

**Dossier de demande d'autorisation
pour la prolongation, pour une durée
illimitée, de l'autorisation de stockage
souterrain en couches géologiques
profondes de produits dangereux non
radioactifs**

(StocaMine, Wittelsheim)

**Mémoire complémentaire répondant aux
demandes du Préfet et à l'avis de l'Autorité
Environnementale**

Juin 2016

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction | 6 |
| 2. Contexte géologique et minier | 12 |
| 2.1 Le contexte géologique et les caractéristiques des roches..... | 12 |
| 2.2 Les terrains en périphérie du stockage..... | 14 |
| 2.2.1 Stabilité..... | 14 |
| 2.2.2 Etanchéité..... | 15 |
| 2.2.3 Les liens entre le stockage et la mine de potasse par les galeries d'accès | 18 |
| 2.2.4 Le remplissage progressif de l'ancienne mine par de la saumure | 19 |
| 2.3 Bilan..... | 21 |
| 3. Confinement prévu | 22 |
| 3.1 Rôle du confinement..... | 22 |
| 3.2 Conception technique et quantification de l'effet du confinement | 24 |
| 3.2.1 L'interface barrières / terrain..... | 24 |
| 3.2.2 Effet des barrières et du remblayage | 25 |
| 3.3 Fermeture des puits de mine Joseph et Else | 28 |
| 4. Les concentrations potentielles dans la nappe | 29 |
| 4.1 Les déchets stockés et le « terme source » qui en résulte | 29 |
| 4.1.1 Les déchets | 29 |
| 4.1.2 Pourquoi les études se sont concentrées sur l'élément mercure | 29 |
| 4.1.3 Les quantités de contaminants avant déstockage..... | 30 |
| 4.1.4 Les quantités après déstockage | 32 |
| 4.1.5 Le "terme source" | 33 |
| 4.2 Concentrations dans la nappe | 34 |
| 5. Synthèse et variabilité des résultats..... | 39 |
| 6. Mesures de surveillance et possibilités d'intervention..... | 43 |
| 6.1 Suivi de l'ennoyage | 43 |
| 6.2 Suivi des niveaux en surface | 46 |
| 6.3 Contrôles de mise en œuvre du confinement | 46 |
| 6.4 Réglementation, surveillance et moyens d'intervention | 47 |
| 7. Conclusion | 48 |

Bibliographie

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Localisation du stockage..... | 6 |
| Figure 2 : Contexte géologique simplifié..... | 13 |
| Figure 3 : "chambres" et "piliers" dans le stockage..... | 14 |
| Figure 4 : EDZ et remblayage..... | 15 |
| Figure 5 : Etanchéité des terrains (champ lointain et champ proche)..... | 16 |
| Figure 6 : Les galeries d'accès au stockage..... | 18 |
| Figure 7 : Plan du secteur ouest de potasse et position du stockage..... | 19 |
| Figure 8 : Schéma de principe, la saumure percole à travers les barrières du stockage..... | 23 |
| Figure 9 : Remblayage du stockage..... | 26 |
| Figure 10 : Temps d'ennoyage du stockage, avec confinement (ITASCA [A8])..... | 27 |
| Figure 11 : Localisation du forage VAPB2..... | 44 |
| Figure 12 : Forage VAPB2 et secteur noyé..... | 45 |
| Figure 13 : Planning de la fermeture du site..... | 46 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Tonnages stockés..... | 31 |
| Tableau 2 : Terme source 2016 (et comparaison avec les données antérieures)..... | 33 |
| Tableau 3 : "worst-case", l'élément Hg dans la couche profonde de la nappe alluviale..... | 42 |

ANNEXES

| | |
|--|--|
| Annexe 1 : Nomenclature ICPE | |
| Annexe 2 : Exemples de barrières de confinement | |
| Annexe 3 : Extrait de [A2], analyses récentes sur les échantillons de déchets | |
| Annexe 4 : Précisions sur le déstockage et les difficultés rencontrées | |
| Annexe 5 : Masses qui resteront dans le stockage au moment de sa fermeture, en fonction du déstockage qui aura pu être réalisé | |
| Annexe 6 : Concentrations dans la nappe alluviale, 1000 ans, INERIS | |
| Annexe 7 : Concentrations à 1000 ans, couche 3 de la nappe | |

Les mots marqués d'un * dans le texte sont expliqués dans le lexique ci-après.
Dans le document, les chiffres entre crochets font référence à la liste de la bibliographie.

Anhydrites : Formations géologiques issues de l'évaporation d'eau salée contenant différents types de sel.

Argile : L'argile est un matériau fin, constitué de feuillets, qui ne laisse pas passer l'eau. Elle peut éventuellement intégrer de l'eau dans sa structure et devient alors pâteuse et souple. Elle est parfois appelée terre glaise et on l'utilise pour étanchéifier des digues, barrages, ...

Bentonite : Il s'agit d'une argile colloïdale appartenant à la famille des smectites et présentant des propriétés gonflantes en milieu humide. Le débouché le plus important de la bentonite se situe dans les techniques du génie civil, particulièrement dans l'étanchéité des édifices, la construction de digues, la pose de canalisations, l'édification de tunnels, l'injection de vides souterrains que l'on souhaite combler, la réalisation de fondations. La bentonite est conditionnée pour cet usage en bâtons (ou granulés) et fournit une obturation hydrologique sûre. Dans les barrages souterrains elle est utilisée en mélange avec du sable, sous forme de briques.

Big-bag : Gros sac très résistant servant au transport de matériaux lourds (déchets, gravas, ...). Pour les déchets, il est constitué d'une double enveloppe.

Cendres : Les cendres volantes sont les particules non combustibles entraînées par les fumées lors de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermiques. Ces résidus de combustion sont récupérés dans des filtres et peuvent notamment être utilisés pour la fabrication de bétons spéciaux. En effet l'utilisation des cendres volantes dans le béton permet notamment de réduire la chaleur d'hydratation, d'améliorer la maniabilité du béton, d'améliorer l'acquisition des performances mécaniques à long terme, d'améliorer la durabilité

Cuvelage : C'est le revêtement, en bois, en fonte, en maçonnerie ou en béton, des parois intérieures des puits et des galeries (soutènement) de mines pour éviter les éboulements. Le cuvelage a aussi pour fonction de faciliter l'aération en diminuant les pertes de charges* (les parois lisses exerçant moins de résistance à l'air), de limiter les venues d'eau dans le puits s'il s'agit d'un cuvelage étanche résistant à la pression hydrostatique (pression exercée par l'eau).

Diapirisme : phénomène géologique de remontée d'un matériau plastique au travers de formations plus denses. C'est ainsi que de grosses masses de sel peuvent remonter à travers les terrains de recouvrement.

Foudroyage : Le foudroyage consiste à laisser s'effondrer le toit de la couche exploitée, derrière la zone d'abattage du minerai (front de taille).

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

Il a pour mission de contribuer à la prévention des risques que les activités économiques font peser sur la santé, la sécurité des personnes et des biens, et sur l'environnement. L'INERIS, établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle du ministère chargé de l'Ecologie, a été créé en 1990.

ITASCA : Il s'agit d'un bureau d'études international spécialiste en modélisation numérique. ITASCA participe activement à la compréhension des problématiques actuelles dans les domaines suivants : génie civil et risques naturels, hydrogéologie, stockage de déchets, matériaux et génie des procédés. ITASCA possède la compétence scientifique, l'expérience et les outils numériques nécessaires à la mise en œuvre de modèles mathématiques permettant la résolution de problèmes d'hydrogéologie des milieux poreux et fracturés. ITASCA développe (et finance) en collaboration avec l'INRIA, son propre outil d'analyse 3FLO, logiciel tri-dimensionnel de calculs d'écoulement et de transport de masse.

Norme de qualité « Eau Potable » : La directive 98/83/CE fixe au niveau européen des exigences à respecter au sujet de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Cette directive a été transposée en droit français dans le code de la santé publique (articles R1321-1 à R1321-66). L'arrêté du 11 janvier 2007 fixe des normes de qualité à respecter pour un certain nombre de substances dans l'eau potable. La norme est représentée par une concentration ou un chiffre, qui fixe une limite supérieure à ne pas dépasser ou une limite inférieure à respecter. Ces seuils s'appuient sur des études scientifiques établissant les doses maximales admissibles (DMA). Une DMA est la quantité d'une substance qu'une personne peut absorber tous apports confondus (alimentaires, hydriques...) sans danger, chaque jour, sa vie durant.

Noyau : De manière générale, un noyau est la partie centrale située au milieu d'un autre objet. Dans le cas d'un barrage, il s'agit de la partie centrale la plus étanche.

Porosité* : La porosité* est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique qui conditionne les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat. La porosité* (n) est aussi une valeur numérique définie comme le rapport entre le volume des vides (Vv) et le volume total (V) d'un milieu poreux ($n = Vv / V$).

Perméabilité / Imperméabilité : La **perméabilité** d'un matériau correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide de référence sous l'effet d'une mise en pression. L'**impermeabilité**, notion inverse de la perméabilité, s'emploie plus couramment dès lors qu'il s'agit d'objets usuels. Le terme s'applique notamment aux matières en contact épisodique mais régulier avec l'eau, par exemple pour désigner la capacité des tissus ou des façades de bâtiments à empêcher la pénétration de l'eau de pluie. L'argile, par exemple, est une roche imperméable. On utilise aussi ce terme pour parler de la capacité à empêcher le passage de l'air ou de poussières.

Dans les rapports des experts et dans le présent document, la perméabilité citée est une perméabilité « intrinsèque », indépendante de la nature du fluide qui traverse le matériau, mais fonction de la dimension des grains, de leur forme et de leur arrangement. Cette valeur a les dimensions d'une surface c'est pourquoi elle est exprimée en m^2 .

ITASCA [76] précise qu'une perméabilité intrinsèque de $1.10^{-19} m^2$ correspond à une perméabilité « de Darcy » de $6.10^{-12} m/s$ pour une saumure saturée.

Perte de charge : En mécanique des fluides (liquide – gaz), la perte de charge correspond à la dissipation, par frottements, de l'énergie mécanique d'un fluide en mouvement sous forme de chaleur. Les lois physiques permettant d'évaluer ces phénomènes distinguent :

- les pertes de charges* linéaires,
- les pertes de charges* singulières liées à la présence d'un artéfact (changements de direction, modification des sections d'écoulement, ...).

Pour permettre au fluide de se déplacer, cette énergie doit être compensée. C'est pourquoi on l'exprime souvent sous forme d'une pression ou d'une hauteur de colonne de fluide

Pilote : dispositif-test reproduisant le fonctionnement d'un dispositif de plus grande ampleur. Il présente l'intérêt de pouvoir évaluer la faisabilité et vérifier les attentes dans le cadre d'un projet nécessitant d'importants travaux.

Sel et roches salifères : Le sel sous forme de roche est un matériau imperméable. L'eau peut attaquer le sel mais une fois saturée, un équilibre se crée et l'eau ne circule pas. Même l'air ne peut pas traverser un massif de sel.

La plaine d'Alsace correspond à un très ancien fossé d'effondrement. Il y a plusieurs millions d'années les terrains s'affaissaient ce qui a permis à la mer de pénétrer dans ce secteur. L'évaporation de l'eau de mer a laissé du sel qui s'est accumulé sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

L'évaporation de l'eau donne plusieurs types de roche : le gypse (sulfate de calcium), le sel gemme (chlorure de sodium, autre nom halite), les sels de magnésium et chlorures de potassium (potasse autre nom sylvinite), Suivant les éléments chimiques contenus, la roche prend des teintes variées (violet, orange, ...).

In situ : In situ est une locution latine qui signifie sur place ; elle est utilisée en général pour désigner une opération ou un phénomène observé sur place, à l'endroit où il se déroule (sans le prélever ni le déplacer), par opposition à ex situ.

Unités et tableau de correspondance :

1 m³/an (rappelons qu'1 m³ c'est le volume d'un cube de dimension 1 m x 1 m x 1 m)

1 m³/an = 1000 litres /an = 2,7 litres/j = 3,1.10⁻⁵ l/s

Exemple d'unités :

- mg/l : milligramme par litre (1 millième de gramme par litre)
- µg/l : microgramme par litre (1 millionième de gramme par litre)
- ng/l : nanogramme par litre (1 milliardième de gramme par litre)

Remarque : certaines concentrations sont parfois exprimées sous forme d'un rapport

ppm : partie par million (10⁻⁶)

ppb : partie par billion (10⁻⁹)

ppt : partie par trillion (10⁻¹²)

10⁻² = 0,01

10⁻³ = 0,001

Compte tenu de la masse volumique de l'eau au sens large ; les unités mg/l et µg/l correspondent respectivement au ppm et ppb.

Sources : divers sites internet.

