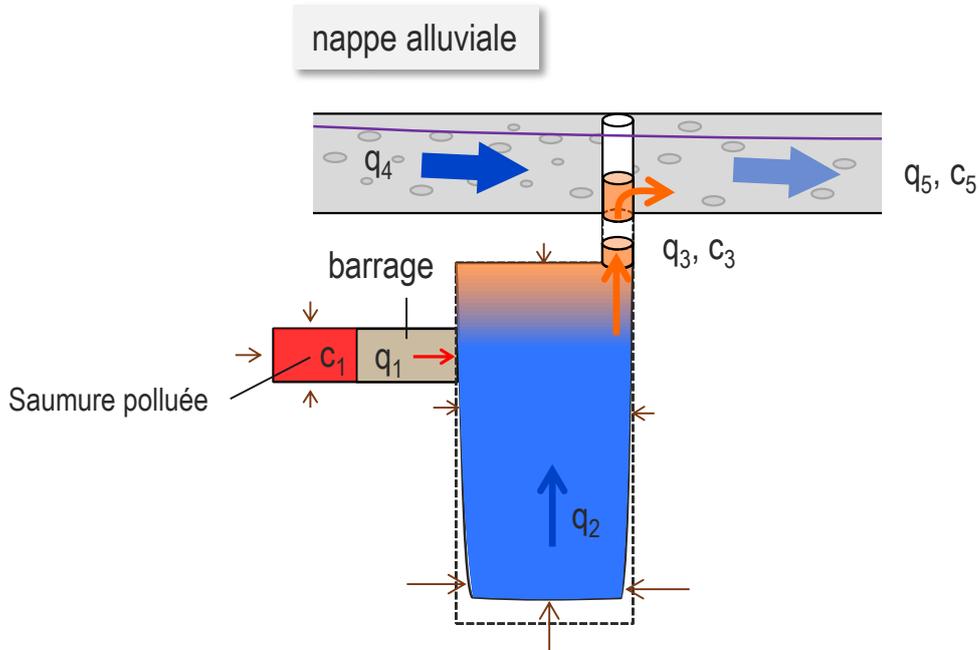
Le Dossier de demande considère l'hypothèse que la saumure polluée sera expulsée du stockage 1000 ans après l'ennoiement total de la mine.

Pour ce qui concerne le débit de saumure pollué qui sort des barrages, ni le Dossier de demande, ni les rapports Ineris n'indiquent la valeur de ce débit ou le mode de calcul.

La seule valeur disponible est la concentration de mercure résultant de la dilution de la saumure polluée en sortie de barrage avec la saumure saine.

Ce débit de sortie de saumure polluée ( $q_1$  de la figure ci-dessous) a alors été 'reconstitué' par la tierce expertise comme étant le débit qui multiplié par la concentration en mercure dans le stockage (7.5 g/l) et divisé par le débit d'épanchement de saumure pris en compte (i.e.  $q_1 + 171 \approx 171 \text{ m}^3/\text{an}$ ) donne la concentration en sortie de puits indiquée dans le rapport [69], i.e. 120 µg/l.

Ceci est illustré par la figure ci-après.



**Figure 32. Paramètres de calcul des concentrations dans les différents compartiments souterrains**

Ainsi le flux massique est estimé comme suit :

$$c_1 \cdot q_1 = q_3 \cdot c_3 \approx q_2 \cdot c_3$$

et,

$$q_1 = c_3 \cdot q_2 / c_1 = (1.2 \cdot 10^{-4} \text{ g/l} \times 171 \text{ m}^3/\text{an}) / 7.5 \text{ g/l} = 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{an}$$

Le débit de saumure polluée en sortie du stockage à  $t = t_0 + 1000$  ans est égal à  $q_1 = 2.7 \text{ l/an}$ .

Ce débit apparaît extrêmement faible par rapport au débit calculé par Itasca où  $q_1 = 12 \text{ l/an}$  (Cf. plus loin) à  $t \approx 20\,000$  ans (alors qu'Itasca prend en compte l'impact d'une faible compressibilité du remblai dans l'estimation du débit de sortie de la saumure polluée).

Par ailleurs, les équations utilisées et les valeurs des paramètres de celles-ci permettant d'aboutir à cette valeur de 2.7 l/an ne sont pas indiquées.

Quant aux phénomènes pris en compte ils diffèrent entre :

- le Dossier de demande qui indique que :  
« La réduction de volume de vide par unité de temps correspondant au débit de saumure polluée qui pourrait sortir du stockage » (Cf. §5.2 annexe 4 du Dossier de demande)
- et le rapport Inéris [69] qui précise que la fuite de saumure polluée à travers les barrières est due à « l'interaction (couplage) entre le comportement hydraulique (percolation de la

saumure polluée à travers les barrières, régie par la loi d'écoulement de Darcy) et le comportement mécanique (fluage du sel et compaction des déchets)» (Cf. §6.1.3).

Ce point est particulièrement pénalisant en termes d'analyse du Dossier de demande notamment par ce qu'il conditionne fortement l'appréciation de l'évaluation globale de l'impact du projet sur la nappe phréatique.

Date à laquelle la saumure polluée est expulsée et débit de sortie associé (études Itasca)

Itasca examine les différents phénomènes après la saturation du stockage, notamment l'influence de l'augmentation de la pression de saumure (qui induit une réduction du taux de fermeture des vides)<sup>40</sup>, et la dynamique de remplacement de la saumure saine par la saumure polluée au sein des barrages.

« Notons, qu'au moment de l'envoyage complet du stockage, les barrages sont remplis de saumure « saine », non contaminée. L'expulsion de la saumure contaminée à l'extérieur des barrages nécessite donc le remplacement de ce fluide « sain » par de la saumure contaminée. Cela introduit un décalage important de la date de sortie de la saumure, qui dépend de la vitesse de fermeture du stockage ainsi que du volume de fluide que les barrages peuvent contenir. Cela représente environ 990 m<sup>3</sup> pour le cas des barrages en bentonite en considérant un volume de barrages d'environ 3300 m<sup>3</sup> avec une porosité de 30%. Les barrages en béton Sorel, dont la porosité est nettement plus faible (7%), contiennent seulement 231 m<sup>3</sup> de fluide. »

Pour prendre en compte le fait que le front d'avancement, n'est pas uniforme et également de façon sécuritaire Itasca considère 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<sup>3</sup> pour les barrages en bentonite et 115 m<sup>3</sup> pour les barrages en béton Sorel<sup>41</sup>.

