



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 PRINCIPAL



ARTELIA Eau et environnement

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



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

1. INTRODUCTION	1
1.1. CONTEXTE HISTORIQUE ET REGLEMENTAIRE	1
1.2. OBJET DE LA TIERCE EXPERTISE	3
2. ORGANISATION DE LA TIERCE EXPERTISE	7
2.1. COMPOSITION DU GROUPEMENT	7
2.2. DEROULEMENT DE LA TIERCE EXPERTISE	7
2.3. ORGANISATION DU RAPPORT	8
3. CONTEXTE DU STOCKAGE ET PROJET DE CONFINEMENT	9
3.1. INTRODUCTION	9
3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MINIER DU STOCKAGE	9
3.3. PROJET DE CONFINEMENT	14
4. ETUDE DE SURETE DU CONFINEMENT DES DECHETS A LONG TERME DANS LA MATRICE RECEPTRICE	17
4.1. INTRODUCTION	17
4.2. STABILITE MECANIQUE	18
4.2.1. Milieu géologique	18
4.2.2. Mine	19
4.2.3. Stockage	20
4.3. CONFINEMENT HYDRAULIQUE	21
4.3.1. Introduction	21
4.3.2. Champ lointain	21
4.3.3. Champ proche	23
4.4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	27
5. ETUDE DU VOLUME ET DE L'EVOLUTION DES VIDES MINIERES – VITESSE D'ENNOYAGE ATTENDUE	29
5.1. INTRODUCTION	29
5.2. PHENOMENES A PRENDRE EN COMPTE POUR EVALUER LA VITESSE D'ENNOYAGE	29
5.3. EVALUATION DES VALEURS DES PARAMETRES	31
5.3.1. Secteur(s) à considérer	31
5.3.2. Evaluation des débits d'infiltration	32
5.3.3. Evolution des vides miniers	34
5.3.3.1. INTRODUCTION	34
5.3.3.2. VIDES INITIAUX	35
5.3.3.3. VIDES CREEES PAR DISSOLUTION	35
5.3.3.4. COMPACTION INITIALE DES TAILLES FOUROYES	35
5.3.3.5. CONVERGENCE RESIDUELLE DES TAILLES FOUROYEES	36
5.3.3.6. CONVERGENCE DES GALERIES	41
5.3.3.7. IMPACT DE L'ENNOYAGE SUR LE FLUAGE	41
5.4. EVALUATION DE LA VITESSE D'ENNOYAGE	42
5.5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	45
6. ANALYSE CRITIQUE DE LA COMPOSITION DES COLIS ENTREPOSES	47
6.1. INTRODUCTION	47
6.2. CARACTERISTIQUES DU PROJET EN LIEN AVEC LA COMPOSITION DES DECHETS STOCKES	47
6.2.1. Types de déchets	47
6.2.2. Quantités initialement stockées	49
6.2.3. Scénarios de déstockage partiel	50

6.3.	HYPOTHESES DU DOSSIER RELATIVES AUX QUANTITES EN CONTAMINANTS STOCKES	51
6.3.1.	Composés organiques	51
6.3.2.	Composés inorganiques – évaluation de l'INERIS	51
6.3.2.1.	HYPOTHESES ET METHODE DE CALCUL	52
6.3.2.2.	ESTIMATION DES QUANTITES DE POLLUANTS	52
6.4.	ANALYSE CRITIQUE	53
6.4.1.	Composés organiques	53
6.4.2.	Composés inorganiques	54
6.5.	NOUVELLE EVALUATION DES QUANTITES EN CONTAMINANTS STOCKEES	55
6.5.1.	Description des nouvelles analyses réalisées	55
6.5.1.1.	ECHANTILLONNAGE	55
6.5.1.2.	PROGRAMME D'ANALYSE	57
6.5.1.3.	SYNTHESE DES ANALYSES REALISEES	58
6.5.2.	Nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockées	59
6.5.2.1.	EVALUATION DES QUANTITES EN CONTAMINANTS STOCKEES	59
6.5.2.2.	ANALYSE DES INCERTITUDES	61
6.6.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	63
7.	ETUDE DU TERME SOURCE	65
7.1.	INTRODUCTION	65
7.2.	CARACTERISTIQUES DU PROJET EN LIEN AVEC L'EVALUATION DU TERME SOURCE	65
7.3.	HYPOTHESES DU DOSSIER DE DEMANDE RELATIVES AU TERME SOURCE	66
7.3.1.	Contaminants mobilisables dans la saumure	66
7.3.1.1.	HYPOTHESES ET METHODE DE CALCUL	66
7.3.1.2.	COMPOSITION DE LA SAUMURE A LONG TERME	66
7.3.2.	Contaminants mobilisables dans l'air	67
7.4.	ANALYSE CRITIQUE	68
7.4.1.	Contaminants mobilisables dans la saumure	68
7.4.1.1.	AVIS DU TIERS-EXPERT SUR LES HYPOTHESES DE CALCULS	68
7.4.1.2.	AVIS DU TIERS-EXPERT SUR LA METHODE DE CALCUL	69
7.4.1.3.	AVIS DU TIERS-EXPERT SUR LES RESULTATS OBTENUS PAR L'INERIS	69
7.4.2.	Contaminants mobilisables dans l'air	70
7.5.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	71
8.	ETUDE DE L'IMPACT DU PROJET SUR LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES	73
8.1.	INTRODUCTION	73
8.2.	IMPACT DU PROJET SUR LA NAPPE (DOSSIER DE DEMANDE)	73
8.2.1.	Introduction	73
8.2.2.	Mécanismes potentiels d'épanchement de saumure polluée dans la nappe d'Alsace	73
8.2.3.	Evaluation de l'impact du projet lié à la réduction des vides miniers (Dossier de demande)	75
8.3.	ANALYSE CRITIQUE DE L'EVALUATION DE L'IMPACT DU PROJET SUR LA NAPPE DU DOSSIER DE DEMANDE	78
8.3.1.	Configuration du projet de confinement prise en compte	78
8.3.2.	Mécanismes pouvant aboutir à une contamination de la nappe d'Alsace	79
8.3.3.	Evaluation de l'impact du projet lié à la réduction des vides miniers (Analyse critique)	79
8.4.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	85
9.	DISPOSITIONS RELATIVES AU SUIVI	87
9.1.	ELEMENTS DU DOSSIER DE DEMANDE	87
9.1.1.	Suivi de l'ennoyage	87
9.1.2.	Suivi de la nappe alluviale	87
9.1.3.	Suivi des puits de mine	87
9.2.	ANALYSE CRITIQUE	87
9.3.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	88
ANNEXE 1	Bibliographie	89

ANNEXE 2 Lettre du préfet du 17 février 2015 _____ **97****ANNEXE 3 Exemple de conception de remblayage de puits dans des mines allemandes** _____ **101****TABLEAUX**

Tableau 1. Différentes estimations des débits d'infiltration (dont Dossier de demande en vert et tierce expertise en bleu)	34
Tableau 2. Différentes hypothèses de compaction initiale des tailles foudroyées	36
Tableau 3. Loi de Norton et paramètres obtenus par ([53] INERIS, 2010)	41
Tableau 4. Résumé des vitesses de convergences utilisées dans les calculs par l'Inéris ([55] INERIS, 2011)	42
Tableau 5. Evaluations de la vitesse d'ennoyage : Dossier de demande et tierce expertise	45
Tableau 6. Groupes de déchets admis par StocaMine (MDPA)	48
Tableau 7. Groupes de déchets admis par StocaMine et tonnage associé (Dossier de demande)	50
Tableau 8. Estimation des quantités de contaminants stockés (Dossier de demande)	52
Tableau 9. Programme d'analyses défini par le groupement de tierce expertise	58
Tableau 10. Synthèse des analyses réalisées	58
Tableau 11. Quantités en contaminants stockés par catégorie de déchets (avant déstockage)	60
Tableau 12. Synthèse des évaluations quantités en contaminants stockés	61
Tableau 13. Dispersion des résultats pour le CAP 811 et le CAP 990813	62
Tableau 14. Composition de la saumure - résultats des calculs de l'INERIS	67
Tableau 15. Hypothèses de calcul et concentrations en mercure dans la saumure	70

FIGURES

Figure 1. Localisation des installations de surface et du stockage (Dossier de demande)	9
Figure 2. Localisation des installations profondes du stockage	10
Figure 3. Localisation du stockage en profondeur (d'après Dossier de demande)	11
Figure 4. Plan des galeries de stockage de StocaMine (Dossier de demande)	12
Figure 5. Plan d'un bloc (bloc 11) de stockage (BMG, [34])	12
Figure 6. Schéma simplifié de l'organisation du stockage (Dossier de demande)	13
Figure 7. Exemple de bloc de déchet en big-bags et en fûts (MDPA)	13
Figure 8. Barrières de confinement, remblayage, galerie exutoire et remblayage des puits (Dossier de demande)	15
Figure 9. Aperçu schématique du concept de sureté du site de StocaMine consistant en un « système multi-barrières » (d'après [77], ERCOSPLAN, 2013)	18
Figure 10. Schéma d'affaissement lié à une exploitation minière par longues tailles avec foudroyage ([73], Inéris, 2012)	19
Figure 11. Profils de perméabilité à proximité d'une cloison et d'une galerie ouverte adjacente (Mine d'Asse in rapport <i>Géomécanique</i>)	24
Figure 12. Évolution de la perméabilité le long d'un profil vertical à partir du toit d'une galerie fermée (extrait d'ITASCA, [78], 2013)	25
Figure 13. Représentation schématique des phénomènes liés à l'ennoyage de la mine	30
Figure 14. Coupe SO-NE présentant la position du stockage par rapport aux travaux miniers et au stot (d'après Mica, 2004)	31
Figure 15. Représentation schématique de circulation d'eau à l'extrados d'un puits	32
Figure 16. Représentation schématique de circulation d'eau à l'extrados d'un puits	37
Figure 12. Schématisation du niveau de saumure dans le forage VAPB2 (d'après MDP)	39
Figure 18. Etablissement de relations compaction initiale / convergence résiduelle / profondeur	40

Figure 19. Evolution des vides après compaction initiale de 80% et date d'ennoyage – secteur Ouest	44
Figure 20. Evolution des vides après compaction initiale de 80% et date d'ennoyage – secteur Amélie	44
Figure 21. Analyse de contrôle lors de la réception des déchets	49
Figure 22. Diagramme des quantités de déchets stockés en 2002 (Dossier de demande)	50
Figure 23. Stratégie d'échantillonnage pour les nouvelles analyses	57
Figure 24. Schémas de calcul de l'équilibre hydrostatique dans la mine (Dossier de demande)	74
Figure 25. Débit de saumure non polluée s'épanchant par les 5 puits de la mine Amélie et concentration de mercure dans le stockage à $t_0 = 300$ ans (d'après rapports INERIS)	76
Figure 26. Débit et concentration de mercure s'épanchant par les 5 puits de la mine Amélie à $t = t_0 + 1000$ ans (d'après rapports INERIS)	76
Figure 27. Débit et concentration de mercure émergeant du puits Amélie 1 et concentration en mercure dans la nappe – scénario 0% (rapports INERIS)	77
Figure 28. Evolutions du débit de saumure via les 5 puits de la mine Amélie selon différentes hypothèses .	81
Figure 29. Paramètres de calcul des concentrations dans les différents compartiments souterrains	82
Figure 30. Comparaison entre l'extension du panache de mercure à proximité d'un puits (Dossier de demande et tierce expertise)	84

Résumé non technique

MDPA a déposé, le 09 janvier 2015, un Dossier de demande de prolongation pour une durée illimitée de l'arrêté préfectoral d'autorisation du 3 février 1997, autorisant le stockage souterrain en couches géologiques profondes de produits dangereux non radioactifs sur le ban de la commune de Wittelsheim.

Le Dossier de demande de prolongation considère un projet consistant à mettre en place un confinement autour des déchets qui resteront dans le site souterrain, une fois les travaux de retrait partiel effectués (avec un objectif de retrait de 93% du mercure contenu dans le site qui pourrait se limiter à 56% du mercure en cas d'impossibilité). Il s'agit ainsi d'une transformation d'un stockage temporaire en stockage de durée illimitée.

En application des dispositions de l'article R. 515-13 du code de l'environnement (reprenant le décret de 2006 précité), le Préfet du Haut-Rhin a demandé (lettre du 17 février 2015) aux MDPAs de faire procéder à une tierce expertise du Dossier de demande.

Une tierce expertise a été constituée par le groupement des sociétés ARTELIA EAU et ENVIRONNEMENT, K-UTEC, et IfG¹.

La tierce expertise² s'est déroulée de mai 2015 à avril 2016. Le délai initial de 6 mois a été étendu compte tenu de l'apparition, au cours de la tierce expertise, de la nécessité de réaliser de nouvelles analyses de caractérisation des colis présents dans le stockage.

Les éléments du dossier sur lesquels la tierce expertise doit effectuer une analyse critique sont indiqués dans la lettre du Préfet du Haut-Rhin du 17 février 2015 (Cf. annexe 2). Ces éléments ont été précisés lors de la réunion de cadrage du 26 février 2015.

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*.

Les principaux résultats de la tierce expertise sont présentés ci-après.

¹ Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig

² Par abus de langage la tierce expertise désigne à la fois le groupe de tiers-experts et le résultat de leur analyse

Etude de sureté du confinement des déchets à long terme dans la matrice réceptrice

La stabilité mécanique du massif de sel, des travaux miniers et du stockage proprement dit est garantie à long terme.

Les barrières ouvragées (barrages) pourront permettre un confinement hydraulique efficace : seul un débit extrêmement limité de saumure pourrait s'infiltrer vers le stockage (ce débit provenant principalement des infiltrations ayant lieu à l'extrados des puits de mine).

La fermeture des puits Joseph et Else utilise un concept proche des techniques les plus évoluées en la matière : le projet de fermeture de ces puits est donc satisfaisant. Il ne permet cependant pas d'empêcher les infiltrations à l'extrados des puits.

Etude du volume et de l'évolution des vides miniers – vitesse d'envoyage attendue

Le Dossier de demande évalue l'évolution des vides miniers et la vitesse d'envoyage de façon simplifiée.

De façon à évaluer l'impact de cette simplification, la tierce expertise a réalisé une évaluation en prenant en compte, d'une part, les données relatives à la répartition des vides miniers en fonction de la profondeur et de leur date de 'création' et d'autre part, des relations entre la vitesse de réduction des vides miniers des tailles foudroyées et la profondeur établies de façon sécuritaire à partir des observations disponibles.

Les résultats obtenus par la tierce expertise aboutissent, dans le cas d'une connexion hydraulique entre le secteur Amélie et le secteur Marie-Louise, à une date d'envoie total de la mine de 120 ans (au lieu de 300 ans dans le cas du Dossier de demande).

Dans la mesure où des données détaillées sont disponibles, la tierce expertise recommande d'estimer la vitesse d'envoyage en suivant une approche basée sur l'ensemble des données et observations disponibles.

Enfin, il apparaît que les différentes estimations (Dossier de demande et tierce expertise) mettent en évidence que la prise en compte d'une hypothèse d'une connexion hydraulique entre le secteur Amélie et le reste du secteur Ouest aboutit à des durées d'envoyage plus courtes et donc correspond à une approche sécuritaire.

Analyse critique de la composition des colis entreposés

Les résultats des analyses effectuées fin 2015 - début 2016 ont permis :

- de confirmer l'absence de mercure dans les déchets de la catégorie B3 – Déchets Arséniés ;
- d'effectuer une nouvelle évaluation des quantités en contaminants présentes dans le stockage.

Ces analyses quantitatives ont été réalisées par un laboratoire accrédité et permettent ainsi de s'affranchir des incertitudes liées à la méthode d'analyse utilisée initialement par StocaMine à l'arrivée des colis sur le site (spectrométrie de fluorescence X ou SFX).

Cette nouvelle évaluation est considérée comme plus fiable que celle effectuée par l'INERIS dans la mesure où elle s'appuie sur des analyses plus complètes et plus précises. La tierce expertise recommande ainsi à MDPA l'actualisation du Dossier de demande en prenant en compte ces nouveaux résultats.

En particulier, la quantité de mercure stockée est réévaluée à environ 26 tonnes sur la base des nouvelles analyses, alors que l'évaluation initiale de l'INERIS était de 53 tonnes de mercure stockées, sur la base des résultats d'analyses SFX.

Bien que la quasi-totalité des échantillons disponibles dans l'échantillonnage³ ait été concernée par la réalisation de nouvelles analyses, le nombre d'analyses disponibles ne permet pas de quantifier l'incertitude liée à l'hétérogénéité des colis et à l'échantillonnage. Ainsi, la tierce expertise rejoint l'avis de l'INERIS ([56])⁴, selon lequel les résultats obtenus ne peuvent être considérés que comme des ordres de grandeur des quantités présentes.

La présence, dans le stockage, de Zirame (substance phytosanitaire organique) neutralisé à la chaux est indiquée dans le Dossier de demande. Compte tenu des incertitudes sur la quantité a priori initialement stockée (potentiellement de 16 à 35 tonnes) et des limites de qualité s'appliquant aux phytosanitaires dans les eaux souterraines, cette substance pourrait être pénalisante vis-à-vis de l'impact du projet sur la nappe d'Alsace si celle-ci est effectivement présente et mobilisable. La tierce expertise recommande ainsi d'étudier plus en détail l'effet sur cette substance de la neutralisation à la chaux réalisée lors du conditionnement des fûts (destruction ou non des molécules, le cas échéant estimation du potentiel de mobilisation des molécules).

Pour ce qui concerne les autres substances organiques, au vu des types de déchets stockés, la fraction estimée d'autres substances dangereuses organiques potentiellement présente (BTEX, HAP, PCB, ...) est considérée comme faible (d'autant plus si elle est rapportée à l'inventaire complet des substances dangereuses).

Etude du terme source

En considérant la nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockées et compte tenu des limites de qualité s'appliquant dans les eaux souterraines (1 µg/L pour le mercure d'après le SDAGE), le mercure reste le contaminant le plus pénalisant pour le scénario sans déstockage (scénario 0%).

En prenant en compte la nouvelle évaluation des quantités de mercure stockées, le volume de vides résiduels calculé par ITASCA⁵ et une mobilisation complète du mercure (hypothèse sécuritaire), les concentrations dans la saumure pour les différentes solutions alternatives considérées dans le cadre de la tierce expertise, sont les suivantes :

- scénario 93 % : 26 mg/L
- scénario 56 % : 161 mg/L
- scénario 0% : 371 mg/L

³ Lors de la livraison d'un lot de déchet, les contrôles prévoient notamment le prélèvement de deux échantillons : un destiné à être analysé pour vérifier les différents critères prévus dans le dossier d'identification remis par l'industriel, le second destiné à être stocké au fond pour constituer une bibliothèque des déchets reçus ou « échantillonnage ».

⁴ Les rapports cités en référence utilisent le référencement (n° de rapport) utilisé par MDPA. Les intitulés de ces rapports et le référencement MDPA sont indiqués en annexe.

⁵ sur la base de la mise en place d'un remblayage poreux au sein de la zone de stockage

L'évaluation de l'extension du panache de mercure dans les eaux souterraines pour le scénario 0% correspond à l'estimation de l'impact maximal du projet sur la nappe d'Alsace.

Dans le cas d'un déstockage du mercure, un nouveau calcul du terme source tenant compte des hypothèses actualisées de quantités en contaminants et de volumes de vides résiduels, permettrait de déterminer le contaminant qui deviendrait le plus pénalisant (Hg, Cd, Sb, ...). Toutefois, l'extension du panache dans la nappe d'Alsace pour ce contaminant resterait inférieure à celle du panache de mercure dans le cas du scénario 0%. Compte tenu de l'extension du panache de mercure dans le cas du scénario 0%, de l'ordre d'une vingtaine de mètre, la tierce expertise considère donc qu'un tel calcul n'est pas nécessaire dans le cadre de l'établissement du Dossier de demande.

Dans le cas où un nouveau calcul de terme source serait mené, il conviendrait de prendre en compte les différentes remarques de la tierce expertise (notamment l'incertitude sur la quantité de cyanures libres stockée, la formation potentielle de complexes de cyano-ferrates, la formation de complexes hydroxo-chlorés solubles de plomb, la libération et le passage en solution d'ammoniac).

Concernant la formation de gaz, la quantité d'hydrogène potentiellement libérée, dans des conditions normales, dans un site de stockage confiné par des barrages et des remblais, dans lequel tout l'espace interstitiel serait rempli de solution, pourrait provoquer une augmentation de la pression du liquide interstitiel. Une analyse de sécurité doit établir si cette augmentation de la pression a un impact sur l'expulsion du liquide interstitiel contaminé, essentiellement opérée par la convergence des terrains.

Etude de l'impact du projet sur la qualité des eaux souterraines

La tierce expertise est en accord avec le Dossier de demande qui considère que le mécanisme principal pouvant induire un épanchement de saumure polluée dans la nappe d'Alsace est dû à la continuation de la réduction des vides miniers et du stockage.

Dans le cadre de l'étude de l'impact du projet, le Dossier de demande considère qu'il n'y aura pas d'épanchement de saumure polluée à la sortie des barrages avant 1000 ans. Au vu des études Itasca, la tierce expertise considère que cette hypothèse est sécuritaire.

Par ailleurs, les calculs relatifs à l'évaluation de l'impact du projet ne prennent pas en compte le rôle du remblayage. Quand bien même ce paramètre est considéré comme un facteur favorable dans le Dossier de demande, il serait souhaitable que l'évaluation de l'impact du projet prenne en compte cette composante du projet de confinement.

Pour évaluer l'impact sur la nappe le Dossier de demande estime, dans un premier temps, le débit et la concentration de saumure polluée à la sortie des puits avant d'atteindre la nappe d'Alsace (ce flux de saumure pollué est ensuite introduit dans le modèle régional de la nappe d'Alsace développé par le BRGM). Cependant les hypothèses prises en compte (évolution du flux de saumure) ou les calculs effectués (concentration en polluant en sortie de puits) ne sont pas indiqués dans les rapports Inéris cités dans le Dossier de demande. De ce fait il n'est pas possible d'analyser la pertinence et la rigueur de l'approche adoptée.

Il est ainsi recommandé que le Dossier de demande précise et justifie toutes les hypothèses prises en compte et indique tous les éléments permettant d'analyser l'approche développée.

Toutefois, afin d'évaluer les ordres de grandeur de l'extension d'un panache de mercure dans la nappe d'Alsace, la tierce expertise a complété l'approche développée par Itasca⁶. Il est ainsi

⁶ Itasca a évalué le débit de saumure polluée en sortie de stockage mais ce n'est pas cette valeur de débit qui est prise en compte dans le Dossier de demande

montré (en ayant une approche sécuritaire) que l'extension d'un tel panache (cas du scénario 0%) serait limitée à quelques dizaine de mètre (limite de panache du mercure à une concentration de 1 µg/l).

Enfin, dans le cadre de la modélisation du devenir du flux de saumure pollués dans la nappe d'Alsace, il est recommandé d'utiliser une approche de modélisation avec un maillage affiné et avec des paramètres hydrodispersifs mesurés localement (dans la mesure où il a été montré que ceux-ci sont disponibles).

Dispositions relatives au suivi

Compte tenu des échelles de temps considérées (plusieurs milliers d'année), la priorité doit être donnée à la mise en place de moyens permettant de suivre à *court terme* l'évolution des phénomènes mis en jeu (ennoyage et réduction des vides). La tierce expertise recommande ainsi :

- l'instrumentation du forage VAPB2, de façon à suivre l'évolution du niveau de saumure dans la mine Amélie,
- la réalisation et l'instrumentation d'un forage profond au niveau du secteur Ouest, afin de suivre également la remontée de saumure dans ce secteur,
- la poursuite des mesures de convergence au sein du stockage,
- la poursuite des mesures d'évolution de la topographie en surface.

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.

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 présent rapport correspond au rapport principal de la tierce expertise.

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

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE HISTORIQUE ET RÉGLEMENTAIRE

Nous précisons ici, de façon succincte, le cadre dans lequel se situe le Dossier de demande de stockage illimité déposé en 2015 ainsi que la demande associée de tierce expertise.

L'autorisation initiale

La société STOCAMINE a été autorisée, par arrêté préfectoral en date du 03 février 1997, à aménager et exploiter, à Wittelsheim, un stockage souterrain de déchets industriels dangereux d'une capacité totale de 320 000 tonnes et pour une durée de 30 ans. A l'échéance de ce délai, l'exploitant devait, soit déposer un Dossier de demande de prolongation de l'autorisation, soit indiquer les conditions de retrait des déchets.

A l'échéance de 30 ans, l'arrêté d'autorisation prévoyait deux possibilités :

- soit le confinement des déchets au fond (stockage définitif),
- soit le retrait des déchets (exercice de la réversibilité).

Cette deuxième option avait notamment été prévue dans le projet pour garder la possibilité de retirer tout ou une partie des déchets si une revalorisation ou un recyclage au moins partiel devenait techniquement possible en cas d'avancées majeures dans ce domaine.

L'incendie de 2002 et l'arrêt de la descente de déchets

En septembre 2002, des déchets non conformes ont été acceptés en opposition avec les règles d'admission édictées pour StocaMine, déclenchant un incendie dans le bloc 15 du stockage.

A la suite de cet incendie, en septembre 2003, StocaMine a pris la décision d'arrêter définitivement l'activité de descente des déchets interrompue depuis le sinistre. Le site contenait alors 44 000 tonnes de déchets.

Le décret de 2006 permettant d'envisager la fermeture du site avant l'échéance de 30 ans

Suite à l'arrêt définitif des opérations de stockage, plusieurs études ont été initiées pour définir précisément la méthode qu'il faudrait suivre dans le cas de la mise en œuvre de la réversibilité et pour mettre en évidence les contraintes à prendre en compte pour la fermeture du site (après retrait des déchets ou non).

Le décret n°2006-283 du 10 mars 2006 a ouvert la possibilité d'une prolongation pour une durée illimitée de l'autorisation de stockage souterrain de produits dangereux dont l'exploitation a cessé depuis au moins un an. Cet arrêté permettait donc de ne pas repousser à 30 ans la décision de fermer le site (avec déstockage préalable ou non).

Les études réalisées, la concertation locale et la demande de l'Etat d'un déstockage partiel

A partir de 2009, StocaMine a fait appel à l'INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques) pour notamment réaliser une analyse critique de toutes les études portant sur

StocaMine déjà effectuées et étudier les solutions de fermeture les plus appropriées, dont le maintien en place de l'ensemble des déchets stockés (scénario 0% de déstockage).

D'après les études INERIS, en prenant en compte la mise en place de barrières et le maintien in situ de tous les déchets (scénario 0% de déstockage), le scénario d'évolution du site conduit à des teneurs en polluants dans la nappe alluviale inférieures à toutes les valeurs de référence. Pour l'élément mercure, la marge de sécurité est toutefois plus faible que pour les autres contaminants.

Le retrait d'une partie des déchets contenant du mercure, décidé par l'Etat à la suite d'une concertation locale initiée en 2010, a été considéré comme assurant une sécurité supplémentaire par rapport au scénario initial sans déstockage.

Ce retrait partiel correspond à une demande de l'Etat dans le but de répondre aux inquiétudes émises durant la concertation publique.

Cette décision prend ainsi en compte la majorité des avis du Comité de Pilotage qui avait suivi l'avancement des différentes études du site en 2010 et 2011, et répond partiellement aux préoccupations de la population locale (qui souhaitait un déstockage total).

Les opérations de déstockage ont débuté en septembre 2014.

Le Dossier de demande de stockage illimité de 2015

MDPA⁷ a déposé, le 09 janvier 2015, un Dossier de demande de prolongation pour une durée illimitée de l'arrêté préfectoral d'autorisation du 3 février 1997, autorisant le stockage souterrain en couches géologiques profondes de produits dangereux non radioactifs sur le ban de la commune de Wittelsheim.

Le Dossier de demande de prolongation considère un projet consistant à mettre en place un confinement autour des déchets qui resteront dans le site souterrain, une fois les travaux de retrait partiel effectués (avec un objectif de retrait de 93% du mercure contenu dans le site qui pourrait se limiter à 56% du mercure en cas d'impossibilité). Il s'agit ainsi d'une transformation d'un stockage temporaire en stockage de durée illimitée.

La demande de tierce expertise du dossier de 2015

En application des dispositions de l'article R. 515-13 du code de l'environnement (reprenant le décret de 2006 précité), le Préfet du Haut-Rhin a demandé (lettre du 17 février 2015) aux MDPAs de faire procéder à une tierce expertise du Dossier de demande.

Il peut être noté que l'autorité environnementale (AE) a émis, le 9 septembre 2015, un avis délibéré sur la prolongation pour une durée illimitée du stockage souterrain de produits dangereux sur la commune de Wittelsheim (68).

⁷ MDPA a absorbé StocaMine le 1^{er} janvier 2014. C'est donc MDPA qui présente le Dossier de demande de prolongation pour une durée illimitée de l'arrêté préfectoral d'autorisation du 3 février 1997.

1.2. OBJET DE LA TIERCE EXPERTISE

Le recours à une tierce expertise est prévu dans le code de l'environnement à l'article R515-13 qui indique que :

Le préfet fait procéder, aux frais du demandeur et par un organisme tiers expert, à une analyse critique de ceux des éléments du dossier, et en particulier de l'étude de sûreté, qui justifient des vérifications particulières. Cette analyse critique est jointe au dossier soumis à l'enquête publique.

La lettre du préfet du 17 février 2015

Les éléments du dossier sur lesquels la tierce expertise doit effectuer une analyse critique sont indiqués dans la lettre du Préfet du Haut-Rhin du 17 février 2015 (Cf. Annexe 2) et présentés ci-dessous.

- Point 1. L'étude de sûreté du confinement des déchets à long terme dans la matrice réceptrice, compte tenu de ses caractéristiques géotechniques. En particulier, la tierce expertise s'attachera à expertiser la performance des barrages à réaliser et leurs emplacements, en fonction du scénario retenu ainsi que les mesures complémentaires à mettre en œuvre. En outre, le concept de remblayage des puits Else et Joseph sera aussi étudié.
- Point 2. L'étude du volume et de l'évolution du volume des vides miniers concernés par le stockage et par récurrence la vitesse d'envoyage attendue.
- Point 3. L'étude du terme source pour appréhender les polluants qui pourraient être expulsés vers la nappe phréatique après ennoyage et l'impact du projet sur la qualité des eaux souterraines.
- Point 4. Une analyse critique de la composition des colis entreposés pour ce qui concerne les polluants présentant les principaux risques à long terme (analyses documentaire des non conformités constatées en phase d'exploitation, ou dans la phase actuelle d'enlèvement).
- Point 5. L'exposé des solutions alternatives au maintien de stockage avec leurs conséquences respectives notamment en ce qui concerne leur impact sur l'environnement.
- Point 6. L'exposé des dispositions relatives au suivi, notamment, le suivi après travaux et celui de la qualité des eaux souterraines.

L'analyse critique porte sur la méthodologie employée, les hypothèses considérées et les résultats obtenus.

La réunion de cadrage du 26 février 2015

Une réunion DREAL/tiers experts/MDPA s'est tenue à Wittelsheim le 26 février 2015. Le même jour et préalablement à cette réunion (le matin) une visite a été effectuée dans la zone de stockage et à proximité.

La réunion de cadrage a permis de préciser certains points relatifs au périmètre de l'analyse. Ainsi la tierce expertise doit prendre en compte :

- **Le concept de confinement du stockage⁸ et les études géomécaniques associées les plus développés alors, c'est-à-dire ceux présentés dans les rapports Itasca** (rapports [76], [78] et [86]) ;
- **Les hypothèses de déstockage du mercure de 93%, 56% et 0%** (solution de base et solutions alternatives) ;

La demande de d'actualisation de l'évaluation des quantités de contaminants au sein du stockage (septembre 2015)

Au cours de l'élaboration de la tierce expertise, la société Dr. Marx GmbH material testing and consulting a réalisé des analyses chimiques⁹ sur les échantillons prélevés dans l'échantillonnage¹⁰ de MDPA correspondant aux déchets devant être déstockés du site de stockage de déchets souterrain de StocaMine et restockés dans celui de GSES à Sondershausen. Ces analyses font partie de la procédure d'autorisation relative au transfert et à l'élimination des déchets auprès de GSES.

Les résultats obtenus ont mis en évidence la quasi-absence de mercure dans les déchets classés B3 - déchets arséniés, alors que des concentrations élevées en mercure avaient été mesurées au moyen de la spectrométrie de fluorescence X (SFX) lors de l'arrivée de ces déchets sur le site.

En raison des incertitudes sur les résultats d'analyse de la base de données de StocaMine (incertitudes mises en évidence par les récents résultats sur le mercure) et dans le cadre de l'analyse critique des quantités de produits au sein du stockage, le groupement de tierce expertise a été sollicité pour **élaborer un programme d'analyses complémentaires**, permettant de préciser les concentrations en contaminants présents dans les déchets¹¹, et de **procéder à une nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockés** sur la base d'analyses fiables.

Documents de base de la tierce expertise

Suite aux échanges avec MDPA et la DREAL, il a été convenu que la tierce expertise porterait sur les documents et données suivants :

- **Le Dossier de demande de prolongation** déposé par la Société des Mines de Potasses d'Alsace à la DREAL du Haut Rhin le 9 janvier 2015, y compris les **annexes** (notamment les études INERIS) ;
- Les principales pièces complémentaires du Dossier de demande¹² et en particulier **Les études ITASCA** réalisées récemment :
 - Evaluation des flux potentiels de saumure contaminée à partir du stockage de Wittelsheim, rapport n13R-001A, 2013 ([76]) ;

⁸ Un concept de scellement a ainsi été développé par ERCOSPLAN (2008, 2013) et a conduit à la définition d'un projet de barrages. L'efficacité de ceux-ci a été évaluée numériquement par ITASCA (2014). Par la suite dans le rapport il sera principalement fait référence aux études Itasca pour désigner le concept de scellement pris en compte par la tierce expertise

⁹ En utilisant des méthodes quantitatives normées

¹⁰ L'échantillonnage stocke les échantillons prélevés ou fournis initialement lors du stockage sur le site de StocaMine

¹¹ En se basant que des méthodes analytiques quantitatives normées

¹² Notamment les documents cités dans la bibliographie de l'annexe 4 du Dossier de demande

- Stockage de Wittelsheim. L'évolution de la perméabilité du sel, rapport 13R-016/A3, 2013 ([78]) ;
 - Etude de comparaison entre les barrages en bentonite et les barrages en béton Sorel, rapport 14R-028A1, 2015 ([86]).
- **Les nouvelles analyses** effectuées pour procéder à une nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockés.