1. Introduction

Le stockage de déchets de StocaMine est un site souterrain constitué de galeries situées à 550 mètres de profondeur. Il permettait d'accueillir des déchets ultimes (qui n'étaient plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment). A ce titre c'est une installation classée pour la protection de l'environnement (nomenclature actuelle ICPE 3660, cf. annexe 1).

Le stockage se situe dans la plaine d'Alsace à Wittelsheim. Les galeries de stockage ont été creusées au cœur d'un important massif géologique de sel.

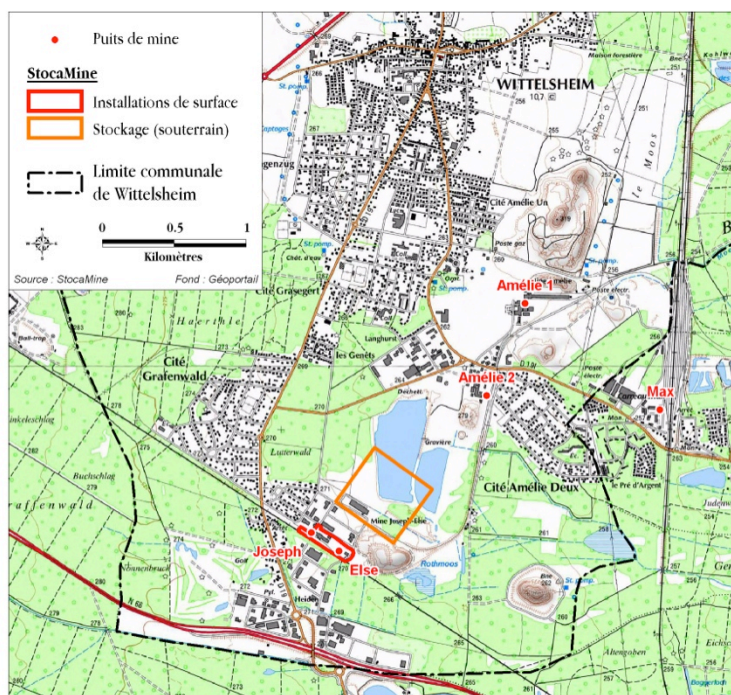


Figure 1 : Localisation du stockage.

L'accès au stockage s'effectue par deux puits de mine (nommés Joseph et Else), qui faisaient partie des infrastructures des Mines de Potasse d'Alsace (MDPA). En effet, dans cet épais massif salifère deux couches riches en sylvinite (ou potasse) ont été exploitées entre 1904 et 2003.

En 2002, un incendie a conduit à l'arrêt de l'activité de stockage. Depuis 2003, de nombreuses études ont été menées quant à la solution de fermeture du site.

En 2009, les Mines de Potasse d'Alsace, maison-mère de StocaMine ont été mises en liquidation amiable. La solution de fermeture du stockage a été confiée pour étude et constitution du dossier à l'INERIS.

Un comité de pilotage mandaté par le Préfet et composé d'experts nommés par les membres de Commission Locale d'Information et de Surveillance (CLIS) de StocaMine a travaillé sur les études et a présenté ses conclusions à la CLIS. A l'issue de ces travaux, et dans la continuité de l'information du public engagée depuis plusieurs années, une concertation du public sous l'égide d'un garant nommé par la Commission Nationale du Débat Public a permis l'expression des parties prenantes dans ce dossier.

Sur la base de ces expertises, des conclusions de l'INERIS leur expert et de la concertation, les MDPAs, qui ont absorbé leur filiale StocaMine il y a plus de deux ans, ont déposé en janvier 2015, un dossier de demande de transformation du site de stockage en site de stockage à durée illimitée.

Le dossier déposé présente la fermeture du site par confinement du stockage, après déstockage des déchets les plus riches en mercure.

Face à la complexité du dossier, l'Etat a demandé l'avis de l'Autorité Environnementale (sur l'étude d'impact fournie dans le dossier) et une tierce-expertise¹ pour mieux apprécier certains aspects techniques fondamentaux du dossier.

Dans le cadre de la procédure d'instruction du dossier et avant l'ouverture de l'enquête publique, le Préfet a sollicité des MDPAs la précision de certains éléments du dossier suite à l'avis de la Tierce-Expertise et de l'Autorité Environnementale. Le présent mémoire regroupe les éléments de précisions demandés, tout en rappelant les principales données nécessaires à la compréhension du dossier. Ce document complète mais ne se substitue pas aux pièces du dossier déposé en 2015.

Le premier chapitre est consacré à l'environnement souterrain du stockage : le contexte géologique (le massif de sel gemme constitue un « bloc hôte » favorable à un stockage souterrain) et minier (le stockage est relié par des galeries aux anciens ouvrages souterrains des Mines de Potasse d'Alsace). Le stockage est dans un environnement stable et étanche mais il est relié par galeries à la mine Amélie qui se remplit progressivement de saumure.

Le deuxième chapitre est un zoom sur le stockage et le confinement planifié. Situés à 550 mètres de profondeur, les déchets seront isolés de la biosphère par ce confinement. L'évolution à très long terme est prise en compte : la cicatrisation du sel par fluage est le facteur favorable à un confinement efficace des déchets. Les barrières réalisées dans toutes les galeries d'accès et le remblayage du périmètre confiné auront pour rôle de ralentir les éventuels mouvements de la saumure qui aura pu être au contact des déchets. Au fil du temps cette mobilisation sera de moins en moins possible car les phénomènes physiques qui la régissent s'atténueront.

Le troisième chapitre est consacré aux déchets stockés : les contaminants qu'ils représentent, leur dissolution possible au sein du stockage, les concentrations dans la nappe alluviale si les polluants pouvaient remonter vers la surface, sous l'effet moteur du fluage du sel. Les concentrations dans la nappe sont présentées (par comparaison à l'étude d'impact 2015) en intégrant les résultats des analyses récentes sur les déchets réalisées dans le cadre de la tierce expertise (celles-ci ont permis d'ajuster en particulier les teneurs en mercure).

In fine, les précisions demandées par le Préfet et l'Autorité Environnementale sont abordées dans les différents chapitres (cf. tableau récapitulatif ci-après).

En fin de document, la bibliographie postérieure au dépôt du dossier de 2015 est fournie (rapports de la Tierce-expertise et études techniques complémentaires INERIS* et ITASCA* pour répondre au Préfet et à l'avis de l'Autorité Environnementale), les chiffres entre crochets [] y font référence.

¹ La tierce expertise a été réalisée par un groupement franco-allemand d'experts en chimie, hydrogéologie et géomécanique (avec une connaissance précise du comportement du sel). En effet, plusieurs mines de sel ont été exploitées en Allemagne et des stockages souterrains y accueillent actuellement des déchets dangereux.

² Les dégradations de surface seront quant à elles enlevées par havage.

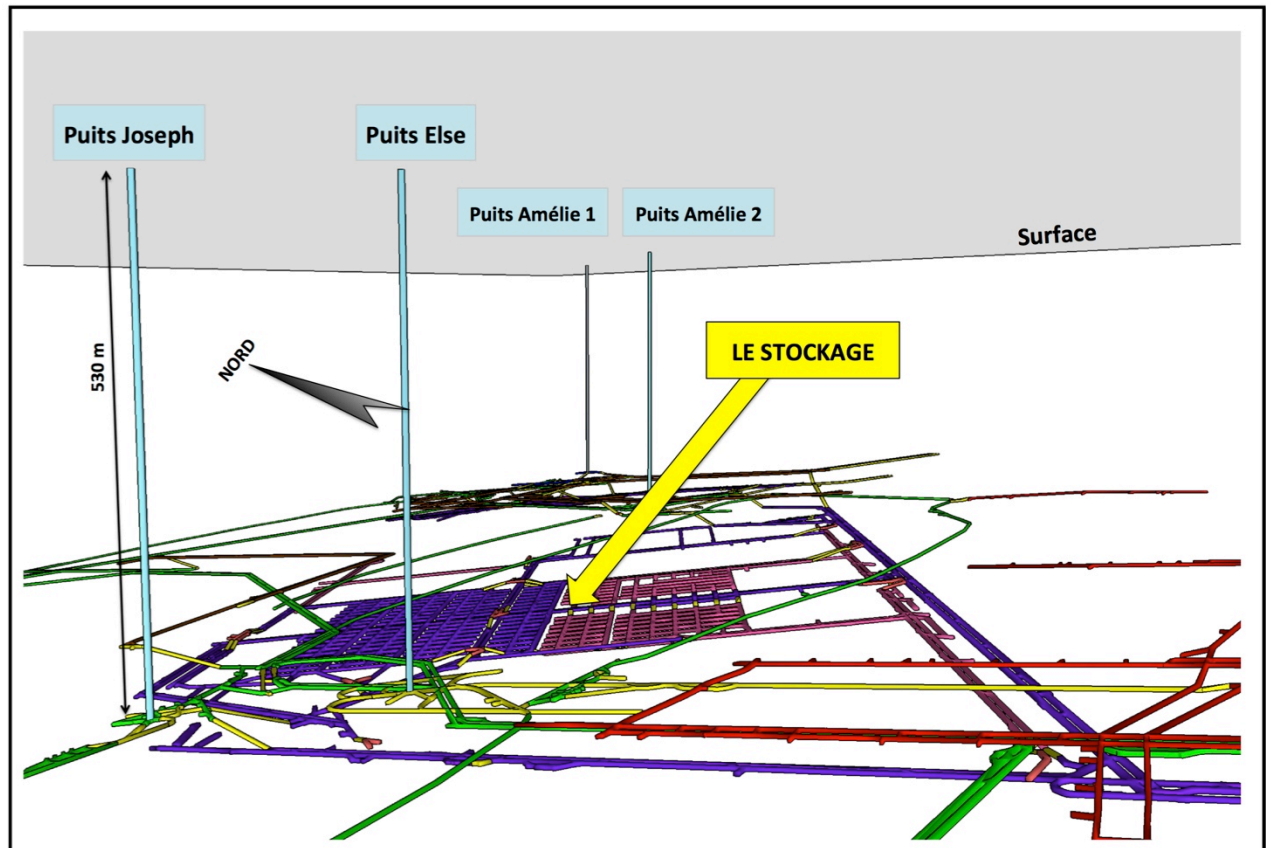
³ Sel issu du havage de galeries.

Tableau récapitulatif des précisions demandées par l'AE et le Préfet

| Précisions demandées par le Préfet suite à la Tierce Expertise (courrier du 18/05/2016) | Précisions demandées par l'Autorité Environnementale | Prise en compte dans les documents complémentaires apportés au dossier |
|---|---|---|
| | Page 12 : Présenter de façon plus claire et compréhensible l'ensemble des couches géologiques situées au-dessus du stockage. | Chapitre 2.1 du présent document. |
| | Page 4-point 4 et page 21 : Pour l'étude hydrogéologique, mieux expliciter les calculs qui conduisent aux résultats produits. | Document INERIS [A7]. Chapitre 2.2 du présent document. |
| | Page 4-point 4 et page 21 : consolider les informations concernant l'efficacité de la barrière de confinement. | Le rapport de géomécanique de la tierce-expertise [A5] est venu consolider les informations concernant l'efficacité de la barrière de confinement. Les principaux éléments sont repris dans le chapitre 3.3 du présent document. |
| | Page 4-point 1 et page 15 : Clarifier le caractère ultime des déchets présents dans le centre de stockage et notamment justifier l'absence d'alternative à leur stockage définitif. | Chapitre 4.1 du présent document (cf. études antérieures BMG [74] et [79]). |
| Point 1 : Actualisation des quantités de mercure | Page 17 : Analyses complémentaires, analyses quantitatives de l'ensemble des éléments traces métalliques, analyses des teneurs en mercure. | Analyses réalisées durant la tierce-expertise. Résultats présentés dans les rapports de la tierce-expertise [A6] [A3] [A2]. Document INERIS [A7]. Chapitre 4.1.3 du présent document. |
| Point 2 : Conséquences de la réduction des ions mercuriels résiduels sur les équilibres et complexes formés avec les cyanure (...) déterminations des ions majeurs (...). Point 3 : Etude sur les conséquences de la présence de phytosanitaires organiques (...) sur la qualité des eaux souterraines de la nappe d'Alsace. | Page 4-point 3 : Compléter et préciser le terme source notamment par des analyses des teneurs en mercure par type de déchet, et redéfinir les objectifs de déstockages partiels en fonction de ces résultats, tenant compte de leurs conséquences pour l'analyse des impacts. | Rapports de la tierce-expertise [A6] [A3] [A2]. Document INERIS [A7]. Chapitres 4.1 et 4.2 du présent document. |
| Point 4 : Estimation de la vitesse de l'envoyage basée sur les données et observations disponibles. Point 5 : L'impact du remblayage dans les calculs relatifs à l'évaluation de l'impact. | Page 21 : Discuter des incertitudes importantes sur l'envoyage et le calcul de l'impact. | La tierce-expertise a fourni un rapport sur l'hydraulique basé sur son interprétation des données les plus récentes (forage VAPB2 et suivi des affaissements en surface) aboutissant à un temps d'envoyage, potentiellement plus court que selon les hypothèses INERIS [A3]. Les études ITASCA [A8] [76] [78] [86] présentent de nombreuses hypothèses de remblayage et les temps de remplissage du stockage associé. Chapitres 5 et 6 du présent document. |