In fine la date de sortie de saumure polluée calculée par Itasca est très supérieure à l'hypothèse de l'INERIS (>20 000 ans / 1000 ans). Cependant le débit de sortie de saumure polluée indique par l'INERIS (2.7 l/an) est paradoxalement très inférieur à celui calculé par Itasca (12 l/an – Cf. tableau ci-dessous).

**Tableau 19. Barrages en bentonite - Année et débit de sortie de la saumure (Itasca)**

<b>Barrages en bentonite</b>	
Date d'envoyage du stockage (ans)	5 740
Volume de vides à l'envoyage (m <sup>3</sup> )	74 805
Date de sortie de la saumure contaminée (ans)	21 340
Flux potentiels de saumure contaminée (m <sup>3</sup> /an)	0,012

Le débit indiqué ici (Cf. tableau ci-dessus) va décroître avec le temps puisqu'il atteint une valeur de 1.85 l/an au bout de 100 000 ans (Itasca).

<sup>40</sup> La pression induit une réduction du taux de fermeture des vides dans les déchets plus importante que l'augmentation correspondante dans le coulis due au développement de la plasticité

<sup>41</sup> Itasca n'a pas tenu compte du temps nécessaire pour que la saumure polluée migre du lieu de dissolution vers le barrage le plus proche – selon Itasca, ce temps peut être important si les galeries d'accès sont remplies de coulis (approche sécuritaire)

## 5.2. DEBIT DE SAUMURE SAIN EN PROVENANCE DES VIDES MINIERS ET DILUTION

Selon le Dossier de demande, le débit de saumure saine en provenance des vides miniers suit la courbe suivante :

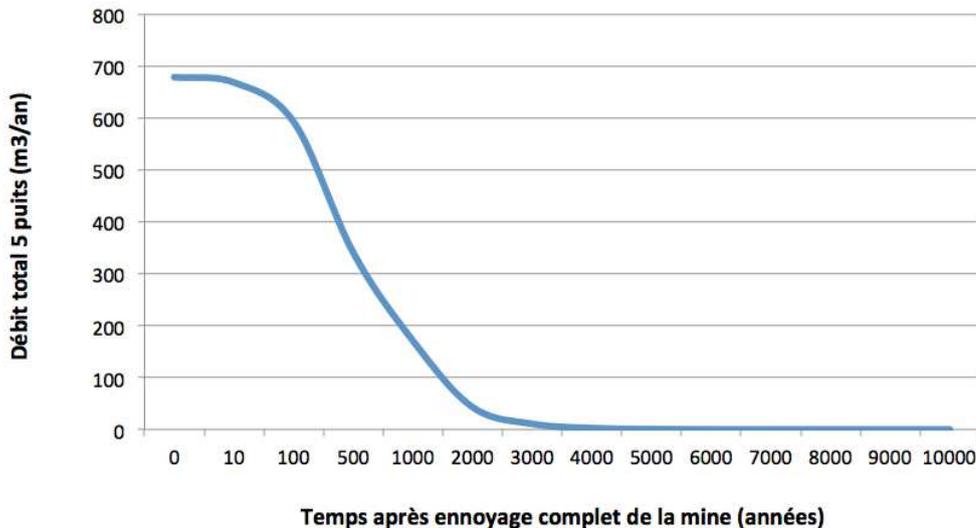


Figure 33. Hypothèse d'évolution du débit de saumure en provenance des vides miniers en fonction du temps, (MDPA, 2015b)

L'Inéris considère que le débit de saumure expulsé par les 5 puits de la mine Amélie va diminuer de 680 m<sup>3</sup>/an à la fin de l'ennoyage (t<sub>0</sub>) à 171 m<sup>3</sup>/an 1000 ans plus tard (t= t<sub>0</sub> + 1000 ans) (Cf. Annexe 1 du rapport [69] et figure ci-dessus).

L'Inéris ne précise pas comment est évaluée cette forte réduction des débits d'épanchement de saumure ni le passage instantané d'un débit évalué à partir d'un taux de convergence des tailles foudroyées ennoyées à des débits évalués de façon différente.

L'évolution des débits après la date d'ennoyage prise en compte dans l'étude d'impact du projet est indiquée dans le rapport BRGM, 2011 :

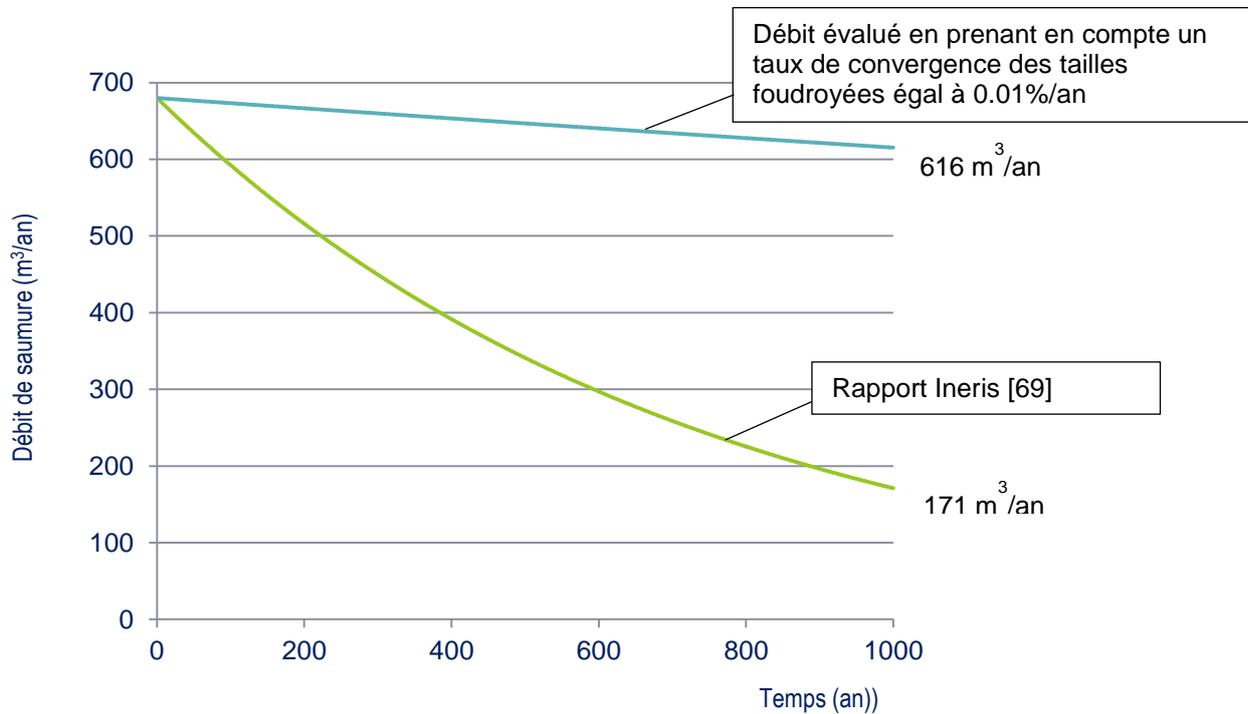
$$Q=Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \text{ avec } Q_0 = 680 \text{ m}^3/\text{an} \text{ à } t = t_0 \text{ et } \alpha = 0.138 \%$$