La liste des documents consultés figure en annexe 1. Par la suite certains rapports seront cités en indiquant le n° de référencement adopté par les MDPa lorsque ceux-ci en bénéficient (ou éventuellement en indiquant l'auteur et la date de publication).

2. ORGANISATION DE LA TIERCE EXPERTISE

2.1. COMPOSITION DU GROUPEMENT

La tierce expertise est constituée par le groupement des sociétés ARTELIA EAU et ENVIRONNEMENT, K-UTEC, et IfG¹³.

Plus spécifiquement, les personnes suivantes sont intervenues dans le cadre de la tierce expertise :

- Pour les aspects relatifs à la géochimie (composition du terme source et évolution de la saumure - Point 3 de lettre du préfet) :
 - Dittmar Lack (K-Utec) : Directeur du département de gestion des déchets et de remblayage, expert en géochimie du sel ;
 - Bernd Weber (Dr Marx GmbH) : La société Dr Marx GmbH ne fait pas partie du groupement de la tierce expertise, mais est intervenue via une collaboration entre les experts en géochimie Dittmar Lack et Bernd Weber.
- Pour les aspects relatifs à la géomécanique du sel (étude de sûreté du confinement et évolution des vides miniers - Points 1 et 2 de la lettre du préfet) :
 - Till Popp (IfG) : Directeur de l'IfG, expert en géomécanique du sel ;
 - Thomas Fliss (K-Utec) : Ingénieur spécialiste de la géomécanique du sel en contexte minier.
- Pour les aspects relatifs à l'hydrogéologie (processus et débit d'envoyage, et impact de la saumure polluée sur la nappe d'Alsace – Points 2 et 3 de la lettre du préfet) :
 - Mac Boisson (Artelia Eau et Environnement) : Directeur de projets et expert hydrogéologue ;
 - Florence Lenhardt (Artelia Eau et Environnement) : Ingénieur spécialiste en hydrogéologie ;
 - Rémi Vigouroux (Artelia Eau et Environnement) : Ingénieur spécialiste en modélisation hydrogéologique.

Les points 4, 5 et 6 de la lettre du préfet du 17 février 2015 ont été étudiés conjointement par l'ensemble des intervenants.

2.2. DEROULEMENT DE LA TIERCE EXPERTISE

La tierce expertise s'est déroulée de mai 2015 à avril 2016. Le délai initial de 6 mois a été étendu compte tenu de l'apparition, au cours de la tierce expertise, de la nécessité de réaliser de nouvelles analyses de caractérisation des colis présents dans le stockage.

¹³ Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig

Plusieurs réunions de suivi ont été organisées, dans le but d'informer MDPA de l'avancement de l'étude. La DREAL a été invitée à ces réunions afin de vérifier l'adéquation des travaux effectués avec le cadre de la tierce expertise et avec la lettre du préfet du 17 février 2015, et apporter des précisions le cas échéant.

Les réunions suivantes ont ainsi eu lieu :

- Réunion du 27/02/2015, Wittelsheim ;
- Réunion du 16/04/2015, Paris ;
- Réunion du 16/06/2015, Strasbourg ;
- Réunion du 14/10/2015, Strasbourg ;
- Réunion du 10/02/2016, Strasbourg¹⁴ ;
- Réunion du 01/04/2016, Metz.

A la demande du préfet, une réunion s'est tenue à Wittelsheim le 7 avril 2016¹⁵ de façon notamment à présenter à la Commission de Suivi de Site (CSS) de StocaMine les résultats de la tierce expertise.

2.3. ORGANISATION DU RAPPORT

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 présent rapport correspond au rapport principal de la tierce expertise.

Après avoir présenté le cadre de la tierce expertise et le contexte du projet de confinement, les différents points de la lettre du préfet du 17 février 2015 sont analysés.

L'ordre des points est suivi dans le présent rapport avec cependant une inversion des points 3 et 4. En effet il est nécessaire d'aborder en premier lieu la réévaluation de la composition des colis entreposés (point 4) avant de préciser le terme source (point 3) puisque celui-ci dépend notamment des quantités de contaminant au sein du stockage.

¹⁴ A la suite de cette réunion, la préfecture a adressé une lettre à la tierce expertise (datée du 9 mars 2016) demandant de préciser certains points

¹⁵ de façon anticipée par rapport à la remise des rapports de la tierce expertise

3. CONTEXTE DU STOCKAGE ET PROJET DE CONFINEMENT

3.1. INTRODUCTION

Le contexte dans lequel se situe le stockage ainsi que le projet de confinement sont présentés ci-après de façon succincte de façon à permettre une meilleure compréhension des points analysés par la tierce expertise.

3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MINIER DU STOCKAGE

Localisation géographique

Le centre de stockage souterrain de déchets ultimes StocaMine est situé dans le bassin potassique d'Alsace, sur la commune de Wittelsheim à environ 10 km au Nord-Ouest de Mulhouse (Haut-Rhin).

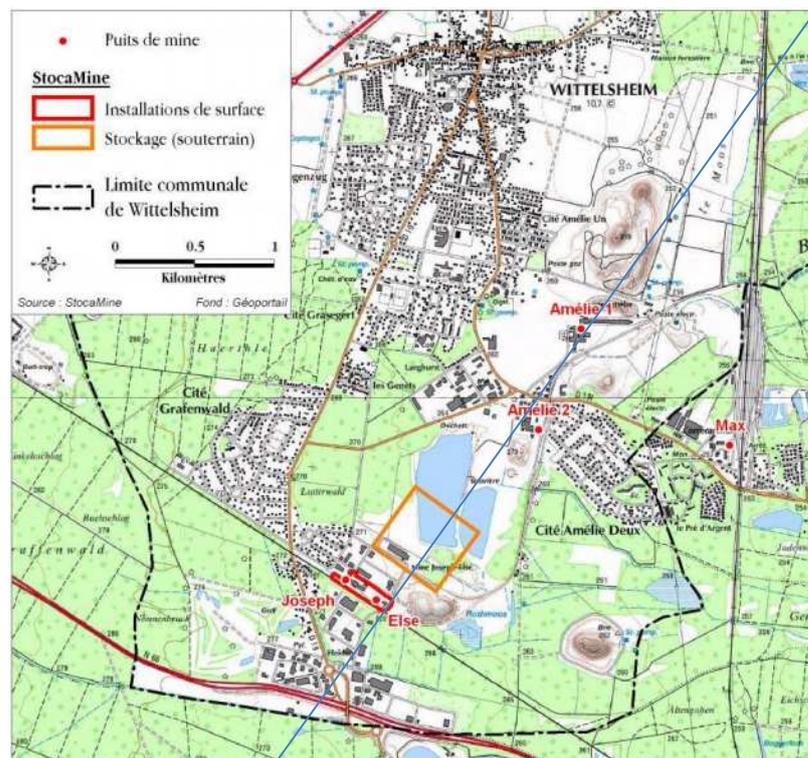


Figure 1. Localisation des installations de surface et du stockage (Dossier de demande)

Les installations de surface (3 ha environ, en rouge sur la figure 1) sont implantées sur une partie de l'ancien carreau minier Joseph-Else (MDPA) - entre les puits de mine Joseph et Else -, à environ 3 km au sud du centre-ville de Wittelsheim, en bordure nord de la voie ferrée SNCF Mulhouse-Kruth.

La zone de stockage se situe à environ 550 mètres de profondeur et représente globalement un rectangle de 700 x 500 m. Sa projection en surface (Cf. Figure 1 et Figure 2 en orange) se situe au

nord des puits de mine Joseph et Else et au sud des puits Amélie I et Amélie II. Le puits Max (5^{ème} puits de la mine Amélie) est situé environ 1,5 kilomètre au nord-est de l'emprise du stockage.

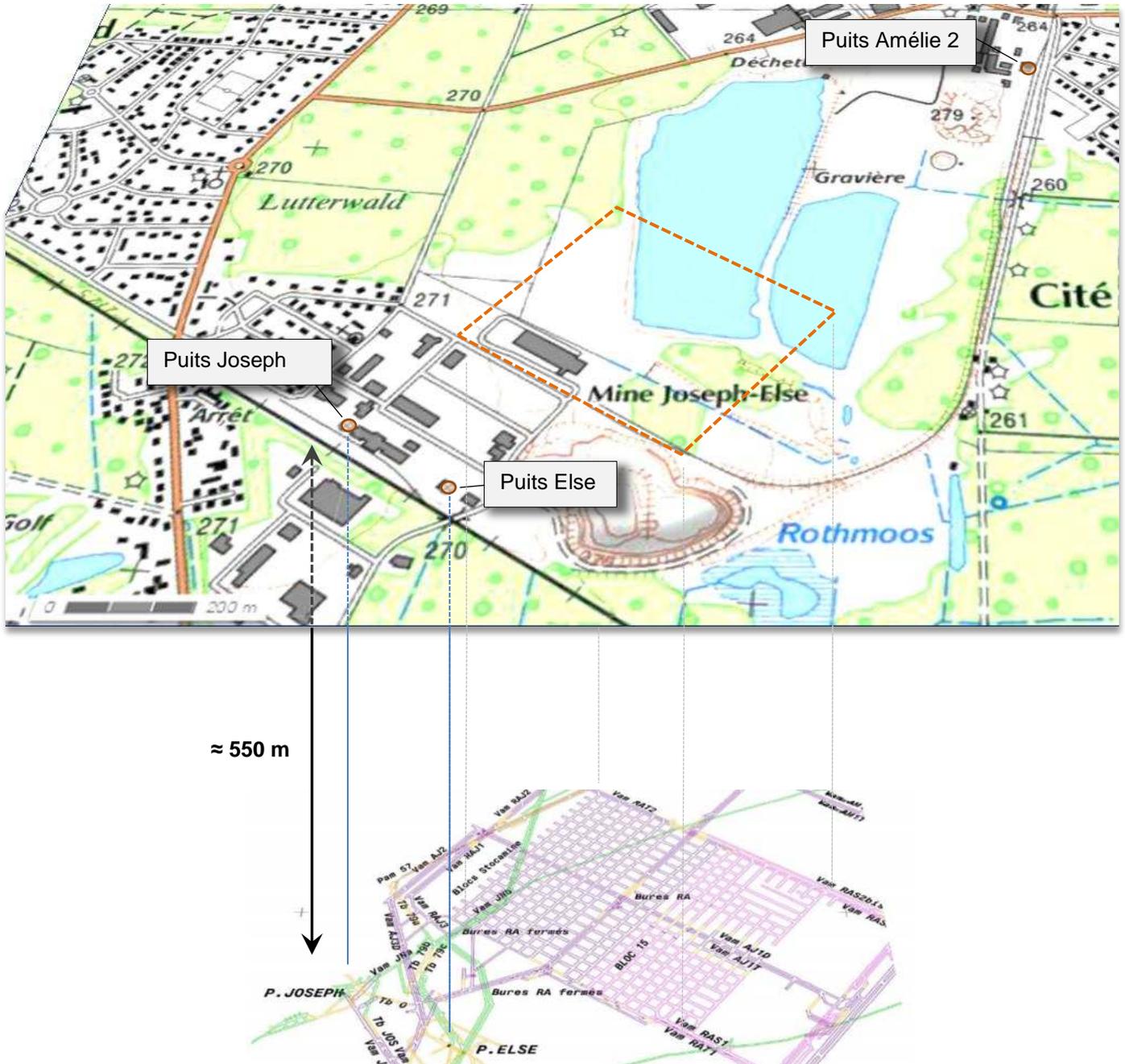


Figure 2. Localisation des installations profondes du stockage

Le contexte géologique est décrit dans l'annexe 4 du Dossier de demande (§2.1.2). Les figures présentées ci-après sont extraits de cette annexe.

La zone de stockage se situe dans la série salifère du Sanoisien. Cette série a une épaisseur d'environ 1200 m. Au niveau du stockage, le Sanoisien est surmonté par une zone à gypse puis par les formations quaternaires de la nappe d'Alsace alors que plus au nord une série composée

principalement par des marnes (Stampien) surmonte la zone à gypse (Cf. figure ci-dessous, l'orientation de la coupe correspond au trait bleu de la Figure 1 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

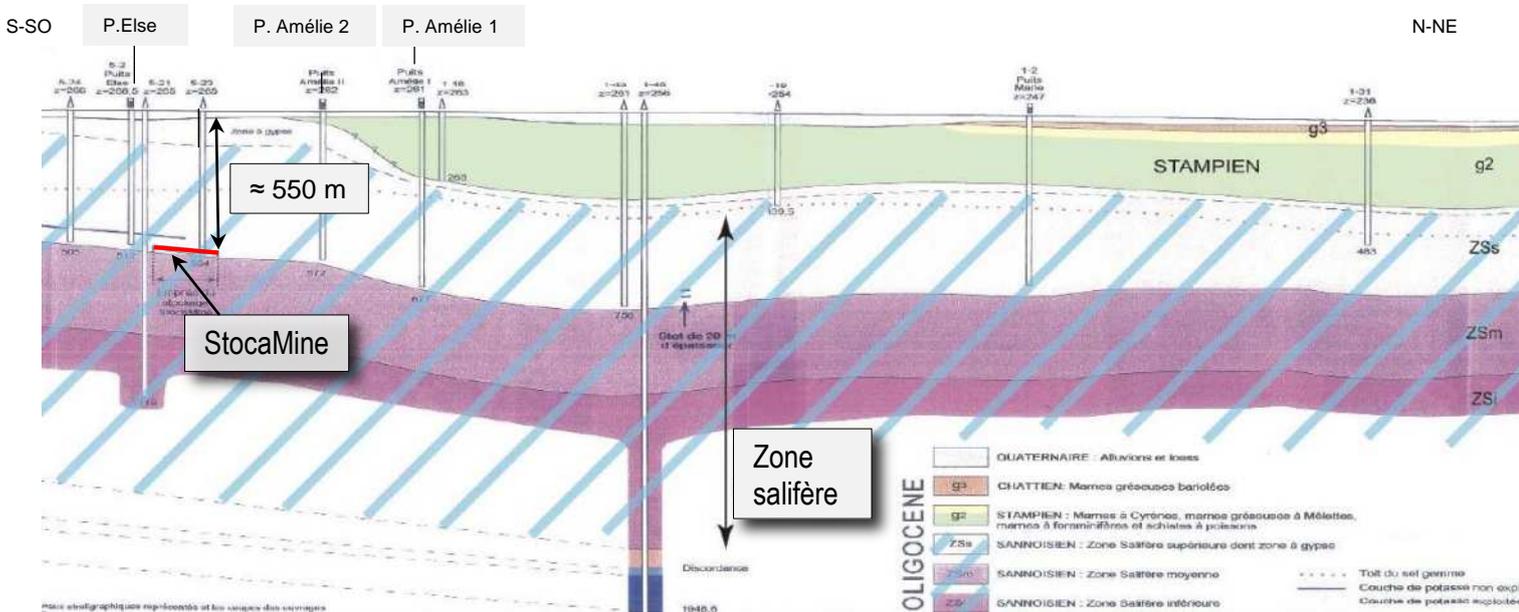


Figure 3. Localisation du stockage en profondeur (d'après Dossier de demande)

C'est au sein des formations salifères que les galeries de stockage ont été creusées. Les galeries d'accès au stockage partent des puits Joseph (qui sert pour descendre au site) et Else (qui sert de retour d'air). Ces galeries sont ainsi reliées à d'anciennes galeries de la mine de potasse « secteur Amélie ».

Le creusement du site de stockage s'est effectué dans des couches de sel gemme situées 23 m à 25 m sous la couche inférieure de sylvinite (minerai de potasse) exploitée auparavant par les MDP. Les équipements (notamment les deux puits d'accès et de ventilation), les matériels de travaux et de transport au fond et les anciennes galeries de la mine de potasse « Joseph-Else » servent au fonctionnement et aux accès au stockage.

Le stockage est distinct de l'ancienne mine.

Le plan des galeries de stockage est présenté ci-après.



Figure 4. Plan des galeries de stockage de StocaMine (Dossier de demande)

Le stockage est organisé en galeries creusées de 5,5 mètres de largeur, perpendiculaires entre elles (Cf. figure ci-dessous avec en gris le massif de sel et en vert les galeries de stockage).

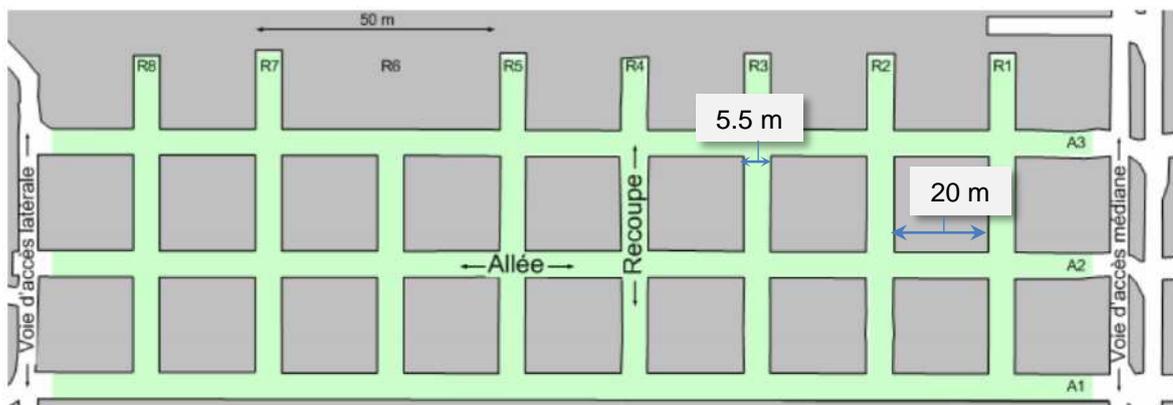


Figure 5. Plan d'un bloc (bloc 11) de stockage (BMG, [34])

Chaque « bloc » est constitué de deux ou trois galeries parallèles de 225 m de long (appelées allées) redécoupées orthogonalement par huit galeries de 70 mètres de long (appelées recoupes). Les allées et les recoupes délimitent des piliers carrés de sels gemme de 20 mètres de côté.

Les blocs de stockage sont séparés les uns des autres par 3 m d'épaisseur de sel gemme laissé en place et ne communiquent donc pas entre eux.

Les numéros des blocs ont été attribués en fonction de leur position par rapport aux galeries centrales, selon le schéma ci-dessous :

BLOC 11 (plein en 2002)	Voie centrale	BLOC 21 (plein en 2002)
BLOC 12 (plein en 2002)		BLOC 22 (plein en 2002)
BLOC 13 (plein en 2002)		BLOC 23 (plein en 2002)
<i>Recoupe centrale</i>		
BLOC 14 (plein en 2002)	Voie centrale	BLOC 24 (plein en 2002)
BLOC 15 : Rempli partiellement, incendie 2002		BLOC 25 : vide
BLOC 16 : vide et non fini		BLOC 26 : vide et non fini

Figure 6. Schéma simplifié de l'organisation du stockage (Dossier de demande)

A l'arrêt du stockage en 2002, 10 « blocs » étaient totalement ou partiellement aménagés. Les blocs 16 et 26 étaient en cours de creusement. Les blocs 11 à 14 et 21 à 24 étaient remplis de déchets. Le bloc 15 était en cours de remplissage. Le bloc 25, prêt, était vide.

Les déchets entreposés sont contenus soit dans des big-bags soit des fûts (Cf. photos ci-dessous).



Figure 7. Exemple de bloc de déchet en big-bags et en fûts (MDPA)

Le stockage est décrit plus précisément au paragraphe 3.1.3 du Dossier de demande.

3.3. PROJET DE CONFINEMENT

Le sel est naturellement étanche et les formations géologiques salifères non perturbées sont exemptes d'eau. Cependant l'exploitation de la potasse va créer des voies d'accès depuis la surface (puits, sondages, ..) et des vides miniers (associés aux couches de potasse extraite, aux galeries,...). L'ensemble de ce réseau peut permettre potentiellement la venue d'eau depuis la nappe d'Alsace vers la zone de stockage.

Dans le cas où l'eau de la nappe s'infiltrerait, elle se transformerait en saumure par dissolution des formations salifères. Cette saumure peut atteindre la zone de stockage et se charger en contaminants contenus dans les déchets stockés. Au sein du stockage, le poids des terrains sus-jacents exerce une pression sur la saumure polluée supérieure à la pression due à la saumure à l'extérieur du stockage. Ce différentiel de pression peut entraîner l'expulsion de la saumure polluée vers la nappe d'Alsace.

Dans ce contexte, le projet de confinement consiste alors à isoler la zone de stockage de la nappe phréatique d'Alsace, située environ 550 m plus haut, et à limiter l'impact des forces motrices responsables de la migration de la saumure polluée.

Les composantes du projet de confinement concernent le champ proche (à proximité du stockage) et le champ lointain.

Les descriptions des composantes présentées ci-après sont issues du Dossier de demande (§3.2) et des rapports Itasca.

Les composantes du projet de confinement dans le champ proche

Le remblayage des galeries vides

Le Dossier de demande mentionne la prise en compte d'un remblayage des galeries (Dossier de demande §3.2.3, et annexe 4 §1.2.2) avec pour finalité :

- le soutien du toit du stockage et limitation des possibilités de décollement de celui-ci ;
- un frein à la compaction du stockage ;
- la création de vides pour augmenter le temps de remplissage du stockage par la saumure (et donc retarder son expulsion ultérieure hors du stockage).

Cependant les caractéristiques du remblayage¹⁶ ne sont pas indiquées dans le Dossier de demande et l'impact du remblayage n'est pas pris en compte dans le cadre de l'évaluation de l'impact du stockage sur la nappe d'Alsace.

Aussi, en cohérence avec la réunion de cadrage de la tierce expertise¹⁷, nous avons considéré les caractéristiques du remblayage décrites dans le rapport Itasca [86] (§2.3). Le remblayage est constitué par un béton de cendres volantes et les caractéristiques prises en compte sont basées sur des essais réalisés en laboratoire¹⁸

¹⁶ Dont l'évolution de la déformabilité, de la porosité et de la résistance en fonction du temps

¹⁷ Il a été demandé à la tierce expertise de prendre en compte les derniers concepts de confinement étudiés, i.e. ceux décrits dans les rapports Itasca récents

¹⁸ Laboratoire de Génie Civil et Géoenvironnement – LGCgE – de l'Université d'Artois et Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur les Matériaux - LERM

Les barrières de confinement

Les barrières de confinement (ou barrages ou barrières ouvragées) visent à :

- retarder la pénétration de la saumure dans le stockage ;
- retarder la sortie de la saumure polluée du stockage ;
- limiter le débit de sortie de la saumure polluée.

La localisation des barrages est indiquée à la figure ci-après.

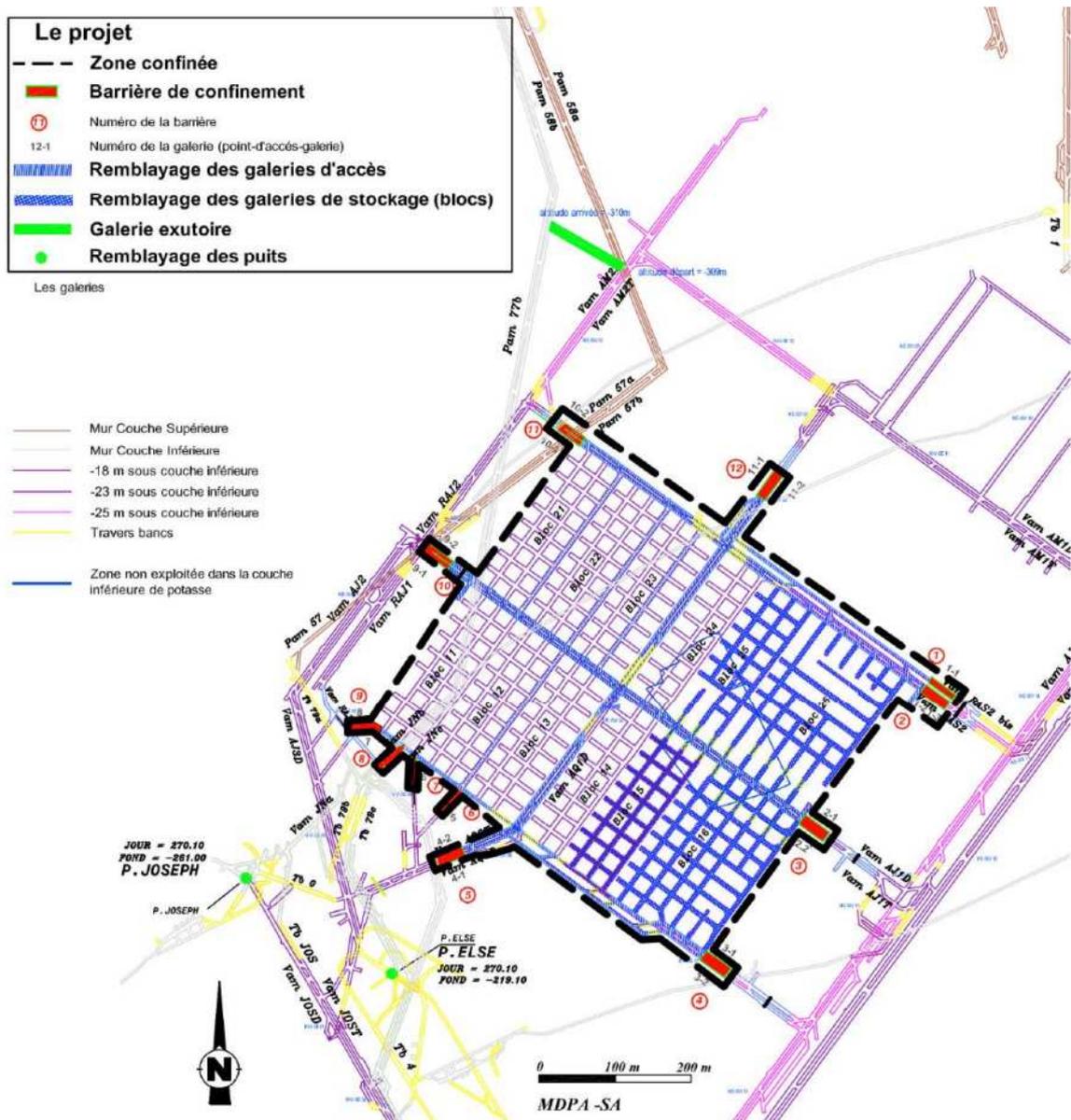


Figure 8. Barrières de confinement, remblayage, galerie exutoire et remblayage des puits (Dossier de demande)

Le Dossier de demande évoque plusieurs types de barrages possibles et retient les caractéristiques décrites dans le rapport Itasca [76], i.e. un barrage de 5 m¹⁹ de longueur composé de bentonite avec une perméabilité de 10⁻¹⁸ m². La hauteur du barrage prend en compte l'excavation de la zone endommagée sur une profondeur d'un mètre sur le pourtour de la galerie²⁰.

La galerie de court-circuit hydraulique ou « galerie exutoire »

Une galerie exutoire est envisagée pour drainer loin du stockage les venues d'eau qui proviendraient des puits Joseph et Else. Sa localisation est indiquée à la Figure 8. Cette galerie permettra de retarder l'arrivée de venues d'eau douce au niveau des barrières de confinement puisque les venues d'eau seront dirigées via cette galerie vers les points bas de la mine. Des dispositifs (non décrits dans le Dossier de demande) permettront de maintenir la fonctionnalité de cette galerie de façon pérenne.

Les composantes du projet de confinement dans le champ lointain

Le remblayage et la fermeture des puits

Le Dossier de demande précise l'objectif des travaux de fermeture :

- « assurer la tenue de ces ouvrages dans le long terme,
- sécuriser les abords des ouvrages en surface,
- limiter les possibilités de transfert d'eau (de la surface vers la mine) ou de saumure (de la mine vers la surface). »

Les puits Joseph et Else seront remblayés en se basant sur la méthodologie développée par les MDPA pour les autres puits et en l'adaptant au contexte de StocaMine « par la mise en place d'un bouchon (cendres volantes ou plus probablement coulis béton et cendres) sur la plus grande hauteur possible (remblayage du même type que le puits Max) de façon à limiter le débit de transit possible dans ces puits. Par ailleurs une couronne d'injection (par résine) à la base du cuvelage est également envisagée afin d'étancher les terrains. »

Les dispositifs de suivi de l'évolution du confinement

Les dispositions relatives au suivi sont précisées dans l'Annexe 4 du Dossier de demande. Celles-ci comprennent :

- Le suivi de l'ennoyage de la mine Amélie par la réalisation d'un forage profond²¹.
- Un suivi de la qualité de la nappe (incluant notamment les métaux lourds et les cyanures) sur des piézomètres existants ainsi que sur 10 piézomètres complémentaires qui devront être mis en place à l'amont et à l'aval des puits de la mine Amélie. Compte tenu de l'échelle de temps considérée, le Dossier de demande prévoit que la réalisation des piézomètres et le démarrage du suivi soient fixés en fonction du résultat du suivi de l'ennoyage.

¹⁹ Le Dossier de demande mentionne une longueur de 6 m pour le barrage décrit le rapport Itasca [76], mais c'est bien une longueur de 5 m qui est indiquée dans ce dernier rapport.

²⁰ La hauteur totale du barrage est ainsi de 5 m pour une galerie dont la hauteur est d'environ 3 m.

²¹ La réalisation du forage dénommé VAPB2, positionné au niveau du point bas de la mine Amélie, a débuté préalablement au dépôt du Dossier de demande et a été achevé en 2015.

4. ETUDE DE SURETE DU CONFINEMENT DES DECHETS A LONG TERME DANS LA MATRICE RECEPTRICE

4.1. INTRODUCTION

Ce chapitre correspond au point 1 de la lettre de demande du préfet du 17 février 2015, c'est à dire à « L'étude de sûreté du confinement des déchets à long terme dans la matrice réceptrice, compte tenu de ses caractéristiques géotechniques. En particulier, la tierce expertise s'attachera à expertiser la performance des barrages à réaliser et leurs emplacements, en fonction du scénario retenu ainsi que les mesures complémentaires à mettre en œuvre. En outre, le concept de remblayage des puits Else et Joseph sera aussi étudié. »

L'étude de sûreté de la demande d'autorisation est présentée à l'annexe 6 du Dossier de demande. Cette annexe correspond au rapport n° DRS-12-108130-02769B de l'Inéris ([73] | Ineris, 2012).

Comme l'explique l'Inéris dans ce rapport, le décret n° 2006-283 du 10 mars 2006²² indique que la transformation d'un stockage temporaire de déchets en stockage définitif doit s'accompagner d'une « Etude de sûreté du confinement à long terme de la matrice réceptrice compte-tenu de ses caractéristiques géotechniques » mais que le contenu de cette étude de sûreté n'est pas défini dans la réglementation.

En se basant sur les notions de « sûreté » décrites dans la réglementation des Installations Nucléaires de Base et des installations de produits explosifs, l'Inéris analyse dans l'étude de sûreté principalement les aspects relatifs la stabilité mécanique du stockage.

Cependant, la tierce expertise considère, notamment au regard du texte même de référence ('étude de sûreté du *confinement...*') et de la définition allemande de la notion de sûreté, que l'étude de sûreté devrait évaluer :

- non seulement – comme le fait l'Inéris - la *stabilité mécanique* du milieu récepteur (milieu géologique et travaux miniers) et plus spécifiquement la stabilité de la zone de stockage proprement dite,
- mais également la *capacité du milieu récepteur à assurer le confinement* des déchets²³.

Il peut être noté que ce dernier point est abordé par ailleurs dans la demande mais peu dans l'annexe consacrée à l'étude de sûreté²⁴.

Concept multi-barrières et champs proche et lointain

La notion de sûreté du confinement, dans le cas de stockage souterrain en couche géologique profonde, s'appuie souvent sur le concept multi-barrière du stockage, où le confinement est assuré à la fois par des barrières ouvragées et par la barrière naturelle que constitue le milieu récepteur.

²² Abrogé par le décret n°2007-1467 du 12 octobre 2007 qui fait référence à l'article R515-11, alinéa III-6° du code de l'environnement.

²³ i.e. cela consiste à s'intéresser à la perméabilité des terrains et à son éventuelle évolution avec le temps.

²⁴ Dans l'étude de sûreté il est seulement indiqué l'impact possible du décollement du toit sur l'évolution a maxima des perméabilité sans pour autant conclure sur l'impact éventuel sur la modification de la capacité de confinement.

Dans ce cadre, il est souvent fait une distinction entre la zone située à proximité du stockage²⁵ (le champ proche) et la partie située au-delà de cette zone et constituée par les formations géologiques (le champ lointain).