| | | |
|--|---|--|
| | Page 4-point 5 et page 19 : Affiner la modélisation du transfert des substances toxiques vers la nappe en tenant compte des compléments apportés au terme source. Mieux justifier le choix des substances à prendre en compte, sans considérer a priori que les conclusions sont transposables aux autres substances sans discussion. | Document INERIS [A7]. Chapitre 4 du présent document. |
| | Evaluer l'impact consécutif à une rupture de barrière d'étanchéité et sa probabilité. | Document INERIS [A7]. Chapitre 4.2 du présent document. |
| | Page 11 : Aborder précisément toutes les hypothèses du scénario retenu, y compris celles du scénario de repli. | NB/ : le « scénario de repli » est l'absence de déstockage Etudes antérieures INERIS [75] [80] Chapitre 5 du présent document. |
| | Page 18 : Justifier l'absence de prise en compte des composés organiques. | Rapport de la tierce-expertise [A2] [A3] [A6]. Chapitre 4.1 du présent document |
| | Page 19 : Analyse de sensibilité et des incertitudes (terme source et paramètres du modèle). | Etudes antérieures INERIS [56] [75] [80]. Document INERIS [A7]. Chapitre 5 du présent document. |
| | Page 19 : Analyser la concentration d'antimoine dans l'environnement local témoin, justifier le choix des substances pour les panaches sans considérer a priori que les conclusions sur le mercure sont transposables sans discussion aux autres substances. Analyse de sensibilité et des incertitudes (terme source et paramètres du modèle). | Document INERIS [A7] (paramètre Antimoine pris en compte dans les calculs). Rapport de la tierce-expertise [A2] [A3] [A6]. Chapitres 4 et 5 du présent document. |
| Point 4 : Estimation de la vitesse de l'ennoyage basée sur les données et observations disponibles. Point 6 : Les surveillances en place ou envisagées pour permettre de suivre au mieux l'évolution des phénomènes en jeu (ennoyage et vides miniers). | Page 22 : Préciser le dispositif de suivi de façon adaptée au projet, en commençant par préciser le calendrier de la concertation jusqu'à la fermeture du stockage, et en précisant les dispositions à prendre lors des principales étapes clés (...) à l'occasion desquelles tant le contenu du projet, les mesures prises que les procédures nécessaires à son autorisation pourraient devoir être adaptés voire redéfinis. | Chapitre 6 du présent document. |
| Courrier du 10 juin 2015 demandant une expertise de la situation de la recoupe 8 du bloc 21. | De nombreuses précisions sont demandées par l'Autorité Environnementale concernant le déstockage | Rapports [A10] et [A11]. Le dossier ne concerne pas le déstockage mais des précisions sont fournies dans l'annexe 4 du présent document. |

Le stockage :
une emprise d'environ 700 m x 500 m à 550 m de profondeur



Les couches de potasse et de sel sont légèrement inclinées vers le nord-ouest. Au-dessus du stockage la couche inférieure de potasse passe ainsi de la cote -210 NGF à -280 NGF (elle se situe ainsi à un peu plus de 520 mètres de profondeur et le stockage à près de 550 mètres de profondeur).

Les galeries sont distinguées par des couleurs différentes en fonction de leur position par rapport aux couches de potasses.

Légende :

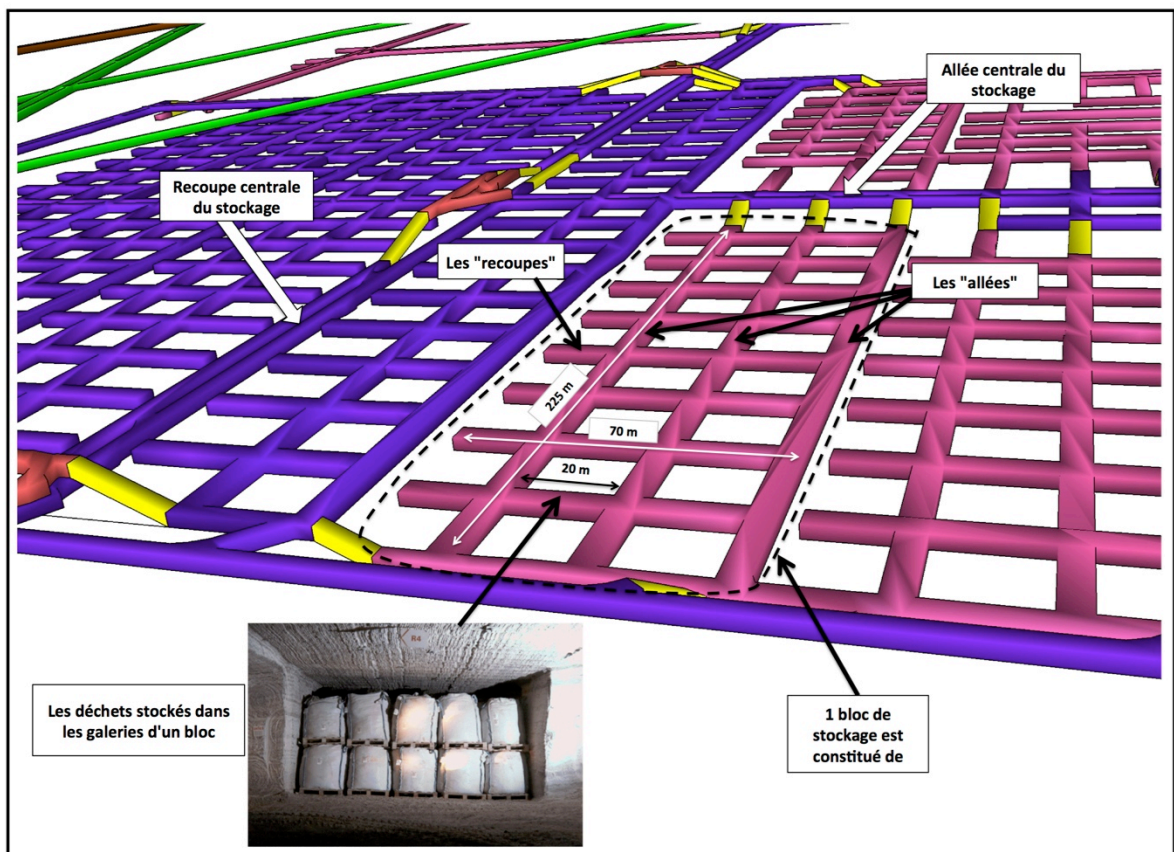
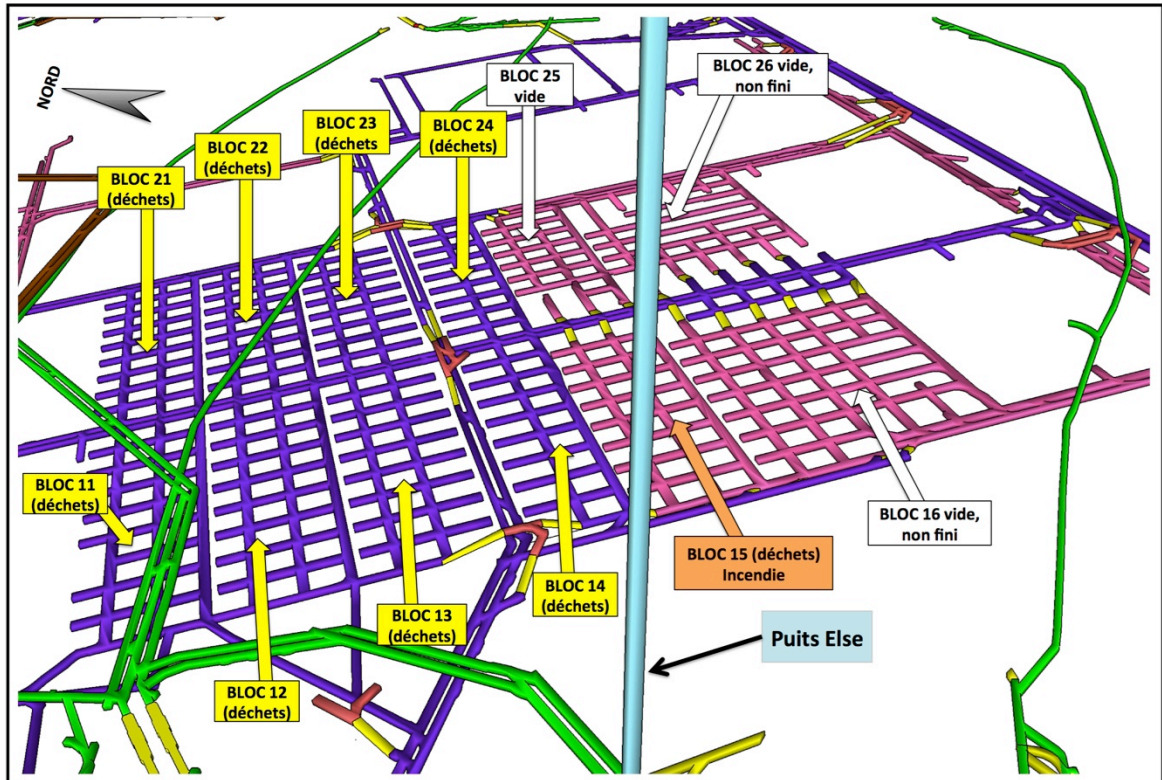
Galeries ou voies au mur de la couche inférieure de potasse (c'est-à-dire à sa base)

Galeries ou voies à 18 m sous la couche inférieure de potasse

Galeries ou voies à 23 m sous la couche inférieure de potasse

Galeries ou voies à 25 m sous la couche inférieure de potasse

Le stockage :
une emprise d'environ 700 m x 500 m à 550 m de profondeur



2. Contexte géologique et minier

2.1 *Le contexte géologique et les caractéristiques des roches*

Le stockage de déchets a été créé à 550 mètres de profondeur dans le massif salifère du fossé rhénan. Il s'agit d'une formation géologique datant de 30 millions d'années, constituée de formations salées cristallisées, avec des alternances de marnes et d'anhydrites. Le massif salifère fait environ 1230 mètres d'épaisseur et le stockage est localisé dans le premier tiers de cette formation (à 230 m du sommet de la formation).

Ce massif salifère est encadré par :

- des couches calcaires du Jurassique (en-dessous du massif, c'est-à-dire à 1560 mètres de profondeur),
- des argiles et marnes (290 m au-dessus du massif).