A titre d'illustration, les évolutions du débit d'épanchement de saumure sont présentées ci-après, sur la base d'un débit initial de 680 m<sup>3</sup>/an, en prenant en compte 1) une vitesse de convergence des tailles foudroyées ennoyées de 0.01%/an sur l'ensemble de la période t<sub>0</sub> – t<sub>0</sub> +1000 ans, 2) l'évolution indiquée dans le rapport [69].

Il apparaît ainsi que l'évolution du débit d'épanchement de saumure considéré<sup>42</sup> ne prend pas en compte les taux de convergence de l'INERIS.

La baisse du débit de saumure du rapport [69] peut paraître surprenante dans la mesure où il est considéré (notamment dans le Dossier de demande) que la réduction des vides miniers sera très faible une fois que ceux-ci sont totalement ennoyés.

<sup>42</sup> Pour estimer l'impact du projet sur la qualité de l'eau de la nappe d'Alsace



**Figure 34. Evolutions du débit de saumure via les 5 puits de la mine Amélie selon différentes hypothèses**

Pour analyser la pertinence de cette évaluation, nous avons utilisé la feuille de calcul présentée au §3.4 (évaluation de la dynamique de réduction des vides miniers).

Comme cela a été vu précédemment, ce calcul de réduction des vides miniers prend en compte la saturation des vides par la saumure en divisant les taux de convergence par 23. Les figures suivantes présentent l'évolution des vides miniers une fois la mine envoyée et également le débit de saumure expulsée correspondant pour le secteur Amélie isolé et pour l'ensemble du secteur ouest.