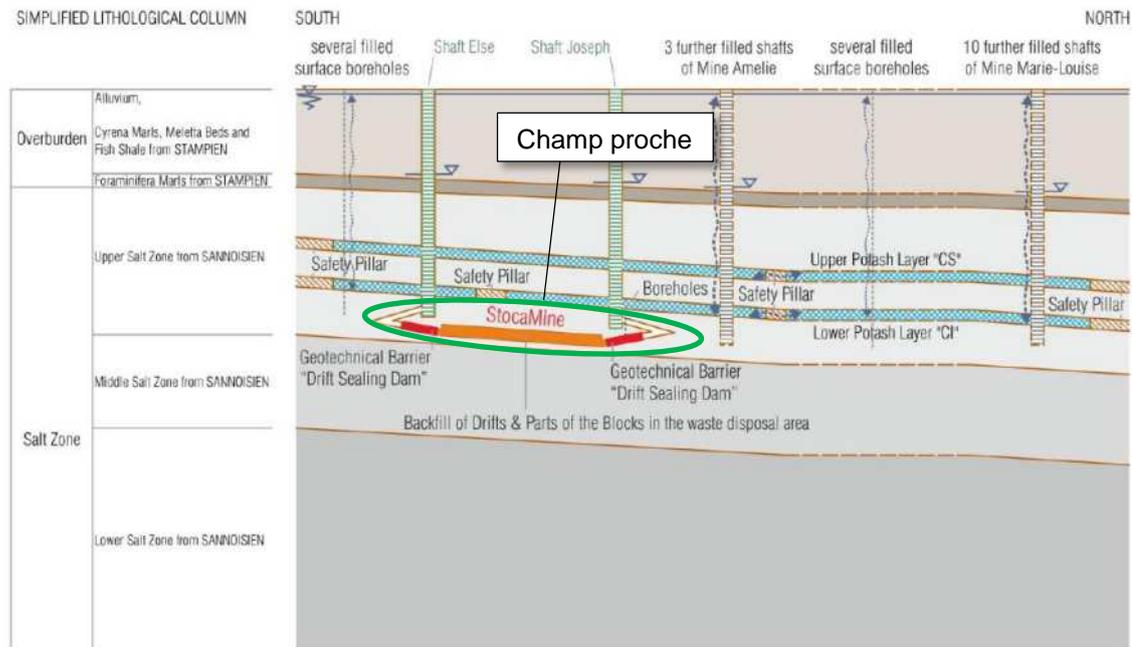


Figure 9. Aperçu schématique du concept de sûreté du site de StocaMine consistant en un « système multi-barrières » (d'après [77], ERCOSPLAN, 2013)

Nous adopterons cette distinction pour analyser les aspects relatifs à l'étude de sûreté du Dossier de demande.

4.2. STABILITE MECANIQUE

L'intégrité de la barrière géologique suppose une stabilité mécanique à long terme. Les paragraphes suivants présentent donc les éléments qui permettent d'évaluer la stabilité géomécanique de la matrice réceptrice (du champ lointain au champ proche).

4.2.1. Milieu géologique

La stabilité mécanique du milieu géologique est abordée dans le paragraphe 2.1.2.2 de l'étude d'impact du Dossier de demande et se base sur les résultats des études de l'Ineris, de l'Institut de Géophysique du Globe et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris ([55] | Ineris, 2011).

Les phénomènes qui pourraient déstabiliser le milieu géologique sont le diapirisme, c'est-à-dire l'ascension d'un massif de sel sous l'effet des différences de densité, et les mouvements liés à un séisme.

Selon les études précitées, les conditions d'apparition de diapirs ne sont pas réunies à StocaMine. En effet ce phénomène pourrait advenir dans le cas d'un massif de sel d'une épaisseur de plus de 500 m situé à une profondeur de plus de 1000 mètres (ce qui n'est pas le cas de StocaMine). Les observations montrent qu'alors une remontée des terrains est possible mais très lente (0,1 mm/an environ). Ainsi dans la plaine du Rhin, les diapirs sont peu nombreux : les diapirs les plus proches

²⁵ Et incluant le stockage proprement dit

de StocaMine sont situés au nord et à l'est de Mulhouse, dans des zones plus favorables à leur apparition.

Les mouvements liés à un phénomène de diapirisme à StocaMine sont considérés comme peu probables et extrêmement lents s'ils existaient.

Les études sismiques ont montré que si la zone est active, un séisme d'envergure est peu probable dans la zone (un séisme de magnitude 6,5 tous les 1000 ans environ). Il est également montré qu'en cas d'un tel séisme, les conséquences seraient faibles en profondeur, et donc pas de nature à modifier la structure géologique constituant la barrière géologique.

La tierce expertise est en accord avec cette analyse. De plus, il est montré par la tierce expertise (Cf. paragraphe 4.3.3) que dans le cas de réactivation de faille (dont l'impact serait amplifié par la présence de vides miniers) les phénomènes de cicatrisation conduiraient à ce que les couches de sel recouvrent leur intégrité.

4.2.2. Mine

La stabilité de la mine est discutée aux paragraphes 4.3, 4.4 et 4.5 de l'étude de sûreté (annexe 6 du Dossier de demande).

La mine a été exploitée principalement par taille foudroyée, c'est-à-dire que la plupart des vides ont été effondrés de manière contrôlée juste après l'exploitation (Cf. figure ci-dessous).

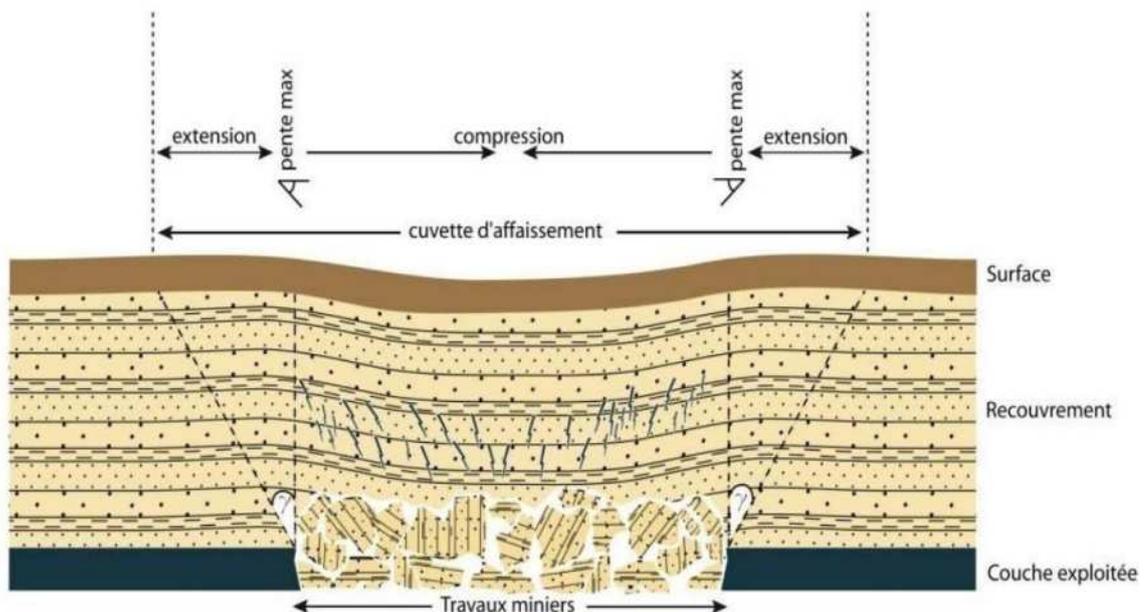


Figure 10. Schéma d'affaissement lié à une exploitation minière par longues tailles avec foudroyage ([73], Inéris, 2012)

Après une compaction initiale relativement rapide (de l'ordre de quelques années) une évolution mécanique des vides restant se met ensuite en place (compaction résiduelle et fluage) de manière très lente.

La stabilité mécanique des travaux miniers est assurée à long terme, d'autant plus que l'activité minière a été arrêtée en 2002.

La tierce expertise est en accord avec cette analyse.

4.2.3. Stockage

L'Inéris identifie plusieurs types d'instabilités géotechniques locales (Cf. §4.6 de l'étude de sûreté dans annexe 6 du Dossier de demande d'autorisation) :

- la fissuration/fracturation de piliers des voies doubles, plus ou moins étendue selon le pilier ;
- le soufflage du mur des galeries ;
- le décollement du toit du stockage, en particulier dans le secteur plus profond situé à -25 m du niveau exploité. Ce fait, qui tient au litage marqué du toit entre -23 m et -25 m, est responsable d'importants désordres au niveau du bloc 15 ;
- le poinçonnement du stot existant au niveau exploité, responsable d'une forte concentration des contraintes dans les blocs sous-jacents ;
- l'endommagement d'origine thermique lié à l'incendie du bloc 15.

Si l'Inéris indique que ces phénomènes risquent de s'intensifier dans les années à venir, il souligne que ces instabilités restent locales et limitées dans l'espace. Ainsi la distance affectée par les décollements 'peut difficilement s'étendre jusqu'au niveau exploité situé 23 à 25 m au-dessus du stockage'.

Le rapport Feuga ([49], 2010) est plus circonspect quant à l'efficacité et la pérennité de la barrière géologique locale entre le site de StocaMine et la couche inférieure de potasse. Ce rapport cite les études effectuées alors par l'Ecole des mines de Paris sur le sujet (Vouille, 1990 – Hadj-Hassen et Tijani, 2006). Ces études « donnent à penser que [...] les désordres localisés [...] ne risqueront même pas de créer dans le toit des galeries de stockage de fractures pouvant mettre le site de StocaMine en communication avec les anciens travaux miniers (situés 23 ou 25 m au-dessus) ». Cependant, B. Feuga estime que cette conclusion doit être considérée avec prudence en partie du fait que les lois extrapolées pour le long terme sont établies à partir d'observations réalisées sur des durées ne dépassant pas quelques années. Il préconise donc le remblayage des galeries de StocaMine pour réduire toute possibilité de déformation et donc de dégradation des terrains.

Pour ce dernier point, il est rappelé que le Dossier de demande préconise la mise en place de remblayage dans les cavités du stockage avec pour objectif notamment de soutenir le toit et empêcher la progression du décollement.

La tierce expertise est en accord avec l'intérêt du remblayage.

L'Inéris analyse également (rapport Inéris [53], 2010) plus globalement la stabilité de la zone de stockage et conclut à la stabilité de celle-ci.

La tierce expertise a analysé de façon relativement détaillée, dans le rapport *Géomécanique*, la stabilité géomécanique de la zone de stockage (Cf. section 3 du rapport précité, et plus particulièrement le § 3.2.8.) en prenant en compte le coefficient d'élancement²⁶, la résistance à la rupture et la capacité portante.

Il ressort notamment de cette analyse que :

« La zone de stockage de StocaMine ayant été installée et exploitée comme site de stockage et non comme une mine de sel traditionnelle, les dimensions du système de chambres et piliers sont très sécuritaires en termes de stabilité. Ainsi, d'un point de vue géomécanique, le site de stockage des déchets est stable durant la période d'exploitation et à long terme. »

²⁶ C'est le rapport hauteur/largeur d'un pilier soit 2.8 m/20 m \approx 1/7

Ces conclusions sont en accord avec celles de l'Inéris.

4.3. CONFINEMENT HYDRAULIQUE

4.3.1. Introduction

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. Sans discontinuités permettant les circulations d'eau, les formations salines sont très imperméables, d'où l'intérêt d'y stocker des déchets. Le sel non perturbé est considéré comme étanche.

Toutefois, le développement d'une activité minière d'extraction de potasse entraîne des perturbations de ce milieu. Il s'agit :

- Des sondages et des puits d'accès et de retour d'air ;
- Des galeries (d'accès et de stockage) ;
- Des vides miniers liés à l'extraction de potasse (tailles foudroyées principalement).

Par ailleurs, la présence de vides miniers pourrait potentiellement accroître l'impact de la réactivation de failles associée à un séisme.

Il importe donc d'évaluer dans quelle mesure ces perturbations modifient les caractéristiques de la matrice réceptrice.

4.3.2. Champ lointain

Les caractéristiques relatives au confinement de la matrice réceptrice (i.e. les formations géologiques salifères) sont bien décrites dans le rapport Feuga ([49], 2010). « Le site de StocaMine est implanté au cœur d'une série géologique (« bloc hôte ») imperméable d'une puissance de l'ordre de 1200 m (200 m au toit du site, et 1000 m au mur de celui-ci). Cette série est constituée essentiellement de terrains très ductiles (argilite, sel) qui peuvent subir des déformations importantes sans se rompre. En outre le sel, de par ses propriétés rhéologiques particulières (son aptitude à fluer), est capable de « cicatriser » rapidement les fractures qui peuvent y apparaître. Ceci explique que, bien que le fossé rhénan soit une zone tectoniquement active, les déformations qu'a subies cette série imperméable n'aient pas altéré son étanchéité. C'est le cas particulier des failles qui recoupent la série : dans les mines de potasse, ces failles, dont aucun, au demeurant, n'est proche du site de StocaMine, n'ont donné lieu à aucune venue d'eau significative. »

Par ailleurs, il a été montré (observations et calculs de mécanique des roches) que la zone de terrain déstructurée par le foudroyage ne s'étendait pas au-delà des quelques dizaines de mètres au dessus des tailles (30 m selon les observations des MDPAs)²⁷.

Le rapport *Géomécanique* confirme ce qui précède :

- 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

²⁷ In rapport Feuga ([49], 2010).

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.

- Des pertes locales de l'intégrité du sel peuvent uniquement survenir le long des perturbations du massif de sel (sondages, galeries, ...).
- Le sel récupère l'intégrité hydraulique après fermeture du stockage en raison de la capacité du sel gemme à s'auto-cicatriser.

Ainsi, pour ce qui concerne le champ lointain, il peut être considéré que la matrice réceptrice est étanche au niveau du mur du stockage et de la partie sus-jacente à la zone déstructurée par le foudroyage. La mise en communication du site avec la nappe phréatique se fera donc uniquement par les puits et les vides miniers connectés hydrauliquement entre le stockage et les puits.

Stot entre les mines Amélie et Marie-Louise

La mine Amélie située au sud du secteur ouest des MDPAs (partie moins profonde) est séparée de la mine Marie-Louise en laissant un stot (sel et potasse) d'une quarantaine de mètres de largeur (mais qui peut atteindre localement une épaisseur de 4 m). L'Ineris s'est interrogé sur la stabilité et l'étanchéité du stot dans la mesure où, de part et d'autre de celui-ci, se trouvent des longues tailles foudroyées provoquant d'importantes concentrations de contraintes sur le stot. L'Ineris a réalisé une modélisation numérique spécifique ([53]) et conclu qu'une absence d'étanchéité hydraulique, au moins partielle, pour le stot de séparation est plausible.

Ce sujet est abordé dans un certain nombre de rapports cités dans le Dossier de demande.

Dans la mesure où, il n'est pas de premier abord aisé de déterminer si le fait de prendre en compte une communication hydraulique entre les mines Amélie et Marie-Louise est une approche sécuritaire ou non et où l'absence d'étanchéité du stot est seulement 'plausible', le Dossier de demande prend en compte les deux hypothèses.

Sondages

L'Ineris recense (annexe 6 du Dossier de demande) les sondages réalisés (en citant le rapport MICA [28]). Les sondages rebouchés ont parfois été recoupés par les travaux miniers. Dans la plupart des cas, quelques suintements et de faibles venues d'eau saturée en sel ont été observées et plus rarement des coulées de boues. Cependant, « les sondages qui ont amené de l'eau lors des travaux d'exploitation ont été immédiatement traités depuis le fond » (MICA, 2004, p. 81) par injection de ciment.

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

L'Ineris 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.

Concept de remblayage des puits Joseph et Else

Seuls deux des puits de la mine (sur les 15 puits du secteur Ouest), sont encore ouverts. L'ennoyage de la mine est bien sûr d'abord conditionné par les infiltrations des puits déjà remblayés, pour certains il y a plusieurs dizaines d'années. Néanmoins, l'utilisation de techniques qui permettent de mieux étancher les puits Joseph et Else est envisagée en tenant compte de l'expérience des MDPA et des progrès techniques récents en matière de remblaiement des puits.

Le projet de remblayage des puits Joseph et Else, est globalement proche des techniques allemandes présentés par la tierce expertise en annexe 3. La conception définitive du remblaiement de Joseph et Else pourrait éventuellement s'inspirer de certains de ces exemples.

4.3.3. Champ proche

Au niveau du champ proche, les formations salifères sont fragilisées sur le pourtour des galeries (zone endommagée – ou EDZ – où la perméabilité est très inférieure à celle du sel gemme). La question se pose alors sur l'intégrité de la zone située entre le toit du stockage et le mur de la couche inférieure.

Evolution de la zone endommagée

Ce sujet est abordé dans le Dossier de demande notamment au paragraphe 8.2.5.6.a de l'annexe 4.

De façon synthétique, les points suivants sont énoncés :

- La présence d'une zone endommagée autour des galeries d'accès au stockage peut conduire à une augmentation significative de la perméabilité du sel. Cette zone plus perméable pourrait permettre des circulations hydrauliques privilégiées autour des barrages et favoriser l'accès à la zone de stockage puis la sortie de saumure polluée ;
- Il est alors recommandé de sur-excaver les galeries au niveau de l'emplacement des futurs barrages pour réduire voire supprimer la zone endommagée.
- Il est également souligné, en se basant sur l'étude Itasca ([78], 2013) que la cicatrisation (*healing*) des fissures sous contrainte, notamment en présence de saumure, conduit à une diminution progressive de la perméabilité de la zone endommagée. Ainsi le surcreusement autour des barrières pourra être inférieur à la totalité de l'épaisseur de la zone endommagée.

La tierce expertise a étudié de façon détaillée à la fois la perméabilité du sel in situ à l'état perturbé et non perturbé (Cf. §3.2.5 du rapport *Géomécanique*) et également la récupération de l'intégrité hydraulique dans la zone de stockage (Cf. §3.4. du rapport *Géomécanique*). Les paragraphes suivants sont extraits de ce rapport.

La question centrale dans l'appréciation de la sûreté pour un stockage de déchets est la récupération de l'intégrité hydraulique du massif de sel, car elle prévient les impacts négatifs dus à l'existence de voies secondaires autour des scellements d'étanchéité.

Dans la phase post-fermeture, après la fin de l'excavation et du remblayage, la contrainte tangentielle dans le sel gemme diminue progressivement par fluage, jusqu'à atteindre un état de contrainte isostatique. Par conséquent, l'état de contrainte dans l'EDZ passera du domaine dilatant au domaine non dilatant. Ceci provoquera a minima la compaction de l'EDZ et de ce fait une réduction de perméabilité.

La cicatrisation de l'EDZ est démontré par des observations in situ, des essais de laboratoire et par des modélisations :

- Le rétablissement, au moins partiel, de l'intégrité hydraulique de l'EDZ dans des conditions in situ a été récemment confirmé par des recherches sur l'unique site d'essais existant, à savoir la mine de sel de Asse située à une profondeur de 700 m (Cf. *Wieczorek & Schwarzianek, 2004*).

Dans cette mine, une cloison coulée en acier d'environ 20 m de longueur a été installée dans une galerie remblayée avec du béton en 1914. Des mesures de perméabilité démontrent que sous le mur de la galerie ouverte, une EDZ typique s'est développée, de 1,5 m de profondeur et dont la perméabilité atteint 10^{-16} m^2 . Autour de la cloison en acier, cependant, la perméabilité a diminué à des valeurs comprises entre 10^{-20} m^2 et 10^{-19} m^2 .

Ceci prouve que l'augmentation des contraintes provoquée par la présence de la cloison permet de retrouver un confinement hydraulique beaucoup plus rapidement.

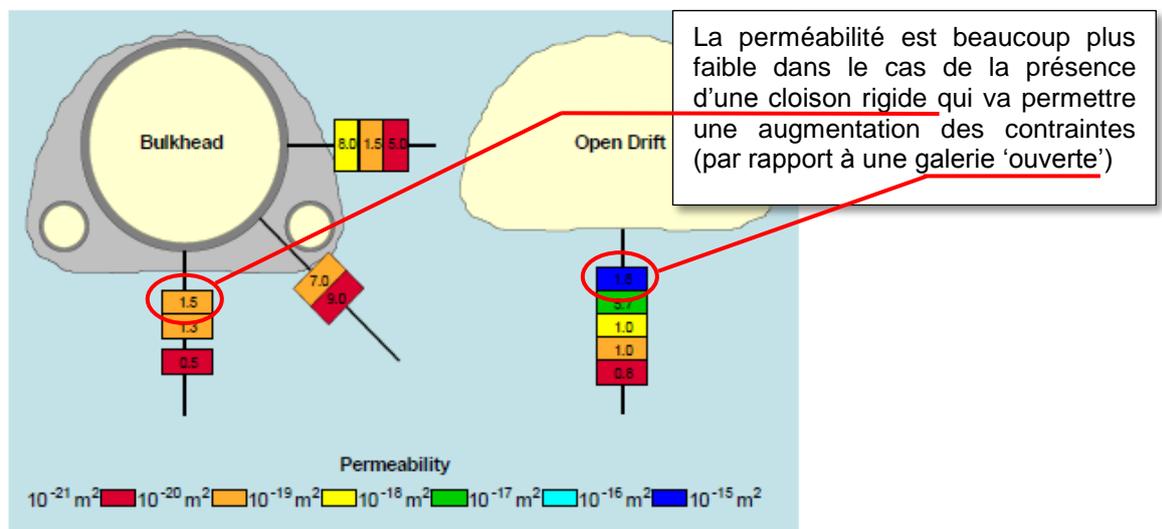


Figure 11. Profils de perméabilité à proximité d'une cloison et d'une galerie ouverte adjacente (Mine d'Asse in rapport *Géomécanique*)

Des mesures de perméabilités réalisés autour d'une butée de béton réalisée dans les années 1990 ont également permis d'observer la récupération de l'intégrité hydromécanique de la zone de contour et du matériau.

- En laboratoire : les tests effectués sur des échantillons de sel endommagés suggèrent que dans des conditions isostatiques, le sel gemme dilaté peut être scellé mécaniquement sur de courtes échelles de temps.
- Les modélisations numériques réalisées par Itasca ([76] | Itasca, 2013) ([86] | Itasca, 2015) confirment que les barrières envisagées sur StocaMine dans les conditions du site pourront atteindre une perméabilité très faible au bout de quelques dizaines d'années (Cf. figure ci-après) après que le massif de sel environnant se soit cicatrisé.

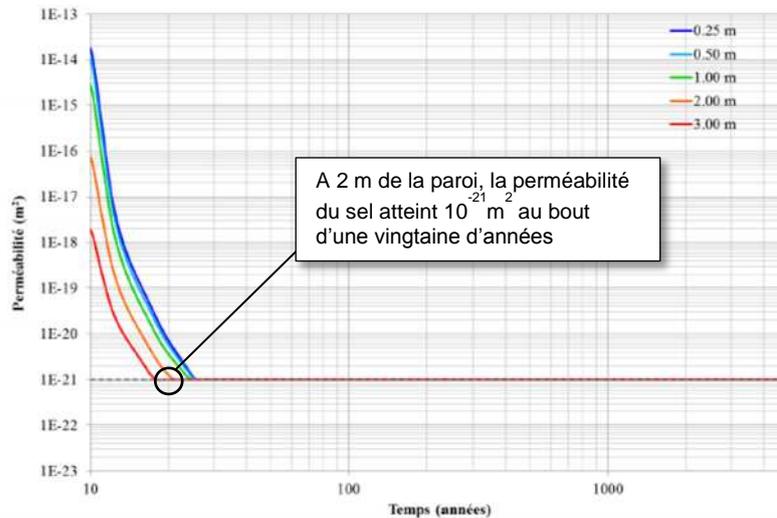


Figure 12. Évolution de la perméabilité le long d'un profil vertical à partir du toit d'une galerie fermée (extrait d'ITASCA, [78], 2013)

Bien qu'Itasca ait utilisé des hypothèses parfois trop simplificatrices, les ordres de grandeur indiqués de récupération des propriétés hydrauliques sont considérés comme corrects par la tierce expertise²⁸.

Intégrité du toit du stockage

L'évolution de la perméabilité de la zone située entre le toit du stockage et le mur de la couche inférieure est abordée au §4.6 du rapport Inéris ([73], 2012).

Il est ainsi considéré que :

- la perméabilité de la zone endommagée en paroi des galeries et au toit du stockage peut être supérieure de plusieurs ordres de grandeur à la perméabilité du sel intact ;
- la modélisation met en évidence une extension de l'EDZ de l'ordre d'un mètre.

Cependant la question qui peut se poser est de savoir si l'épaisseur de la barrière de sel est suffisante pour résister à une pression de fluide importante.

De ce point de vue, la tierce expertise présente un analogue géologique (Cf. rapport *Géomécanique*, §3.2.4). Contrairement aux essais classiques sur le terrain, les analogues techniques permettent d'évaluer les phénomènes temporaires à grande échelle et à long terme. Dans le cas de la mine de sel de Merkers (Allemagne), mine exploitée par chambres et piliers, il a été montré par modélisation qu'une barrière de sel de faible épaisseur (environ 30 m) restait intacte (i.e. étanche) malgré la pression de fluide exercée à son mur (pression de CO₂ d'environ 7.5 MPa)²⁹.

À la suite d'un séisme, survenu le 13 mars 1989, une fracturation s'est produite aboutissant à la perte d'intégrité de la barrière de sel et à une fuite du gaz initialement maintenu sous pression. Or il a été observé une cicatrisation de la barrière de sel et le rétablissement progressif de l'intégrité de

²⁸ La mise à jour du modèle avec le concept de barrière finalement retenu et en prenant en compte les remarques de la tierce expertise pourra permettre de préciser l'évolution des propriétés hydromécaniques du stockage

²⁹ Dit autrement, le fait que la pression de fluide sous-jacente soit élevée démontre que la couche de sel joue bien un rôle de barrière

la barrière de sel. La validité des simulations numériques réalisées a été démontrée, d'une part par les observations concernant le rétablissement de l'étanchéité du sel (aucune émission de CO₂ après un an) et d'autre part, en mesurant l'augmentation des valeurs de contrainte dans les barrières de sel anciennement déchargées (Cf. Popp et al., 2007).

Ainsi, il est considéré par la tierce expertise qu'une barrière de sel de relativement faible épaisseur permet d'assurer une étanchéité au niveau du toit du stockage (d'autant plus que le remblayage va induire une forte amélioration des caractéristiques de la zone endommagée). **Il conviendra toutefois de s'assurer que les trous de dégazage³⁰** (Cf. Dossier de demande, Annexe 4, §6.1.2.2) **réalisés au toit du stockage n'impactent pas cette étanchéité.**

Performance des barrages

Le concept des barrières ouvragées envisagé est présenté au paragraphe 3.2.4 de la demande. Le rôle hydraulique des barrières ouvragées est discuté dans le paragraphe 1.2.1 de l'étude d'impact du Dossier de demande, et se base sur les résultats des études de Itasca ([76] | Itasca, 2013) ([86] | Itasca, 2015).

Les conclusions de la tierce expertise sur ce sujet sont exposées en détail dans le rapport *Géomécanique*.

D'une façon générale, sur la base des expériences existantes concernant d'autres projets de scellement, la mise en place de barrages de scellement à long terme dans des formations de sel avec une étanchéité suffisante est possible.

Les observations réalisées sur les barrages pilotes pour des stockages dans les mines de sel allemandes (Asse, Morsleben) montrent en effet que des perméabilités intégrales de l'ordre de 10⁻¹⁸ m² sont atteignables en quelques années.

La perméabilité intégrale initiale des barrages visée devrait être de l'ordre de < 10⁻¹⁸ m², ce qui est possible d'un point de vue technique. Dans de telles conditions, les débits à travers les barrages sur le site de StocaMine seront inférieurs à 10 m³/an.

Le concept d'étanchéité d'ERCOSPLAN propose un schéma de barrage possible. Il conviendrait cependant de prendre en compte les recommandations formulées par la tierce expertise dans le rapport *Géomécanique* et visant à renforcer l'efficacité du système, notamment l'avis formulé vis-à-vis de l'utilisation du béton Sorel.

Les barrières ouvragées pourront donc permettre un confinement hydraulique efficace : seul un débit extrêmement limité de saumure pourrait ainsi s'infiltrer vers le stockage (de l'ordre de 10 m³/an d'après les études d'Itasca).

Mesures complémentaires à mettre en œuvre

Le remblayage, tel que décrit dans le Dossier de demande et par Itasca [86], permettra de renforcer le confinement notamment en allongeant la durée d'envoyage. Cette disposition constructive fait partie intégrante du concept de confinement et donc de la demande d'autorisation.

La tierce expertise a considéré que ce remblaiement aura les caractéristiques décrites par Itasca (Itasca 2015). Cependant, les tiers-experts indiquent que la mise en œuvre de ce remblai peut s'avérer complexe du fait de certaines contraintes techniques (Cf. rapport *Géomécanique* de la tierce expertise). Les caractéristiques du remblaiement devront donc être affinées par les MDPAs, avec pour objectif d'atteindre des caractéristiques similaires à celles indiquées par Itasca.

³⁰ réalisés dans le but de faire baisser la pression de gaz dans les terrains

4.4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le document présenté en annexe 6 du Dossier de demande n'expose que partiellement les aspects relatifs à l'étude de sûreté³¹, du moins dans la compréhension qu'en a la tierce expertise.

Cependant, les éléments contenus dans les études associées au dossier et les quelques éléments apportés par la tierce expertise permettent de présenter les conclusions ci-dessous :

La barrière géologique que constitue le massif de sel peut être considérée comme étanche. Seuls les puits, les galeries d'accès et les vides liés à l'extraction de potasse pourraient permettre une connexion hydraulique entre la zone de stockage et la nappe phréatique d'Alsace.

La zone endommagée des galeries située au niveau de l'emplacement des barrages retrouve l'intégrité hydraulique du massif de sel en quelques dizaines d'années. Ceci est démontré à l'aide de mesures de laboratoire, d'observations de terrain et de simulations numériques.

La barrière de sel entre le toit du stockage et la couche inférieure a une épaisseur suffisante pour garantir une étanchéité (d'autant plus que le remblayage va induire une forte amélioration des caractéristiques de la zone endommagée).

Les barrières ouvragées (barrages) pourront permettre un confinement hydraulique efficace : seul un débit extrêmement limité de saumure pourrait ainsi s'infiltrer vers le stockage (de l'ordre de 10 m³/an d'après les études d'Itasca).

Le remblaiement du stockage fait partie intégrante du projet de confinement : le remblaiement permet de garantir la stabilité mécanique de celui-ci, de ralentir l'envoyage du stockage en augmentant le volume de vides disponibles et, de par sa faible compressibilité, de limiter les débits de sortie de saumure polluée.

La fermeture des puits Joseph et Else utilise un concept proche des techniques les plus évoluées en la matière : le projet de fermeture de ces puits est donc satisfaisant.

La stabilité mécanique du massif de sel, des travaux miniers et du stockage proprement dit est garantie à long terme.

Selon la compréhension de la tierce expertise de l'étude de sûreté, il serait souhaitable que l'ensemble des éléments relatifs à la stabilité et au confinement soient synthétisés dans un seul document ou chapitre du Dossier de demande.

³¹ Certains aspects relatifs au confinement apparaissant dans d'autres volets du Dossier de demande

5. ETUDE DU VOLUME ET DE L'EVOLUTION DES VIDES MINIERES – VITESSE D'ENNOYAGE ATTENDUE

5.1. INTRODUCTION

Ce chapitre correspond au point 2 de la lettre de demande du préfet du 17 février 2015, c'est à dire à « l'étude du volume et de l'évolution du volume des vides miniers concernés par le stockage et par récurrence la vitesse d'ennoyage attendue ».

Ces éléments sont étudiés dans le paragraphe 2.4.2.2. de l'étude d'impact (annexe 4 du Dossier de demande). Le Dossier de demande se base principalement sur les études de l'Ineris (principalement le document [55] (Ineris, 2011)).

Dans une première partie, les phénomènes associés à la vitesse d'ennoyage sont identifiés.

Ensuite, les lois de comportement associées à ces phénomènes sont décrites et les valeurs des paramètres sont déterminées dans le cas de StocaMine.

Enfin la vitesse d'ennoyage est évaluée.

5.2. PHENOMENES A PRENDRE EN COMPTE POUR EVALUER LA VITESSE D'ENNOYAGE

Le milieu salifère au sein duquel se trouve le stockage constitue initialement un milieu très favorable au confinement des déchets car la présence même de sel témoigne du très bas niveau de circulation de l'eau souterraine. Toutefois, l'exploitation minière est venue perturber cette situation, créant des voies de transfert potentielles entre les zones exploitées et la surface. Les terrains salifères et les terrains sus-jacents ont ainsi été traversés par environ 200 sondages de reconnaissance en petit diamètre et 15 puits en gros diamètre.

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. 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.

En revanche, malgré le remblayage des puits avec des cendres volantes depuis les années 1980, les infiltrations situées à l'extrados des puits vont contribuer à ennoyer la mine.

Lors de l'ennoiement, l'eau de la nappe en s'infiltrant va dissoudre le sel et se transformer en saumure.

Pour déterminer, à partir du débit d'infiltration, la vitesse d'ennoyage - c'est-à-dire la vitesse de montée du niveau de la saumure dans la mine - il importe de connaître le volume des vides miniers³² qui vont être progressivement saturés par la saumure.

³² Et leur évolution au cours du temps

Les vides présents dans la mine (galeries et tailles foudroyées) vont avoir tendance à se réduire avec le temps.

Les phénomènes de convergence des vides sont différents pour les galeries et les tailles foudroyées :

- Pour les galeries, la convergence des vides est due au fluage.
- Pour les tailles foudroyées, après une phase de compaction initiale des terrains de quelques années, la convergence des vides est due à la fois à la compaction résiduelle des terrains et au fluage.

Les phénomènes liés à l'envoyage de la mine étudiés et pris en compte dans le Dossier de demande sont :

- L'infiltration d'eau à travers l'extrados des puits,
- La dissolution des évaporites (sel et potasse),
- La convergence des vides miniers (galeries et tailles foudroyées).

La figure suivante synthétise de façon schématique les phénomènes qui influencent la vitesse d'envoyage de la mine.