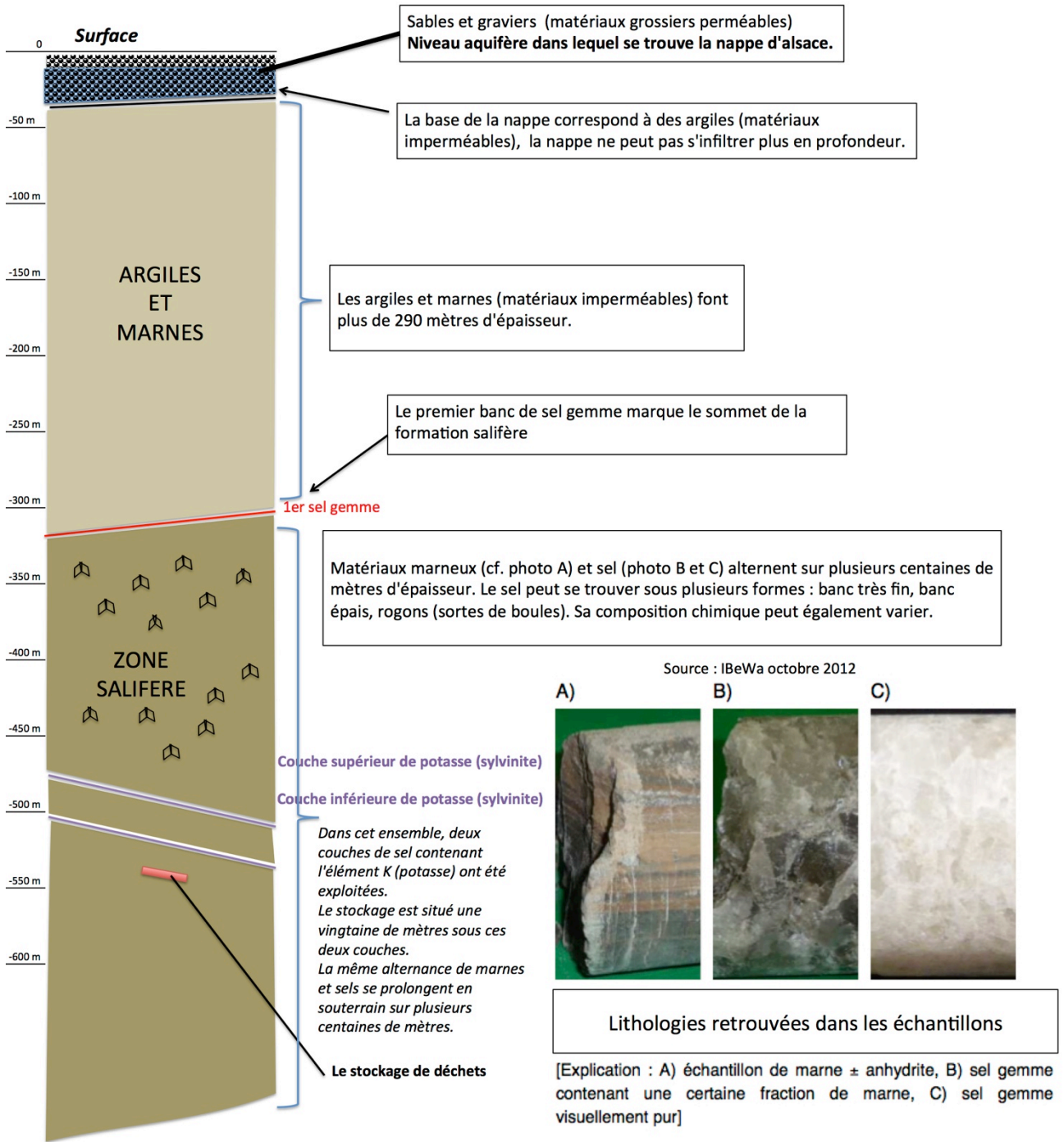
Les 290 m d'argiles et de marnes isolent le massif salifère des terrains les plus proches de la surface, qui sont constitués d'alluvions (niveau d'environ 35 m d'épaisseur) et dans lesquels s'écoule la nappe phréatique d'Alsace.

Le massif salifère est favorable à l'implantation d'un stockage souterrain, car :

- le sel est naturellement étanche,
- il n'y a pas de risque de mouvement du massif par diapirisme*, la stabilité mécanique du massif de sel est garantie à long terme.

Ces deux caractéristiques fondamentales sont tout à fait confirmées par les Tiers-Experts [A2] qui précisent que c'est parce que les formations salifères sont très imperméables qu'elles sont sélectionnées pour accueillir des déchets (cas de l'Allemagne notamment).

Le stockage est implanté à 550 mètres de profondeur, il est dans un contexte géologique (« champ lointain ») favorable car entouré par une formation salifère épaisse et étanche.



Voir lexique pour des définitions simples des termes techniques

Figure 2 : Contexte géologique simplifié.

2.2 Les terrains en périphérie du stockage

Le contexte géologique originel, très favorable par la nature imperméable des formations qui le constituent, a été altéré par l'exploitation minière de la potasse et par le creusement des galeries du stockage. On s'intéresse ici aux terrains entourant le stockage (« champ proche »).

Suivant les galeries du stockage il y a 23 mètres (galeries en rose sur les plans) ou 25 mètres d'épaisseur (en violet) entre le toit des galeries de stockage et la couche de potasse exploitée la plus profonde (dite « couche inférieure »).

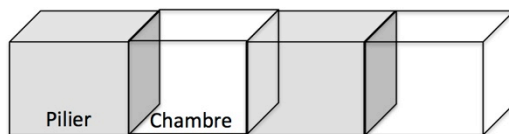
2.2.1 Stabilité

La stabilité géologique du secteur n'est pas remise en cause par les experts qui confirment également la stabilité du stockage. Les galeries de stockage ont été creusées avec les dimensions suivantes :

- 5,5 mètres de largeur,
- 2,8 mètres de hauteur,
- 20 mètres de massif conservé entre les galeries.

Les dimensions très larges des massifs de sel (piliers) laissés entre deux galeries garantissent une bonne tenue globale du stockage. Cela signifie qu'il n'y a pas de risque qu'une chambre du stockage s'écrase brutalement en créant une fracture dans les terrains du dessus (ce qui pourrait alors altérer l'étanchéité des terrains susjacentes).

Exploitation "classique" en chambres et piliers



Chambres et piliers du stockage de déchets

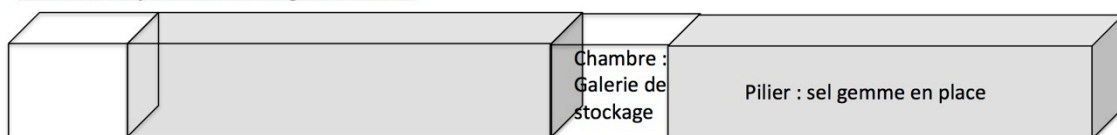


Figure 3 : "chambres" et "piliers" dans le stockage.

Par des calculs de géomécanique, l'INERIS* avait affirmé cette stabilité à grande échelle des galeries de stockage, et ceci est confirmé par les modélisations du bureau d'études ITASCA. La tierce-expertise aboutit également au même résultat.

Par contre, ceci n'empêche pas une altération des parois et du toit des galeries. Les galeries travaillent : les parois s'appuient progressivement sur les déchets. Ce lent mouvement inéluctable correspond au fluage du sel et entraîne la fermeture progressive des galeries autour des déchets (cf. page 18). L'INERIS a déterminé que les galeries de l'ensemble du stockage allaient être le siège de nombreux décollements horizontaux (au toit et au mur) et verticaux (sur les parois) du fait du fluage du sel [A10].

L'existence de décollements en plaques sur les parois des galeries constitue un risque pour les travailleurs dans les galeries mais ne déstabilisent pas « en masse » les terrains situés au-dessus du stockage.

Les dégradations observées sur les parois des galeries du stockage sont dangereuses pour les travailleurs mais ne remettent pas en cause la stabilité autour du stockage. Le stockage est par ailleurs dans un environnement géologiquement stable.

2.2.2 Etanchéité

Comme indiqué précédemment, au-dessus de chaque niveau exploité, les premiers mètres de terrain sont dégradés : les formations, décomprimées, se fissurent, peuvent se décoller et perdent donc leur caractère étanche. Or les galeries du stockage ne sont qu'à une vingtaine de mètres sous la couche inférieure de potasse exploitée.

Plusieurs informations indiquent que l'altération des terrains autour des secteurs exploités reste limitée à quelques mètres.

En effet, la tierce-expertise cite plusieurs expériences ou événements dans des sites de stockage allemands confirmant qu'une couche de sel peu épaisse peut garder son caractère étanche. Par ailleurs, les tests de perméabilité* réalisés par IBewa en 2013 autour des galeries du stockage indiquent que la frange « altérée » autour des galeries (appelée par les spécialistes EDZ pour Excavation Damaged Zone) se limite à 3,5 mètres environ.

L'épaisseur de terrain entre les galeries de stockage et la couche inférieure exploitée (23 à 25 m) est ainsi considérée comme suffisamment épaisse pour qu'elle conserve son caractère étanche.

Toutefois, les galeries du stockage se déforment au fil du temps (voir encart : les propriétés du sel et le fluage). Pour s'assurer que la dégradation « de surface » des propriétés du sel ne s'étende pas au-delà des quelques mètres observés actuellement, les MDPAs prévoient de remblayer les galeries vides du stockage avant la fermeture du site (cf. chapitre « confinement »). Cette précaution permet de préserver l'étanchéité des terrains juste au-dessus du stockage, entre les galeries et l'ancienne mine de potasse.

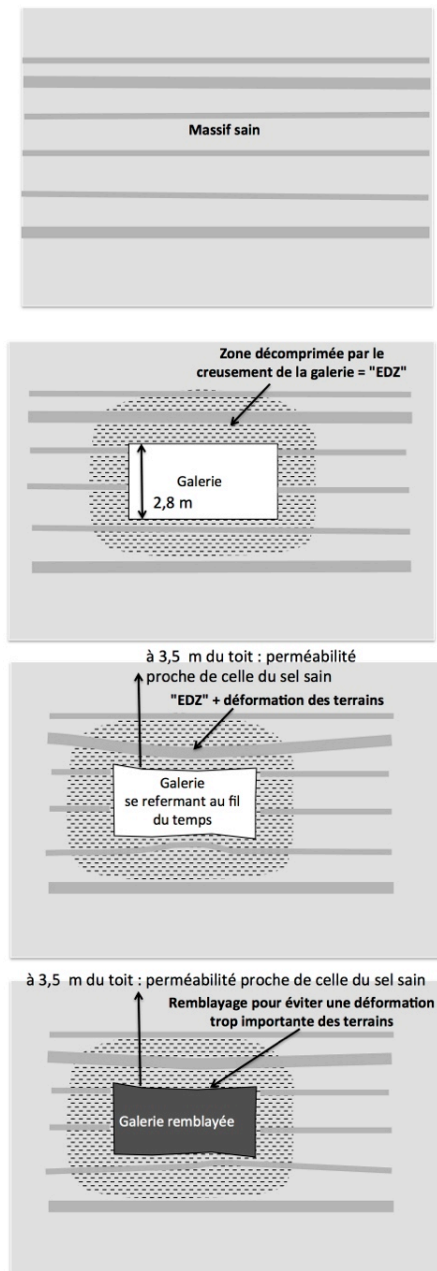


Figure 4 : EDZ et remblayage.

Il faut noter qu'un sondage de reconnaissance ancien a traversé l'épaisseur de terrains située entre la couche inférieure de potasse et le stockage de déchets (sondage VIII). Pour s'assurer qu'il ne constitue pas une liaison entre la mine et le stockage, l'ouvrage a été recherché et traité par injection en 2013 (sondage de 15 cm de diamètre, bouché originellement avec de l'argile, retrouvé sec en 2013 et injecté de ciment magnésien).

En remblayant les galeries du stockage, l'intégrité des terrains situés juste au-dessus du stockage (entre ce dernier et la couche inférieure de potasse exploitée par la mine) est confortée. Le stockage reste donc bien isolé de la mine par des terrains non fissurés. Au-dessus des deux couches de potasse, l'épaisseur de sel non exploité (230 m) puis les argiles et marnes (290 m) garantissent l'étanchéité jusqu'à la surface.