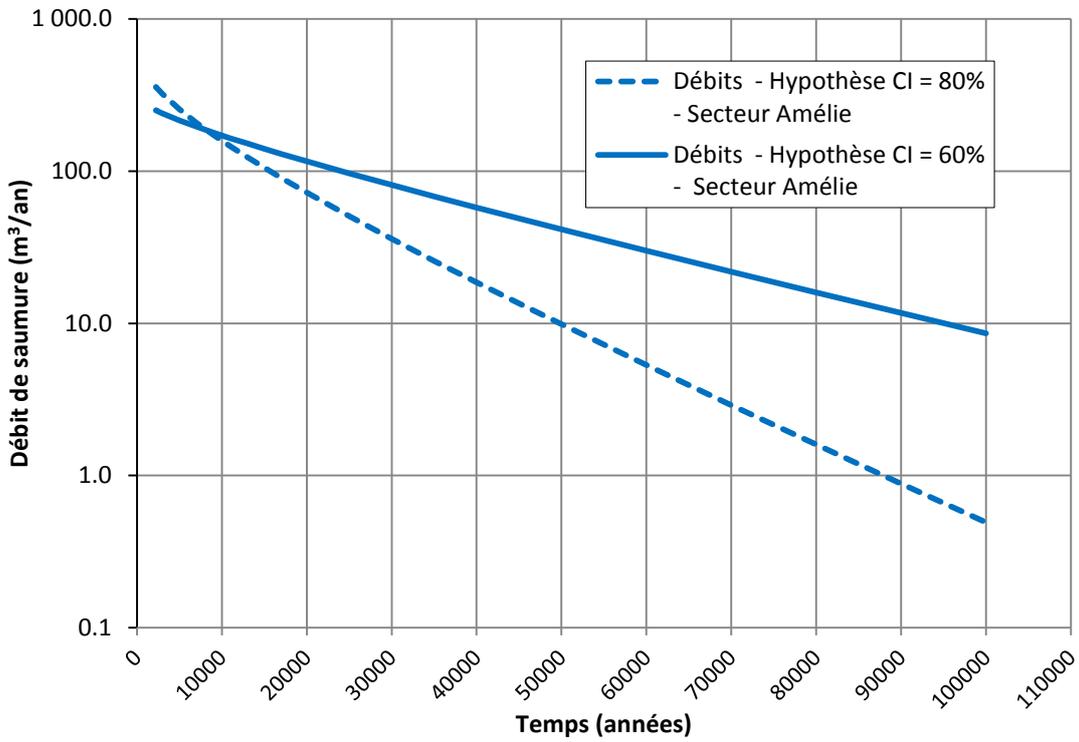


Figure 35. Evolutions du débit de saumure saine pour le secteur Amélie

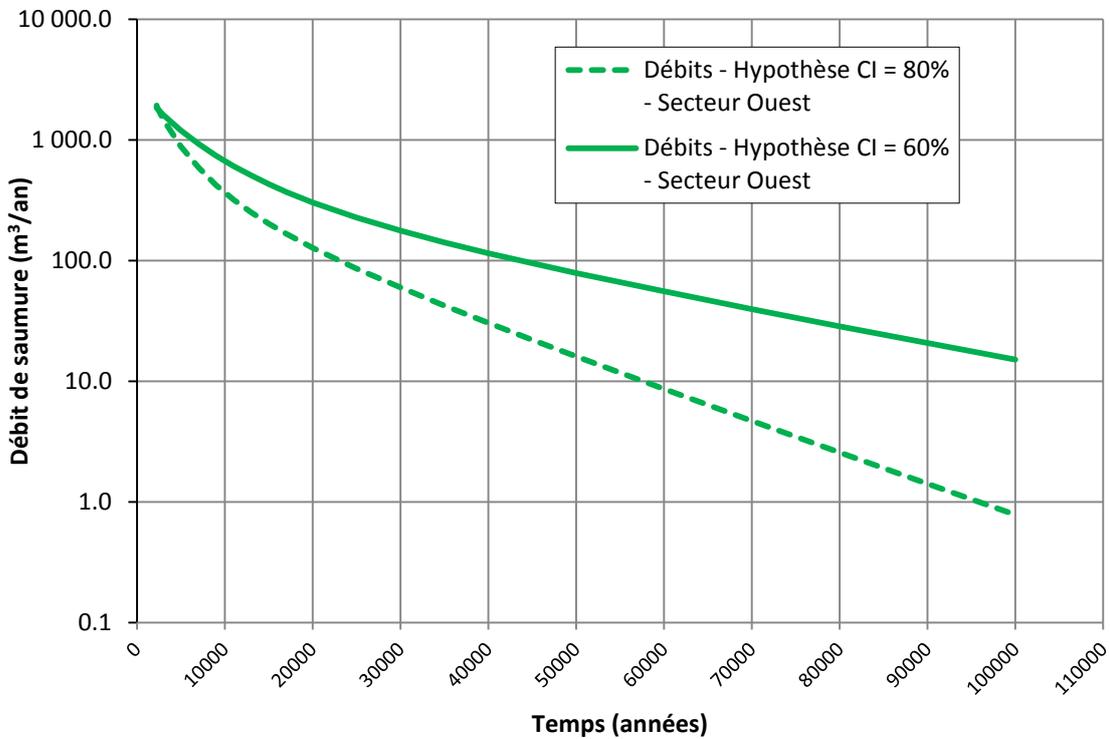


Figure 36. Evolutions du débit de saumure saine pour le secteur Ouest

On estime ainsi que dans environ 21 000 ans<sup>43</sup>, le débit de saumure au sortir de la mine sera globalement compris entre 70 m<sup>3</sup>/an et 120 m<sup>3</sup>/an si la mine Amélie est isolée, et de 150 m<sup>3</sup>/an à 350 m<sup>3</sup>/an si l'ensemble du secteur Ouest est connecté.

Cela correspond à environ 15 à 25 m<sup>3</sup>/an par puits dans le cas de la mine Amélie seule ou environ 10 à 25 m<sup>3</sup>/an si l'ensemble du secteur Ouest est connecté<sup>44</sup>.

---

<sup>43</sup> Date de sortie des barrages de la saumure polluée évaluée par Itasca

<sup>44</sup> L'hypothèse la plus pénalisante étant de considérer l'ensemble du secteur ouest ce qui induit un débit de sortie de saumure de la mine par puits (et donc un effet de dilution) le plus faible. Cette hypothèse correspond à un débit de saumure atteignant la nappe d'Alsace de 10 m<sup>3</sup>/an par puits.



## 6. DILUTION DANS LA NAPPE D'ALSACE

Dans le cas où la saumure polluée atteindrait la nappe d'Alsace, celle-ci apparaîtrait a priori de manière assez localisée au voisinage des puits qui constituent alors les exutoires du bloc-hôte. Il se formerait alors un panache de pollution par dilution dans l'écoulement de la nappe.

La qualité de l'eau en nappe dépendra alors du flux de polluants de l'effluent atteignant la nappe et des caractéristiques de l'aquifère.

### 6.1. HYPOTHESES DU DOSSIER DE DEMANDE

L'épanchement de la saumure polluée dans la nappe alluviale a été évalué par le BRGM à l'aide d'un modèle numérique des écoulements souterrains. Ce modèle a été développé initialement pour évaluer l'effet de la salure de la nappe par les terrils du bassin potassique (BRGM, 1998), (BRGM, 2006).

Cette modélisation utilise le logiciel Marthe qui résout les équations des écoulements souterrains par la méthode des différences finies. Le modèle est discrétisé en mailles carrées de 500 m de côté, affinées à 125 mètres au droit du bassin potassique.

Les formations alluviales sont représentées en 3 couches de lithologies distinctes : alluvions récentes, alluvions anciennes et alluvions de base. Au droit du site cependant, les paramètres hydrodynamiques sont relativement homogènes au sein des 3 couches.

Le modèle simule les aspects hydrodynamiques (flux d'eau) et hydrodispersifs (transports de l'eau saumâtre) des écoulements souterrains. Le calcul du transport du sel ne prend en revanche pas en compte les effets densitaires.

Le calage du modèle a été effectué sur la période 1978-2004 et se base sur:

- les informations piézométriques interprétées (carte piézométrique de juin 2002),
- les chroniques piézométriques,
- les informations de débits de la Thur et de l'III,
- les cartes et chroniques de salinité de la nappe,

Le calage montre que les gradients et les directions d'écoulements sont globalement bien reproduits. Les variations piézométriques saisonnières et à long terme sont également correctement reproduites. Les débits de base des rivières Thur et III, qui correspondent principalement aux apports de la nappe, sont bien restitués par le modèle.