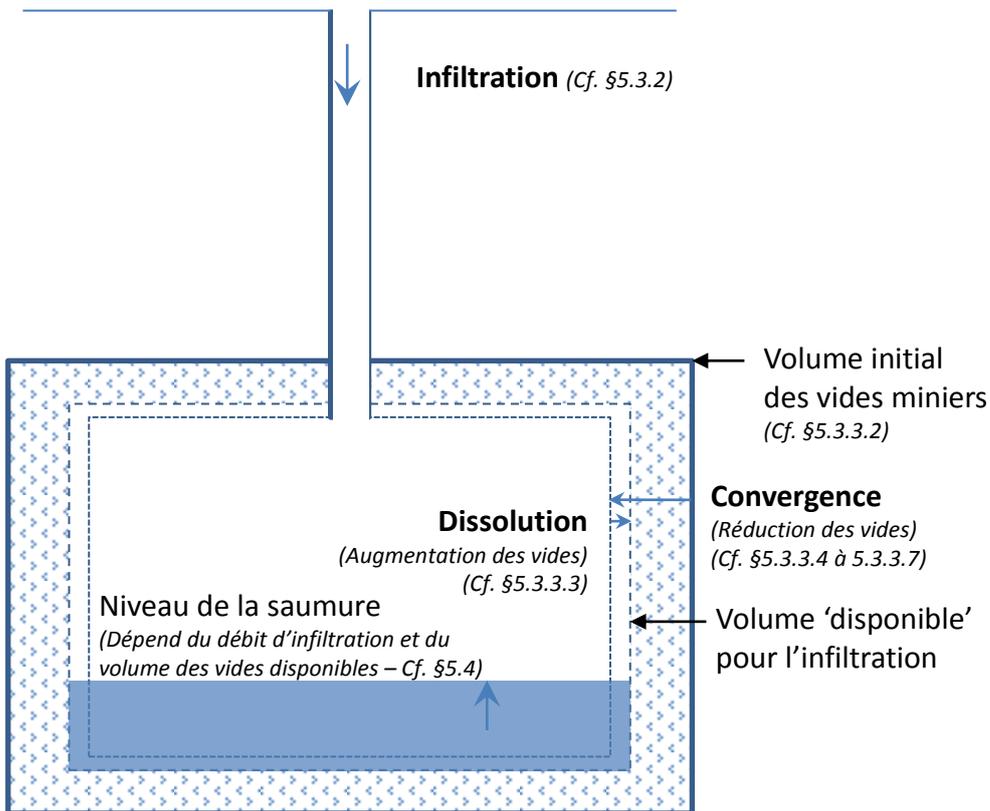


Figure 13. Représentation schématique des phénomènes liés à l'envoyage de la mine

Les phénomènes à prendre en compte pour évaluer la vitesse d'envoyage sont correctement identifiés et décrits dans le Dossier de demande.

5.3. EVALUATION DES VALEURS DES PARAMETRES

5.3.1. Secteur(s) à considérer

Il a été vu précédemment que la vitesse d'envoyage dépend du débit d'infiltration via les puits de mine et des vides miniers connectés à ces puits. Il est alors nécessaire de déterminer quels sont les vides miniers qui peuvent être en relation avec la zone de stockage.

La zone de le stockage de StocaMine est située dans le secteur de la mine Amélie³³ 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).

Selon l'INERIS ([55] | INERIS, 2011), l'isolement hydraulique du secteur de la mine Amélie et du reste du secteur ouest ne peut être garanti du fait de la faible épaisseur du stot par endroit, celle-ci pouvant atteindre une épaisseur de 4 m par endroits.

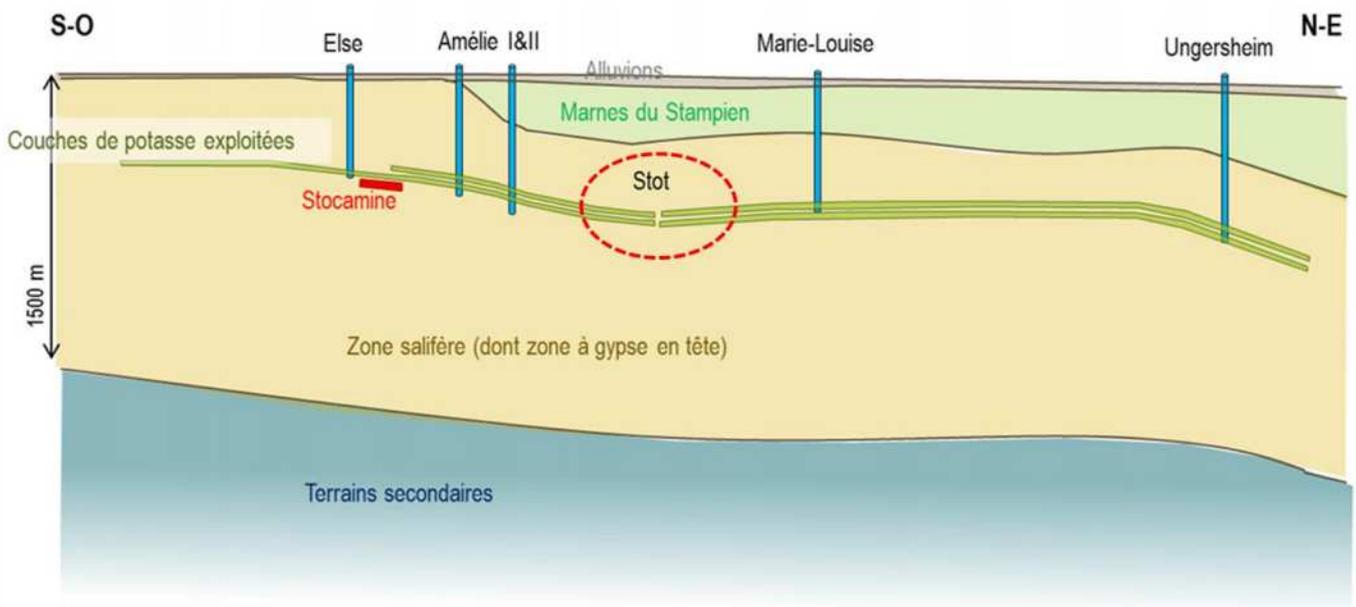


Figure 14. Coupe SO-NE présentant la position du stockage par rapport aux travaux miniers et au stot (d'après Mica, 2004)

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.

Le Dossier de demande considère qu'il existe 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.

³³ qui, lors de l'exploitation de la potasse, était connectée avec la surface par les puits Amélie 1 et 2, Max, Joseph et Else

L'évaluation du rôle hydraulique du stot séparant la mine Amélie du reste des travaux miniers n'étant pas clairement établi, la tierce expertise est en accord avec le Dossier de demande qui considère les deux hypothèses.

5.3.2. Evaluation des débits d'infiltration

Les infiltrations se font principalement par l'extrados des puits

Le Dossier de demande (Cf. §3 du rapport [55], Inéris, 2011) écarte ou considère comme négligeable le transfert de saumure par :

- diapirisme,
- failles,
- sondages,

et retient une infiltration possible des eaux de la nappe d'Alsace via les puits colmatés et une expulsion de saumure via ces puits.

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.

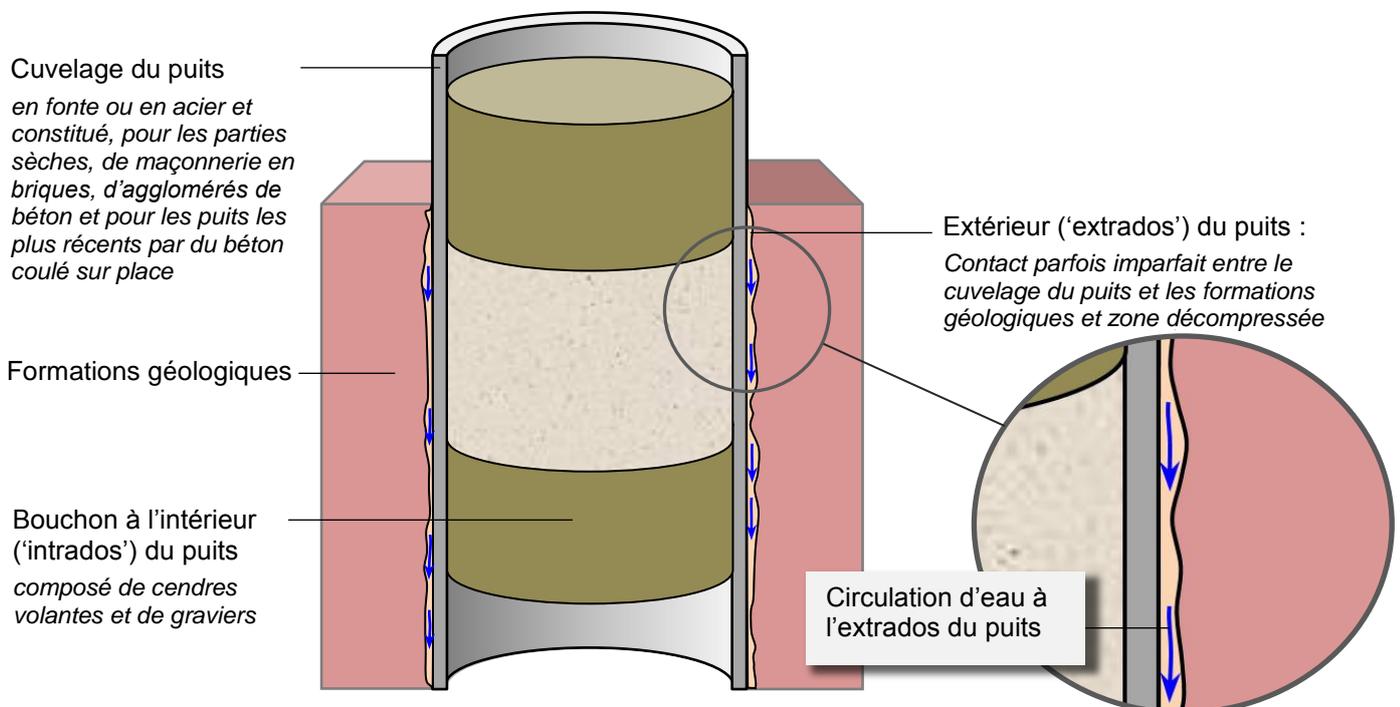


Figure 15. Représentation schématique de circulation d'eau à l'extrados d'un puits

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 (Cf. rapport *Hydraulique* de la tierce expertise).

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

Evaluation des débits d'infiltration

Les différentes estimations des débits 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' ;
- 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.

L'Inéris 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 m³/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'exhaure³⁴ mesurés³⁵, hors épisode historique ponctuel de fortes venues d'eau, soit un débit total pour l'ensemble du secteur ouest d'environ 72 000 m³/an.

³⁴ Ceux-ci correspondent aux débits d'infiltration et au réseau d'alimentation de la mine.

³⁵ Référence retenue : Note Lourdel du 12 juillet 2005

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])	Lourdell - note du 12 juillet 2005	Inéris ([55])	
Secteur Amélie					
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	
sous-total	2 400			6 980	9 778
Reste du secteur ouest					
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
Sous-total	18 983	65 000	105 069		
TOTAL	21 383		71 980	114 847	

Note : du fait d'une erreur de sommation ([55], tableau 4, p37) L'INERIS retient la valeur de 104 847 m³/an, arrondie à 105 000 m³/an au lieu de 114 847 m³/an.

5.3.3. Evolution des vides miniers

5.3.3.1. INTRODUCTION

Comme cela a été vu précédemment il importe de distinguer le comportement des vides miniers correspondant aux tailles foudroyées de ceux correspondant aux galeries.

L'évolution des vides est alors estimée en prenant en compte :

- Les vides initiaux,
- Les processus de modification des vides :
 - Phénomènes de dissolution ;
 - Compaction initiale (tailles foudroyées) ;

- Convergence résiduelle (pour les tailles foudroyées et les galeries).

Ces différents points sont présentés dans les paragraphes suivants.

5.3.3.2. VIDES INITIAUX

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour la détermination du volume de vides créé par l'exploitation minière.

Le Dossier de demande retient les hypothèses de l'INERIS qui considère que :

- Les volumes créés par l'exploitation minière se répartissent en tailles foudroyées (95,5% du volume total) et en voies et galeries (4,5% du volume total) ([55] | INERIS, 2011).
- Les volumes sont calculés à partir du tonnage extrait et de la masse volumique du minerai ([28] | Mica Environnement, 2004), ([55] | INERIS, 2011)

Le volume considéré est de 200 000 000 m³ pour l'ensemble du secteur ouest et de 90 000 000 m³ 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.

Le volume total des vides initiaux est ainsi de 200 Mm³ pour le secteur ouest.

5.3.3.3. VIDES CRÉÉS PAR DISSOLUTION

Le Dossier de demande considère que les infiltrations correspondent à de l'eau douce et donc que le potentiel de dissolution est maximal.

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'envoyage in rapport *Hydraulique*).

5.3.3.4. COMPACTION INITIALE DES TAILLES FOUROYES

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

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

Tableau 2. 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 ³⁶ . Les résultats obtenus vont de 65% à 75% ³⁷ . 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 locales³⁸.

5.3.3.5. CONVERGENCE RESIDUELLE DES TAILLES FOUROYEES

Pour les tailles foudroyées, l'INERIS se base sur des chroniques d'observation d'affaissement en surface³⁹ (qui correspondent à une convergence des vides en profondeur) ([53] | Ineris, 2010 §7.6.1, p51).

³⁶ Il s'agit donc ici de la compaction initiale suivie d'une convergence résiduelle jusqu'à la date de 2006

³⁷ Réalisé par INERIS ([53] | INERIS, 2010) et repris par ARTELIA

³⁸ Le Dossier de demande mentionne des volumes résiduels estimés entre 10 à 30% des vides initiaux (Annexe 4, §2.4.2.2)

³⁹ 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)

Les exemples donnés dans le corps du rapport 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 une vitesse d'affaissement résiduel estimée à 0.7 – 1 cm/an.

Pour illustrer l'approche retenue, l'INERIS divise l'affaissement actuel (i.e. 1 cm) par la hauteur *initiale* des vides (i.e. 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.

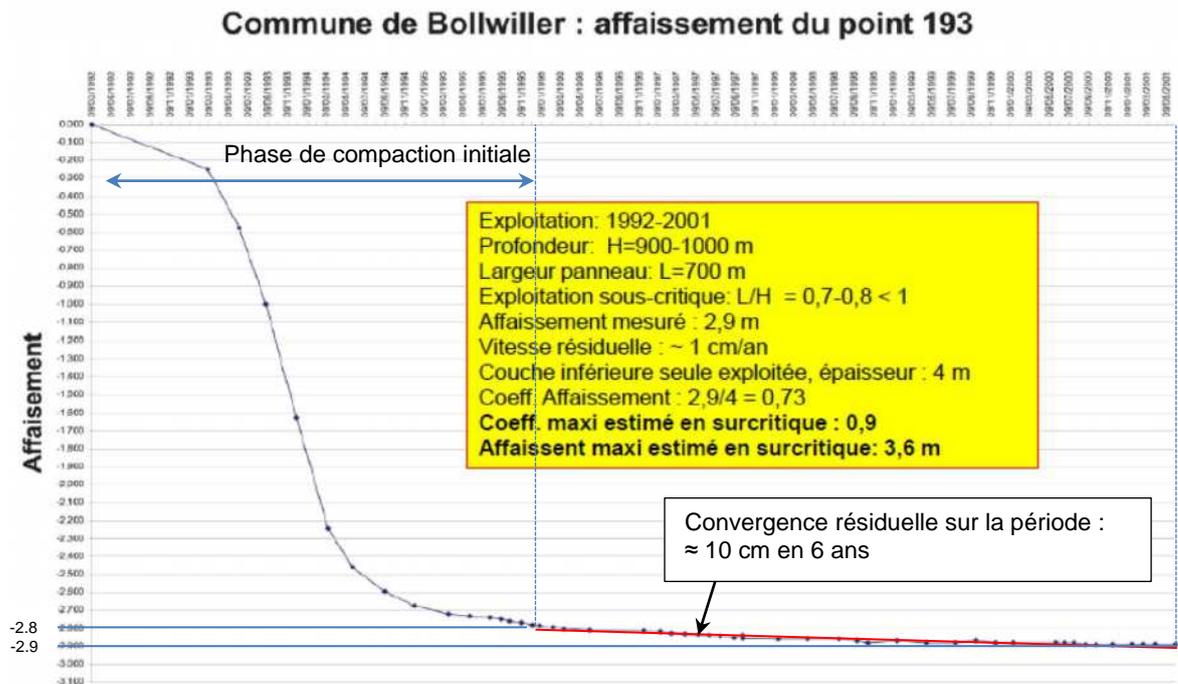


Figure 16. Représentation schématique de circulation d'eau à l'extrados d'un puits

Sur la figure ci-dessus :

- L'affaissement maximal est estimé à 3.6 m
- L'affaissement après la phase de compaction initiale peut être estimé à ≈ 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 d'une vitesse relative 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) est basée sur un raisonnement erroné et sous-estime de façon significative la convergence résiduelle des tailles foudroyées. Il en résulte que les volumes résiduels, 'disponibles' à l'envolement, seront plus importants.

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 d'envolement de la mine plus long.

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 2014⁴⁰.
- les mesures d'affaissement réalisées juste après le passage des travaux miniers et présentées dans le rapport de l'Ineris ([53] | Ineris, 2010)
- les mesures de niveau de saumure dans le sondage VAPB2 en novembre 2015⁴¹.

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

Le niveau de saumure mesuré dans le forage VAPB2 résulte (Cf. Schéma à la figure ci-dessous) :

⁴⁰ Ces valeurs ont été mesurées sur une période de courte durée et doivent donc être considérées avec prudence

⁴¹ Mesures dont ne disposait pas l'Ineris

- du volume d'eau infiltré via les puits Amélie 1 et 2 depuis l'arrêt de l'exhaure de ces puits⁴² ;
- des vides disponibles à l'enneiement sur la période s'étendant depuis l'arrêt des puits jusqu'à maintenant (2015).

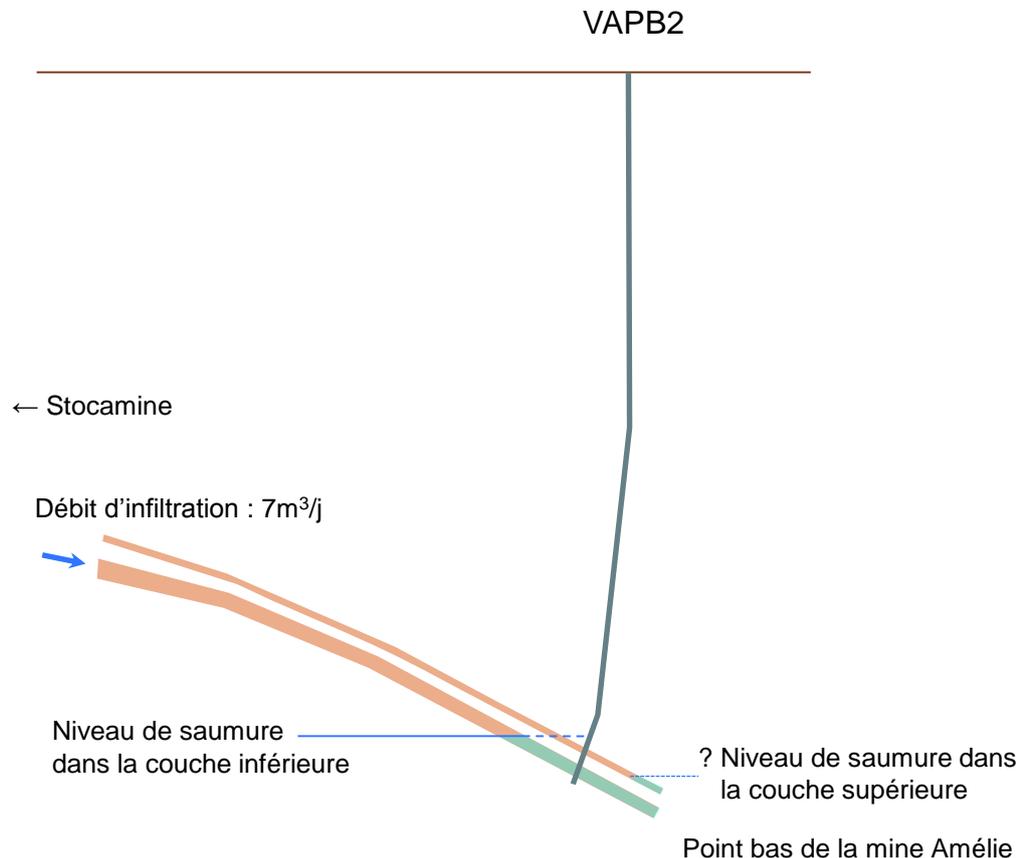


Figure 17. Schématisation du niveau de saumure dans le forage VAPB2 (d'après MDPA)

Un calcul a été effectué par la tierce expertise⁴³ pour évaluer quelle serait la convergence résiduelle dans le cas d'une hypothèse de compaction initiale de 60%. Le résultat obtenu, dans ce cadre, donne une convergence résiduelle, à environ 890 m de profondeur, de l'ordre de 2.5%⁴⁴.

Sur la figure ci-dessous les convergences résiduelles déduites des points d'observation récents⁴⁵ (■), des points d'observation anciens (○) et du niveau de saumure dans le forage VAPB2 ont été représentées à la figure ci-après en considérant pour tous les points une compaction initiale des tailles foudroyées de 60%.

⁴² 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 m³ sur la période considérée.

⁴³ Ce calcul prend en compte la dissolution et la réduction de la convergence résiduelle lorsque les vides sont saturés de saumure. Le calcul est effectué à un pas de temps annuel et intègre notamment la répartition des vides miniers en fonction de la date de 'création' des vides et de leur profondeur.

⁴⁴ Il peut être noté que la convergence résiduelle dépend fortement de la compaction initiale.

⁴⁵ Relativement peu fiables au vu de la faible étendue de la période de mesure.

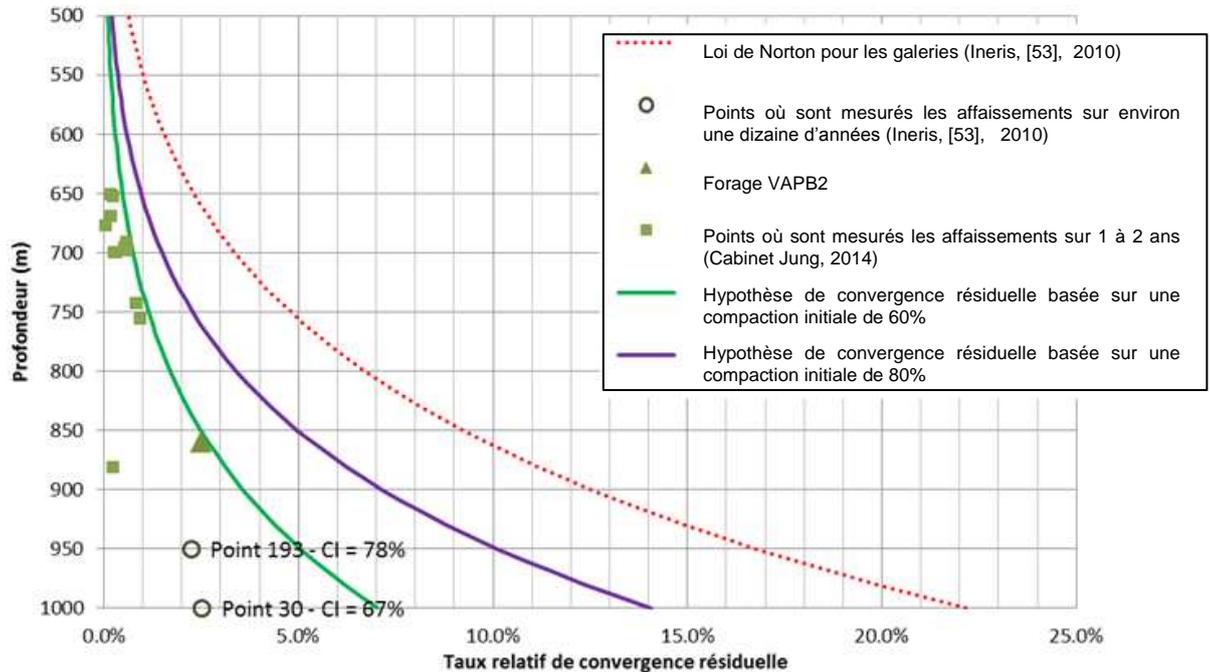


Figure 18. Etablissement de relations compaction initiale / convergence résiduelle / profondeur

Pour une compaction initiale donnée, une relation entre convergence résiduelle et profondeur a été établie de façon sécuritaire⁴⁶ par rapport aux observations disponibles (courbe verte de la figure ci-dessus).

Dans la mesure où des valeurs de compaction initiale de l'ordre de 80% ont pu être observées, une autre relation a été établie entre convergence résiduelle et profondeur de façon sécuritaire⁴⁷ par rapport aux observations (courbe bleue de la figure ci-dessus).

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.

⁴⁶ La courbe verte est systématiquement 'à droite' des convergences résiduelles ponctuelles estimées en se basant sur une compaction initiale de 60%. C'est-à-dire que les vides se refermeront plus vite, que les volumes disponibles à l'envolement seront alors plus faibles, et que, pour un débit d'infiltration donné, le niveau de saumure 'montera' plus vite (approche sécuritaire).

⁴⁷ Comme précédemment (Cf. note ³⁵ ci-dessus) la courbe bleue passe systématiquement 'à droite' des convergences résiduelles ponctuelles estimées en se basant sur une compaction initiale de 80% (et prend en compte notamment les points récents de mesure des affaissements) (approche sécuritaire).

5.3.3.6. 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 en utilisant la loi de Norton⁴⁸ ([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 3. 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).

5.3.3.7. IMPACT DE L'ENNOYAGE SUR LE FLUAGE

Lorsque la mine est complètement ennoyée, la pression hydrostatique 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 alors diminuée d'un facteur 2,2⁴ soit environ d'un facteur 23 ([55] | INERIS, 2011)⁴⁹.

L'Inéris retient les valeurs présentées dans le tableau ci-après⁵⁰.

⁴⁸ 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 baisse 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.

⁴⁹ Dans le rapport ([53] | INERIS, 2010), l'Inéris, sur la base d'hypothèses proches considère un facteur de réduction de 2⁴ soit un facteur 16.

⁵⁰ 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 un arrondi correspondant à plus du double de la valeur estimée).

Tableau 4. 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'ennoyement et avant l'ennoyement 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 avec cette approche.

5.4. EVALUATION DE LA VITESSE D'ENNOYAGE

Le Dossier de demande évalue une durée d'ennoyage de l'ordre de 300 ans pour le secteur ouest⁵¹ (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 MDPAs⁵² 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 (non exhaustif) les hypothèses suivantes.

- 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 mécaniquement⁵³.
- Pour ce qui concerne les vitesses de convergences :

⁵¹ Et de 240 ans pour que le niveau de saumure atteigne le niveau du stockage

⁵² En 2015

⁵³ 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.

- les valeurs indiquées dans le rapport [53] (Inéris, 2010).

L'approche moyennante développée ne prend pas en compte une évolution des vides miniers qui dépendrait 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 les taux de convergence dépendant de la profondeur ont pu être proposés, la tierce expertise a mené un calcul détaillé pour évaluer la pertinence de la vitesse d'ennoyage indiquée dans le Dossier de demande. Cette approche est présentée succinctement ci-après et de façon plus détaillée dans le rapport *Hydraulique* de la tierce expertise.

Les hypothèses considérées par la tierce-expertise relatives à l'évolution des vides miniers avec le temps sont les suivantes.

- L'estimation des vides créés par l'exploitation minière (ou vides initiaux) est réalisée à partir d'un calcul de tonnage et de masse volumique : le tonnage extrait a été suivi précisément et la masse volumique du minerai varie peu, la méthode est donc relativement précise en particulier comparativement à d'autres méthodes d'estimation (surface et hauteur exploitée, cette dernière pouvant varier significativement et n'étant pas forcément consigné aussi précisément que le tonnage extrait).
- Conformément aux observations et aux avis des différents experts (Inéris, IfG, ...) le volume des galeries et des voies d'accès fluent selon la loi dite de Norton, dont les paramètres ont été calés sur les observations des MDPA.
- L'évolution des vides dans les tailles foudroyées est plus difficile à évaluer puisque ceux-ci ne sont plus directement accessibles. L'utilisation d'observations récentes a permis de proposer une relation entre convergence des vides et profondeur⁵⁴, avec des paramètres également calés sur les observations indirectes d'évolution des vides (affaissement en surface, sondages in situ, observation de l'ennoyage par forage, ...).
- La dissolution est considérée comme correspondante à 24% des vides ennoyés.
- La convergence augmente d'un facteur 2 lorsque les vides sont partiellement ennoyés (Ifg).
- La convergence est divisée d'un facteur 2.2^4 (i.e. ≈ 23) lorsque les vides sont totalement ennoyés.

Le calcul se fait en suite par intégration de l'évolution des vides en fonction de la profondeur et dans le temps.

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 de 250 ans pour le secteur Ouest (respectivement 345 ans et 885 ans dans le cas du secteur Amélie).

La figure suivante présente 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 %.

⁵⁴ De fait deux relations sont proposées en fonction des hypothèses relatives à la compaction initiale des terrains foudroyés

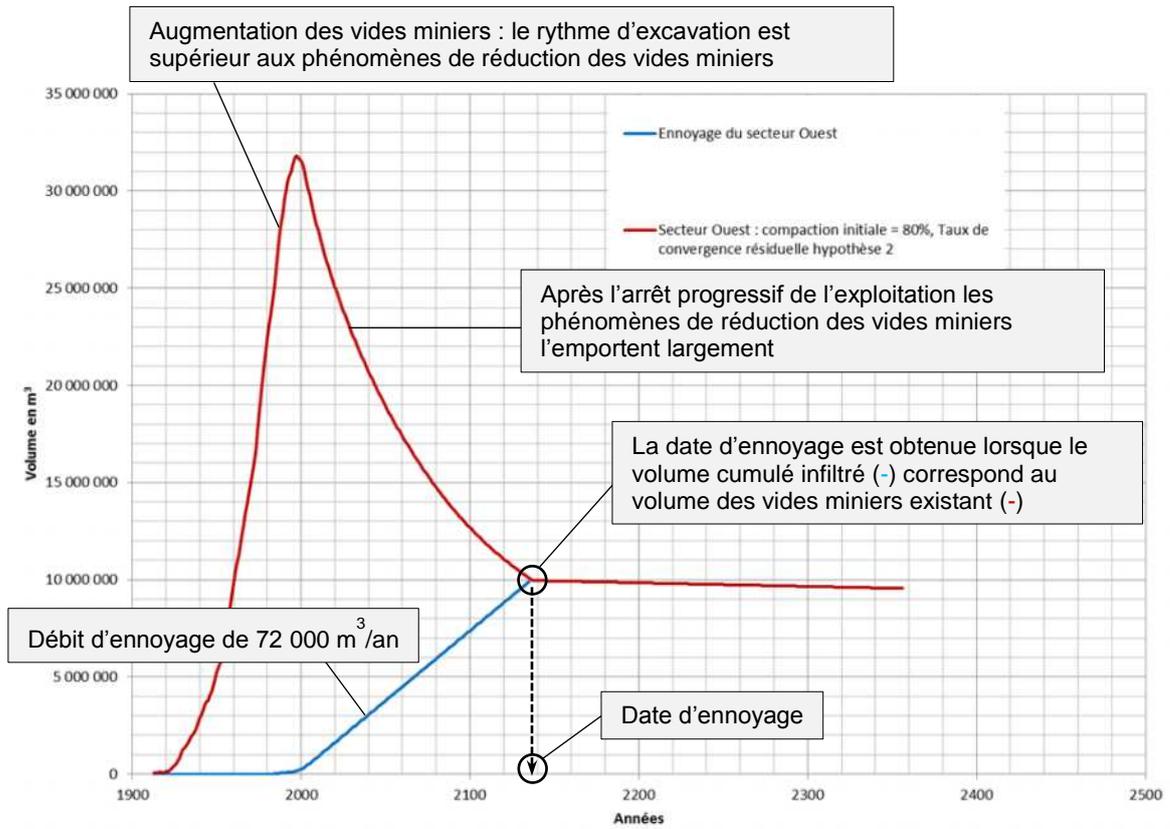


Figure 19. Evolution des vides après compaction initiale de 80% et date d'envoyage – secteur Ouest

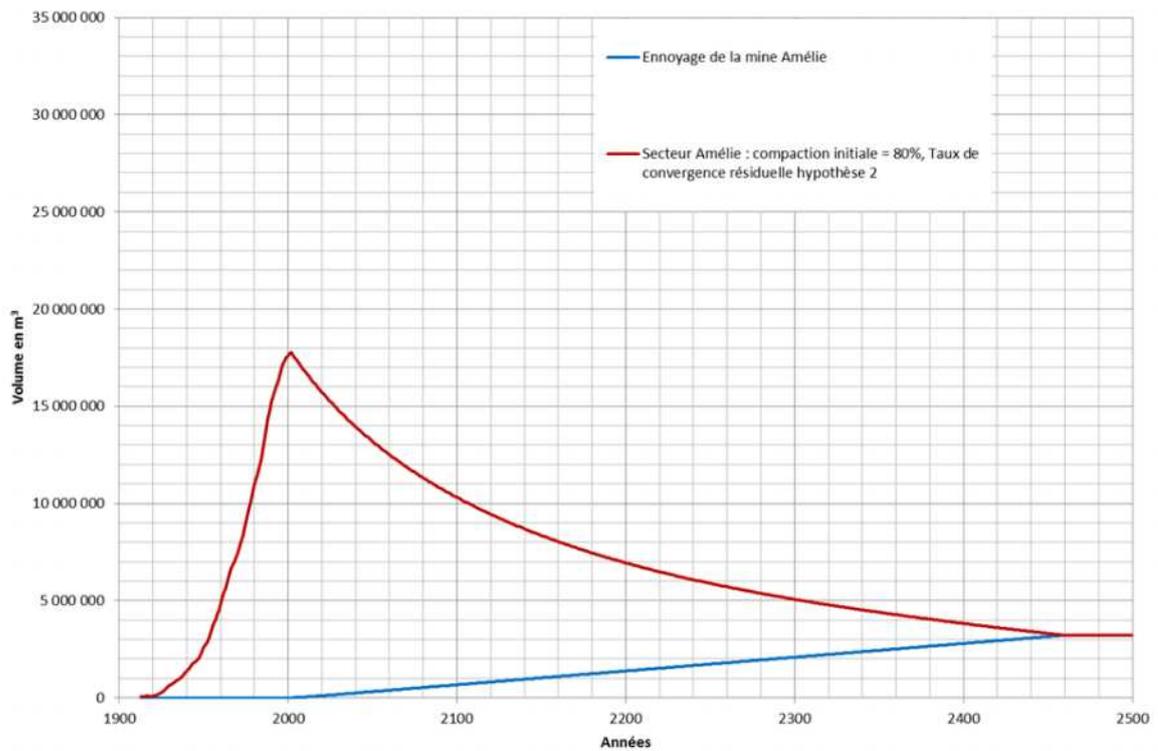


Figure 20. Evolution des vides après compaction initiale de 80% et date d'envoyage – secteur Amélie

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

Tableau 5. Evaluations de la vitesse d'ennoyage : 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
Ennoyage complet de la mine	300 ans	120 ans

5.5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les valeurs des vitesses d'ennoyage du Dossier de demande et celles estimées par la tierce expertise sont dans le même ordre de grandeur avec celles de la tierce expertise étant toutefois significativement plus faibles.