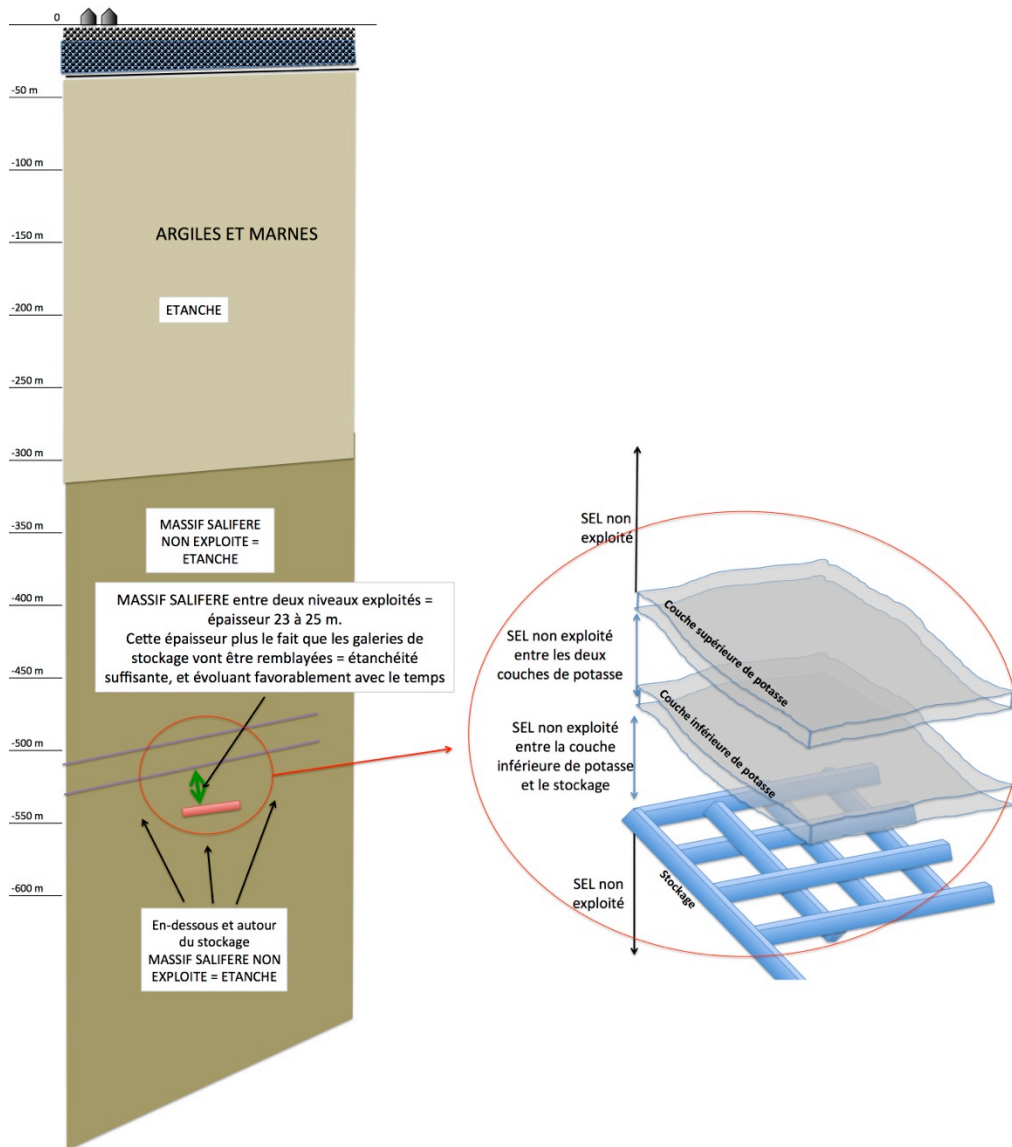


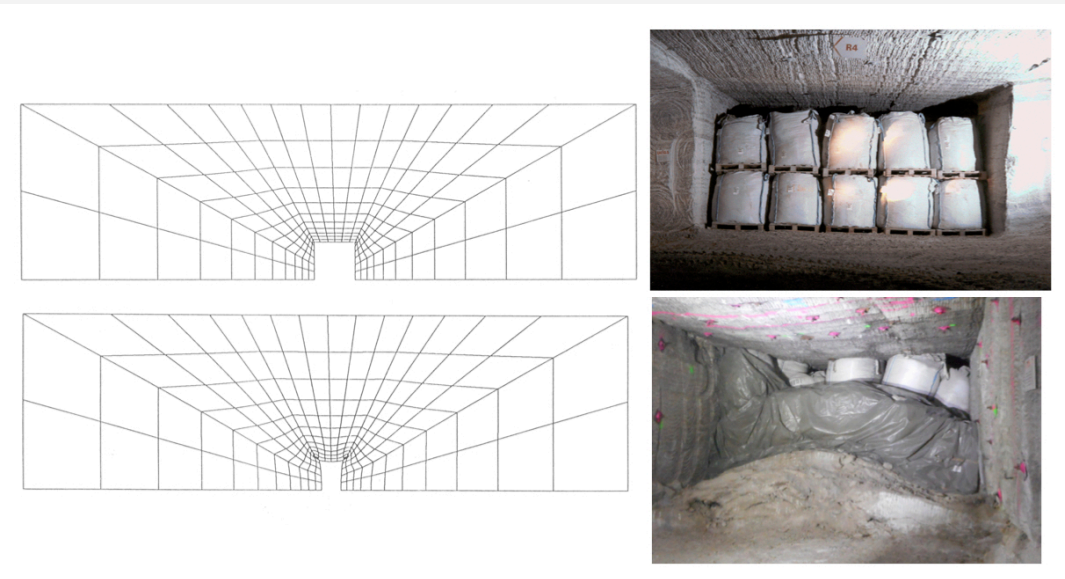
Figure 5 : Etanchéité des terrains (champ lointain et champ proche).

Plus de détails sur : le comportement du sel

Lors de leur écrasement, les roches ne réagissent pas de la même façon suivant leur nature et leur état de fracturation. La géomécanique est la science qui étudie le comportement des roches mises sous contraintes.

Le sel gemme est un matériau dont la déformation est « élastique et viscoplastique ». Il réagit en partie comme un fluide visqueux.

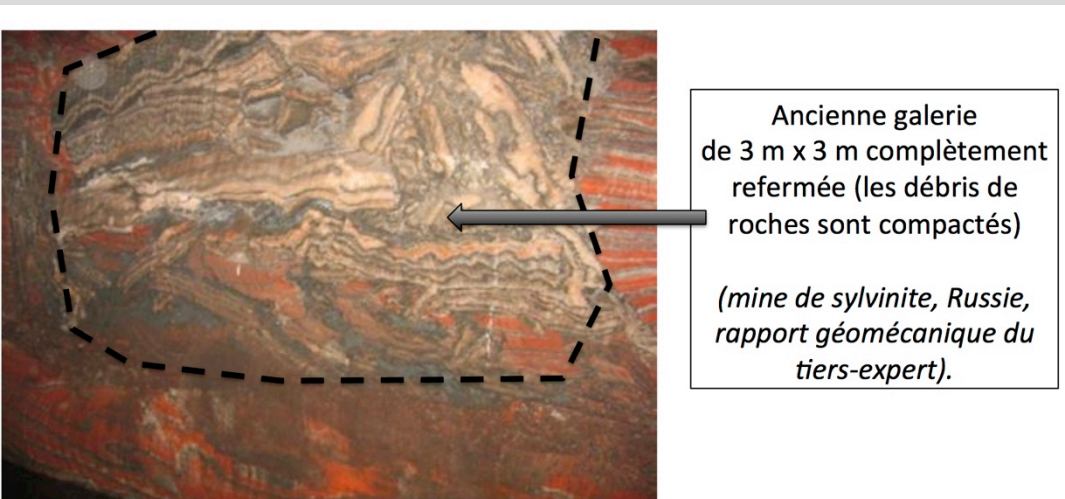
Sous le poids (= la contrainte) des terrains, une galerie creusée dans du sel va se refermer au fil du temps (fluage du sel).



Dans les galeries vides, une première loi géo-mécanique permet de représenter le comportement du sel, l'INERIS a utilisé la loi de Norton.

Dans des galeries pleines (de sel ou de déchets), d'autres lois sont utilisées car il y a deux phénomènes : la fermeture du sel mais aussi l'écrasement des matériaux situés dans la galerie.

La photo ci-dessous montre que si le matériau remplissant les galeries est du sel, celui-ci est progressivement comprimé et le massif « cicatrise ».



2.2.3 Les liens entre le stockage et la mine de potasse par les galeries d'accès

Le stockage a été conçu en s'appuyant sur les infrastructures minières existantes qui allaient être abandonnées à la fin de l'exploitation de potasse. Il n'a ainsi pas été nécessaire de creuser des puits d'accès jusqu'à 550 mètres de profondeur, l'accès et la ventilation du stockage ainsi que le creusement des galeries du stockage ont été possibles à partir des puits de mine Joseph et Else. Ces puits de mine desservent par ailleurs les champs d'exploitation de la potasse à partir de galeries rejoignant des niveaux supérieurs.

Comme représenté sur le schéma ci-dessous on dénombre 11 points d'accès au stockage, constitués de galeries simples ou de galeries doubles (c'est-à-dire deux galeries très proches).

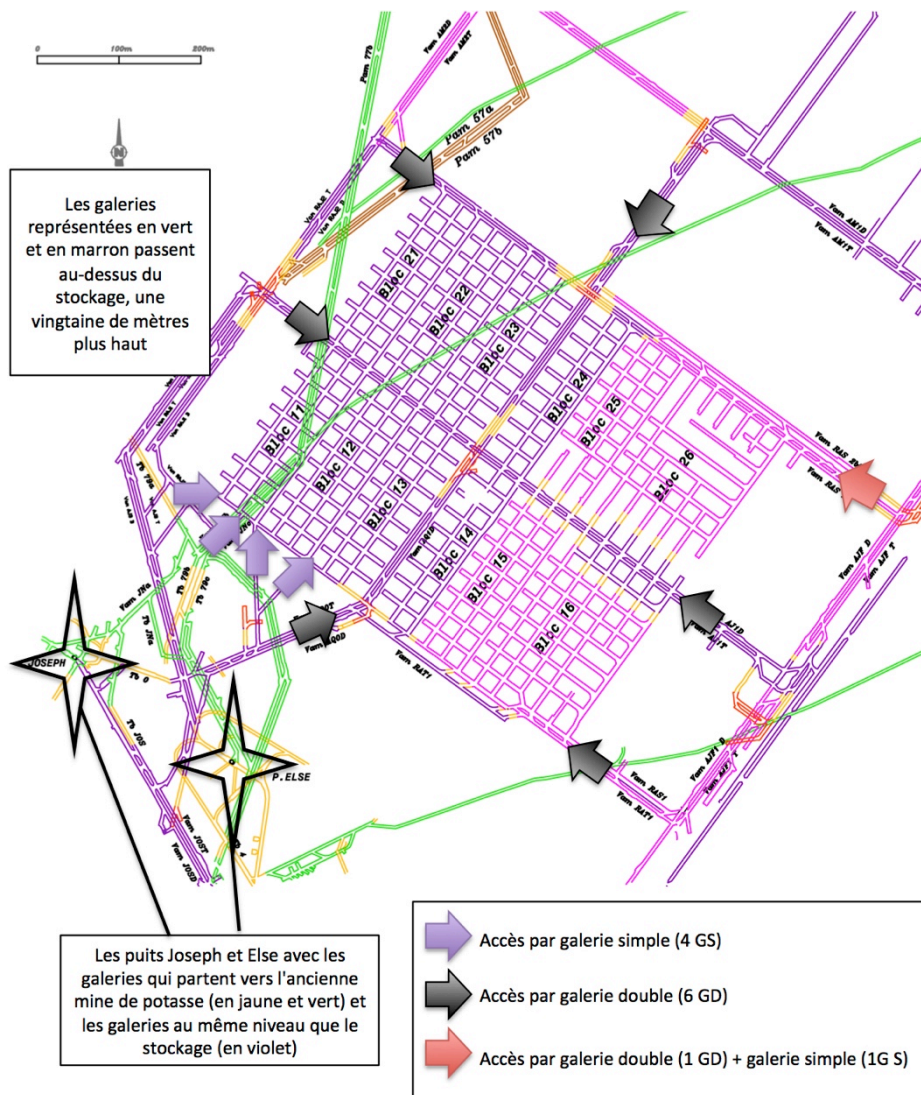


Figure 6 : Les galeries d'accès au stockage.

Les terrains qui séparent le stockage des champs d'exploitation de la mine de potasse sont étanches mais les galeries d'accès au stockage sont en lien avec l'ancienne mine de potasse.

2.2.4 Le remplissage progressif de l'ancienne mine par de la saumure

Pendant l'exploitation de la potasse, les puits de mine qui traversent la nappe alluviale ont conduit l'eau au fond de la mine. Toutes les mesures ont été prises pour que l'eau n'entre pas dans la mine (sous peine d'empêcher l'exploitation minière). Malgré ces précautions (étanchéifications et cuvelage* des puits, ...) un peu d'eau parvenait à la base des puits ce qui ne représentait que de très faibles volumes, facilement évacués par pompage. A chaque abandon de puits lorsqu'un secteur cessait d'être exploité, le remblayage du puits de mine était réalisé avec le même souci d'éviter les infiltrations par l'ouvrage.

Malgré cela, il faut considérer que des suintements restent possibles le long des anciens puits de mine fermés (dans les terrains microfissurés qui sont au contact entre le cuvelage* et les terrains traversés) et rejoignent les anciens travaux miniers. Comme les vides de l'ancienne mine ne se ferment pas tout de suite complètement, l'eau infiltrée, transformée en saumure au contact du sel gemme, peut circuler dans les anciens champs d'exploitation et atteindre les points bas de l'ancienne mine. Au fil du temps les vides miniers résiduels se remplissent et le niveau de saumure monte, l'évolution ultime étant une saturation de l'ensemble de la mine.

La mine de potasse est constituée de deux ensembles complètement distincts : les mines du « secteur est » et les mines du « secteur ouest ». Le stockage est en lien avec les mines du « secteur ouest » (exploitées à partir de 15 puits de mine, dont les puits Joseph et Else). Environ 200 millions de m³ ont été extraits dans le secteur ouest (compartiments Marie-Louise et Amélie). Ce volume représente le vide initial laissé en souterrain par la mine.

Le stockage est situé à l'extrémité sud de l'exploitation, dans le compartiment Amélie. Ce secteur correspond à une des parties les moins profondes de l'exploitation minière.