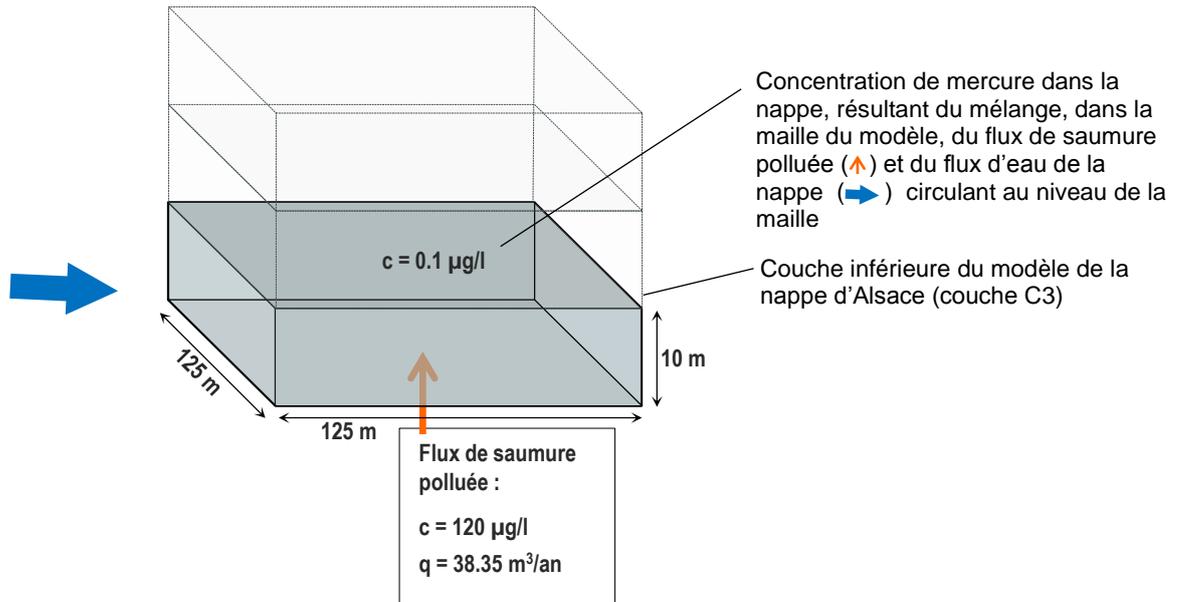
Le calage du transport de l'eau saumâtre montre une plutôt bonne reproduction de l'évolution dans le temps des mesures de salinité en plusieurs points. On notera en revanche que la largeur des panaches de salinité est généralement surestimée dans les simulations.

Les simulations d'impact de l'épanchement de la saumure polluée (BRGM, 2010)([62] | BRGM, 2011) sont réalisées à partir d'un état hydrodynamique permanent (écoulement moyen). Les effets densitaires ne sont pas pris en compte. On remarque une différence pour les valeurs de dispersivité indiquées dans les rapports ([62] | BRGM, 2011), i.e. de 100 m pour la dispersivité longitudinale et de 10 m pour la dispersivité transversale, et (BRGM, 1998), i.e. de 50 m pour la dispersivité longitudinale et de 5 m pour la dispersivité transversale.

Le flux de saumure polluée<sup>45</sup> sortant de chacun des 5 puits de la mine Amélie<sup>46</sup> est ensuite introduit, dans le modèle régional de la nappe d'Alsace élaboré par le BRGM.

Les concentrations résultantes, dans la maille<sup>47</sup> où est introduit le flux de saumure polluée, sont données dans le tableau 29 de l'annexe 4, pour les différents contaminants considérés et dans le cas du scénario 93%.

La figure ci-dessous illustre la concentration en mercure obtenue dans la nappe en sortie du puits Amélie 1 dans le cas du scénario 0%.



**Figure 37. Débit<sup>48</sup> et concentration de mercure émergeant du puits Amélie 1 et concentration en mercure dans la nappe – scénario 0% (rapports INERIS)**

L'approche développée par l'Ineris conduit à des concentrations maximales au niveau du puits Amélie 1, avec une concentration de mercure de  $0.007 \mu\text{g/l}$  dans le cas du scénario 93% et  $0.1 \mu\text{g/l}$  dans le cas du scénario 0% (Cf. figure ci-dessus).

La propagation du panache est ensuite simulée avec le modèle BRGM en utilisant une simulation de référence d'écoulement de saumure (scénario 5 du rapport BRGM, 2011) et en appliquant un ratio entre la concentration initiale en sel et la concentration initiale en mercure.

<sup>45</sup> Flux de  $171 \text{ m}^3/\text{an}$  avec une concentration en mercure de  $1.2 \cdot 10^{-4} \text{ g/l}$  (soit  $120 \mu\text{g/l}$ )

<sup>46</sup> Dans l'ensemble des calculs le cas de référence correspond à une sortie de saumure polluée par les 5 puits de la mine Amélie (le cas où la saumure polluée sort par les puits Joseph et Else est également évalué)

<sup>47</sup> Maille correspondant à la 3<sup>ème</sup> couche de l'aquifère alluvial et de dimension  $125 \text{ m} \times 125 \text{ m}$  (et de  $10 \text{ m}$  d'épaisseur)

<sup>48</sup> Le débit sortant au niveau de la mine Amélie au bout de 1000 ans après la fin de l'ennoyage est une partie du débit d'épanchement de la saumure via les 5 puits de la mine Amélie à cette date.  $Q_{\text{Amélie 1 à } t=t_0+1000\text{ans}} = 152.5 \cdot (171/680) \text{ m}^3/\text{an}$ ,

avec :

$$Q_{\text{Amélie 1}} = 152.5 \text{ m}^3/\text{an} \text{ à } t=t_0 \text{ (date d'ennoyement de la mine)}$$

$$Q_{\text{5 puits de la mine Amélie}} = 680 \text{ m}^3/\text{an} \text{ à } t=t_0$$

$$Q_{\text{5 puits de la mine Amélie}} = 171 \text{ m}^3/\text{an} \text{ à } t=t_0 + 1000 \text{ ans}$$

## 6.2. ANALYSE CRITIQUE

Le modèle reproduit bien les observations piézométriques et de débit : le calage hydrodynamique est satisfaisant et permet de reproduire correctement les flux d'écoulements souterrains.

### Impact des coefficients de dispersivité

En revanche, la surestimation de la largeur des panaches salés laissent à penser que les coefficients de dispersion sont surestimés. A cela vient s'ajouter une incohérence dans les valeurs indiquées de ces paramètres. En effet les valeurs de dispersivité utilisées pour le calage du modèle (5 et 50m) semblent avoir été multipliées par deux dans le modèle utilisé pour simuler l'impact du projet sur la nappe.