Il faut toutefois retenir que pour que les barrages puissent permettre un confinement hydraulique efficace, quelques dizaines d'années seulement sont nécessaire (Cf. §4.3.3). Ainsi dans l'hypothèse la plus pessimiste (arrivée de la saumure au niveau du stockage dans environ 70 ans) les écoulements de saumure vers le stockage ne pourront se faire que par le barrage (la zone endommagée ayant recouvré son intégrité ou pour le moins des perméabilités très inférieures à celle du barrage).

L'estimation de la durée d'ennoyage estimée dans le Dossier de demande repose sur une approche simplifiée et aboutit à des valeurs relativement supérieures à celles obtenues dans le cadre d'une approche détaillée (tierce expertise).

La tierce expertise recommande d'estimer la vitesse d'ennoyage en suivant une approche détaillée basée sur les données et observations disponibles (notamment répartition des vides miniers et évolution de la convergence en fonction de la profondeur).

Par ailleurs, dans la mesure où les informations du forage VABP2 permettent de suivre *directement* l'évolution de l'ennoyage, il est recommandé de continuer à suivre les niveaux de saumure dans ce forage.

Enfin, il apparaît que les différentes estimations (Dossier de demande et Tierce expertise) mettent en évidence que la prise en compte d'une hypothèse d'une connexion hydraulique entre le secteur Amélie et le reste du secteur Ouest aboutit à des durées d'ennoyage plus courtes et donc correspond à une approche sécuritaire. Dans ce cadre il semble pertinent d'envisager la réalisation d'un forage profond dans le secteur Marie-Louise, sur le modèle du VABP2, de façon, d'une part, à mieux maîtriser les paramètres de convergence dans ce secteur et, d'autre part, à suivre l'évolution de l'ennoyage.

6. ANALYSE CRITIQUE DE LA COMPOSITION DES COLIS ENTREPOSES

6.1. INTRODUCTION

Ce chapitre correspond au point 4 de la lettre de demande du préfet du 17 février 2015, c'est à dire à « l'analyse critique de la composition des colis entreposés pour ce qui concerne les polluants présentant les principaux risques à long terme. »

Ce chapitre est organisé de la façon suivante :

- Caractéristiques du projet en lien avec la composition des déchets stockés ;
- Hypothèses du dossier relatives aux quantités en contaminants stockés ;
- Analyse critique des hypothèses du dossier ;
- Nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockées, à partir des résultats d'analyses réalisées entre octobre 2015 et février 2016 sur l'ensemble des déchets (hors déchets amiantés) ;
- Conclusions et recommandations de la tierce expertise.

Les principaux documents consultés sont les suivants :

- MDPA - Dossier de demande d'autorisation 2015 dont l'annexe 4 ;
- INERIS, 2011, [56] - Evaluation du terme source dans le scénario du stockage illimité, calculs des quantités de contaminants stockées et des concentrations potentielles en solution et en phase ;
- INERIS, 2012, [75] - Modélisation complémentaire du terme source en fonction des scénarios de déstockage étudiés ;
- BMG ENGINEERING AG, 2004, [30] - Stockage souterrain de Wittelsheim : évaluation des risques suite au confinement de déchets dans la mine – risques dus aux substances chimiques.

L'étude détaillée relative à la réévaluation des quantités en contaminants stockées fait l'objet d'un rapport spécifique⁵⁵.

6.2. CARACTERISTIQUES DU PROJET EN LIEN AVEC LA COMPOSITION DES DECHETS STOCKES

6.2.1. Types de déchets

L'autorisation d'exploiter au titre des installations classées a été accordée à StocaMine par arrêté préfectoral n°970157 du 3 février 1997. Cet arrêté fixe également la liste des déchets admissibles et des déchets à exclure, ainsi que la procédure d'acceptation des déchets.

⁵⁵ ARTELIA – avril 2016 – Tierce expertise du Dossier de fermeture du site du StocaMine - Réévaluation des quantités en contaminants stockées

Les critères d'exclusion des déchets ont été définis à l'origine du projet dans l'objectif de garantir la sécurité tant du dépôt que du personnel y travaillant. Ils prennent en compte la nature des produits et les contraintes imposées par le milieu de stockage (mine de sel gemme).

Dans le stockage étaient donc interdits (art. 11 de l'arrêté préfectoral d'autorisation) :

- Les déchets non ultimes
- Tous déchets présentant les caractéristiques suivantes :
 - Produits radioactifs.
 - Produits toxiques biologiques.
 - Produits volatils.
 - Produits explosifs ou inflammables.
 - Produits gazeux et liquides.
 - Produits volumétriquement ou thermiquement instables.
 - Déchets provenant de collectes, sous forme de mélanges indéfinissables.
 - Produits réagissant avec l'eau ou le sel gemme en donnant des produits explosifs ou inflammables ou des gaz.
 - Produits à caractère carburant ou oxydant fort susceptibles de réagir avec le sel gemme.

Les déchets admissibles dans le stockage ont été définis à l'origine du projet (art.12 de l'arrêté préfectoral) comme des « déchets ultimes, solides, stables et convenablement conditionnés ».

Un déchet ultime défini par la loi du 15 juillet 1975 est un déchet résultant ou non du traitement d'un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant et dangereux.

Les déchets admis se répartissent en treize groupes présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6. Groupes de déchets admis par StocaMine (MDPA)

Groupe de déchets admissibles
A1 – Sels de trempe cyanurés
A2 – Sels de trempe neutre
B3 – Déchets arséniés
C4 – Déchets chromiques
B5 – Déchets mercuriels
B6 – Terres polluées et résidus souillés par des métaux lourds
D7 – Résidus de l'électronique
C8 – Déchets de galvanisation, rétentats de filtration
E9 – Résidus d'incinération de déchets
B10 – Produits phytosanitaires non organiques
D11 – Catalyseurs usés
D12 – Déchets de laboratoire
E13 – Déchets contenant de l'amiante

La procédure d'acceptation d'un déchet sur le site de StocaMine, telle que décrite dans l'article 13 de l'arrêté préfectoral du 3 février 1997, comprend 4 phases :

- Phase 1 - Dossier d'identification établi par le producteur de déchet, comprenant au minimum : une description détaillée du fait générateur du déchet, un justificatif montrant que c'est un déchet ultime, les résultats des tests et analyses réalisés par un laboratoire compétent sur un échantillon représentatif du déchet ;
- Phase 2 - Certification d'Acceptation technique établi par l'exploitant (ou CAP, certificat d'acceptation préalable), comprenant notamment les tests de vérification rapides à effectuer sur le site lors de l'admission des déchets. Le CAP est renouvelé chaque année afin de vérifier que le déchet n'a pas varié et de réactualiser les conditions commerciales. Chaque lot (ensemble d'une vingtaine de colis issus d'une même livraison) est ainsi rattaché à un CAP, représentatif d'un type de déchet (même producteur et même fait générateur du déchet).
- Phase 3 - Contrôles à effectuer par l'exploitant sur le centre lors de la livraison d'un lot de déchet (vérification des documents, examen de la cargaison). Ces contrôles incluent notamment le prélèvement de deux échantillons : un destiné à être analysé pour vérifier les différents critères prévus dans le dossier d'identification remis par l'industriel, le second destiné à être stocké au fond pour constituer une bibliothèque des déchets reçus (ou « échantillothèque »).
- Phase 4 – Refus ou acceptation du lot

La figure ci-après schématise l'analyse de contrôle réalisée lors de la réception d'un lot de déchets sur le site.

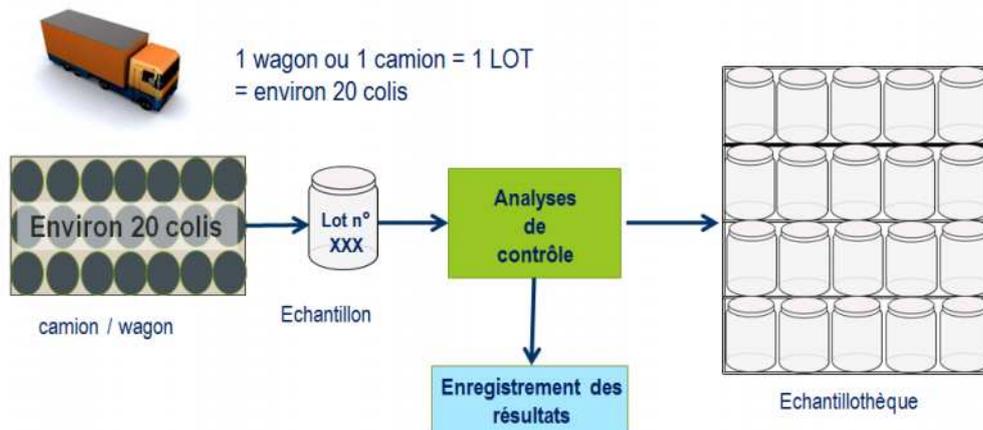


Figure 21. Analyse de contrôle lors de la réception des déchets

6.2.2. Quantités initialement stockées

Entre 1999 et 2002, un peu moins de 44 000 tonnes de déchets ont été stockées sur le site de StocaMine, représentant environ 64 200 colis.

Les quantités admises à StocaMine par catégorie de déchets sont listées dans le tableau ci-dessous. La catégorie D11 n'est pas représentée dans le stockage. Les résidus d'incinération (E9) représentent près de la moitié du tonnage de déchets stockés.

Tableau 7. Groupes de déchets admis par StocaMine et tonnage associé (Dossier de demande)

Catégories	Quantités totales stockées en 2002 (en tonnes)
A1 - Sels de trempe	2 154,88
A2 - Sels de trempe non cyanurés	1 214,64
B3 - Déchets arséniés	6 964,40
C4 - Déchets chromiques	427,96
B5 - Déchets mercuriels	2 254,94
B6 - Terres polluées	5 250,97
D7 - Résidus de l'industrie	137,50
C8 - Déchets de galvanisation	642,50
E9 - Résidus d'incinération	20 670,69
B10 - Produits phytosanitaires	127,60
D12 - Déchets de laboratoire	221,92
E13 - Déchets amiantés	3 851,06
Somme	43 970,96

La figure ci-après présente la répartition des tonnages stockés par catégorie de déchets.

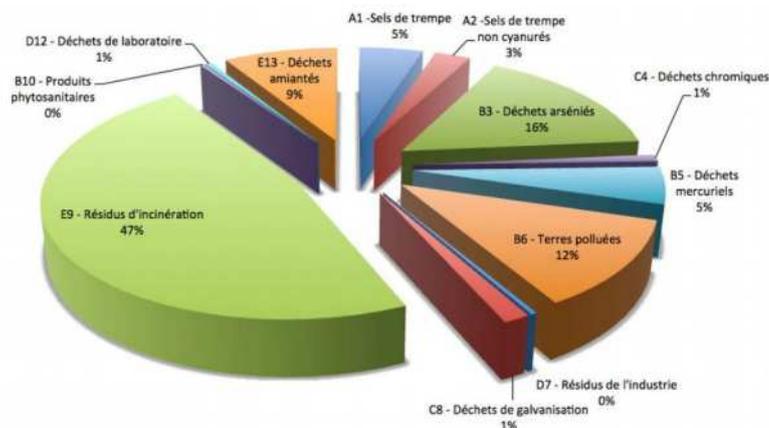


Figure 22. Diagramme des quantités de déchets stockés en 2002 (Dossier de demande)

6.2.3. Scénarios de déstockage partiel

Le déstockage d'une partie des déchets contenant du mercure correspond à une demande de l'Etat.

Le retrait des déchets est toutefois une opération délicate car les galeries de stockage se sont déjà partiellement refermées autour des déchets. La manipulation des déchets est donc beaucoup plus difficile qu'au moment de leur entreposage.

Afin de pouvoir réagir si les risques pour les opérateurs du déstockage deviennent trop dangereux, l'Etat, actionnaire des MDPA, a prévu un objectif de retrait de 93% du mercure, avec un minimum

de 56% en cas de trop grosses difficultés, en privilégiant le retrait des déchets contenant du mercure les plus accessibles.

Les scénarios de déstockage envisagés ont donc été définis, sur la base des calculs réalisés par l'INERIS, en minimisant les manipulations pour sortir le maximum de déchets contenant du mercure.

La répartition du mercure dans le stockage, résultant de l'évaluation par l'INERIS des quantités en contaminants stockés, a ainsi conduit à la définition des scénarios suivants :

- Scénario 0 % : sans retrait de déchets (absence de retrait du mercure) ;
- Scénario 56 % (retrait partiel de 56% du mercure), correspondant au déstockage des déchets contenant du mercure situés dans les blocs 21 et 22 (hors déchets difficilement accessibles) ;
- Scénario 93 % (retrait partiel de 93% du mercure), correspondant au déstockage des blocs 12, 21, 22 et 23.

Le déstockage a débuté en septembre 2014 du fait du retard pris par les autorités allemandes pour délivrer les autorisations nécessaires au restockage des déchets sur le site de Sonderhausen.

A partir du premier semestre 2015, les opérations de déstockage ont été fortement ralenties par l'ampleur des problèmes miniers rencontrés (fissures et décollement du toit des galeries dans les allées 2 et 3 du bloc 21). Ces difficultés ont conduit la DREAL à prendre le 22 juillet 2015 un arrêté au titre de la Police des Mines stipulant « la suspension des travaux de déstockage dans les zones dans lesquelles les colis de déchets sont coincés et déformés du fait de la convergence des terrains et par la chute de bancs du toit de la galerie ».

Une méthode de progression plus sûre a été élaborée par MDPA et ses prestataires au cours de l'été 2015 et validée par la société K-Utec. La mise en œuvre de ces mesures de renforcement et sécurisation a permis la poursuite des travaux de déstockage. Les conditions de déstockage rencontrées depuis l'automne 2015 sont à nouveau plus favorables.

6.3. HYPOTHESES DU DOSSIER RELATIVES AUX QUANTITES EN CONTAMINANTS STOCKES

6.3.1. Composés organiques

D'après les hypothèses du Dossier de demande, les quantités de polluants organiques dans le stockage resteraient modestes, et seraient présents dans les catégories suivantes :

- Catégories B6 (terres polluées) : certains lots contiennent des traces de PCB ;
- Catégorie E9 (résidus d'incinération) et déchets du bloc 15 : présences dioxines en trace ;
- Catégorie B10 (produits phytosanitaires) : présence de 28 tonnes de Zirame.

6.3.2. Composés inorganiques – évaluation de l'INERIS

Le calcul des quantités de polluants inorganiques présents dans le stockage a été réalisé par l'INERIS pour les trois scénarios de référence (scénario sans déstockage – i.e. 0% -, scénario 56%, scénario 93%). Les résultats des travaux de l'INERIS ([56], [75]) sont synthétisés ci-après.

6.3.2.1. HYPOTHESES ET METHODE DE CALCUL

Les données disponibles sur la quantité et la composition des déchets stockés ont été collectées par l'INERIS et rassemblées sous la forme d'une base de données. Cette base de données inclut notamment les informations suivantes : numéro de lot, numéro de CAP, producteur du déchet, masse du lot, ainsi que les résultats des analyses de contrôles effectuées par StocaMine lors de la réception des déchets.

Les procédures du laboratoire de StocaMine ainsi que les méthodes d'analyses ont également été étudiées par l'INERIS, qui souligne notamment les points suivants :

- les procédures ne définissent pas la stratégie d'échantillonnage opérée dans un lot, ni le nombre et le type d'analyse à réaliser. En particulier, la liste des analyses pratiquées à l'admission pour une même catégorie de déchet varie ;
- les résultats d'analyses sont très hétérogènes, y compris dans des déchets enregistrées sous un même CAP (forte variation des concentrations) ;
- les éléments chimiques ont principalement été analysés par spectrométrie de fluorescence X (méthode dite SFX). Selon le type d'appareillage utilisé, la méthode est encore considérée aujourd'hui comme semi-quantitative. Elle a été normalisée en 2010 (après étalonnage sur la matrice étudiée). Il est estimé par l'INERIS, à dire d'expert, que l'incertitude de l'analyse est de l'ordre de 50%.

L'INERIS a estimé les quantités de contaminants présents par lot, en multipliant la masse du lot⁵⁶ par les concentrations en contaminants issus des résultats des analyses de contrôle (réalisées par spectrométrie de fluorescence X).

6.3.2.2. ESTIMATION DES QUANTITES DE POLLUANTS

Dans le rapport [75], l'INERIS a dressé un tableau des tonnages en contaminants stockés suivant les différents scénarios de déstockage (scénario 0%, retrait de 56 % du mercure et retrait de 93 % du mercure). Ces résultats sont présentés dans le tableau ci- après.

Tableau 8. Estimation des quantités de contaminants stockés (Dossier de demande)

⁵⁶ La masse considérée dans le calcul est la « masse nette » du lot, après soustraction de la masse des palettes, futs et plâtres.

Éléments		Quantité stockée en 2002 (tonnes)	Quantité résiduelle, retrait 56% mercure (tonnes)	Quantité résiduelle, retrait 93% mercure (tonnes)
Argent	Ag	2	1,3	1,2
Arsenic	As	1 190	335	65
Baryum	Ba	188	183	179
Bismuth	Bi	78	16	2
Cadmium	Cd	30	20	18
Chrome	Cr	48	46	45
Cuivre	Cu	85	52	47
Mercur	Hg	51	21	3
Molybdène	Mo	14	14	10
Nickel	Ni	31	30	29
Plomb	Pb	214	127	99
Antimoine	Sb	78	26	12
Sélénium	Se	0,82	0,69	0,44
Zinc	Zn	296	256	241
Cyanures libres	Cyanures libres	4,67	4,67	4,67

L'INERIS indique que les résultats comportent des incertitudes qui n'ont pu être mesurées. Elles sont estimées, à dire d'expert, comme faibles (quelques %) pour l'estimation des masses des lots, mais de l'ordre de 50% pour les concentrations d'éléments mesurés en fluorescence X sans étalonnage de la matrice d'échantillon. L'incertitude globale prise en compte par l'INERIS pour le calcul de l'impact du projet sur la nappe d'Alsace est de 50%. Il existe également une incertitude liée à la représentativité des échantillons prélevés lors de l'arrivée des colis sur le site de StocaMine. L'INERIS indique que les résultats obtenus (par exemple impact sur la nappe) à partir des quantités estimées doivent être considérés comme étant des ordres de grandeur.

D'après les résultats de l'INERIS sur les quantités de contaminants présents en 2002, le mercure, considéré par l'INERIS comme l'élément le plus pénalisant, est présent pour 64% dans les déchets de la catégorie B3 - déchets arséniés (environ 35 tonnes), pour 32% dans les déchets de la catégorie B5 – déchets mercuriels (environ 17 tonnes), et pour 3% dans la catégorie D12 – Déchets de laboratoire (environ 1,7 tonnes). Cette répartition explique la stratégie initiale de déstockage, orienté sur le retrait des déchets des catégories B3 et B5.

6.4. ANALYSE CRITIQUE

6.4.1. Composés organiques

Les composés organiques (COT, HCT, HAP, PCB, PCDD/F, HHV, BTEX ou les composés nitroaromatiques, ...) ne sont pas décelables au moyen de l'analyse SFX. Il n'y a donc aucune donnée sur ces paramètres dans la base de données de StocaMine. Cependant, au vu des types de déchets stockés, et rapportée à l'inventaire complet des substances dangereuses, la fraction de substances dangereuses organiques peut être considérée comme faible. Les valeurs de perte au feu disponibles dans la base de données StocaMine permettent d'évaluer la fraction organique totale d'un échantillon. Ces valeurs, inférieures à 1 %, sont faibles et confortent donc cette hypothèse.

MDPA et BMG fournissent, sur la base des informations transmises par les producteurs de déchets, des indications relatives aux tonnages totaux stockés pour certaines substances organiques (PCB : < 250 kg, PCDD/F : <0,4 kg, Colorant ACBT: 29 tonnes, Zirame : 28 tonnes).

Ces éléments confirment les faibles quantités de PCB, dioxines et furanes présentes dans le stockage.

Le Zirame, molécule phytosanitaire organique dont la présence est mentionnée dans la demande (28 tonnes), constitue un contaminant pouvant potentiellement avoir un impact significatif en cas de transfert de cette substance vers la nappe d'Alsace. La tierce expertise a donc étudié l'ensemble des documents disponibles et transmis par MDPA relatifs aux déchets de la catégorie B10 (produits phytosanitaires) afin de confirmer ou d'infirmer la présence de Zirame et d'évaluer la quantité présente dans le stockage.

Sur la base de ces documents, il ressort que la catégorie B10 regroupe 118,5 tonnes de déchets, correspondant à trois CAP. A partir des CAP et des indications fournies par les producteurs de déchet dans les déclarations, on peut relever ce qui suit :

- les CAP 804 et CAP 990609 regroupent environ 5,5 tonnes de déchets. Ces déchets sont constitués d'un mélange de kaolin (50 à 60 %) et de pesticides inorganiques à base d'arsenic, provenant de collectes nationales de produits phytosanitaires. Les substances actives arséniées présentes sont l'arséniate de chaux (en moyenne 20%), l'arsénite de sodium (en moyenne 10%), l'arséniate de cuivre et l'arséniate de plomb.
- le CAP 010221 regroupe environ 113 tonnes de déchets. Ces déchets sont constitués de fûts contenant un mélange de chaux (26.8 %) et de PYRAL (73.2%), ancien produit phytosanitaire, correspondant à un lot de produit non conforme à la commercialisation. Le PYRAL est composé d'As₂O₃ (arsénite de chaux), de zirame (phytosanitaire organique), de Soprophor (un tensio-actif), et d'agent anti-moussant. D'après les informations contenues dans le CAP, la quantité de PYRAL stockées dans les fûts après neutralisation à la chaux est de 83 tonnes, ce qui représenterait une quantité de zirame de 17 à 35 tonnes.

La composition de la catégorie B10 – produits phytosanitaires est connue via les fiches d'identification des déchets. Ceux-ci se composent principalement de produits phytosanitaires inorganiques inertés à la chaux.

La quantité de substances phytosanitaires organiques initialement stockée représenterait, d'après la fiche d'identification des déchets, entre 17 à 35 tonnes (Zirame). Compte tenu de cette quantité et des limites de qualité s'appliquant aux phytosanitaires dans les eaux souterraines, cette substance pourrait être potentiellement pénalisante vis-à-vis de l'impact du projet sur la nappe d'Alsace.

Toutefois, les déchets ont été neutralisés à la chaux avant transfert sur le site de StocaMine. *L'effet de cette neutralisation doit être étudié, afin de préciser :*

- *si du zirame est effectivement présent dans les déchets,*
- *le cas échéant, si le zirame est mobilisable.*

6.4.2. Composés inorganiques

L'INERIS a calculé les quantités en contaminants stockés exclusivement sur la base des valeurs de mesure consignées dans la base de données de StocaMine. Au vu des incertitudes identifiées quant à l'exhaustivité et la fiabilité des données existantes, l'incertitude globale prise en compte par l'INERIS pour le calcul de l'impact du projet sur la nappe d'Alsace est de 50%.

L'INERIS a notamment souligné le fait que les analyses de contrôle réalisées par StocaMine, visant à vérifier les paramètres indicatifs des analyses de déclaration, correspondent à des analyses semi-quantitatives.

Au cours des travaux de la tierce expertise, la société Dr. Marx GmbH a réalisé des analyses chimiques sur les échantillons, prélevés dans l'échantillothèque des MDPAs, correspondant aux déchets devant être déstockés du site de stockage de déchets souterrain de StocaMine et restockés dans celui de GSES à Sondershausen. Ces analyses font partie de la procédure d'autorisation relative au transfert et à l'élimination des déchets auprès de GSES.

Les résultats obtenus ont mis en évidence la quasi-absence de mercure dans les déchets classés B3 - déchets arséniés, alors que des concentrations élevées en mercure avaient été mesurées au moyen de la spectrométrie de fluorescence X (SFX) lors de l'arrivée de ces déchets sur le site. Cet écart peut s'expliquer, pour des échantillons contenant de fortes concentrations en arsenic, par la superposition des pics d'arsenic et de mercure dans les spectres SFX.

En raison des doutes soulevés par cette constatation, le groupement de tierce expertise a proposé un programme d'analyses complémentaires, permettant de préciser les concentrations en contaminants présents dans les déchets, et de procéder à une nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockés sur la base des nouvelles analyses.

Les paramètres analysés intègrent les métaux lourds, qui représentent les principaux contaminants présents dans le stockage, mais aussi d'autres substances polluantes susceptibles d'être présentes dans certaines catégories de déchets (cyanures libres, HAP, BTEX, ...).

Parmi ces substances, il est notamment apparu nécessaire de préciser la quantité en cyanures libres présents dans le stockage, car ceux-ci jouent un rôle prépondérant dans la géochimie du terme source. Les cyanures sont présents dans les déchets de la catégorie A1 (Sels de trempes cyanurés). Lors du contrôle effectué à la réception des déchets, le paramètre cyanure libre était analysé par colorimétrie. A partir de ces données, l'INERIS a évalué la quantité en cyanures facilement libérables et présents dans le site de stockage à environ 4 à 5 tonnes. L'INERIS a également fait procéder à quelques analyses en laboratoire sur certains CAP de la catégorie A1. Ces analyses ont donné des résultats proches de ceux obtenus lors de l'acceptation des déchets sur le site. Toutefois, cela correspond à une teneur en cyanures des déchets de la catégorie sels de trempes cyanurés de 0,2 % en moyenne, ce qui semble relativement faible. Sur la base des teneurs indiquées par le producteur de déchets, la société BMG avait précédemment estimé la quantité de cyanures à 159 tonnes.

Le programme d'analyses proposé a également pris en compte certains paramètres chimiques supplémentaires, non qualifiables de substances dangereuses, mais qui sont susceptibles d'avoir un impact déterminant sur la minéralisation de la saumure, et sur la formation de complexes de métaux lourds solubles. Les paramètres concernés sont notamment les nitrites, les nitrates et l'ammonium/ammoniac.

Les résultats de la nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockés sont présentés succinctement dans le paragraphe ci-après (les résultats obtenus sont décrits de façon plus détaillée dans le rapport *réévaluation de la composition des colis* de la tierce expertise).

6.5. NOUVELLE EVALUATION DES QUANTITES EN CONTAMINANTS STOCKEES

6.5.1. Description des nouvelles analyses réalisées

6.5.1.1. ECHANTILLONNAGE

Compte tenu du contexte du stockage (colis entreposés dans des futs ou big-bags dans les blocs de stockage), la réalisation de nouveaux prélèvements sur les colis entreposés n'est pas apparue

envisageable. Les nouvelles analyses ont donc été réalisées à partir des échantillons de la bibliothèque d'échantillons de StocaMine (appelée « échantillothèque »).

Les nouvelles analyses ont concerné l'ensemble des déchets présents dans le stockage, à l'exception des déchets de la catégorie E13 – Déchets amiantés. Selon le rapport de BMG, les déchets amiantés stockés ne comportent que des composants non dangereux, à l'exception des fibres d'amiante. Par principe, on peut également trouver dans ce type de déchets des contaminations par des métaux lourds, ainsi que par diverses substances organiques de type PCB, HAP ou par des résidus de colles inflammables. Toutefois, la présence de fractions importantes de substances organiques ou inorganiques facilement solubles est plutôt improbable. Ainsi, le potentiel de substances dangereuses, à l'exception des fibres d'amiante, contenues dans les déchets regroupés sous la catégorie E13 est estimé comme étant faible. Des analyses chimiques supplémentaires n'ont pas été jugées utiles.

Les nouvelles analyses ont concerné l'ensemble des déchets présents dans le stockage, à l'exception des déchets de la catégorie E13 – Déchets amiantés. Selon le rapport de BMG, les déchets amiantés stockés ne comportent que des composants non dangereux, à l'exception des fibres d'amiante. Par principe, on peut également trouver dans ce type de déchets des contaminations par des métaux lourds, ainsi que par diverses substances organiques de type PCB, HAP ou par des résidus de colles inflammables. Toutefois, la présence de fractions importantes de substances organiques ou inorganiques facilement solubles est plutôt improbable. Ainsi, le potentiel de substances dangereuses contenues dans les déchets regroupés sous la catégorie E13 est estimé comme étant faible. Des analyses chimiques supplémentaires ne sont pas jugées utiles.

Pour l'élaboration des nouveaux échantillons, il a été nécessaire de tenir compte des contraintes suivantes :

- les échantillons stockés au fond ont une masse d'environ 200 g ;
- la DREAL a imposé que la moitié de la masse des échantillons soit conservée dans l'échantillothèque.

Par ailleurs, bien que la masse strictement nécessaire à la réalisation d'une analyse en laboratoire soit relativement réduite (de l'ordre de 70 g), la réalisation d'échantillons bruts d'une masse plus importante permet d'être plus représentatif de l'ensemble du déchet à la fois en termes de composition chimique et de distribution des tailles particulières.

Les nouveaux échantillons ont donc été constitués de la façon suivante :

- Prélèvement d'une masse de 50 g environ dans chaque échantillon de l'échantillothèque concerné par cette nouvelle phase d'analyse;
- Regroupement des prélèvements pour former un nouvel échantillon, afin de constituer des échantillons de 100 à 250 g (mélange de 2 à 5 prélèvements, en tenant compte du fournisseur et du CAP).

Dans la majeure partie des cas, un nouvel échantillon est donc représentatif de 2 à 5 lots du même type de déchet (même fournisseur et même CAP). Toutefois, en fonction des échantillons disponibles dans l'échantillothèque et du nombre de lots stockés par CAP et fournisseur, il a parfois été nécessaire de mélanger des échantillons correspondant à des types de déchets différents.

La figure ci-après schématise la démarche mise en œuvre pour la réalisation des échantillons.

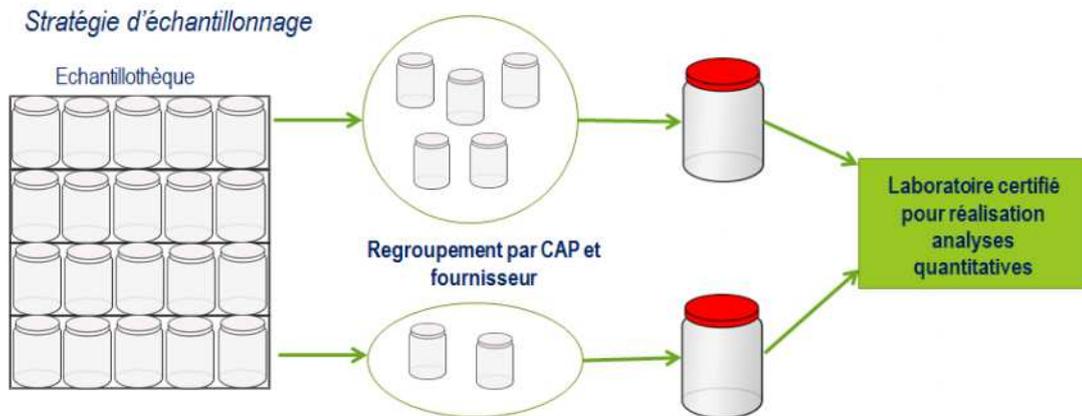


Figure 23. Stratégie d'échantillonnage pour les nouvelles analyses

Pour chaque catégorie de déchets (hormis les déchets amiantés), de nouveaux échantillons ont ainsi été constitués à partir des échantillons de l'échantillothèque, en respectant une logique relative au type de déchet (regroupement par CAP et fournisseur).

6.5.1.2. PROGRAMME D'ANALYSE

Les substances à analyser, par catégorie de déchets, ont été définies en tenant compte de la nature des déchets (décrits dans le rapport BMG, 2004) et des caractéristiques des contaminants (toxicité et mobilité). Le choix des différentes substances à analyser est détaillé dans le rapport technique de la tierce expertise relatif à la géochimie et à l'évaluation du terme source.

Le tableau ci-après présente le programme d'analyses mis en œuvre.

Tableau 9. Programme d'analyses défini par le groupement de tierce expertise

Catégories	paramètres	
A1 -Sels de trempe	<i>cyanures libres, métaux lourds (pack 12 métaux),</i>	<i>cyanates, nitrates, nitrites, ammonium</i>
A2 -Sels de trempe non cyanurés	<i>métaux lourds (pack 12 métaux), Cr VI</i>	<i>nitrates, nitrites, ammonium</i>
B10-Produits phytosanitaires non organiques	<i>As, Zn, TOC, perte au feu dans l'éluat: As</i>	
B3 -Déchets arseniés	<i>métaux lourds (pack 12 métaux), bore, dans l'éluat: As et B</i>	
B5 -Déchets mercuriels	<i>métaux lourds (pack 12 métaux) (+ lithium sur 1 CAP)</i>	
B6 -Terres polluées et résidus souillés par des métaux lourds	<i>métaux lourds (pack 12 métaux) + pour quelques CAP (cf. tableau BMG) : PCB, HAP / BTEX / HCT</i>	
C4 -Déchets chromiques	<i>métaux lourds (pack 12 métaux), Cr VI</i>	
C8 -Déchets de galvanisation	<i>métaux lourds (pack 12 métaux)</i>	
D12-Déchets de laboratoire	<i>métaux lourds (pack 12 métaux)</i>	
D7 -Résidus de l'industrie	<i>Be, As, dans l'éluat: As</i>	
E13-Déchets amiantés		
E9 -Residus d'incinération	<i>métaux lourds (pack 12 métaux)</i>	<i>dégagement gazeux</i>

6.5.1.3. SYNTHÈSE DES ANALYSES RÉALISÉES

Les analyses ont été réalisées par le laboratoire Dr Marx GmbH, accrédité équivalent COFRAC, via des méthodes quantitatives standardisées (notamment NF EN ISO 12846 pour le mercure et NF EN ISO 11885 pour les autres métaux).