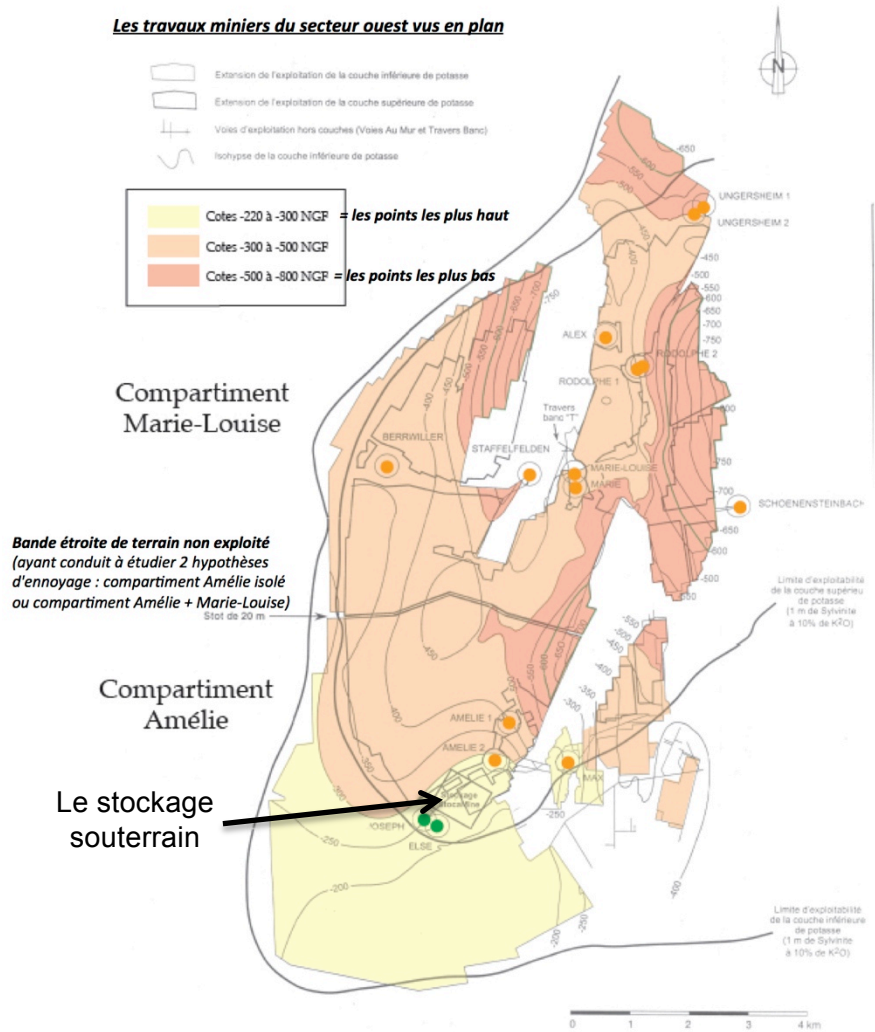


Figure 7 : Plan du secteur ouest de potasse et position du stockage.

Plus de détails sur : le remplissage de la mine de potasse par de la saumure.

Les débits entrants :

Les infiltrations le long des anciens puits de mine remblayés descendent gravitairement jusqu'à la base des puits et suivent les chemins des anciennes galeries et des anciens champs foudroyés* pour s'accumuler dans les points bas et remplir progressivement les vides résiduels souterrains.

La durée de cet ennoyage progressif dépend du volume d'eau qui arrive au fil du temps par les puits (= le débit d'infiltration) et du volume à remplir en souterrain (= le volume des vides résiduels).

Rappelons que le remblayage des puits a été soigné pour limiter les intrusions d'eau par les puits de mine, le débit d'alimentation ne peut donc être que très faible. Plusieurs études ont porté sur l'évaluation des débits entrants et différentes approches sont détaillées dans les études techniques jointes au dossier. Ces études aboutissent à un débit d'apport compris entre 22 000 m³/an et 105 000 m³/an au total pour les 15 puits de mine du secteur ouest. Pour le tiers-expert la valeur majorante est de l'ordre de 72 000 m³/an.

Les volumes à remplir :

Concernant les vides miniers résiduels, les études sont complexes car il faut distinguer le comportement des galeries, des zones foudroyées, ainsi que le changement de loi physique en cas de remplissage des vides par la saumure (le contact avec la saumure accélère les déformations de surface mais la contre-pression de saumure ralentit les déformations du massif, ...). Quand les terrains sont exploités par foudroyage (ce qui représente environ 95% de l'exploitation minière, le reste étant des galeries) ; deux phénomènes se succèdent :

- les vides souterrains sont d'abord comblés par l'éboulement des quelques mètres de sel et d'insolubles (marnes et anhydrites) situés juste au-dessus. Cet écroulement provoque un affaissement progressif des terrains jusqu'à la surface, qui se produit grâce à la souplesse des couches géologiques. Comme les affaissements en surface ont été suivis par l'exploitant, il a pu être constaté que ce premier phénomène provoque une réduction importante (60 à 90%) des vides souterrains, en trois ans environ ;
- ensuite la fermeture des vides se poursuit mais lentement, en comprimant les blocs de sels écroulés, jusqu'à ce que le secteur exploité se cicatrise totalement ; les hypothèses d'évolution des vides peuvent varier selon les experts consultés : l'INERIS a pris une valeur moyenne pour l'ensemble de la mine de -0,1%/an. Pour les tiers-experts il est probable que les vitesses de réduction des vides soient plus élevées (-2%/an environ). Dans leur dossier d'arrêt, les MDPAs précisent qu'il subsisterait actuellement dans les couches exploitées de l'ordre 10% des volumes de vides initiaux.

Tout ceci est détaillé dans les différentes études techniques. De façon certaine, il est acquis que le cumul des vides résiduels sur tout l'ensemble minier ouest représente actuellement encore 20 à 80 millions de m³ de vide (concrètement il n'y a pas de grandes poches de vides mais un secteur de porosité* plus forte). Les différences entre les expertises correspondent à des hypothèses différentes sur les vides après affaissement et sur les lois d'évolution au cours du temps.

N.B. : L'incertitude sur la durée d'ennoyage (dépendant à la fois du débit qui passe par les puits et de l'évolution des vides souterrains au fil du temps) a conduit les experts à étudier les cas les plus défavorables. L'INERIS* a retenu des hypothèses qu'il a considérées comme défavorables mais réalistes au vu de son expérience. Le tiers-expert a retenu une hypothèse encore plus contraignante, on verra toutefois que cela ne modifie pas les conclusions quant au confinement comme précisé ci-après.

2.3 Bilan

Le stockage est donc entouré de formations étanches, les seuls points non étanches sont ses galeries d'accès, qui le relie à l'ancienne mine de potasse et aux puits de mine qui rejoignent le jour.

3. Confinement prévu

Autour du stockage l'étanchéité des terrains est confirmée par les experts et tiers-experts. Par contre les galeries d'accès au stockage sont reliées aux anciens ouvrages souterrains des Mines de Potasse d'Alsace, que l'on peut se représenter comme deux couches profondes poreuses, au sein du massif étanche. Dans la mesure où des infiltrations d'eau sont possibles par le cheminement des puits, il faut considérer que la mine de potasse peut être progressivement saturée par de la saumure qui atteindra à long terme le secteur du stockage.

Le confinement consiste à boucher les galeries d'accès au stockage pour éviter que la saumure n'atteigne les déchets (« boucher » est un terme très simplificateur, on verra ci-après les différents phénomènes dont on tient compte pour confiner le site).

Les galeries d'accès au stockage, qui sont indirectement reliées à la mine de potasse seront équipées de barrières de très faible perméabilité*.

3.1 Rôle du confinement

Le stockage se trouve à 550 mètres de profondeur, il est impossible que les déchets remontent en surface. Le risque à considérer, à moyen terme, est une arrivée de saumure jusqu'aux déchets puis une remontée de cette saumure polluée jusqu'en surface.

Pour que cette remontée de saumure se produise, divers scénarios ont été étudiés et ne sont pas vraisemblables (remontée par diapirisme*, activation d'une faille jusqu'en surface, ...). Par contre, la fermeture progressive des vides souterrains, du fait du fluage du sel, peut engendrer un mouvement de la saumure en direction des puits de mine et une remontée par l'intermédiaire des puits, jusque dans la nappe alluviale. Le confinement doit permettre d'éviter ce risque.

Le rétrécissement progressif observé dans les galeries du stockage au fil du temps confirme la tendance à la cicatrisation du massif, ce qui est favorable à un encapsulage naturel des déchets dans le sel. Toutefois, si de la saumure envahissait le stockage, la fermeture des galeries aurait tendance à repousser cette saumure (polluée au contact des déchets) vers la mine, puis les puits de mine et éventuellement la nappe alluviale.

Cette évolution potentielle conduit à prévoir un confinement poussé des déchets par la mise en place de barrières étanches sur l'ensemble des galeries d'accès du stockage.

Dans les études préalables au projet de fermeture, l'INERIS* a fixé un objectif de performance à ce confinement : la saumure polluée ne doit pas pouvoir sortir du stockage avant au moins 1000 ans. En effet, à cette échéance la convergence résiduelle des galeries du stockage (la fermeture naturelle des terrains) sera si faible que si des débits arrivent à sortir du stockage ils ne seront pas de nature à polluer la nappe d'Alsace.

Nous reviendrons plus en détail dans la suite du document sur la notion de pollution, les échelles auxquelles les experts ont travaillé, comment la sortie potentielle de contaminants est modélisée et les concentrations associées.

D'après l'INERIS*, il est envisageable, en utilisant des matériaux de très faible perméabilité* sur une grande longueur, de boucher les galeries d'accès au stockage avec des barrières qui retardent de 1000 ans toute sortie de saumure du stockage. En travaillant sur la conception des barrières, ITASCA a toutefois démontré, à l'aide de modélisations géo-mécaniques, que la sortie de saumure depuis le stockage passe par de nombreuses étapes (cf. Figure 8) qui ont chacune des durées très significatives.

1) Les barrières sont mises en place dans les galeries d'accès au stockage.



2) Le niveau de saumure dans la mine monte progressivement et atteint le stockage fermé.



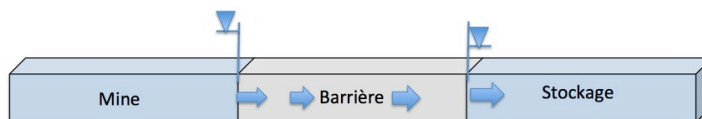
3) Le niveau de saumure dans la mine continue de monter : un différentiel de pression apparaît de part et d'autre de la barrière. La saumure imprègne progressivement la barrière.



4) La saumure traverse progressivement la barrière avec un débit limité par la faible perméabilité de cette dernière.



5) Les pressions hydrostatiques s'équilibrent entre la mine et le stockage.



6) Lorsque cet équilibre est atteint, il n'y a plus de moteur hydrostatique pour faire bouger la saumure. Dans le stockage, la saumure se charge en substances polluantes au contact des déchets.



7) C'est alors l'évolution du vide dans le stockage qui devient le phénomène moteur pouvant faire sortir de la saumure (polluée) du stockage vers la mine.



La mine elle-même continuera à évoluer et pourra faire ressortir de la saumure polluée vers les puits de mine et la nappe alluviale en surface.

Figure 8 : Schéma de principe, la saumure percole à travers les barrières du stockage.

Pour accroître la durée du phénomène et retarder la sortie potentielle de saumure la première intention pourrait s'attacher à conserver les galeries vides dans le stockage pour que l'ennoyage potentiel soit plus lent. Toutefois, dans le cas particulier d'un stockage dans le sel, les vides se ferment au fil du temps et finissent par disparaître complètement alors que le remblayage des galeries permet à long terme de préserver du vide lié à la porosité* du matériau de remblayage. Avec des galeries remblayées par des matériaux qui gardent une certaine porosité* malgré la pression des terrains, le temps d'ennoyage du stockage augmente. ITASCA a montré que cette étape pouvait être aussi lente voire nettement plus longue que le temps de traversée des barrières elles-mêmes.

Lorsque la saumure de la mine atteindra le stockage, la sortie de polluant depuis le stockage confiné sera retardée par 3 étapes :

- la traversée des barrières par la saumure, depuis la mine vers le stockage,
- le remplissage des vides du stockage,
- la traversée des barrières par la saumure polluée, depuis le stockage vers la mine.

3.2 Conception technique et quantification de l'effet du confinement

3.2.1 L'interface barrières / terrain

Tous les experts s'accordent pour affirmer que la zone de contact entre le noyau* étanche et les terrains encaissants doit être l'objet d'une grande attention pour empêcher les fuites.

Comme précisé dans le chapitre 2, autour des galeries les parois ont des qualités dégradées par rapport au sel sain. Il faut que cette zone endommagée (EDZ) soit aussi imperméable que les barrières de fermeture, pour empêcher que le flux ne passe par « l'extrados » des barrières.