La surestimation des paramètres de dispersion a pour effet une plus grande dilution de la pollution dans l'aquifère alluvial. Ainsi il est possible que les effets de la pollution aient été sous-estimés. Malheureusement il n'a pas été réalisé, à notre connaissance, d'étude de sensibilité sur ces paramètres : l'incertitude qui y est associée n'est donc pas facilement quantifiable. On notera que les paramètres hydrodispersifs sont généralement mal connus, et qu'il peuvent facilement varier d'un facteur 10 d'un contexte à un autre (Gehlar et al., 1992).

Le tableau suivant compare les valeurs utilisées dans l'étude BRGM 2010 et 2011 avec les valeurs issues dans la bibliographie pour des lithologies similaires (Gehlar et al., 1992) et pour un essai de traçage réalisé sur site dans les années 1970 (Fried, 1975).

**Tableau 20. Valeurs de dispersivité utilisées dans les modèles BRGM et provenant de la bibliographie.**

	$\alpha_L$	$\alpha_T$
(BRGM, 2011)	100 m	10 m
(BRGM, 1998)	50 m	5 m
(Fried, 1975)	15 m	5 m
(Gehlar et al. 1992) pour des lithologies similaires	$1 \text{ m} < \alpha_L < 50 \text{ m}$	$0,1 \text{ m} < \alpha_T < 10 \text{ m}$

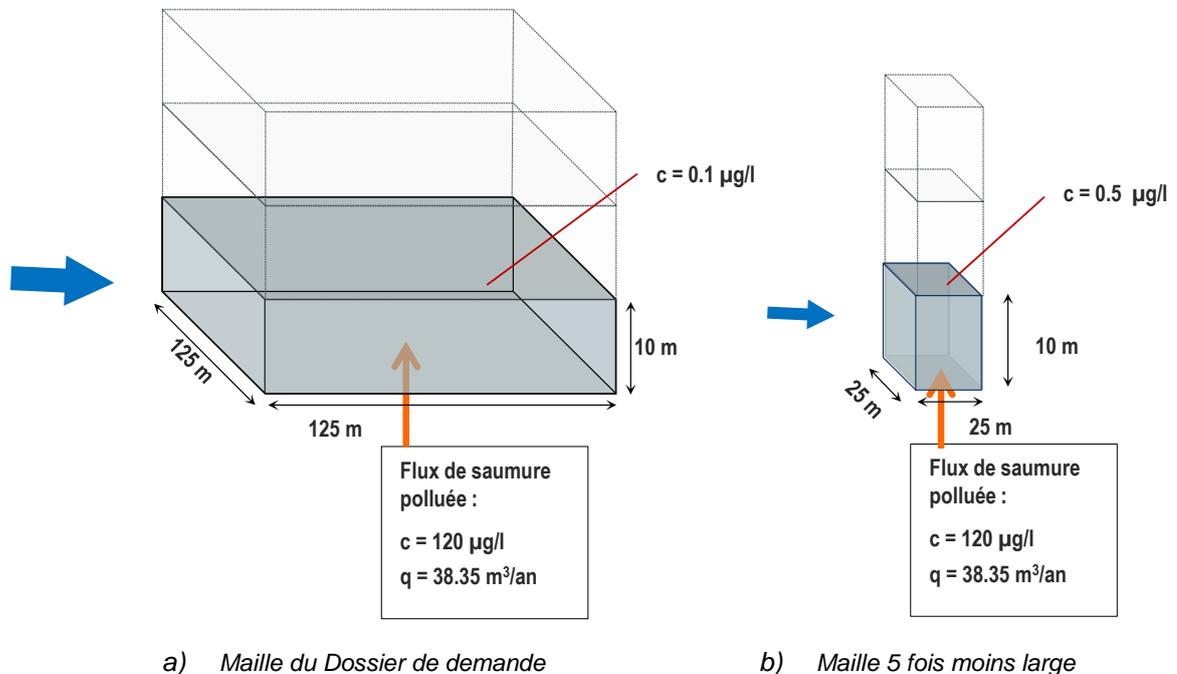
Les valeurs de Fried sont plus appropriées car elles correspondent à des mesures qui ont été effectuée sur la nappe d'Alsace dans l'emprise des MDPAs.

### Impact de la façon d'introduire le flux de saumure polluée dans le modèle BRGM

Au niveau d'un puits, via lequel la saumure polluée atteint la nappe d'Alsace, le flux de saumure pollué est introduit dans la maille de la couche inférieure de l'aquifère.

Par construction, le flux de saumure est dilué artificiellement dans l'ensemble du volume de la maille. Cette dilution est importante du fait d'un ratio élevé entre le diamètre du puits (environ 5 m) et la largeur de la maille considérée. Cette dilution dépend du choix de la taille de la maille où est introduit le flux de saumure polluée en provenance de la mine.

A titre d'illustration, le choix d'une taille de maille de 25 m x 25 m x 10 m (au lieu de 125 m x 125 m x 10 m) induirait une concentration en mercure dans la première maille<sup>49</sup> 5 fois plus élevée (0.5 µg/l au lieu de 0.1 µg/l (Dossier de demande))<sup>50</sup>.



**Figure 38. Influence du choix de la taille de la maille sur les concentrations initiales dans le modèle utilisé dans le Dossier de demande**

Dans la mesure où on s'intéresse au panache de pollution à proximité des puits, il conviendrait d'adopter un maillage adapté.

#### Impact des hypothèses de flux de saumure polluée en provenance de la mine

Comme cela a été vu précédemment, les paramètres ayant le plus d'impact sur la qualité de la nappe d'Alsace sont :

- le débit de saumure polluée en sortie de stockage (2.7 l/an dans le Dossier de demande) ;
- le débit de saumure saine (171 m<sup>3</sup>/an à t=t<sub>0</sub>+1000 ans pour les 5 puits du secteur Amélie dans le Dossier de demande<sup>51</sup>).

Or ces les valeurs de ces deux paramètres ne sont pas justifiées dans le dossier de demande et semblent être des hypothèses.