Le tableau ci-après synthétise le nombre d'analyses réalisées pour chaque catégorie de déchets.

Tableau 10. Synthèse des analyses réalisées

	quantités (tonnes)	nombre de lots	nombre de lots prélevés	% lots prélevés	nombre d'analyses
A1 -Sels de trempe	1964	151	151	100%	36
A2 -Sels de trempe non cyanurés	1112	100	100	100%	20
B10-Produits phytosanitaires	118	9	9	100%	2
B3 -Déchets arseniés	6842	374	286	76%	61
B5 -Déchets mercuriels	2015	116	113	97%	26
B6 -Terres polluées	5255	291	270	93%	55
C4 -Déchets chromiques	399	37	37	100%	8
C8 -Déchets de galvanisation	636	51	51	100%	12
D12-Déchets de laboratoire	141	18	16	89%	6
D7 -Résidus de l'industrie	89	28	28	100%	7
E13-Déchets amiantés					
E9 -Residus d'incinération	20645	1402	418	30%	82
total	39216	2577	1479	57%	315

Au total, 315 analyses ont été réalisées, ce qui représente 30 % des lots de REFIOMS (catégories E9, environ 20 000 tonnes de déchets stockés), et entre 76% et 100 % des lots pour les autres catégories de déchets.

Des analyses en doublon ont par ailleurs été effectuées par un second laboratoire (Agrolab) afin de contrôler la cohérence des résultats

6.5.2. Nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockées

6.5.2.1. EVALUATION DES QUANTITES EN CONTAMINANTS STOCKEES

Le calcul des quantités en contaminants stockés est réalisé de la façon suivante :

- pour les lots ayant fait l'objet d'une analyse, la masse de contaminant du lot est calculée en multipliant la concentration en contaminant de l'échantillon par la masse « nette » du lot (masse du lot hors masse des palettes et fûts) ;
- pour les lots n'ayant pas fait l'objet d'une analyse, la masse de contaminant du lot est calculée en prenant en compte, pour chaque contaminant, la moyenne des concentrations obtenues sur les échantillons analysés sur les lots de même CAP ;
- dans le cas où aucune concentration n'est disponible pour un CAP, les lots correspondant à ce CAP ne sont pas intégrés au calcul (échantillons non retrouvés dans l'échantillothèque ou flacons vides). Il s'agit de 34 lots sur les 2577 lots recensés dans la base de données, et plus précisément de 9 lots de la catégorie B3 – déchets arséniés (rattachés à 5 CAP différents), de 3 lots de la catégorie B5 – déchets mercuriels (rattachés à 2 CAP différents), de 21 lots de la catégorie B6 – terres polluées (rattachés à 5 CAP différents) et d'1 lot de la catégorie D12 – déchets de laboratoire. Compte tenu de l'incertitude induite par l'absence d'analyse sur ces lots, il conviendrait de vérifier que les lots de la catégorie B5 – déchets mercuriels (susceptibles de contenir des quantités significatives de mercure) sont inclus dans le programme de déstockage envisagé. Des prélèvements d'échantillons directement sur ces colis permettraient de réaliser des analyses pour préciser les quantités de mercure concernées. Toutefois, la faisabilité de ces prélèvements peut être remise en cause en fonction de l'accessibilité des colis.

Le tableau suivant présente les résultats obtenus par catégorie de déchets pour les principaux métaux lourds. Les quantités calculées correspondent ici aux quantités initiales, avant la mise en œuvre des opérations de déstockage. Ces résultats sont comparés aux quantités calculées par l'INERIS à partir de la base de données de StocaMine (analyses par méthode SFX).

Tableau 11. Quantités en contaminants stockés par catégorie de déchets (avant déstockage)

	Arsenic		Cadmium		Chrome	
	laboratoire	SFX	laboratoire	SFX	laboratoire	SFX
A1 -Sels de trempe	0.2	0.3	0.7	0.8	1.4	1.5
A2 -Sels de trempe non c	0.1	0.0	0.0	0.1	0.8	0.8
B10-Produits phytosanita	18.6	2.1	<i>non analysé</i>	0.0	<i>non analysé</i>	0.0
B3 -Déchets arséniés	1720.0	1153.1	18.0	11.5	4.3	2.7
B5 -Déchets mercuriels	0.3	0.9	0.1	0.1	0.2	0.4
B6 -Terres polluées	5.1	5.6	12.2	15.9	9.6	10.8
C4 -Déchets chromiques	0.1	0.2	0.0	0.0	9.0	15.3
C8 -Déchets de galvanisat	0.0	0.1	0.1	0.1	2.7	3.0
D12-Déchets de laborato	1.9	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0
D7 -Résidus de l'industrie	0.0	0.0	<i>non analysé</i>	0.0	<i>non analysé</i>	0.0
E13-Déchets amiantés						
E9 -Residus d'incinératio	0.6	20.9	1.5	1.5	3.8	10.3
Total	1747.1	1184.2	32.9	29.9	31.8	44.9
Ecart laboratoire / SFX	48%		10%		-29%	
	Mercure		Plomb		Antimoine	
	laboratoire	SFX	laboratoire	SFX	laboratoire	SFX
A1 -Sels de trempe	0.0	0.0	4.9	5.1	0.1	0.1
A2 -Sels de trempe non c	0.0	0.0	0.8	0.2	0.1	0.0
B10-Produits phytosanita	<i>non analysé</i>	0.0	<i>non analysé</i>	0.7	<i>non analysé</i>	0.0
B3 -Déchets arséniés	0.2	34.1	171.8	117.0	90.4	67.9
B5 -Déchets mercuriels	24.3	15.1	2.2	1.4	0.2	0.1
B6 -Terres polluées	0.0	0.1	6.2	15.9	4.2	6.0
C4 -Déchets chromiques	0.0	0.0	11.5	7.9	0.2	0.1
C8 -Déchets de galvanisat	0.0	0.0	1.7	2.1	0.1	0.0
D12-Déchets de laborato	1.0	1.4	4.9	2.0	0.7	0.4
D7 -Résidus de l'industrie	0.0	0.0	<i>non analysé</i>	0.0	<i>non analysé</i>	0.0
E13-Déchets amiantés						
E9 -Residus d'incinératio	0.1	0.4	46.1	64.1	3.7	4.9
Total	25.7	51.1	250.1	216.4	99.7	79.4
Ecart laboratoire / SFX	-50%		16%		26%	

Les résultats surlignés en rouge correspondent aux principaux écarts constatés entre la nouvelle évaluation et l'évaluation initiale de l'INERIS. Les principaux écarts constatés sont les suivants :

- Mercure : les analyses réalisées confirment l'absence de mercure dans les déchets de la catégorie B3 – déchets arséniés. La quantité globale de mercure dans le stockage est évaluée à 25,7 tonnes, stockée dans les déchets mercuriels et dans le lot 1463 (CAP315) de la catégorie D12 - déchets de laboratoire ;
- Arsenic : les analyses réalisées montrent une quantité d'arsenic dans les déchets arséniés et dans les déchets phytosanitaires significativement plus importante ; cela s'explique par la surévaluation du mercure lors de l'interprétation des spectres résultant de l'analyse SFX ;
- Cadmium, Chrome, Plomb, Antimoine : les quantités totales calculées s'écartent de 10 à 30 % des quantités calculées par l'INERIS, avec une répartition dans les différentes catégories de déchets qui diffère sensiblement.

Le tableau ci-après reprend le tableau des quantités en contaminants stockés (avant déstockage) présenté par l'INERIS⁵⁷ [56].

Tableau 12. Synthèse des évaluations quantités en contaminants stockés

	Evaluation INERIS (SFX)	Evaluation tierce-expertise (laboratoire)
Eléments	(tonnes)	(tonnes)
As	1199	1747
Ba	192	79
Cd	30	33
Cr	48	32
Cu	88	104
Hg	53	26
Mo	11	6
Ni	33	24
Pb	214	250
Sb	79	100
Se	0.9	2.9
Zn	296	253
CN-	4.7	4.4

Les nouvelles analyses réalisées conduisent à une quantité totale de mercure dans le stockage de 25,7 tonnes, et confirment l'absence de mercure dans les déchets de la catégorie B3-déchets Arséniés.

La quantité de cyanures libres évaluée à l'aide des nouvelles analyses, d'environ 4,4 tonnes, conforte l'évaluation réalisée initialement par l'INERIS.

6.5.2.2. ANALYSE DES INCERTITUDES

Les incertitudes sur l'évaluation des quantités en contaminants stockées sur le site de StocaMine sont principalement liées :

- A la représentativité des échantillons prélevés lors de l'arrivée des colis sur le site de StocaMine ;
- A la précision des analyses.

Compte tenu du type d'analyses réalisées (analyses quantitatives normées réalisées par un laboratoire accrédité), et contrairement aux résultats obtenus avec la spectrométrie de

⁵⁷ Les résultats de l'INERIS sont présentés pour les substances suivies pour le stockage en décharge (Décision 2003/33/CE du 19/12/02 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE (JOCE n° L11 du 16 janvier 2003)), à savoir : As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, ainsi que le cyanure libre.

fluorescence X, les incertitudes sur les résultats d'analyses obtenus peuvent être considérées comme faibles.

Ainsi, l'incertitude la plus forte résulte a priori de l'échantillonnage plus ou moins représentatif des colis réalisé lors de l'arrivée des déchets sur le site (échantillons utilisés ensuite pour la réalisation des analyses). L'erreur induite par ce phénomène potentiellement perturbateur se calcule classiquement par une étude statistique de la dispersion des résultats. En effet, sur un grand nombre de mesures, on peut considérer que l'on a une loi de probabilité de distribution gaussienne. L'erreur due à la dispersion statistique est alors calculée en fonction de l'intervalle de confiance considéré comme acceptable.

Dans le cas de la composition des déchets stockés à StocaMine, les calculs statistiques doivent être réalisés au niveau de chaque CAP, et non au niveau de l'ensemble des déchets ou catégorie de déchets. C'est en effet au niveau du CAP qu'on retrouve des lots de déchets présentant une composition a priori similaire (un CAP correspondant à un même fournisseur et à un même fait générateur du déchet). Pour la majeure partie des CAP, le nombre d'échantillons analysés est inférieur à 5.

Pour les deux CAP pour lesquels plus de 10 résultats d'analyses sont disponibles, les paramètres permettant d'évaluer la dispersion des résultats obtenus pour les principaux métaux lourds sont indiqués dans le tableau ci-après.

Tableau 13. Dispersion des résultats pour le CAP 811 et le CAP 990813

CAP 811 (Salsigne)				
18 résultats d'analyses				
	Moy	Min	Max	Ecart type
Arsenic	470990.5	282000	633000	75787.9
Cadmium	5632.5	1310	8870	2153.4
Chrome	104.7	0	518	161.4
Mercure	5	0	10.8	3.8
Plomb	46846.9	10300	79800	20215.1
Antimoine	26699	9340	48200	10052.8
CAP 990813 (Rhodia)				
15 résultats d'analyses				
	Moy	Min	Max	Ecart type
Arsenic	106.1	20	1090	272.7
Cadmium	9.8	1.82	39.5	10.5
Chrome	93.1	38.6	759	184.2
Mercure	2105.2	388	4760	1116.7
Plomb	61.5	32.8	134	29.3
Antimoine	8.7	2.64	58.5	14

On constate une dispersion significative des résultats obtenus, qui met en évidence l'hétérogénéité des échantillons analysés.

Compte tenu du nombre de résultats disponibles par CAP, une approche statistique généralisée à l'ensemble des déchets n'est pas possible.

6.6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les résultats des analyses effectuées fin 2015 début 2016 ont permis :

- de confirmer l'absence de mercure dans les déchets de la catégorie B3 – Déchets Arséniés ;
- d'effectuer une nouvelle évaluation des quantités en contaminants présentes dans le stockage.

Ces analyses quantitatives ont été réalisées par un laboratoire accrédité et permettent ainsi de s'affranchir des incertitudes liées à la méthode d'analyse utilisée par StocaMine à l'arrivée des colis sur le site (spectrométrie de fluorescence X).

Cette nouvelle évaluation est considérée comme plus fiable que celle effectuée par l'INERIS dans la mesure où elle s'appuie sur des analyses plus complètes et plus précises. La tierce expertise recommande ainsi à MDPA l'actualisation du dossier en prenant en compte ces nouveaux résultats.

En particulier, **la quantité de mercure stockée est évaluée à environ 26 tonnes** sur la base des nouvelles analyses, alors que l'évaluation de l'INERIS conduisait à une quantité de 53 tonnes de mercure stockée, sur la base des résultats d'analyses SFX.

Bien que la quasi-totalité des échantillons disponibles dans l'échantillonnage ait été concernée par la réalisation de nouvelles analyses, le nombre d'analyses disponibles par CAP ne permet pas de quantifier l'incertitude liée à l'hétérogénéité des colis et à l'échantillonnage. Ainsi, la tierce expertise rejoint l'avis de l'INERIS ([56]), selon lequel les résultats obtenus ne peuvent être considérés que comme des ordres de grandeur des quantités présentes.

Concernant la présence de Ziram dans le stockage (substance phytosanitaire organique), compte tenu des incertitudes sur la quantité a priori initialement stockée (potentiellement de 16 à 35 tonnes) et des limites de qualité s'appliquant aux phytosanitaires dans les eaux souterraines, cette substance pourrait être pénalisante vis-à-vis de l'impact du projet sur la nappe d'Alsace. Il importe donc de préciser si la présence de Ziram doit être considérée ou non dans le cadre de l'évaluation de l'impact du projet sur la nappe d'Alsace. La tierce expertise recommande ainsi d'étudier plus en détail l'effet sur cette substance de la neutralisation à la chaux réalisé lors du conditionnement des fûts (destruction ou non des molécules, le cas échéant potentiel de mobilisation des molécules).

Au vu des types de déchets stockés, et rapportée à l'inventaire complet des substances dangereuses, la fraction estimée d'autres substances dangereuses organiques potentiellement présente (BTEX, HAP, PCB, ...) est considérée comme faible.

7. ETUDE DU TERME SOURCE

7.1. INTRODUCTION

Ce chapitre correspond à la première partie du point 3 de la lettre de demande du préfet du 17 février 2015, c'est à dire à l'analyse critique de « l'étude du terme source pour appréhender les polluants qui pourraient être expulsés vers la nappe phréatique après ennoyage. »

Ce chapitre est organisé de la façon suivante :

- Caractéristiques du projet en lien avec l'évaluation du terme source ;
- Hypothèses du dossier relatives aux quantités en contaminants stockés ;
- Analyse critique des hypothèses du dossier ;
- Conclusions et recommandations de la tierce expertise.

Les principaux documents consultés sont les suivants :

- MDPA - Dossier de demande d'autorisation 2015 et Annexe 4 ;
- INERIS, 2011, [56] - Evaluation du terme source dans le scénario du stockage illimité, calculs des quantités de contaminants stockées et des concentrations potentielles en solution et en phase ;
- INERIS, 2012, [75] - Modélisation complémentaire du terme source en fonction des scénarios de déstockage étudiés ;
- BMG ENGINEERING AG, 2004, [30] - Stockage souterrain de Wittelsheim : évaluation des risques suite au confinement de déchets dans la mine – risques dus aux substances chimiques.

7.2. CARACTERISTIQUES DU PROJET EN LIEN AVEC L'EVALUATION DU TERME SOURCE

Les déchets sont sous forme solide, emballés dans des big-bags ou des fûts. Après confinement du site, la seule possibilité de transfert de polluants depuis le stockage jusqu'au milieu superficiel est un passage de certains éléments dans la saumure (par dissolution) et, potentiellement dans une très faible mesure, dans l'air de la mine (par dégazage), puis leur mobilisation jusqu'aux puits de mine.

Les paramètres du projet à prendre en compte pour évaluer la composition de la saumure polluée dans le stockage (ou terme source) sont :

- Les quantités en contaminants stockées ;
- Les scénarios de déstockage partiel, qui modifient les quantités de contaminants présents dans le stockage ; les solutions alternatives considérées dans le cadre de la tierce expertise sont les scénarios 0%, 56% et 93% ;
- Les mesures de confinement (mesures de scellement et remblayage du stockage), qui aboutissent à un volume de vides résiduels dans le stockage lors de l'ennoyage. Ce

volume de vides résiduels correspond, une fois le stockage envoyé, au volume de la saumure disponible dans le stockage pour le passage en solution des contaminants.

7.3. HYPOTHESES DU DOSSIER DE DEMANDE RELATIVES AU TERME SOURCE

Les quantités de substances dangereuses *mobilisables* correspondent au terme source. L'INERIS a effectué des calculs de mobilisation pour les substances dangereuses contenues dans les déchets stockés. Les calculs réalisés par l'INERIS se basent notamment sur une quantification des quantités de substances dangereuses stockées établie à partir des analyses archivées dans la base de données de StocaMine (essentiellement des spectres SFX).

7.3.1. Contaminants mobilisables dans la saumure

7.3.1.1. HYPOTHESES ET METHODE DE CALCUL

L'effet protecteur des emballages, fûts doublés ou munis de big bags à double enveloppe, a été négligé par l'INERIS. Il a été considéré que les emballages seront détruits à terme par la pression des terrains, mettant directement les déchets au contact de la saumure.

L'enrichissement potentiel de la solution aqueuse par absorption de substances dangereuses contenues dans les déchets, en cas de contact entre la solution et ces derniers, a été calculé par l'INERIS à l'aide du logiciel Visual MINTEQ.

Pour ses calculs, l'INERIS a notamment considéré :

- les quantités d'éléments présents dans le stockage (évaluation à partir des données de spectrométrie SFX) ;
- une hypothèse sans remblayage des vides miniers dans la zone de stockage, soit un volume de vides résiduels de 7 000 m³ ;
- un pH de 11,78, sur la base des concentrations estimées d'ions hydroxydes ;
- la saturation de la saumure au contact des terrains (saturation en halite NaCl, sylvite KCl) et de certains produits contenus dans les déchets (calcite CaCO₃, gypse et hydroxyapatite).

7.3.1.2. COMPOSITION DE LA SAUMURE A LONG TERME

Les calculs réalisés par l'INERIS aboutissent à une composition de la saumure à long terme. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après pour les principaux contaminants⁵⁸.

⁵⁸ Contaminants étudiés dans la mesure où ils sont susceptibles a priori d'avoir un impact significatif compte tenu de leurs tonnages dans le stockage, de leur toxicité et de leur mobilité

Tableau 14. Composition de la saumure - résultats des calculs de l'INERIS

		Sans déstockage		Avec déstockage intermédiaire (déstockage 56% du Hg total)		Avec déstockage 93% du Hg total	
Volume saumure (m ³)		7000		6213		5635	
Eléments		Masse stockée en 2002 (tonnes)	Concentration dans la saumure en g/L	Masse résiduelle (tonnes)	Concentration dans la saumure en g/L	Masse résiduelle (tonnes)	Concentration dans la saumure en g/L
Argent	Ag	2	3.88E-02	1,3	5.30E-02	1.2	5.20E-02
Arsenic	As	1 190	1.54E-02	335	1.42E-02	65	1.39E-02
Baryum	Ba	188	2.30E-07	183	2.39E-07	179	2.42E-07
Bismuth	Bi	78	6.95E-06	16	6.96E-06	2	6.96E-06
Cadmium	Cd	30	1.54E-03	20	1.56E-03	18	7.12E-01
Chrome	Cr	48	7.07E+00	46	7.07E+00	45	8.27E+00
Cuivre	Cu	85	1.93E-07	52	1.94E-07	47	1.95E-07
Mercure	Hg	51	7.52E+00	21	3.46E+00	3	5.26E-01
Nickel	Ni	31	3.05E-07	30	7.78E-07	29	1.00E-03
Plomb	Pb	214	4.53E-07	127	4.56E-07	99	4.57E-07
Antimoine	Sb	78	1.89E-01	26	1.92E-01	12	1.92E-01
Cyanures	CN	4.67	6.80E-01	4.67	7.67E-01	4.67	8.42E-01

D'après les calculs de l'INERIS, la prise en compte de la limitation de la solubilité et des effets de précipitations montre que certains ions métalliques comme Ba, Bi, Co, Pb, Ni vont précipiter en hydroxydes insolubles au pH du stockage. D'autres ions sont très peu limités, voire pas du tout en raison des effets de complexation avec les chlorures et les cyanures. C'est notamment le cas du mercure et du cadmium.

La concentration à l'équilibre calculée est de 7.52 g/L pour le mercure, pour une masse stockée évaluée à 51 tonne et un volume de vides résiduels dans le stockage de 7 000 m³.

Avec un déstockage de 93% de la masse initiale de mercure, la concentration la plus élevée (quelques g/L) correspond au chrome (puis au cyanure, au cadmium, et au mercure). Néanmoins, d'après l'INERIS, considérant la toxicité du mercure dans l'eau pour un usage eau potable, celui-ci reste le contaminant dominant.

L'INERIS indique que les résultats obtenus sont les plus affinés possibles en l'état actuel des connaissances scientifiques, mais qu'ils doivent être pris comme des ordres de grandeur des concentrations en contaminants dans la saumure

7.3.2. Contaminants mobilisables dans l'air

Après confinement du site, au sein du stockage, des émissions gazeuses pourraient se produire :

- Au contact de l'air (avant que la saumure n'atteigne le stockage) : Les déchets qui ont été admis dans le stockage souterrain ne sont toutefois pas de nature à réagir avec l'air, ou seulement dans des quantités très faibles.
- Au contact de la saumure : Lorsque la saumure atteindra les déchets, une libération de gaz pourrait intervenir pour des éléments qui réagiraient spécifiquement avec la saumure.

L'INERIS indique que des mesures étendues de concentrations dans l'air dans le stockage StocaMine ont montré un léger dégazage des déchets, mais sans que des signes d'activité biologique n'aient pu être mis en évidence. Sur la base de ces mesures, l'INERIS considère que la possibilité d'émission de contaminants dans l'air de composés réduits comme l'Arsine (AsH_3) et le mercure métallique gazeux (Hg^0) semble donc a priori faible.

La concentration potentielle d'acide cyanhydrique (HCN_g) est estimée par l'INERIS à $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ mg/m}^3$ d'air (en considérant un volume de vides de $7\,000 \text{ m}^3$ et 4.27 tonnes de cyanures libres).

D'après l'INERIS, l'émission de phénols ne peut être estimée. Toutefois, l'annexe 4 de la Demande précise que compte tenu de son pKa, la forme volatile du phénol sera réduite du fait du pH élevé dans le stockage, et que de ce fait, les émissions gazeuses potentielles de phénols seront négligeables.

7.4. ANALYSE CRITIQUE

L'ensemble des rapports de l'INERIS concernant l'évaluation du terme source ont été étudiés par la tierce expertise. Les paragraphes suivants présentent une synthèse de l'analyse critique du tiers-expert sur ces différents rapports. Les détails sont fournis dans le rapport technique spécifique de la tierce expertise relatif à l'évaluation du terme source.

7.4.1. Contaminants mobilisables dans la saumure

7.4.1.1. AVIS DU TIERS-EXPERT SUR LES HYPOTHESES DE CALCULS

Les calculs de l'INERIS se basent sur l'évaluation des quantités en contaminants stockées faite sur la base des analyses de spectrométrie SFX. Les nouvelles analyses réalisées en cours de tierce expertise permettent une évaluation plus fiable des quantités en contaminants stockées. La différence est notamment très significative pour le mercure où l'on passe d'un tonnage de 51 tonnes à un tonnage d'environ 26 tonnes.

De plus, les calculs de l'INERIS ne tiennent pas compte l'évaluation des vides miniers résiduels calculée par l'ITASCA en tenant compte des mesures de remblayage. Or, les mesures de remblayage font partie des mesures de sécurisation du confinement du Dossier de demande.

Les hypothèses utilisées pour le calcul des contaminants mobilisables dans la saumure doivent donc être actualisées en tenant compte des derniers éléments disponibles :

- Nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockés ;
- Volume de vides résiduels avec remblayage, soit de l'ordre de $70\,000 \text{ m}^3$ d'après ITASCA.

Par ailleurs, l'INERIS souligne l'importance du cyanure libre dans la mobilisation des métaux lourds (formations de complexes cyanurés facilement solubles).

L'évaluation, sur la base des nouvelles analyses, de la quantité de cyanures libres présente dans le stockage (4,4 tonnes) conforte l'évaluation faite par l'INERIS sur la base des mesures de spectrométrie SFX (4,7 tonnes).

7.4.1.2. AVIS DU TIERS-EXPERT SUR LA METHODE DE CALCUL

Le logiciel utilisé par l'INERIS (MINTEQ) convient pour la détermination de la solubilité de composés de métaux lourds dans des solutions aqueuses faiblement minéralisées. En cas d'application de ce logiciel à des solutions concentrées d'électrolytes, il atteint ses limites. L'INERIS partage ce jugement et indique que les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de faire de calculs plus précis.

La tierce expertise rejoint l'avis de l'INERIS selon lequel les résultats obtenus doivent être pris comme des ordres de grandeur des concentrations en contaminants dans la saumure.

7.4.1.3. AVIS DU TIERS-EXPERT SUR LES RESULTATS OBTENUS PAR L'INERIS

La solubilité des métaux lourds dans le fluide interstitiel est fonction de la forme sous laquelle ils sont présents et des caractéristiques du fluide interstitiel. Le fluide interstitiel évoluera progressivement vers une solution de CaCl_2 , puis de NaNO_2 , et enfin de NaNO_3 , avec une valeur de pH comprise entre 11,5 et 12,5.

Les métaux lourds sont présents dans les différents déchets sous forme de liaisons variables, qui présentent différents degrés de solubilité.

Concernant le mercure, l'hypothèse d'une mobilisation complète dans la saumure polluée constitue l'approche sécuritaire. Les cyanures requis pour la mobilisation du mercure peuvent en effet potentiellement être préférentiellement liés par la formation de complexes cyanoferrates et donc être en quantité moindre pour contribuer à la solubilisation du mercure.

Concernant l'arsenic, compte tenu notamment du caractère oxydant du milieu, des composés de types arsénites ou arséniates se formeront. Ceux-ci présentent une faible solubilité dans l'eau et ne pourront donc enrichir la saumure que dans une faible mesure.

Concernant le plomb, l'hypothèse de l'INERIS d'une solubilité très faible du plomb, par suite de précipitation d'hydroxyde de plomb(II), dans un milieu hautement basique et en présence de fortes concentrations de chlorures, n'est pas correcte selon la tierce expertise. Dans les conditions du stockage ennoyé, il faudra s'attendre à la formation de complexes hydroxo-chlorés solubles de plomb.

Dans le cas du scénario 0% (sans déstockage du mercure), en considérant une solubilité totale du mercure, et compte tenu des quantités en contaminants stockées, de la mobilité des polluants, et des limites de qualité s'appliquant dans les eaux souterraines, le mercure constitue le contaminant le plus pénalisant vis-à-vis de l'impact de la nappe d'Alsace.

Dans le cas d'un déstockage partiel du mercure, un nouveau calcul du terme source, tenant compte des hypothèses actualisées des quantités en contaminants et des volumes de vides résiduels, serait nécessaire pour déterminer le contaminant qui deviendrait le plus pénalisant (Hg, Cd, Sb, ...). L'impact sur la nappe d'Alsace de ce contaminant sera toutefois inférieur à l'impact évalué pour le mercure dans le cas scénario 0%.

En considérant la nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockées et compte tenu des limites de qualité s'appliquant dans les eaux souterraines (1 µg/L pour le mercure d'après le SDAGE), le mercure reste le contaminant le plus pénalisant pour le scénario sans déstockage (scénario 0%). L'évaluation de l'extension du panache de mercure dans les eaux souterraines pour le scénario 0% correspond ainsi à l'estimation de l'impact maximal du projet sur la nappe d'Alsace.

Le tableau ci-après indique les concentrations en mercure dans la saumure pour les différentes solutions alternatives considérées dans le cadre de la tierce expertise, en considérant la nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockées et le volume de vides résiduels calculé par ITASCA, et en considérant une mobilisation complète pour ce contaminant (hypothèse sécuritaire).

Tableau 15. Hypothèses de calcul et concentrations en mercure dans la saumure

	INERIS ⁵⁹	Tierce expertise
Volume des vides dans le stockage	7000 m ³	70 000 m ³
Hypothèse de quantité de mercure mobilisable	51 t	26 t

		INERIS	Tierce expertise
Hg (g/L)	Scénario 0%	7.52	0.37
	Scénario 56 %	3.46	0.16
	Scénario 93%	0.53	0.03

Enfin, concernant les polluants organiques, l'effet de la neutralisation à la chaux du zirame doit être étudié afin d'évaluer la quantité de zirame résiduelle potentiellement présente dans le stockage. En fonction de cette quantité, la possibilité que cette substance passe en solution dans la saumure devra être étudiée. Les résultats devront être pris en compte dans l'étude d'impact du projet sur la nappe d'Alsace.

7.4.2. Contaminants mobilisables dans l'air

Des réactions pouvant dégager du gaz sont susceptibles de se produire pour une partie des déchets lors de l'infiltration de la saumure. A ce titre, il convient de distinguer les gaz faiblement hydrosolubles dans des conditions normales⁶⁰ (par exemple l'hydrogène, les hydrocarbures gazeux) et qui n'ont pas d'effet toxique, des gaz qui sont plutôt solubles dans l'eau ou dans les fluides aqueux, et qui en plus constituent des substances dangereuses et toxiques (par exemple HCN, AsH₃, PH₃, NH₃, H₂S, SO₂). On pourrait potentiellement également rencontrer des vapeurs de mercure, qui se formeraient lors de la libération de mercure métallique.

La problématique du dégagement de gaz est considérée par l'INERIS par rapport à l'aspect toxique des gaz formés (mercure gazeux, hydrogène arséniés, cyanure d'hydrogène). Or, les résultats montrent que les gaz toxiques auront un impact négligeable sur le milieu chimique attendu dans le site de stockage. Cela vaut également pour le sulfure d'hydrogène et l'hydrogène phosphoré, et pour le dioxyde de soufre, non pris en compte par l'INERIS.

En revanche, il importe, selon l'avis du tiers-expert, de considérer la formation d'hydrogène et d'ammoniac lors de l'entrée en contact des déchets avec la saumure. En effet :

⁵⁹ Les calculs de l'INERIS ne considère pas la présence d'un remblayage (et les vides associés en relation avec la porosité du remblai) alors qu'un remblayage fait partie des composantes du projet de confinement mentionnées dans le Dossier de demande

⁶⁰ Conditions normales (T = 273,15 K, p = 101,3 kPa)

- La quantité d'hydrogène potentiellement libérée, dans des conditions normales, dans un site de stockage confiné par des barrages et des remblais, dans lequel tout l'espace interstitiel serait rempli de solution, pourrait provoquer une augmentation de la pression du liquide interstitiel. La solubilité de l'hydrogène en fonction de la pression doit donc être prise en compte. Une analyse de sécurité doit établir si cette augmentation de la pression a un impact sur l'expulsion du liquide interstitiel contaminé, essentiellement opérée par la convergence.
- La libération d'ammoniac contenu dans les déchets a une forte incidence sur les réactions chimiques potentielles. L'ammoniac se dissoudra complètement dans la saumure, et sera donc disponible pour de nombreuses réactions à l'origine de la formation de complexes.

Des mesures de libération d'hydrogène et de teneurs en ammonium et ammoniac ont été réalisées sur les échantillons de l'échantillonnage dans le cadre de la tierce expertise et doivent être prises en compte afin d'apporter des compléments sur ces points.

7.5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

En considérant la nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockées et compte tenu des limites de qualité s'appliquant dans les eaux souterraines (1 µg/L pour le mercure d'après le SDAGE), le mercure reste le contaminant le plus pénalisant pour le scénario sans déstockage (scénario 0%). Les concentrations en mercure dans la saumure pour les différentes solutions alternatives considérées dans le cadre de la tierce expertise, en considérant la nouvelle évaluation des quantités en contaminants stockées et le volume de vides résiduels calculé par ITASCA, et en prenant ne compte une mobilisation complète (hypothèse sécuritaire), sont les suivantes :

- scénario 93 % : 26 mg/L
- scénario 56 % : 161 mg/L
- scénario 0% : 371 mg/L

L'évaluation de l'extension du panache de mercure dans les eaux souterraines pour le scénario 0% correspond à l'estimation de l'impact maximal du projet sur la nappe d'Alsace.

Dans le cas d'un déstockage du mercure, un nouveau calcul du terme source tenant compte des hypothèses actualisées de quantités en contaminants et de volumes de vides résiduels, permettrait de déterminer le contaminant qui deviendrait le plus pénalisant (Hg, Cd, Sb, ...). Toutefois, l'extension du panache dans la nappe d'Alsace pour ce contaminant resterait inférieure à celle du panache de mercure dans le cas du scénario 0%. Compte tenu de l'extension du panache de mercure dans le cas du scénario 0%, de l'ordre d'une vingtaine de mètre, la tierce expertise considère donc qu'un tel calcul n'est pas nécessaire dans le cadre de l'établissement du Dossier de demande.

Dans le cas où un nouveau calcul de terme source serait mené, il conviendrait de prendre en compte les différentes remarques de la tierce expertise (notamment l'incertitude sur la quantité de cyanures libres stockées, la formation potentielle de complexes cyano-ferrates, la formation de complexes hydroxo-chlorés solubles de plomb, la libération et le passage en solution d'ammoniac).

Concernant la formation de gaz, la quantité d'hydrogène potentiellement libérée, dans des conditions normales, dans un site de stockage confiné par des barrages et des remblais, dans lequel tout l'espace interstitiel serait rempli de solution, pourrait provoquer une augmentation de la pression du liquide interstitiel. Une analyse de sécurité doit établir si cette augmentation de la pression a un impact sur l'expulsion du liquide interstitiel contaminé, essentiellement opérée par la convergence.

8. ETUDE DE L'IMPACT DU PROJET SUR LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

8.1. INTRODUCTION

Ce chapitre correspond à la deuxième partie du point 3 de la lettre de demande du préfet du 17 février 2015, c'est à dire à l'analyse critique de « l'étude du terme source pour appréhender [...] l'impact du projet sur la qualité des eaux souterraines ».