Les experts indiquent que, comme la barrière obstruera la totalité de la section de la galerie, l'EDZ sera progressivement comprimée par la pression lithostatique. Comme cette zone est constituée de sel, sa perméabilité* va diminuer pour retrouver au fil du temps des valeurs proches de celles du sel sain.

Au droit d'un barrage pilote* dans la mine d'Asse en Allemagne, des tests réalisés 15 ans après la construction de la butée béton ont permis de conclure que la zone de contour avait « récupéré son intégrité hydromécanique » autrement dit que les perméabilités* y étaient proches de celles du sel sain. Diverses expériences réalisées dans des galeries en Allemagne confirment également ce phénomène.

Les modélisations réalisées par ITASCA [78] sur la base de mesures de perméabilité effectuées dans les parois des galeries de StocaMine indiquent un délai de retour à des perméabilités proches des valeurs originelles inférieur à trois décennies.

Le tiers-expert affirme ainsi que, après scellement des ouvrages, il est possible de « tabler avec certitude sur l'absence d'infiltrations secondaires par suite de création de voies de passage hydraulique » [A5].

La couronne de terrain légèrement déstructurée autour des barrières² sera progressivement comprimée, et le sel retrouvera son étanchéité.

3.2.2 Effet des barrières et du remblayage

Le principe général des barrières a été validé. Elles comprendront :

- deux éléments d'appui,
- un élément central (noyau*) de très faible perméabilité*.

Un exemple est proposé dans le dossier déposé en 2015 (cf. annexe 2), avec une conception qui a pu être testée dans la mine de sel de Sondershausen en Allemagne (éléments d'appui en béton mélangé avec de la saumure saturée, noyau* en briques de bentonite* avec un mur de saturation). Toutefois, les MDPAs souhaitent prendre en compte les expériences les plus approfondies dans le domaine. Le tiers-expert [A5] a notamment fourni des indications très éclairantes sur les matériaux envisageables (avantages et inconvénients) suite aux essais conduits en Allemagne.

Ainsi l'utilisation de la bentonite*, bien que pertinente, se traduit par des contraintes importantes de mise en œuvre. Des bétons spéciaux, à forte teneur en suies, permettent d'obtenir une perméabilité équivalente à celle de la bentonite*, soit 10^{-18} m². Leur formule est à mettre au point avec l'ingénierie choisie par les MDPAs et les fournisseurs de béton. Des tests sur « pilotes* » sont en cours pour comparer la méthode de mise en place par coulage et la méthode par projection en couches successives. De part et d'autre du noyau, des éléments d'appui de 3 m de longueur serviront de butées. Plusieurs mètres de havrit³ compléteront les ouvrages côté mine afin d'assurer une saturation en NaCl des venues d'eau atteignant les barrières (pour éviter toute dissolution à proximité de celles-ci).

Concernant le remblayage, dans ses études préalables au projet de fermeture du site, l'INERIS* a mis en évidence l'intérêt de remblayer les galeries vides pour soutenir leur toit (plafond) et s'assurer ainsi que les décollements de surface qui y sont observés ne se transmettent pas plus en profondeur dans le massif de sel.

ITASCA a souligné que, suivant les matériaux utilisés, le remblayage aura également un rôle indirect d'effet retard car, comme indiqué précédemment, la porosité* des remblais constituera autant de volume à remplir par la saumure qui pénétrerait dans le stockage.

Dans les galeries contenant des déchets (blocs 11, 12, 13, 14, 21, 22, 23, 24), aucun remblayage n'est prévu car les déchets assurent le même rôle qu'un remblayage.

² Les dégradations de surface seront quant à elles enlevées par havage.

³ Sel issu du havage de galeries.

Tous les autres blocs seront remblayés (Figure 9) :

- le bloc 15 (lieu de l'incendie de 2002),
- les blocs vides 16 et 26,
- le bloc 25, bloc vide excepté sur deux allées qui seront remplies par des déchets déplacés lors du déstockage.

Le bloc 15 sera remblayé avec du coulis (béton maigre) de cendres. Pour les autres blocs, des tests *in situ** seront réalisés pour comparer à la fois l'efficacité des matériaux, les contraintes de mise en œuvre et les coûts associés (environ 140 000 m³ de matériaux sont nécessaires). Le havrit (sel issu du havage des galeries), actuellement testé, donne de bons résultats.

Selon le tiers-expert une méthode de remblayage à sec, si possible pneumatique, est préférable à un remblayage hydraulique (pourtant plus rapide) pour minimiser l'introduction d'eau à proximité des déchets.

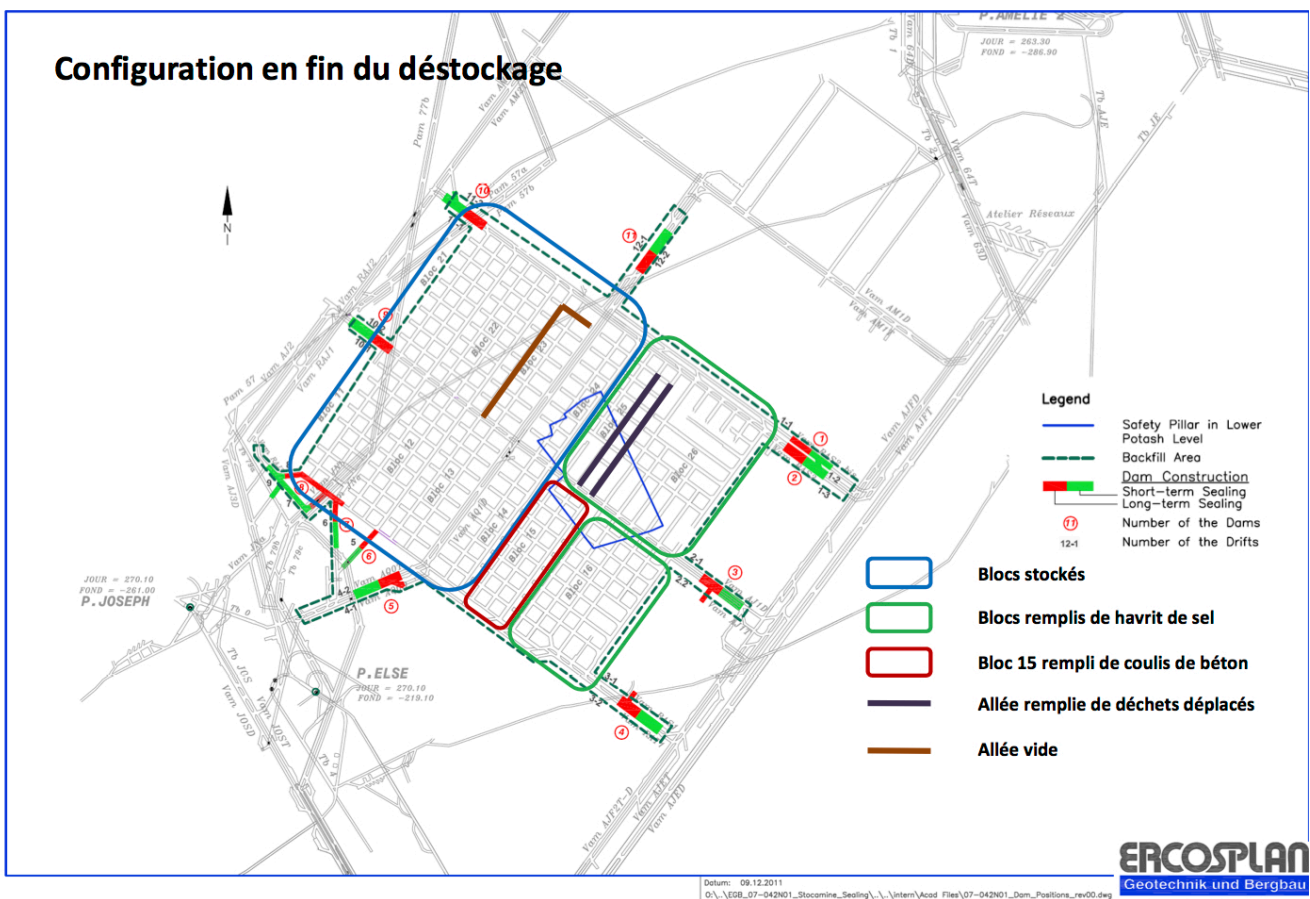


Figure 9 : Remblayage du stockage.

Dans son dernier rapport [A8], ITASCA a modélisé l'évolution à long terme du stockage de déchets confiné par des barrières dont les noyaux étanches sont constitués de béton spécial avec une perméabilité de 10^{-18} m^2 .

La modélisation intègre un remblayage des galeries vides du stockage par des havrits et deux solutions pour les galeries d'accès internes au stockage : du béton maigre ou des havrits de sel. Les havrits de sel présentent une porosité qui diminue fortement, l'IFG (Institut de mécanique des roches allemand) a ainsi retenu une porosité nulle à échéance 1000 ans⁴.

Le volume actuel de vides dans le stockage est estimé autour de 260 000 m³ (calculé d'après la géométrie du stockage, les galeries laissées vides, la porosité des déchets dans les galeries pleines). Il décroîtra pour atteindre 20 000 m³ au bout de 1000 ans si du havrit est utilisé pour remplir les galeries d'accès internes au stockage. Un remplissage de ces galeries par un coulis de béton maigre laisserait davantage de vides disponibles, cette deuxième solution n'est pas écartée mais elle nécessitera des essais et études complémentaires.

Avec des noyaux de 5 m de longueur et de 10⁻¹⁸ m² de perméabilité, le débit qui peut traverser l'ensemble des barrières est approximé à 13 m³/an.

En combinant la réduction des vides dans le stockage et les apports de saumure, ITASCA conclut à un remplissage complet du stockage par de la saumure au bout de 1700 ans environ dans le cas d'un remplissage des galeries d'accès avec des havrits et 3600 ans pour un remplissage avec un coulis de béton (Figure 10).

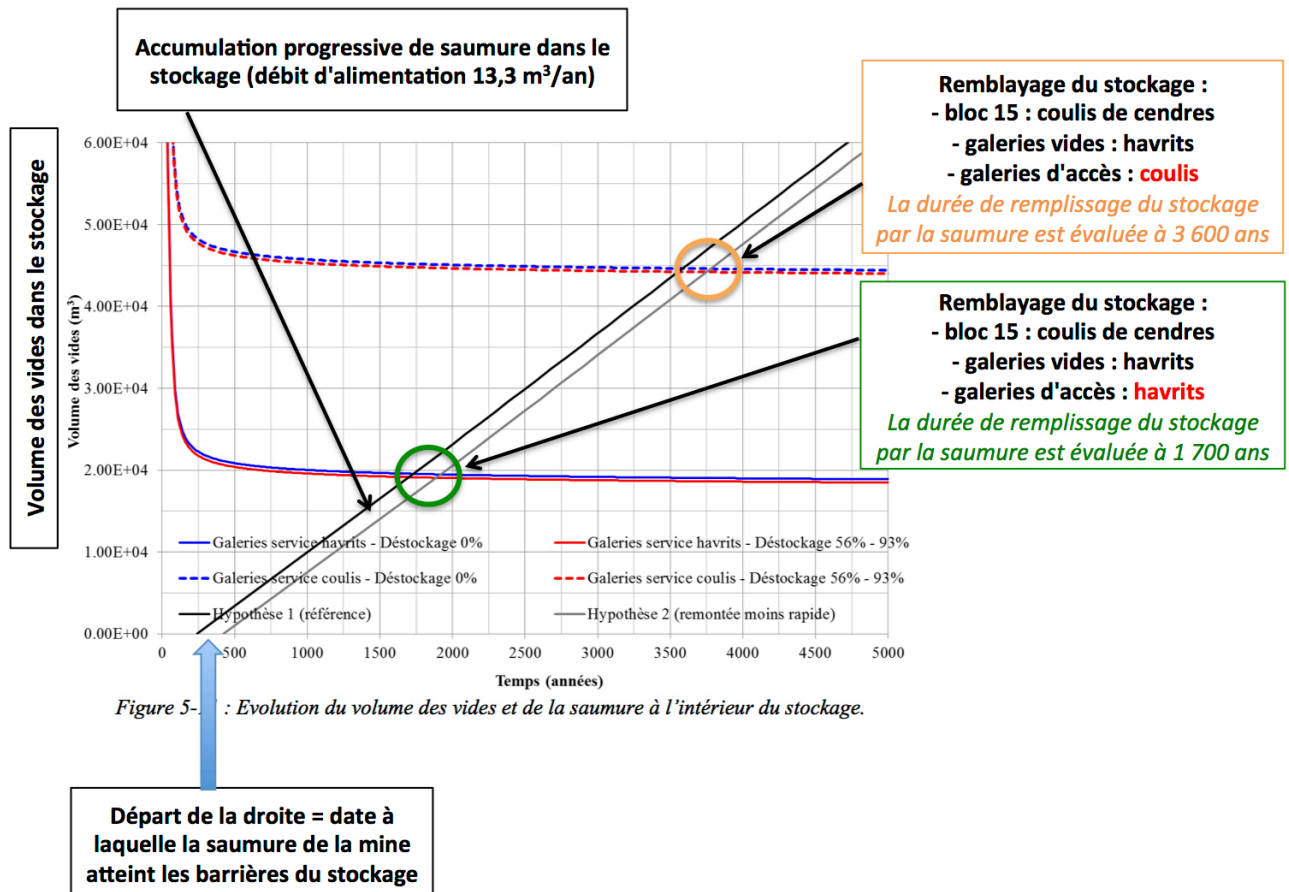


Figure 10 : Temps d'envoyage du stockage, avec confinement (ITASCA [A8]).