<sup>49</sup> Exemple du scénario 0%, puits Amélie 1

<sup>50</sup> De la même façon une maille de 10 m de large (ce qui est significativement plus grand que le diamètre des puits) induirait une concentration dans la première maille de 1.25 µg/l

<sup>51</sup> Ce débit va impacter non seulement la dilution au sein de la mine mais également la largeur du panache dans la nappe d'Alsace

En effet le débit de saumure saine sortant des puits de mine pris en compte dans le Dossier de demande est présenté comme une hypothèse dans le rapport BRGM, 2011.

Par ailleurs, le débit de saumure polluée sortant du stockage est « donné par la loi de compaction des déchets » (Dossier de demande), mais ni cette loi, ni les paramètres associés, ni les valeurs obtenues ne sont indiqués dans le Dossier de demande.

### 6.3. ETUDE DE SENSIBILITE SUR LE FLUX DE SAUMURE POLLUEE SORTANT AU NIVEAU DE LA NAPPE D'ALSACE

De façon à pouvoir apprécier la pertinence de l'approche décrite dans le Dossier de demande, une évaluation a été effectuée par la tierce expertise en prenant en compte :

- les différentes composantes du projet de stockage (dont le remblayage qui n'est pas considéré par l'INERIS) ;
- les débits de saumure polluée en sortie de stockage évalués par Itasca et en intégrant les quantités de polluant réévalués (tierce expertise) ;
- les débits de saumure saine déduits de l'évolution détaillée des vides miniers (tierce expertise) ;
- un modèle local avec un maillage adapté, basé sur la caractérisation hydrogéologique de la nappe d'Alsace du BRGM, mais en prenant en compte des valeurs de dispersivité basées sur des essais réalisés localement<sup>52</sup> (tierce expertise).

Les hypothèses du modèle local sont les même que celle présentées au paragraphe précédent et les hypothèses de flux de polluant sont présentées ci-après.

**Tableau 21. Hypothèses de flux polluant retenues pour le modèle de dispersion de la pollution dans la nappe.**

scénario	Hg		
	0%	56%	93%
masse mobilisable (t)	26	11.3	1.8
concentration dans le stockage (70 000 m <sup>3</sup> ) en mg/L	371	161	26
concentration au sortir de la mine (mélange de 12 L/an avec 10 m <sup>3</sup> /an par puits <sup>53</sup> en provenance des vides miniers) en mg/L	0.220	0.097	0.015

Les extensions des panaches de pollution sont présentées sur la figure suivante. Les limites réglementaires sont respectées dans un périmètre d'une dizaine de mètres.

<sup>52</sup> Les valeurs de dispersivité de Fried (Cf. Tableau 20 ) ont été utilisées

<sup>53</sup> La valeur de 10 m<sup>3</sup>/an est issue de la Figure 36. Elle correspond à un débit global du secteur ouest de 150 m<sup>3</sup>/an à t≈20 000 ans pour les 15 puits du secteur ouest, soit un débit unitaire de 10m<sup>3</sup>/an/puits

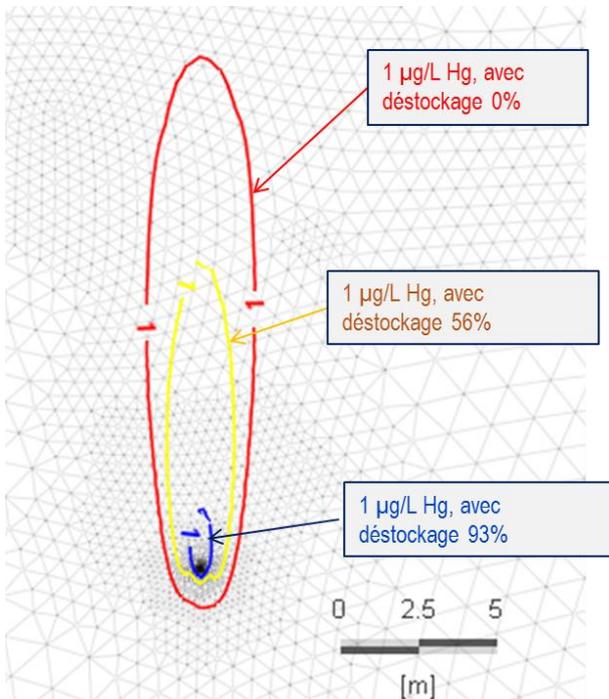


Figure 39. Extension du panache de mercure en sortie de puits selon différentes hypothèses de déstockage

A titre d'illustration, le panache précédent a été superposé sur la première maille du modèle utilisé dans le Dossier de demande (où la concentration maximale est de 0.1 µg/l – scénario 0%).