Ce chapitre est organisé de la façon suivante :

- Evaluation de l'impact du projet dans le Dossier de demande ;
- Analyse critique des hypothèses du dossier ;
- Conclusions et recommandations de la tierce expertise.

Les principaux documents consultés sont les suivants :

- MDPA - Dossier de demande d'autorisation 2015 dont l'annexe 4 ;
- INERIS, 2011, [55] – Etude hydrogéologique de l'ennoyage du site ;
- INERIS, 2012, [69] – Impact potentiel du stockage sur la ressource en eau dans le cadre du scénario de stockage illimité ;
- BRGM, 1998, R40335 – Modèle de la nappe d'Alsace – Projet de développement 312 – Rapport final ;
- BRGM, 2011, BRGM/RP-60256-FR - Modélisation d'une fuite de saumure à partir du site de stockage souterrain de StocaMine : Simulation d'un 5^{ème} scénario – Rapport final.

8.2. IMPACT DU PROJET SUR LA NAPPE (DOSSIER DE DEMANDE)

8.2.1. Introduction

L'évaluation de l'impact du projet sur la nappe est présentée notamment dans le Dossier de demande dans l'annexe 4 au paragraphe 3.2.

Après avoir recensé les principaux mécanismes potentiels pouvant induire un écoulement de saumure polluée dans la nappe d'Alsace, le mécanisme retenu comme prépondérant est décrit brièvement et les éléments de quantification du Dossier de demande sont présentés.

8.2.2. Mécanismes potentiels d'épanchement de saumure polluée dans la nappe d'Alsace

Le Dossier de demande analyse principalement deux processus pouvant potentiellement induire un écoulement de saumure polluée vers la nappe d'Alsace, avec comme 'moteur' des écoulements :

- La différence de charge hydraulique entre l'amont et l'aval du site de StocaMine ;
- La continuation de la réduction des vides miniers et de ceux du stockage.

Le premier cas est analysé au §2.4.2.3-b de l'annexe 4 du Dossier de demande et présenté succinctement ci-après.

Les différences de charges hydrauliques dans la nappe alluviale qui pourraient entraîner un écoulement dans la mine sont de :

- environ 10 mètres de entre le puits le plus à l'amont (Else) et le puits le plus à l'aval du secteur Amélie (Max),
- environ 40 mètres de entre le puits le plus à l'amont (Else) et le puits le plus à l'aval du secteur Ouest (Ungersheim 2), si les mines Amélie et Marie-Louise sont connectées (i.e. en considérant que le stot n'est pas étanche)

Les calculs réalisés par M. Bonnet (Cf. Annexe 6 du rapport [55]) et l'Inéris ([55] | Ineris, 2011) évaluent le poids de la colonne d'eau + saumure en amont hydraulique (point P1) et le compare au poids de la colonne d'eau + saumure en aval hydraulique (point P2) (Cf. figure ci-dessous). Les calculs montrent que l'équilibre hydrostatique n'est pas atteint (i.e. poids en P1 > poids en P2) et donc qu'un écoulement est possible. Cet écoulement pourrait induire une remontée de la saumure à l'aval (en P2 la hauteur H2 augmente).

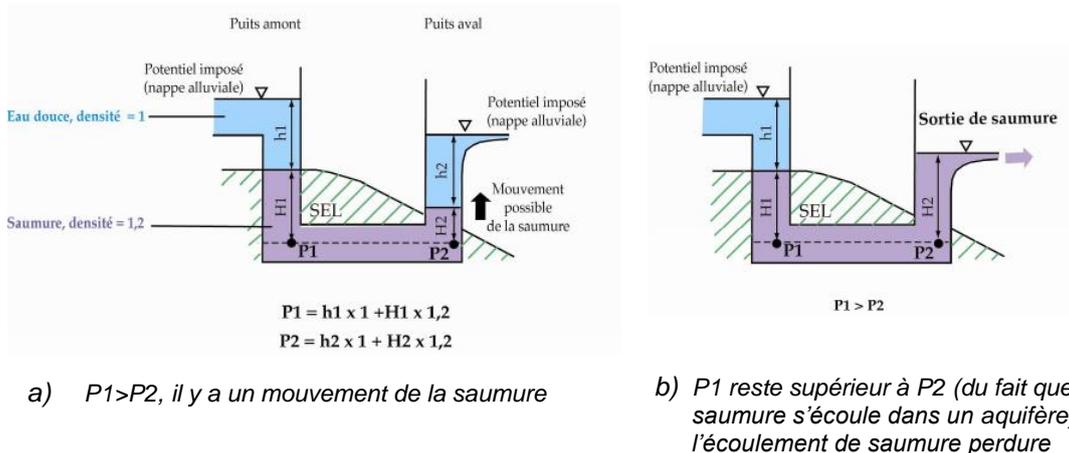


Figure 24. Schémas de calcul de l'équilibre hydrostatique dans la mine (Dossier de demande)

Les calculs indiquent que le niveau de saumure (et donc potentiellement de saumure polluée) pourrait - dans le cas de la mine Amélie isolée - dépasser ponctuellement (au puits Max) le mur du tertiaire ce qui induirait des débits très faibles (quelques m^3/an).

Dans le cas où l'ensemble du secteur ouest est pris en compte, une hypothèse majorante aboutirait à un débit cumulé d'environ $200 m^3/an$ pour les cinq puits situés le plus à l'aval.

Cependant, l'Inéris considère que le temps de transit de ces écoulements (« de l'ordre de un à quelques milliers d'années ») serait tel que ces écoulements ne pourraient pas se produire avant la fermeture pratiquement complète de la mine du fait du fluage du sel.

Par ailleurs, le phénomène de réduction des vides miniers aboutira à la sortie de saumure par l'ensemble des puits et s'opposera au processus d'écoulement gravitaire.

Le Dossier de demande conclut alors qu'un « épanchement significatif de saumure en surface par écoulement hydrodynamique spontané de l'amont vers l'aval du secteur ouest sous l'effet d'un gradient de densité est peu probable. S'il se produit, il sera négligeable par rapport à l'épanchement lié à la poursuite de la compaction, qu'il s'agisse du cas de la mine Amélie isolée ou de l'ensemble du secteur ouest. »

Ainsi, selon le Dossier de demande, le processus principal pouvant conduire à un épanchement de saumure polluée dans la nappe d'Alsace résulte de la continuation de la réduction des vides miniers.

Ce processus est présenté ci-après.

8.2.3. Evaluation de l'impact du projet lié à la réduction des vides miniers (Dossier de demande)

L'évaluation de la concentration en polluants est d'abord effectuée au niveau des puits de mine avant leur dispersion dans la nappe alluviale. Cette évaluation est, selon le Dossier de demande, basée sur :

- La concentration initiale de saumure polluée au sein du stockage ;
- Le débit de saumure polluée à la sortie immédiate du stockage ;
- Le débit de saumure remontant depuis la mine de potasse sous l'effet des phénomènes de réduction des vides des travaux miniers.

Ensuite le débit de saumure contaminée sortant des puits est introduit dans le modèle d'écoulement de la nappe d'Alsace élaboré par le BRGM, de façon à obtenir les concentrations en contaminant dans la nappe d'Alsace.

Le Dossier de demande ne présente aucun calcul et renvoie aux rapports INERIS.

De façon succincte, l'INERIS considère principalement 2 étapes :

- A $t = 300$ ans par rapport à l'époque actuelle, la mine vient d'être totalement envoyée et la saumure de la mine commence à être expulsée sous l'effet de la réduction des vides miniers. Le débit de saumure est estimé en considérant que le volume sus-jacent à la zone de stockage pourra être potentiellement pollué⁶¹ ;
- A $t = +1000$ ans par rapport à la date précédente⁶², la saumure polluée commence à sortir du stockage. Elle est ensuite diluée par le débit de saumure non polluée résultant de la continuation de la réduction des vides miniers.

Les valeurs des paramètres intervenants dans l'estimation du débit de saumure atteignant la nappe sont illustrées dans les figures suivantes (où il est considéré que le stot n'est pas étanche⁶³ et que la saumure polluée s'épancherait dans la nappe au niveau des 5 puits de la mine Amélie).

⁶¹ Débit de saumure = Volume au niveau et sus-jacent à la zone de stockage (6.8 Mm^3) x taux de convergence (0.01%)

⁶² Dans le Dossier de demande il y a une certaine confusion sur les dates (notamment au §2.4.3 de l'annexe 4). En effet la date à laquelle la saumure polluée pourrait sortir du stockage serait de 1000 ans *par rapport à la date actuelle* – selon le Dossier de demande – alors que les calculs de l'INERIS considèrent la 'date' de + 1000 ans *à partir du début de l'épanchement de saumure des puits de mine* « soit vers l'an 2300 » (Cf. annexe 1 du rapport [69])

⁶³ i.e. prise en compte de l'ensemble du secteur ouest

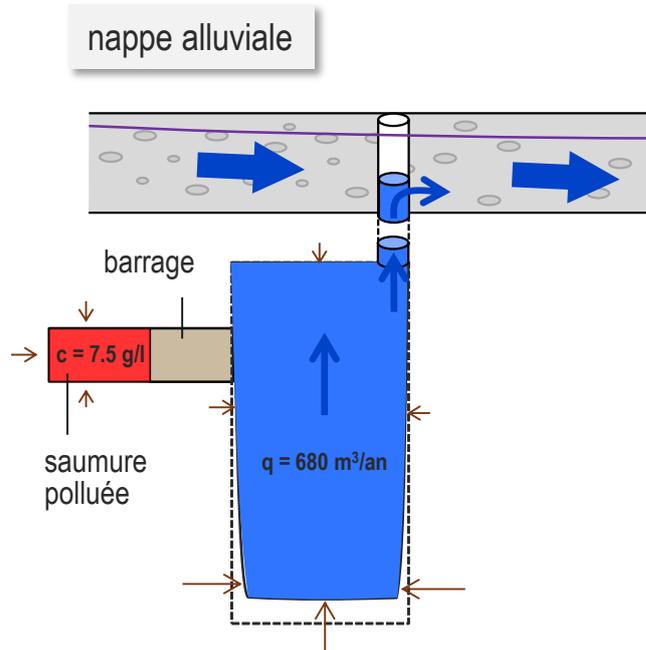


Figure 25. Débit de saumure non polluée s'épanchant par les 5 puits de la mine Amélie et concentration de mercure dans le stockage à $t_0 = 300$ ans (d'après rapports INERIS)

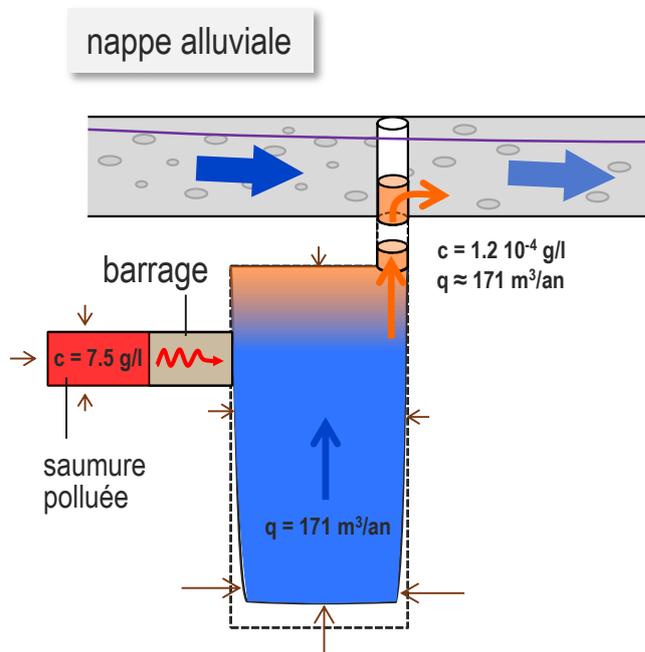


Figure 26. Débit et concentration de mercure s'épanchant par les 5 puits de la mine Amélie à $t = t_0 + 1000$ ans (d'après rapports INERIS)

Le flux de saumure polluée⁶⁴ sortant de chacun des 5 puits de la mine Amélie⁶⁵ est ensuite introduit, dans le modèle régional de la nappe d'Alsace élaboré par le BRGM.

Les concentrations résultantes, dans la maille⁶⁶ 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%.

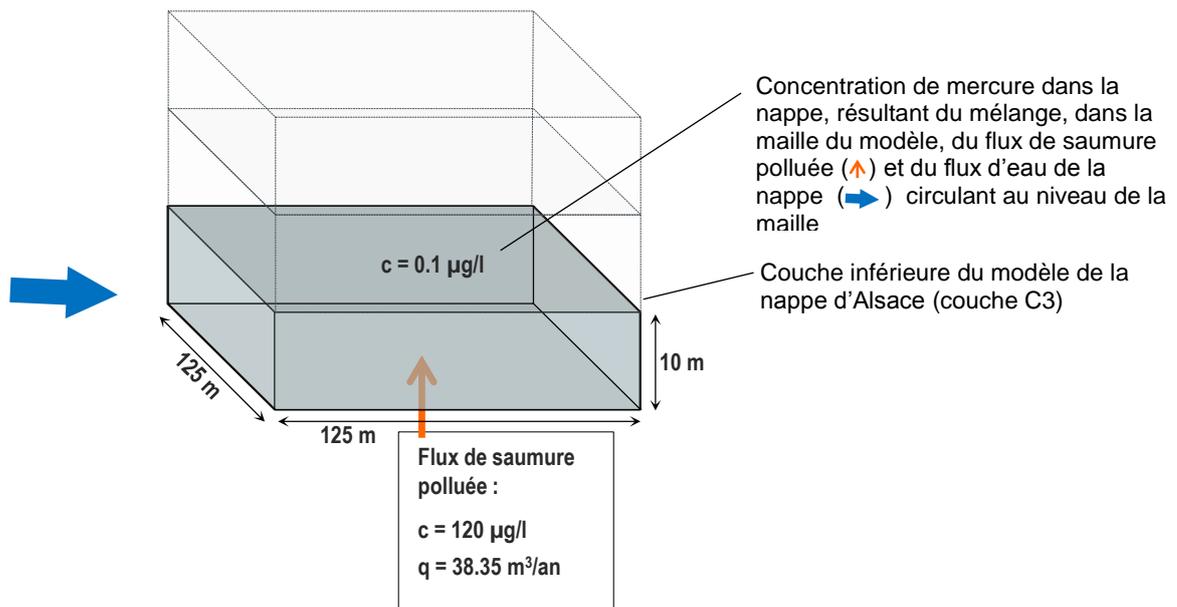


Figure 27. Débit⁶⁷ et concentration de mercure émergeant du puits Amélie 1 et concentration en mercure dans la nappe – scénario 0% (rapports INERIS)

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 µg/l dans le cas du scénario 93% et 0.1 µg/l dans le cas du scénario 0% (Cf. figure ci-dessous).

Par la suite, le panache de mercure dans la nappe d'Alsace a été simulé (Cf. § 3.2.3.3).

⁶⁴ Flux de 171 m³/an avec une concentration en mercure de 1.2 10⁻⁴g/l (soit 120 µg/l)

⁶⁵ 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)

⁶⁶ Maille correspondant à la 3^{ème} couche de l'aquifère alluvial et de dimension 125 m x 125 m (et de 10 m d'épaisseur)

⁶⁷ 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 :

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

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

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

8.3. ANALYSE CRITIQUE DE L'ÉVALUATION DE L'IMPACT DU PROJET SUR LA NAPPE DU DOSSIER DE DEMANDE

Une analyse plus détaillée, que celle présentée ici, des aspects relatifs à l'impact du projet sur la nappe phréatique est effectuée dans le rapport *Hydraulique* de la tierce expertise.

8.3.1. Configuration du projet de confinement prise en compte

Le Dossier de demande précise que le projet de confinement inclura un « remblayage des galeries vides ou partiellement vides du stockage » (Dossier de demande, Annexe 4, §1.2.2.1).

Ce remblayage a pour rôle notamment:

- de constituer un frein à la compaction du stockage ;
- de retarder l'expulsion de la saumure hors du stockage par la création de vides au sein de celui-ci, les vides créés augmentant le temps de remplissage du stockage⁶⁸.

Les caractéristiques du remblayage ont un impact direct sur les débits de saumure polluée qui sortiront de la zone de stockage, en effet :

- La porosité de remblais va impacter le temps de saturation du stockage⁶⁹ ainsi que la dilution des contaminants, voire des équilibres chimiques du terme source ;
- La résistance à la compression du remblai est un des facteurs déterminant le débit de sortie de saumure polluée.

Cependant, les calculs relatifs à l'évaluation de l'impact du projet de confinement dans le Dossier de demande ne prennent pas en compte le fait que les galeries seront au moins partiellement remblayées⁷⁰.

Par ailleurs, dans l'évaluation du débit de sortie de saumure polluée de la zone de stockage, l'INERIS indique prendre en compte *uniquement* la compressibilité des déchets, alors que les études Itasca prennent en compte la compressibilité du remblai. Ces éléments des études Itasca (études citées dans le Dossier de demande) ne sont pas pris en compte dans le Dossier de demande.

Le projet de confinement inclut, selon le Dossier de demande, un « remblayage des galeries vides ou partiellement vides du stockage », or ce remblayage n'est pas pris en compte dans les calculs relatifs à l'évaluation de l'impact du projet sur la nappe.

Quand bien même le remblayage est présenté comme un facteur favorable dans le Dossier de demande et dans la mesure où le remblayage impacte de façon significative le débit de sortie de saumure polluée de la zone de stockage, il serait souhaitable que l'évaluation de l'impact du projet prennent en compte cette composante du projet de confinement.

⁶⁸ Cf. Dossier de demande, §3.2.3

⁶⁹ Plus le volume des vides sera important plus le temps de saturation du stockage sera long

⁷⁰ Ainsi, le volume des vides pris en compte correspond – dans l'évaluation de l'impact du projet, i.e. les études INERIS – à la porosité des déchets (les galeries de stockage étant mécaniquement fermées), c'est-à-dire un volume de vides de 7 000 m³, alors que les études Itasca, qui prennent en compte un remblayage des galeries, considèrent un volume de vide de 70 000 m³ correspondant principalement aux vides de porosité du remblai

8.3.2. Mécanismes pouvant aboutir à une contamination de la nappe d'Alsace

Les calculs effectués dans le Dossier de demande pour évaluer les différences de charges hydrauliques dans la nappe alluviale qui pourraient entraîner un écoulement dans la mine considèrent uniquement des pertes de charges au travers du puits de sortie, et conclut que les débits sont faibles (quelques m³/an dans le cas de la mine Amélie isolée à 200 m³/an sinon⁷¹).

Ce calcul est extrêmement sécuritaire puisqu'il n'est pris en compte aucune perte de charge dans le puits en entrée et dans la mine proprement dite. Or, au vu des résultats des tests hydrauliques sur le sondage VAPB2 (SolExperts, 2014), les transmissivités des couches foudroyés sont faibles, de l'ordre de 5.10⁻⁷ à 10⁻⁶ m²/s, et entraîneront d'importantes pertes de charges dans la mine.

Ainsi, nous considérerons que les débits d'expulsion de la saumure par la différence de pression hydrostatique dans la mine seront de plusieurs ordres de grandeurs inférieurs à ceux indiqués dans le dossier. Ces débits sont donc bien négligeables.

De plus, il s'agit ici de l'expulsion de saumure « saine », c'est-à-dire qui n'est pas en contact avec les déchets. Une différence de charge entre l'amont et l'aval hydraulique du stockage sera extrêmement faible et avec des pertes de charges très importantes du fait des barrières : l'entraînement de la pollution par ce mécanisme de différence de charge hydraulique peut être considéré comme très largement négligeable.

La tierce expertise considère, comme le Dossier de demande (mais en intégrant les pertes de charges hydrauliques le long du trajet d'écoulement), que les débits d'écoulement de saumure polluée dans la nappe phréatique sont négligeables devant les débits générés par la continuation de la réduction des vides miniers (effet 'seringue'). Il convient donc d'étudier ce dernier mécanisme.

8.3.3. Evaluation de l'impact du projet lié à la réduction des vides miniers (Analyse critique)

L'analyse de la tierce expertise suit les différentes étapes présentées dans le Dossier de demande.

Quantification des phénomènes liés à l'évaluation de l'impact du projet à la fin de l'ennoyage de la mine ($t=t_0$)

Des remarques ont été faites précédemment sur les éléments suivants :

- La concentration en mercure dans le stockage (qui dans les rapports Ineris ne prend pas en compte le remblayage), (Cf. §7.4.1.3) ;
- La vitesse de convergence des vides miniers des tailles foudroyées (Cf. § 5.3.3.5).

Ces remarques ne sont pas plus développées ici (voir les § précités pour plus de détail).

L'analyse portera ici sur la valeur du débit de sortie de saumure (680 m³/an) à la fin de l'ennoyage.

Pour obtenir cette valeur, l'Ineris évalue tout d'abord le débit de sortie de saumure via l'ensemble des puits de la mine.

⁷¹ Ce dernier chiffre (200 m³/an) in fine n'est pas négligeable devant celui estimé pour le débit de saumure atteignant la nappe alluviale sous l'influence de la réduction des vides miniers (171 m³/an) à $t=t_0 + 1000$ ans

Celui-ci est évalué en prenant en compte :

- Un volume des vides miniers à la fin de l'ennoyage est de 28.5 Mm³ arrondi à 30 Mm³ ;
- Une vitesse de convergence de 0.01%/an.

Le débit de saumure est alors estimé par le produit du volume des vides miniers par la vitesse de convergence :

$$\text{Débit total d'épanchement de saumure} = 0.01\%/an \times 30 \text{ Mm}^3 = 3000 \text{ m}^3/an^{72}$$

L'Ineris, dans le rapport [55] (§4.3.6) n'indique pas comment le volume des vides miniers à la fin de l'ennoyage est évalué, ni la valeur de 28.5 Mm³ obtenue.

Ensuite l'Ineris évalue le débit de saumure potentiellement polluée s'épanchant par les 5 puits Amélie dans le débit total (i.e. via les 15 puits du secteur ouest) en considérant le volume des vides ennoyés situés au niveau et au-dessus de la zone de stockage.

Quantification des phénomènes liés à l'évaluation de l'impact du projet à $t=t_0 + 1000$ ans

Evolution du débit de saumure s'épanchant via les 5 puits de la mine Amélie

L'Ineris considère que le débit de saumure expulsé par les 5 puits de la mine Amélie va diminuer de 680 m³/an à la fin de l'ennoyage (t_0) à 171 m³/an 1000 ans plus tard ($t= t_0 + 1000$ ans) (Cf. Annexe 1 du rapport [69]).

L'Ineris 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 :

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

alors que dans le rapport [55], c'est le taux de convergence des tailles foudroyées (0.01%/an) qui est utilisé.

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 m³/an, en prenant en compte 1) une vitesse de convergence des tailles foudroyées ennoyées de 0.01%/an sur l'ensemble de la période $t_0 - t_0 + 1000$ ans, 2) l'évolution indiquée dans le rapport [69].

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.

⁷² L'Ineris a appliqué successivement des arrondis sur le taux de convergence (ramené de 0.0043% à 0.01%) et sur les volumes des vides miniers (ramenés de 28.5 Mm³ à 30 Mm³). En l'absence d'arrondi, le débit de saumure serait de 1225 m³/an au lieu de 3000 m³/an

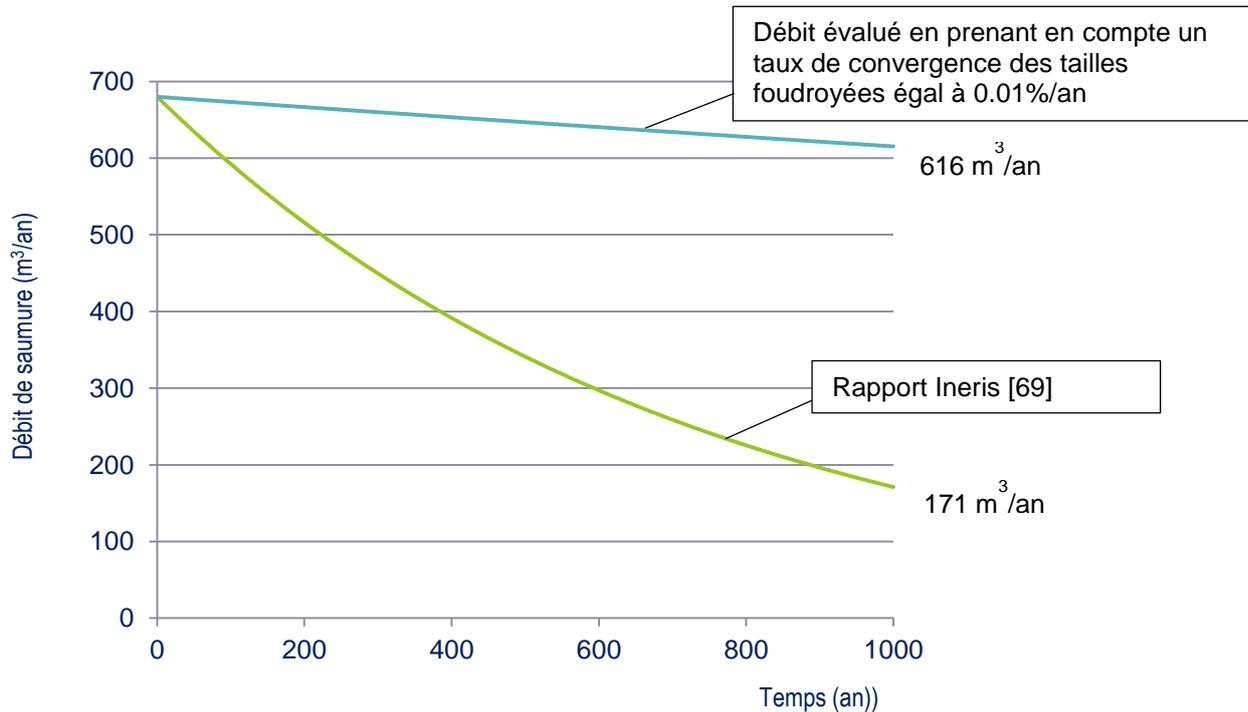


Figure 28. Evolutions du débit de saumure via les 5 puits de la mine Amélie selon différentes hypothèses

Evaluation du débit de saumure polluée en sortie de stockage à $t = t_0 + 1000$ ans

Le Dossier de demande présente parfois les barrages comme ayant une efficacité de 1000 ans⁷³. Cette présentation peut être trompeuse dans la mesure où il est considéré en fait que les barrages continueront à être efficaces au-delà de cette date.

L'hypothèse de non sortie de saumure polluée avant 1000 ans est acceptable au vu des calculs réalisés par Itasca qui montrent (avec pris en compte d'un remblai) que la saumure polluée ne commencerait à sortir du stockage qu'au bout d'une période d'environ 20 000 ans.

Le débit de saumure pollué n'est indiqué ni dans le Dossier de demande, ni dans les rapports Ineris.

Ce débit a 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. 171 m³/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.

⁷³ « Si les barrières restent efficaces pendant 1000 ans » (Cf. Dossier de demande, Annexe 4, §5.2)

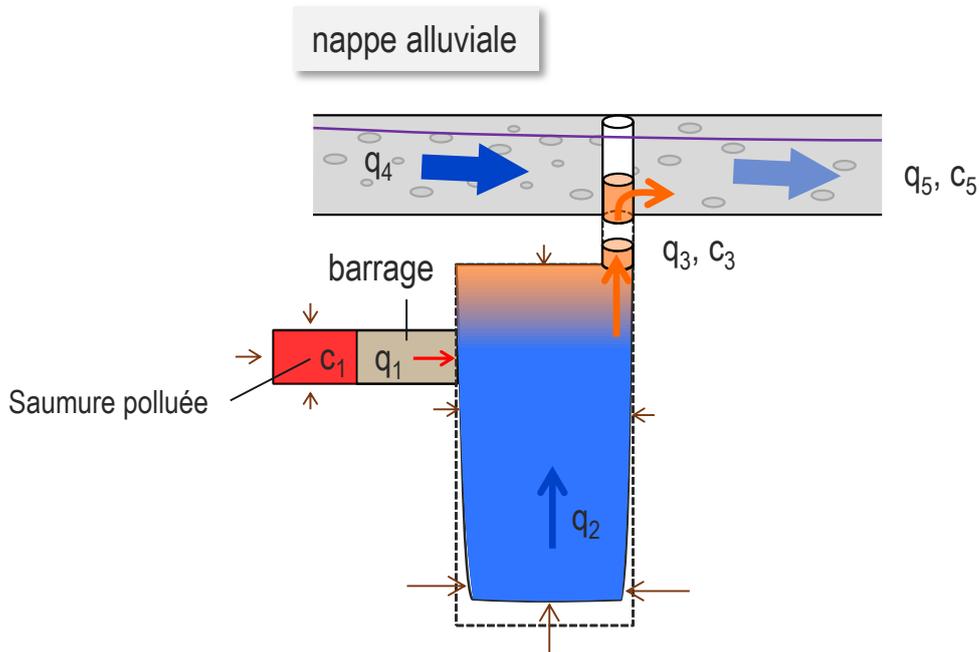


Figure 29. Paramètres de calcul des concentrations dans les différents compartiments souterrains

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,

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

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

Ce débit apparaît extrêmement faible par rapport au débit calculé par Itasca où $q_1 = 12 \text{ l/an}$ à $t = 20\,000 \text{ ans}$ (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.

Evaluation des concentrations dans la nappe à $t = t_0 + 1000$ ans

Le flux de saumure polluée est introduit dans le modèle régional de la nappe d'Alsace au niveau de chaque maille (au niveau de la couche inférieure de la nappe phréatique) correspondant à chacun des puits de la mine Amélie.

Les caractéristiques hydrodynamiques prises en compte dans le modèle BRGM sont considérées comme appropriées (au vu de l'analyse hydrogéologique faite des logs de forage disponibles et du calage obtenu).

Cependant le fait d'introduire un débit de saumure qui s'épanche via l'extrados d'un puits d'environ 5 m de diamètre dans une maille de 125 m par 125 m de côté et de 10 m d'épaisseur induit de facto une dilution importante puisque la concentration résultante dans cette maille dépend du flux de la nappe d'Alsace 'traversant' une section d'aquifère de 125 m de large et 10 m d'épaisseur.

Le rapport Inéris [69] reconnaît ce biais puisque des mailles plus petites « auraient pu conduire à des concentrations plus importantes à la sortie des puits dans la nappe » ([69], §7.1.2). L'Inéris considère toutefois (ce qui n'est pas démontré) que ces concentrations maximales (non simulées) ne devraient pas dépasser le rayon d'une maille (soit 70 m).

Pour évaluer l'impact de la discrétisation du maillage dans le modèle d'écoulement de la nappe d'Alsace, la tierce expertise a créé un modèle local (avec le logiciel Feflow). Ce modèle reprend l'ensemble des caractéristiques hydrodynamique du modèle BRGM à l'exception des paramètres de dispersion où la tierce expertise a privilégié des données locales.

Pour ce qui concerne les flux de saumure polluée sortant des puits de la mine Amélie, nous avons considéré d'une part, les études Itasca pour l'évaluation du débit de saumure polluée sortant des barrières du stockage⁷⁴ et, d'autre part, le calcul développé par la tierce expertise pour estimer l'évolution des vides miniers⁷⁵ au cours du temps et donc in fine estimer le débit de saumure non polluée dans lequel la saumure polluée en sortie de stockage sera diluée.

Cette approche est présentée de façon plus détaillée dans le rapport *Hydraulique* de la tierce expertise.

Les résultats obtenus pour le mercure dans le cas du scénario 0 % sont présentés à la figure ci-après.

⁷⁴ Ces études intègrent le rôle du remblai et modélisent finement le contexte géologique du stockage

⁷⁵ Ce calcul prend en compte la distribution des vides miniers en fonction de leur date de 'création', leur profondeur et des relations entre convergence et profondeur établies de façon sécuritaire à partir des observations disponibles.

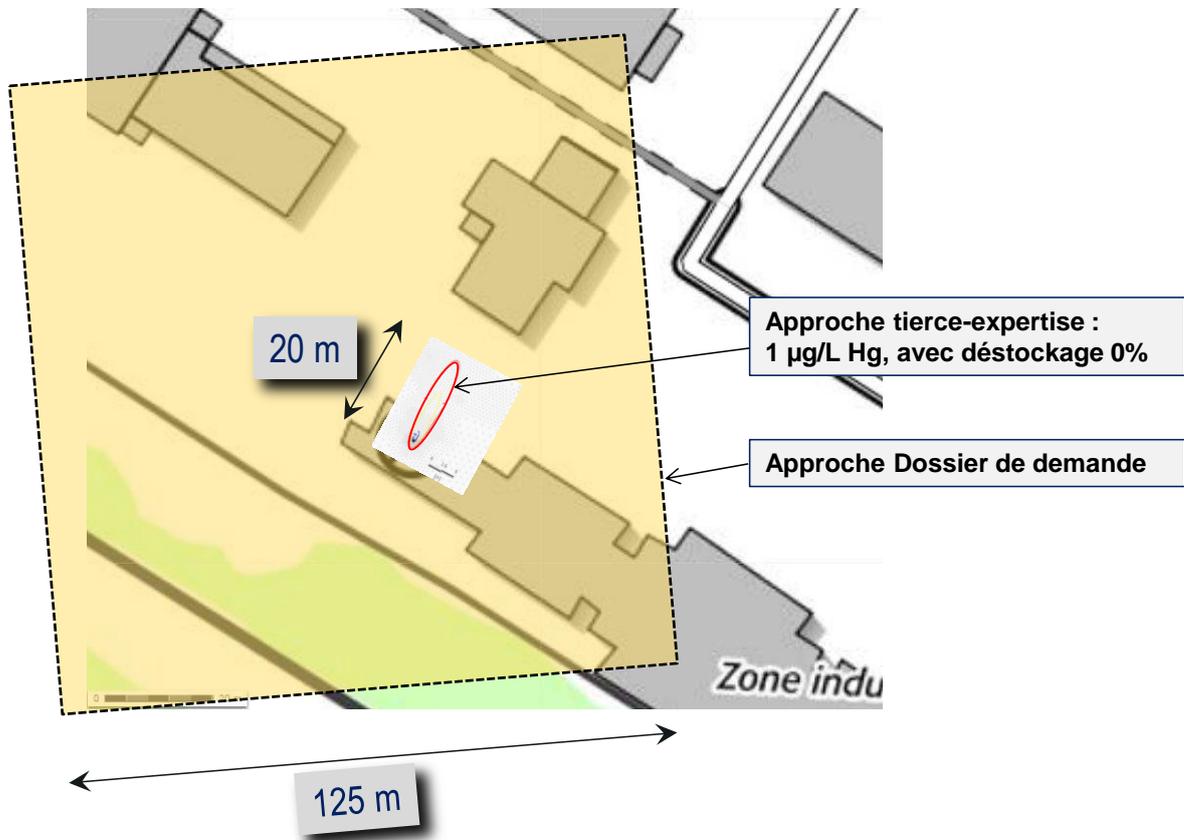


Figure 30. Comparaison entre l'extension du panache de mercure à proximité d'un puits (Dossier de demande et tierce expertise)

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

- plus allongé (ceci est dû 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 (16 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 dizaines de mètres.