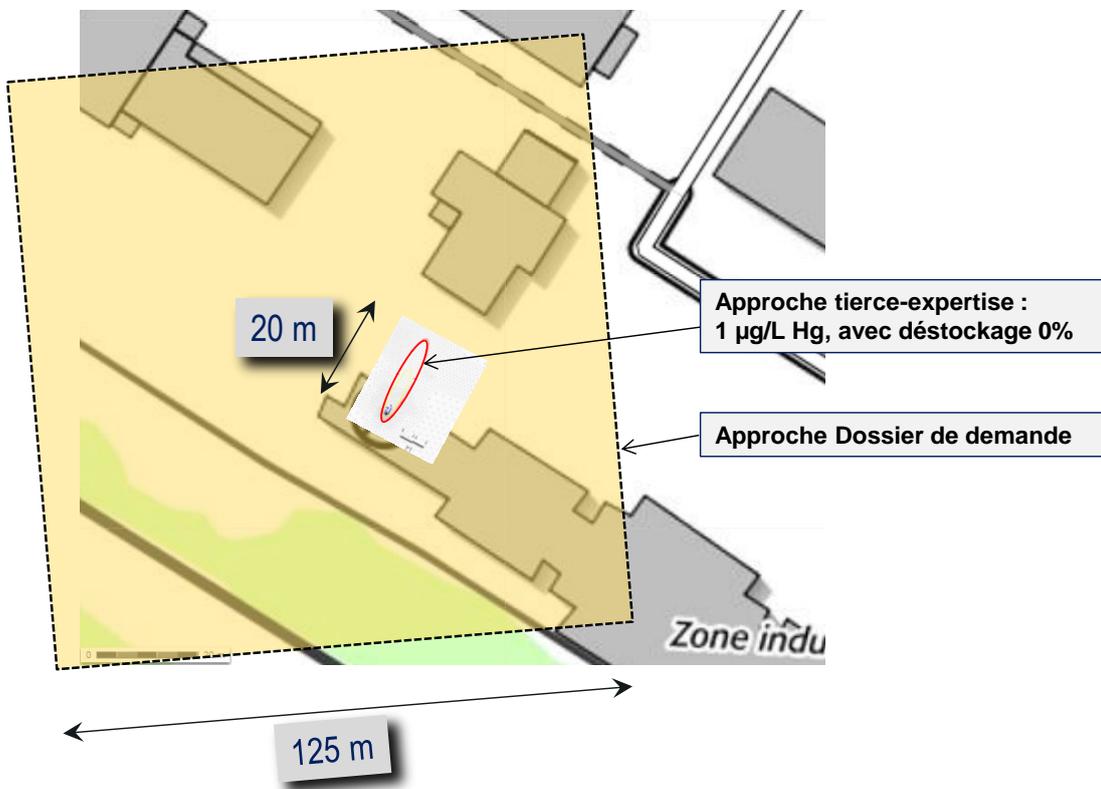


Figure 40. Comparaison entre l'extension du panache de mercure à proximité d'un puits (Dossier de demande et tierce expertise)

L'extension du panache de mercure est, dans le cas de la tierce expertise :

- plus allongé (ceci est dû notamment à un mode de représentation des écoulements locaux plus adapté) ;
- d'extension plus faible, du fait notamment de paramètres hydro-dispersif plus appropriés et d'un terme source moindre (26 t de mercure au lieu d'environ 51 t)

Au vu des incertitudes relatives à l'échantillonnage pour estimer les quantités de polluants dans le stockage, il est probable que l'extension du panache de mercure (avec  $C = 1 \mu\text{g/l}$ ) ne dépasse pas quelques dizaine de mètres.

Ainsi, si in fine l'impact du projet sur la nappe d'Alsace est relativement faible, le Dossier de demande n'explique pas suffisamment les méthodes de calcul utilisées, le choix des paramètres retenus ni les résultats obtenus notamment pour l'évaluation du débit de saumure polluée en sortie de stockage et le débit de saumure saine en sortie des puits.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

ASGA. 2014. Caractérisation géomécanique de roches issues du sondage CJEO1 - Rapport lithologique - Détermination du volume des vides.

BRGM. 1998. Modèle de la nappe d'Alsace. Projet de développement 312. RR-40335-FR. Rapport final.

BRGM. 2006. Modélisation de la salure profonde au droit et en aval du Bassin Potassique - Rapport final. BRGM/RP-54389-FR. AERM.

BRGM. 2007. Cartographie des affaissements miniers dans le bassin potassique alsacien. BRGM/ALS/NT07N03.

BRGM. 2010. Site de stockage de StocaMine : simulation de fuites de saumure par des puits de mines. RP-59244-FR.

[62], BRGM. 2011. Modélisation d'une fuite de saumure à partir du site de stockage souterrain de StocaMine : simulation d'un 5ème Scénario. BRGM/RP-60256-FR. STOCKAMINE.

[37], Cesame. 2006. Ennoyage de la mine de potasse, secteur Ouest.

Courtois N, Gerbaux-Francois O, Grenier C, Maugis P, Mouche E, De Fouquet C, Goblet P, Ledoux E. 2000. Characterization of dispersion in an alluvial aquifer by tracing techniques and stochastic modelling. IAHS Publ.:84–89.

[4], ENSMP, Combes, Ledoux. 1997. Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la mine Amélie - Approche des problèmes liés à l'hydrogéologie. LHM/RD/90/60.

Fried JJ. 1975. Groundwater pollution. Elsevier. [consulté le 2015 août 20]. <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=8cKxHnsOKCkC&oi=fnd&pg=PP1&dq=fried+1975+groundwater+pollution&ots=PWwl4rQZXV&sig=HSjvucx41rrOnZddLWwoCWPOy9o>

Gehlar L, Welty C, Rehfeldt K. 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. Water Resour. Res.:1955–1974.

IFG. 2015. Dossier de prolongation pour une durée illimitée de l'autorisation du 03 février 1997 relative au stockage souterrain de produits dangereux non radioactifs - Tierce-expertise - Rapport Géomécanique. MDP.A.

[50], Ineris. 2010. Stockage souterrain de STOCAMINE (68) - Synthèse critique des études hydrogéologiques sur l'ennoyage du site. DRS-10-108130-03801A. STOCAMINE.

[53], Ineris. 2010. Stockage souterrain de STOCAMINE (68) - Etude géomécanique du stockage. DRS10 – 108130-14273A. STOCAMINE.

[55], Ineris. 2011. Stockage souterrain de STOCAMINE (68) - Etude hydrogéologique de l'ennoyage du site. N° DRS-10-108130-12810B. STOCAMINE.

[69], Ineris. 2012. Impact potentiel du stockage sur la ressource en eau dans le cadre du scénario de stockage illimité. N°DRC-12-108130-00744B. STOCAMINE.

[76], Itasca. 2013. Evaluation des flux potentiels de saumure contaminée à partir du stockage de Wittelsheim. 13R-001/A3.

[86], Itasca. 2015. Stockage de Wittelsheim. Etude de comparaison entre les barrages en bentonite et les barrages en béton Sorel. 14R-028A2.

Liberda R. 2011. Choix d'un site de forage de reconnaissance de la montée des eaux. 074-12. MDPa.

MDPa. 2008a. Mémoire 3 - Recueil des données sur les puits des MDPa.

MDPa. 2008b. Mémoire 5 - Affaissements et dégâts de surface.

MDPa. 2015a. Note de synthèse sur les observations réalisées sur le puits VA PB2. 191-15 151217\_VAPB2.

MDPa. 2015b. Bilan écologique - étude d'impact. ANNEXE 4 de la Demande. 1758-AB/DL/2015. CESAME.

[28], Mica Environnement. 2004. Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique du centre de stockage de StocaMine. 04-069.