8.4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les principaux points induisant des remarques de la part de la tierce expertise sont présentés ci-après.

Mécanismes liés à l'épanchement de saumure polluée dans la nappe

La tierce expertise est en accord avec le Dossier de demande qui considère que le mécanisme principal pouvant induire un épanchement de saumure polluée dans la nappe d'Alsace est dû à la continuation de la réduction des vides miniers.

Absence de sortie de saumure polluée avant 1000 ans après la date d'envoyage

Le Dossier de demande considère qu'il n'y aura pas d'épanchement de saumure polluée à la sortie des barrages avant 1000 ans. Au vu des études Itasca, la tierce expertise considère que cette hypothèse est sécuritaire.

Prise en compte du remblayage

L'impact du remblayage n'est pas pris en compte dans les calculs relatifs à l'évaluation de l'impact sur la nappe du projet. Quand bien même ce paramètre est considéré comme un facteur favorable il serait probablement souhaitable que l'évaluation de l'impact du projet prenne en compte cette composante du projet de confinement.

Evaluation de l'impact sur la nappe

Le Dossier de demande mentionne un flux et une concentration en polluant en sortie de puits sans indiquer les hypothèses prises en compte (évolution du flux de saumure de t_0 à $t = t_0 + 1000$ ans) ni les calculs effectués (concentration en polluant en sortie de puits).

De ce fait il n'est pas possible d'évaluer la pertinence et la rigueur de l'approche adoptée. Il est ainsi recommandé que le Dossier de demande précise et justifie toutes les hypothèses prises en compte et indiquent tous les éléments permettant d'analyser l'approche développée.

Toutefois, afin d'évaluer les ordres de grandeur de l'extension d'un panache de mercure dans la nappe d'Alsace, la tierce expertise a complété l'approche développée par Itasca (Itasca ayant évalué le débit de saumure polluée en sortie de stockage). Il est ainsi montré (en ayant une approche sécuritaire) que l'extension d'un tel panache (cas du scénario 0%) serait limitée à quelques dizaine de mètre (limite de panache du mercure à une concentration de 1 µg/l).

Enfin, pour estimer l'impact sur la nappe et notamment déterminer l'extension d'un panache de polluant, il est recommandé d'utiliser une approche de modélisation locale (avec des paramètres hydrodispersifs locaux d'autant que ceux-ci sont disponibles).

9. DISPOSITIONS RELATIVES AU SUIVI

9.1. ELEMENTS DU DOSSIER DE DEMANDE

Les dispositions relatives au suivi sont précisées dans l'Annexe 4 du Dossier de demande. Ces dispositions sont brièvement décrites ci-après.

9.1.1. Suivi de l'ennoyage

Le suivi de l'ennoyage de la mine Amélie par la réalisation d'un forage profond est prévu dans le Dossier de demande.

La réalisation du forage dénommé VAPB2, positionné au niveau du point bas de la mine Amélie, a débuté préalablement au dépôt du Dossier de demande. Le forage a été stoppé dans un premier temps à 898,5 mètres, à l'arrivée dans la couche supérieure de potasse exploitée (perte totale du fluide de foration).

Ce forage a été repris en 2015 et a atteint la couche inférieure.

9.1.2. Suivi de la nappe alluviale

La demande prévoit un suivi de la qualité de la nappe (incluant notamment les métaux lourds et les cyanures) sur des piézomètres existants ainsi que sur 10 piézomètres complémentaires qui devront être mis en place à l'amont et à l'aval des puits de la mine Amélie.

Compte tenu de l'échelle de temps considérée, la demande prévoit que la réalisation des piézomètres et le démarrage du suivi soient fixés en fonction du résultat du suivi de l'ennoyage.

9.1.3. Suivi des puits de mine

Comme pour tous les autres anciens puits de la mine de potasse (dont Amélie 1, Amélie 2 et Max), la demande prévoit que le Département de Prévention et de Sécurité Minière du BRGM assure la surveillance des ouvrages Joseph et Else.

9.2. ANALYSE CRITIQUE

Les impacts envisagés portent sur plusieurs milliers d'années. Cette perspective du très long terme pose, comme pour d'autres projets avec ces échelles de temps, la question de la pérennité des organismes de gouvernance et des dispositifs suivi à long terme permettant de suivre l'évolution du site.

En tout état de cause, il n'est pas possible de garantir la mise en œuvre d'un suivi de qualité d'eau de la nappe à cette échelle de temps. Ainsi, après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée.

Il importe ainsi avant tout d'obtenir des résultats à court terme sur l'évolution des phénomènes pour vérifier les hypothèses prises en compte dans l'étude d'impact, les ajuster et / ou mettre en place des mesures correctives.

La tierce expertise insiste donc sur la nécessité de mettre l'accent sur les mesures de contrôle de l'évolution des phénomènes pouvant être mises en place dès à présent.

9.3. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Compte tenu des échelles de temps considérées (plusieurs milliers d'année), la priorité doit être donnée à la mise en place de moyens permettant de suivre à court terme l'évolution des phénomènes mis en jeu (ennoyage et réduction des vides). La tierce expertise recommande ainsi :

- l'instrumentation du forage VAPB2, de façon à suivre l'évolution du niveau de saumure dans la mine Amélie,
- la réalisation et l'instrumentation d'un forage profond au niveau du secteur Ouest, afin de suivre également la remontée de saumure dans ce secteur,
- la poursuite des mesures de convergence au sein du stockage,
- la poursuite des mesures d'affaissement en surface.

oOo

ANNEXE 1

Bibliographie

Références Bibliographiques selon la nomenclature MDPA

Note : en gras les principales références citées dans le rapport

- [1], StocaMine. 1996. Le stockage en mine de déchets industriels
- [2], ENSPM. 1997. Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la Mine Amélie. Aspects mécaniques du problème
- [3], IPG Strasbourg. 1997. Estimation des mouvements sismiques à la cote 500 m
- [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.**
- [5], ANRED. 1990. Stockage profond : évaluation des flux de déchets admissibles
- [6], PECSIE. 1991. Stockage profond de déchets industriels : étude des dangers
- [7], EDF. 1991. Mines de Potasse d'Alsace : tenue au séisme du cuvelage du puits Joseph
- [8], Chimie mulhouse. 1990. Etude de sécurité chimique
- [9], Chimie mulhouse. 1990. Etude de sécurité chimique sur le projet MDPA de stockage profond des déchets industriels dans la mine Joseph-Else à Wittelsheim, Comportement à long terme
- [10], INERIS. 1993. Stockage en mine de déchets toxiques : déchets à exclure (1)
- [11], INERIS. 1993. Stockage en mine de déchets toxiques : déchets à exclure (2)
- [12], Chimie mulhouse. 1991. Etude de sécurité chimique, procédure d'acceptation et de suivi des déchets
- [13], INERIS. 1996. Avis d'expert relatif à la demande de création d'un stockage souterrain de déchets industriels
- [14], INSA. 1998. Réalisation d'un état initial du site de stockage de déchets industriels de StocaMine
- [15], INERIS. 2001. Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres
- [16], ERM. 2003. Evaluation des risques sanitaires : site de Wittelsheim
- [17], CLIS StocaMine. 2003. StocaMine : rapport final d'expertise, Experts nommés par la Commission Locale d'Information et de Surveillance (CLIS)
- [18], INERIS. 2003. Audit triennal de StocaMine, 1999-2002
- [19], StocaMine. 2009. Suivi des lots, StocaMine, février 1999 à septembre 2002.
- [20], StocaMine. 2001. Analyses environnementales courantes, extraits, StocaMine
- [21], StocaMine. 2009. Suivi minier, température et analyses des gaz
- [22], Préfecture du Haut-Rhin. 1997-2002. Arrêtés préfectoraux du 3.2.1997, 10.7.2001, 12.9.2002, 17.12.2002
- [23], StocaMine. 1999-2002. Rapport d'activité, StocaMine, décembre 1999 à décembre 2002
- [24], StocaMine. 2002. Manuel Qualité / Environnement, StocaMine 2 juillet 2002
- [25], MDPA. 2002. Plan des travaux du fond et aérage
- [26], MDPA. 2007. Affaissement et dégâts de surface dans le bassin potassique alsacien
- [27], MDPA. 2004. Caractérisation des cendres volantes
- [28], Mica Environnement. 2004. Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique du centre de stockage de StocaMine. 04-069.**

- [29], ISPS. 2004. Détermination des dangers
- [30], BMG. 2004. Stockage souterrain de Wittelsheim : évaluation des risques suite au confinement de déchets dans la mine. Risques dus aux substances chimiques
- [31], ISPS. 2004. Etude d'impact, rapport synthèse
- [32], ISPS. 2006. Etude de sécurité au travail et de protection de la santé dans le cadre de la mise en oeuvre de la réversibilité
- [33], ISPS. 2006. Rapport de synthèse Etude approfondie de la variante de la mise en oeuvre de la réversibilité
- [34], BMG. 2006. Stockage souterrain de Wittelsheim : évaluation technique de la variante de la mise en oeuvre de la réversibilité
- [35], ENSPM. 2006. Actualisation de l'étude de stabilité du stockage de déchets toxiques dans la mine d'Amélie
- [36], Solétanche. 2006. Etude technique détaillée du confinement complémentaire du bloc 15
- [37], CESAME. 2006. Synthèse sur l'envoyage de la mine de potasse Secteur Ouest
- [38], StocaMine. 2003. Plan d'urgence interne
- [39], CESAME. 2008. L'envoyage des mines de potasse. Dossier commun aux secteurs Est et Ouest.
- [40], Ercosplan. 2008. Etude de faisabilité. Remblayage des cavités souterraines de Stockage des Déchets de StocaMine
- [41], Geostock. 2008. MDPA - Projets puits – Puits piézométrique – Puits d'évent. Programme simplifié
- [42], MDPA. 2002. Mémoires techniques des Mines de Potasse d'Alsace – 1904-2008
- [43], MDPA. 2003. Les sondages depuis ce jour à l'intérieur des concessions MDPA
- [44], StocaMine. 2000. Modes opératoires du laboratoire de StocaMine
- [45], StocaMine. 2013. Document Santé Sécurité
- [46], StocaMine. 2009. Le devenir du stockage souterrain de StocaMine
- [47], Hadj-Hassen. 2009. Evaluation du volume des vides souterrains résiduels après envoyage du stockage
- [48], AVEC. 2009. Etude des conséquences sur l'aéragé d'un incendie dans la voie de roulage près du bloc 14 du secteur StocaMine et dans la galerie Vam AJF2D du secteur MDPA
- [49], FEUGA. 2010. Comparaison entre les conditions d'isolement des déchets dans le site de stockage de StocaMine et dans quelques sites allemands de stockage en mines de sel ou de potasse
- [50], INERIS. 2010. Stockage souterrain de STOCAMINE (68) - Synthèse critique des études hydrogéologiques sur l'envoyage du site. DRS-10-108130-03801A. STOCAMINE.
- [51], INERIS. 2010. Analyse critique des études géomécaniques du stockage de StocaMine
- [52], INERIS. 2010. Synthèse critique : thématiques « Impact sur la santé humaine des populations hors travailleurs du site de StocaMine » et « Impact sur la ressource en eau »
- [53], INERIS. 2010. Stockage souterrain de STOCAMINE (68) - Etude géomécanique du stockage. DRS10 – 108130-14273A. STOCAMINE.
- [54], INERIS. 2010. Fermeture du stockage de déchets ultimes de StocaMine - Etude de faisabilité technique pour les différentes options logistiques des déchets vers les centres de stockage

- [55], Ineris. 2011. Stockage souterrain de STOCAMINE (68) - Etude hydrogéologique de l'ennoyage du site. N° DRS-10-108130-12810B. STOCAMINE.
- [56], INERIS. 2011. Evaluation du terme source dans le scénario du stockage illimité : calculs des quantités de contaminants stockés, et des concentrations potentielles en solution et en phase gazeuse en cas d'ennoyage
- [57], INERIS. 2011. Interprétation Campagnes de prélèvements des eaux d'infiltration effectuées par l'INERIS au fond de la mine Amélie en juillet et septembre 2010
- [58], INERIS. 2010. [58] Présentations faites au COPIL les 19 novembre 2010 [58a], 9 décembre 2010 [58b], 20 janvier 2011 [58c], 28 février 2011 [58d], 1er avril 2011 [58e], 23 mai 2011 [58f]
- [59], COPIL. 2011. Rapport d'expertise
- [60], COPIL. 2011. Présentation à la CLIS - 7 Juillet 2011
- [61], ACV KI. 2002. Analyse du Cycle de Vie de la filière de Stockage des Déchets Industriels Spéciaux Ultimes
- [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.
- [63], ERCOSPLAN. 2011. Conceptual Design Backfill Operation and Dam Construction of StocaMine Toxic Waste Disposal Site - Draft
- [64], ERCOSPLAN. 2011. Opérations de Remblaiement et d'Isolation du Site de Stockage de Déchets Ultimes StocaMine – Etude de conception – Résultats préliminaires
- [65], QUANTIS. . Description de la méthodologie ACV (Analyse du Cycle de Vie) – Annexe explicative jointe aux rapports d'application de l'Analyse de Cycle de Vie
- [66], HUMBERT S., MARGNI M., JOLLIET O.. 2009. impact 2002+ analyse cycle de vie déchets version 2.1
- [67], INERIS. 2011. Estimation de la convergence du sondage W3 et des trous de dégazage au toit du stockage de StocaMine
- [68], INERIS. 2012. Comparaison des scénarios de devenir du stockage de StocaMine
- [69], INERIS. 2012. Impact potentiel du stockage sur la ressource en eau dans le cadre du scénario de stockage illimité
- [70], MDPA. 2010. Choix d'un site de forage de reconnaissance de la montée des eaux
- [71], INERIS. 2012. Impact potentiel du stockage sur la santé
- [72], INERIS. 2012. Moyens de maîtrise des risques dans l'option de stockage illimité à StocaMine
- [73], INERIS. 2012. Etude de sûreté du confinement à long terme de la matrice réceptrice compte-tenu de ses caractéristiques géotechniques
- [74], BMG. 2013. Evaluation logistique et technique d'une réversibilité partielle du stockage
- [75], INERIS. 2012. Modélisation complémentaire du terme-source en fonction des scénarios de déstockage étudiés
- [76], Itasca. 2013. Evaluation des flux potentiels de saumure contaminée à partir du stockage de Wittelsheim. 13R-001/A3.
- [77], ERCOSPLAN. 2013. Conceptual design for dam constructions and partial backfill for the isolation of StocaMine underground waste disposal site
- [78], ITASCA. 2013. Stockage de Wittelsheim, Etude de l'évolution de la perméabilité du sel
- [79], BMG. 2013. Evaluation logistique et technique de variantes de réversibilité du stockage, stockage souterrain de déchets ultimes de Wittelsheim

- [80], INERIS. 2013. Modélisation complémentaires du terme source en fonction des scénarios de déstockage étudiés (5), tracé des panaches consécutifs à ces 5 scénarios
- [81], INERIS. 2013. Comparaison des scénarios relatifs au devenir du stockage de StocaMine – Etude complémentaire
- [82], INERIS. 2013. Note de synthèse des travaux d'expertise de l'INERIS relatifs au devenir du stockage de déchets de StocaMine au sein de la mine Amélie
- [83], MDPA. 2014. Bilan de la concertation publique 15 novembre 2013-15 février 2014, projet de fermeture du stockage souterrain StocaMine
- [84], Préfecture du Haut-Rhin. 2014. Arrêté préfectoral n°2014 303-0004 du 30 octobre 2014
- [85], CGEDD. 2014. Bilan de la concertation et propositions – Conseil Général de l'Environnement Développement Durable (CGEDD)
- [86], ITASCA. 2014. Stockage de Wittelsheim, étude de comparaison entre les barrages en et les barrages en béton Sorel
- [83a], MDPA. 2014. Bilan de la concertation publique 15 novembre 2013-15 février 2014, projet de fermeture du stockage souterrain StocaMine, Annexes partie 1
- [83b], MDPA. 2014. Bilan de la concertation publique 15 novembre 2013-15 février 2014, projet de fermeture du stockage souterrain StocaMine, Annexes partie 2
- [86]**, Itasca. 2015. Stockage de Wittelsheim. Etude de comparaison entre les barrages en bentonite et les barrages en béton Sorel. 14R-028A2.

Bibliographie citée (hors nomenclature MDPA)

- 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.
- 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.
- 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.
- Ineris. 2011. Evaluation des aléas liés aux puits des Mines de Potasse d'Alsace (MDPA) et recommandations pour la mitigation des risques résiduels. DRS-10-114702-14204A.
- Liberda R. 2011. Choix d'un site de forage de reconnaissance de la montée des eaux. 074-12. MDPA.
- Lourdé. 2005. Problématique de l'ennoyage des mines de potasse.
- 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 VAPB2. 191-15
151217_VAPB2.

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

Popp, T., Wiedemann, M., Kansy, A. & Pusch, G. 2007. Gas transport in dry rock salt –
implications from laboratory investigations and field studies. In. Wallner, M., Lux, K., Minkley, W.,
and Hardy Jr., H. R. (eds.), "The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC
Processes. Proceedings of the 6th Conference (SaltMech6)", held at Hannover, Germany; 22-25
May 2007.

Soldata - Geophysic. 2014. Rapport d'étude géophysique – Wittelsheim bouchon pilote. 00027923.

Wieczorek, K. & Schwarzieneck, P. 2004. Untersuchung zur Auflockerungszone im Salinar
(ALOHA2), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS Bericht GRS 198.

ANNEXE 2

Lettre du préfet du 17 février 2015



PRÉFET DU HAUT-RHIN

Direction régionale de l'environnement,
de l'aménagement et du logement Alsace
Service Risques Technologiques

Monsieur le Liquidateur
de la Société des Mines de Potasse d'Alsace
A l'attention de Monsieur Alain Rollet

Avenue Joseph Else
68310 WITTELSHEIM

Nos réf. : 2296_2015_01_29_MDP_A_STOCAMINE
Affaire suivie par : Gilbert WOLF
gilbert.wolf@developpement-durable.gouv.fr
Tél. : 03 88 13 06 26 – Fax : 03 88 13 05 60

Le **17** FEV. 2015

Monsieur le Liquidateur,

La société STOCAMINE a été autorisée par arrêté préfectoral en date du 03 février 1997, à aménager et exploiter, à Wittelsheim, un stockage souterrain de déchets industriels dangereux d'une capacité totale de 320 000 tonnes et pour une durée de 30 ans.

A l'échéance de ce délai, l'exploitant devait soit déposer un dossier de demande de prolongation de l'autorisation, soit indiquer les conditions de retrait des déchets.

Vous m'avez adressé, le 09 janvier 2015, ce dossier de demande de prolongation pour une durée illimitée de l'arrêté préfectoral d'autorisation du 3 février 1997, autorisant le stockage souterrain en couches géologiques profondes de produits dangereux non radioactifs sur le ban de la commune de Wittelsheim.

En application des dispositions de l'article R. 515-13 du code de l'environnement, je vous demande de faire procéder, par un organisme tiers expert, à vos frais, à une analyse critique des éléments suivants du dossier de demande précité :

- L'étude de sûreté du confinement des déchets à long terme dans la matrice réceptrice, compte tenu de ses caractéristiques géotechniques. En particulier, la tierce-expertise s'attachera à expertiser la performance des barrages à réaliser et leurs emplacements, en fonction du scénario retenu ainsi que les mesures complémentaires à mettre en œuvre. En outre, le concept de remblayage des puits Else et Joseph sera aussi étudié.
- L'étude du volume et de l'évolution du volume des vides miniers concernés par le stockage et par récurrence la vitesse d'envoyage attendue.
- L'étude du terme source pour appréhender les polluants qui pourraient être expulsés vers la nappe phréatique après envoyage et l'impact du projet sur la qualité des eaux souterraines.



7, RUE BRUAT - B.P. 10489 - 68020 COLMAR CEDEX - TÉL. 03.89.29.20.00 - www.haut-rhin.gouv.fr

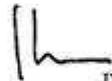
- Cette étude comportera, en outre, une analyse critique de la composition des colis entreposés pour ce qui concerne les polluants présentant les principaux risques à long terme (analyses documentaire, des non conformités constatées en phase d'exploitation, ou dans la phase actuelle d'enlèvement).
- L'exposé des solutions alternatives au maintien de stockage avec leurs conséquences respectives notamment en ce qui concerne leur impact sur l'environnement.
- L'exposé des dispositions relatives au suivi, notamment, le suivi après travaux et celui de la qualité des eaux souterraines.

Le choix du tiers expert devra être soumis à l'accord de l'inspection des installations classées.

Les conclusions du tiers expert accompagnées des commentaires visés ci-dessus, sont transmises dans un délai de 5 mois à compter de la réception du présent courrier.

Veuillez agréer, Monsieur le Liquidateur, l'assurance de ma considération distinguée.

Le Préfet



Pascal LELARGE

Copies :

- M le préfet de la région Alsace, Préfet du Bas-Rhin
- DREAL Alsace – 2 route d'Oberhausbergen – 67000 Strasbourg
- Monsieur le chef de l'UT 68 – Place du Général de Gaulle – 68100 Mulhouse
- Madame la Sous-Préfète de Thann / Guebwiller – 3 avenue Poincaré – 68800 THANN

ANNEXE 3

Exemple de conception de remblayage de puits dans des mines allemandes

Exemples de concept de remblayage de puits de mines en Allemagne (K-Utec)

Puisque la barrière géologique ne présente aucune venue d'eau, le taux d'inondation des cavités résiduelles dépend considérablement des hypothèses concernant la circulation d'eau dans les puits de mines. La plupart des puits des MDPA sont remblayés et étanchéifiés en partie. L'objet principal des mesures de remblayage et d'étanchéité était la stabilisation des puits et la limitation des venues d'eau provenant des couches de couverture aquifères. Les concepts appliqués reposent sur le remblayage complet à l'aide de graviers et de pierres concassées et sur des sections d'étanchéité spéciales à l'aide de cendres de filtration ainsi que de bouchons en partie en béton. Puisque le soutènement des puits en maçonnerie ou cuvelage n'a pas été retiré, l'étanchéité totale du puits n'est pas possible.

Pour les mesures de fermeture et d'étanchéité dans les puits de sel et de potasse, les autorités allemandes exigent une approche spéciale. Le puits doit être remblayé complètement du fond jusqu'à l'orifice du puits à la surface. Pour isoler les cavités minières de la biosphère et éviter les inondations non contrôlées de la concession minière, une section d'étanchéité spéciale doit être installée à un endroit approprié dans le puits. Généralement, la partie supérieure des strates salinifères a été sélectionnée comme horizon d'étanchéité. Pour la mise en place de la section d'étanchéité, le soutènement du puits (généralement en maçonnerie) sera retiré. Ainsi, la section d'étanchéité sera en contact direct avec la roche voisine et une étanchéité efficace pourra être garantie.

La section d'étanchéité consiste en des matériaux stables à long terme, par exemple l'argile, la bentonite ou l'asphalte, pour garantir une étanchéité à long terme. En raison de la très faible perméabilité des matériaux d'étanchéité, des débits volumiques inférieurs à environ 1 m³/an pourraient être atteints sans problèmes.

Diverses propositions pour obtenir l'étanchéité des puits en Allemagne sont présentées ci-après.

Concept de remblaiement du puits Immenrode.

Le schéma A représente une section du puits avec la position des joints d'étanchéité.

Le schéma C représente la construction d'un joint d'étanchéité combinant argile et asphalté pour rendre le puits étanche à l'eau douce provenant de la nappe phréatique et aux solutions salines provenant de la mine :

- 1 – Colonne de remplissage cohésive en gravier dans la partie inférieure du puits
- 2 – Butée en béton pour supporter le joint d'étanchéité en argile
- 3 – Couches inférieures de transition en sable, argile et asphalté.
- 4 – Joint d'étanchéité principal en argile
- 5 – Butée supérieure en gravier
- 6 – Colonne de remplissage cohésive en gravier solidifié dans la partie supérieure du puits.

Sur la photo C, le puits pendant le transport du matériel.

Sur la photo D, les travaux d'excavation dans la zone du joint d'étanchéité principal.

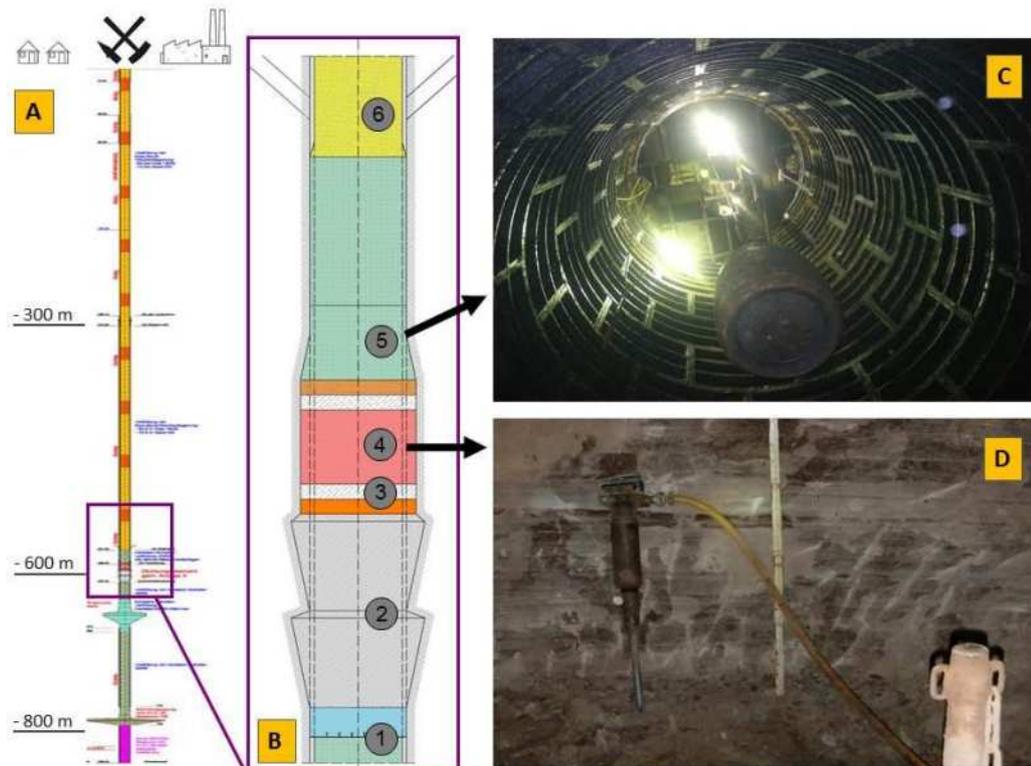


Fig. 1. Conception du remblaiement du puits Immenrode

Concept de remblaiement du puits Ludwigshall.

Le schéma A représente une section du puits avec la position des joints d'étanchéité.

Le schéma B montre la construction du barrage complet avec les composants suivants :

- 1 – Colonne de remplissage cohésive par du gravier dans la partie inférieure du puits
- 2 – Couches inférieures de transition en sable, gravier et asphalte
- 3 – Joint d'étanchéité principal en argile
- 5 – Butée supérieure en gravier solidifié
- 6 – Colonne de remplissage cohésive par du gravier dans la partie supérieure du puits.

Sur la photo C, les tests sur matériaux pendant la construction du joint d'étanchéité principal en argile.

Sur la photo D, le joint en asphalte du dessous terminé.

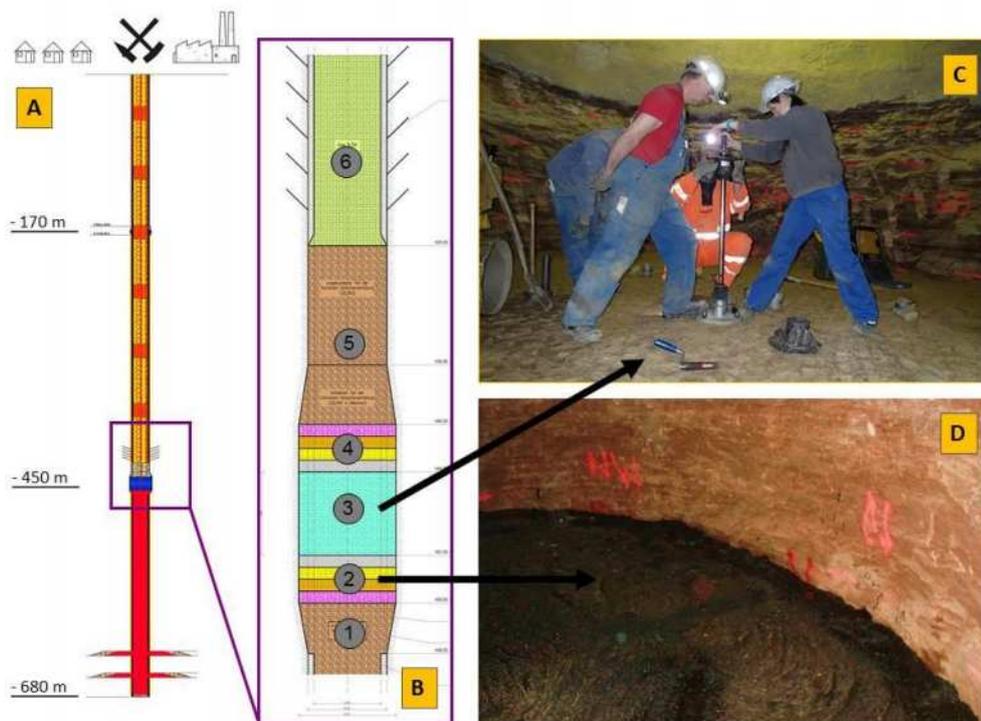


Fig. 2. Conception du remblaiement du puits Ludwigshall

Concept de remblaiement des Puits Friedrichshall 1 et 2 (Région de Stassfurt, Allemagne centrale)

Le schéma A représente une vue de coupe du puits rempli avec différents matériaux :

- 1 – Gravier avec et sans béton de Sorel
- 2 – Gravier avec une solution de $MgCl_2$
- 3 – Gravier avec un matériau sous forme de gel à base de $MgCl_2$ conçu par K-UTEC
- 4 – Gravier avec béton de Sorel
- 5 – Matériau sous forme de gel 1 à base de $MgCl_2$ conçu par K-UTEC
- 6 – Matériau sous forme de gel 2 à base de $MgCl_2$ conçu par K-UTEC
- 7 – Gravier

Sur la photo B, la centrale de malaxage intégrée à proximité du puits au jour.

Sur la photo C, du gravier renforcé avec du béton de Sorel.

Sur la photo D, du gravier avec une matrice sous forme de gel à base de $MgCl_2$ conçue par K-UTEC.

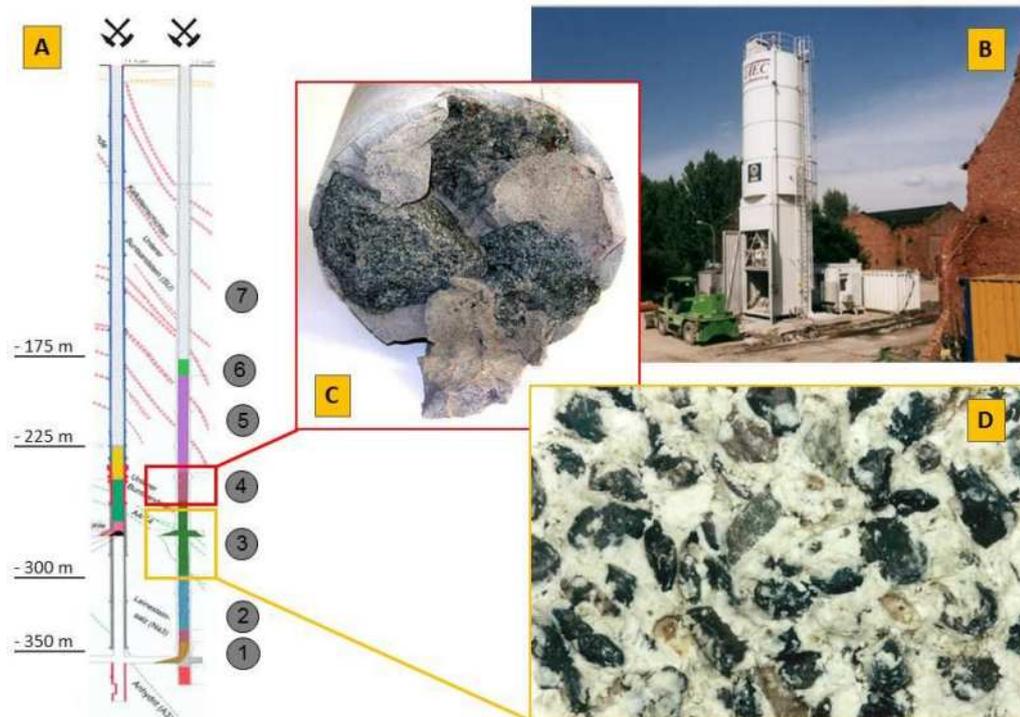


Fig. 3. Conception du remblaiement des Puits Friedrichshall