⁴ Le béton garderait une porosité plus importante, mais les contraintes de mise en œuvre et le coût associé au vu des volumes à prévoir, ont conduit à écarter ce matériau.

Le tiers-expert confirme la cohérence des modélisations d'ITASCA, et fournit les précisions suivantes [A5] :

- il confirme qu'une étanchéité de l'ordre de 10^{-18} m² avec du béton spécial est techniquement réalisable selon les connaissances actuelles⁵
- une perméabilité* encore plus faible (10^{-20} m²) pourrait être acquise par du sel.

Ce dernier point permettrait donc d'envisager que le sel qui servira au remblayage du stockage ou celui placé en avant des barrières puisse constituer une barrière très étanche à long terme.

Le tiers-expert confirme également que seuls de très faibles débits peuvent traverser les barrières prévues : avec des noyaux d'une longueur de 6 m, des matériaux de perméabilité 10^{-18} ou 10^{-20} m² ne laisseront passer qu'un débit inférieur à 10 m³/an (pour l'ensemble des galeries). Sur la base d'un volume à remplir dans le stockage de 30 000 m³ (volume qui correspond à l'hypothèse initiale INERIS* sans remblayage), diminuant au fil du temps, le tiers-expert confirme qu'il faut au minimum 1000 ans pour saturer le stockage.

La tierce-expertise, qui se fonde sur des ouvrages déjà réalisés en Allemagne confirme que les modélisations opérées par ITASCA sont réalistes (débits et temps de traversée des barrières avec un noyau* de très faible perméabilité*). Le rôle du remblayage est considéré comme positif dans son « effet-retard ». Même en choisissant des havrits (sel broyé dont la porosité diminue nettement avec le temps) comme matériau de remplissage, les modélisations indiquent que les étapes successives menant à une sortie de saumure correspondent à des durées supérieures à 1000 ans.

3.3 Fermeture des puits de mine Joseph et Else

Les deux puits de mine Joseph et Else sont les deux derniers puits encore ouverts du secteur ouest des Mines de Potasse d'Alsace. Ils constituent les seules liaisons entre l'ancienne mine de potasse et la surface⁶. Tous les autres puits de mine ont été remblayés sur toute leur hauteur.

La technique de fermeture des puits sera proche de celle employée jusqu'à présent pour la mine de potasse, elle sera toutefois plus élaborée puisque des injections à la base du cuvelage* éviteront que la saumure polluée ne sorte préférentiellement par les deux puits les plus proches du stockage de déchets.

⁵ Effectivement, la mise en place des matériaux est très importante pour que ceux-ci atteignent effectivement la valeur objectif (pas de fissures, de défauts, ...). Le tiers-expert confirme que les techniques actuelles permettent de réaliser de tels ouvrages.

⁶ Il y a eu également des sondages de reconnaissance, de plus faibles diamètres, mais ceux-ci ont été bouchés pendant l'exploitation minière. D'après les experts, leur rôle éventuel n'est pas significatif.

4. Les concentrations potentielles dans la nappe

4.1 Les déchets stockés et le « terme source » qui en résulte

4.1.1 Les déchets

Les déchets pouvant être stockés à StocaMine devaient répondre aux critères d'acceptation fixés dans l'arrêté initial d'autorisation du stockage (arrêté N°970157 du 3 février 1997). Leur composition était vérifiée par le fournisseur de déchets et par StocaMine à l'arrivée sur son site. L'archivage de toutes ces données permet de connaître les types de déchets stockés ainsi que les quantités de contaminants associées. Au total, 44 000 tonnes de déchets ont été stockées entre 1999 et 2002. Il s'agit de déchets ultimes. Selon le Code de l'Environnement, un déchet ultime 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 ou dangereux. »

Ces déchets sont constitués d'une base d'éléments majeurs (calcium, sodium, ...) mais également, ce qui les rend dangereux, de métaux ou semi-métaux toxiques (arsenic, mercure, ...) qui représentent un peu moins de 3 000 tonnes. Ces produits sont sous forme solide (enfermés dans des gros sacs (big-bag) ou des fûts selon leur nature), leur manipulation nécessite des équipements de protection (risque au toucher et/ou en cas d'inhalation).

BMG [79] a recensé les possibilités actuelles de traitement des déchets avec des méthodes telles que la pyrolyse, la distillation ou la vitrification. Ces traitements ne sont envisageables que pour certains éléments (mercure, arsenic, amiante, ...), sous des conditions strictes (concentrations limites, textures spécifiques, ...) et à des coûts qui limitent les possibilités réelles de traiter les déchets de StocaMine. De plus, si un élément peut être retiré des déchets, cela ne signifie pas que tout le déchet est retraitable, et le déchet « résiduel » devra tout de même être stocké au final en site souterrain. Dans tous les cas, il n'y a pas de réelle valorisation possible de ces déchets en situation actuelle.

Les déchets stockés sont des résidus sous forme solide, considérés comme non retraitables.

4.1.2 Pourquoi les études se sont concentrées sur l'élément mercure

Pour s'assurer que la fermeture du stockage ne pouvait pas engendrer de dégradation significative de la qualité de la nappe d'Alsace, l'INERIS* a travaillé sur les hypothèses défavorables qui pouvaient conduire à une sortie de contaminants du stockage souterrain.

L'hypothèse majorante, retenue par l'INERIS pour étudier la solution de fermeture, a été la remontée de saumure polluée par les puits de mine, se dispersant ensuite dans la nappe alluviale.

L'INERIS* a ainsi calculé des concentrations théoriques dans la nappe autour des puits de mine. Pour se rendre compte si ces concentrations sont dangereuses ou non, les valeurs obtenues ont été comparées à des valeurs guides (qualité naturelle de la nappe) ou des normes (utilisation pour l'eau potable). En effectuant cette comparaison, l'INERIS* a démontré que pour la majorité des contaminants, les concentrations calculées dans la nappe à la sortie des puits seraient extrêmement faibles et nettement inférieures aux valeurs de référence retenues (certains éléments ne pourraient même pas être décelés par les méthodes d'analyse actuellement connues). Cependant le mercure serait potentiellement l'élément présentant le plus de risque de dépasser les valeurs guides (étant donné la chimie particulière de cet élément, son tonnage dans le stockage et les valeurs guides qui sont basses).

Ainsi, l'élément mercure est apparu comme le plus pénalisant. La réflexion peut donc le retenir en référence : si, dans les calculs, les concentrations théoriques dans la nappe sont admissibles pour cet élément, cela signifie que les concentrations dans la nappe calculées pour les autres éléments seront également admissibles (et avec des marges de sécurité bien plus importantes).

Le mercure est l'élément pour lequel il y a le moins de marge de sécurité entre les impacts potentiels et les normes en vigueur. La modélisation de l'INERIS a ainsi établi que lorsque le calcul d'impact était satisfaisant pour le mercure, cela signifiait qu'il était forcément satisfaisant pour les autres éléments.

Les concentrations pour tous les contaminants ont été calculées mais ne sont pas systématiquement présentées dans le corps des rapports (elles sont disponibles en annexes). Les calculs de concentration sont opérés aux trois niveaux de nappe alluviale, ce qui aboutit à des tableaux de valeurs détaillés.

4.1.3 Les quantités de contaminants avant déstockage

Pour apprécier le risque de contamination lié à une saumure ayant été en contact avec les déchets stockés, il est nécessaire de connaître les quantités de contaminants susceptibles de polluer cette saumure.

Les études antérieures à 2016 se sont basées, pour quantifier les contaminants, sur les listings de StocaMine décrivant les déchets stockés et les fiches d'analyses jointes à ces descriptions.

A réception des déchets, des analyses semi-quantitatives étaient réalisées dans l'objectif de contrôler les informations fournies par le propriétaire du déchet et de définir la catégorie du déchet afin de le positionner dans le stockage selon les règles de classement fixées dans l'arrêté préfectoral. Une marge d'erreur de +/- 50% était annoncée par StocaMine et a été intégrée par l'INERIS.

Dans le cadre du déstockage des déchets mercuriels et arseniés (engagé à la demande de l'Etat au vu des premiers résultats de l'Ineris* ayant défini le mercure comme élément critique), des analyses de la composition des déchets extraits ont été réalisées. Celles-ci ont révélé des teneurs en mercure beaucoup plus faibles qu'estimé initialement dans les déchets arseniés.

La tierce-expertise a demandé de nouvelles analyses pour que soient comparées les compositions indiquées dans la base de données de StocaMine et les compositions d'échantillons de déchets. Un programme d'analyses a été proposé et 310 analyses quantitatives précises ont été réalisées entre fin 2015 et début 2016 sur les échantillons de déchets issus de toutes les différentes catégories de déchets présents dans le stockage (cf. annexe 3).

Ce programme de contrôle a montré que la méthode semi-quantitative utilisée par StocaMine sous-estimait les concentrations en arsenic dans les déchets arseniés et surestimait les concentrations en mercure dans ces mêmes déchets. Ceci explique pourquoi les analyses récentes aboutissent à des masses d'arsenic plus importantes que les évaluations faites par l'INERIS à partir des données initiales et à l'inverse des masses de mercure, plus faibles.

Les données utilisées avant 2015 (INERIS*) et les données issues des analyses plus récentes et retenues par le tiers-expert sont fournies dans le tableau ci-après.

| Éléments | | Estimation INERIS [78] (valeurs moyennes, en tonnes) | Estimation après les analyses de la Tierce-Expertise [B2] | Ecart |
|-------------------------------------|-----------------|---|---|-------|
| Argent | Ag | 2 | | |
| Arsenic | As | 1 190 | 1 747 | +47% |
| Baryum | Ba | 188 | 78,2 | -58% |
| Bismuth | Bi | 78 | | |
| Cadmium | Cd | 30 | 32,84 | +9% |
| Chrome | Cr | 48 | 31,63 | -34% |
| Cuivre | Cu | 85 | 103,4 | +22% |
| Mercure | Hg | 51 | 25,69 | -50% |
| Molybdène | Mo | 14 | 6,11 | -56% |
| Nickel | Ni | 31 | 23,47 | -24% |
| Plomb | Pb | 214 | 247,9 | +16% |
| Antimoine | Sb | 78 | 99,55 | +28% |
| Sélénium | Se | 0,82 | 2,87 | +250% |
| Zinc | Zn | 296 | 253,3 | -14% |
| Cyanures libres | Cyanures libres | 4,67 | 4,37 | -6% |
| Total (pour ces 15 éléments) | | 2310 t. | 2656 t. | |

Tableau 1 : Tonnages stockés.

Les valeurs retenues par le tiers-expert au terme des nouvelles analyses diffèrent de celles considérées par l'INERIS*. Elles apparaissent ainsi plus élevées pour l'arsenic (expliqué précédemment), le cadmium, le cuivre, le plomb, l'antimoine et le sélénium. Les écarts observés peuvent paraître importants au premier abord mais, en réalité, au terme des calculs d'impact (concentrations dans la nappe cf. chapitre 4.2), on constate qu'il faudrait que les tonnages changent significativement (10, 100 ou 1000 fois plus élevés) pour que les conclusions du dossier soient modifiées.

Précision : bien que le tonnage de mercure soit plus faible que ce qu'avait retenu l'INERIS, cet élément reste le plus défavorable dans les calculs d'impact qui seront présentés en fin de*

rapport. C'est bien cet élément qui aboutit à une marge de sécurité la plus faible. Par contre, le fait que les déchets classés arseniés contiennent finalement quasiment pas de mercure a permis de réorienter le déstockage sur la priorité que sont les déchets mercuriels.

Pour la tierce-expertise, les échantillons de déchets du stockage ont été réanalysés de manière fine. Les résultats sont proches des valeurs retenues par l'INERIS* pour quantifier les contaminants accumulés dans le stockage. Les différences constatées ne modifient pas les conclusions des études. L'information la plus importante est que les déchets arseniés, signalés comme riches en mercure, en contiennent finalement peu. Ceci permet notamment de préciser que les déchets classés « mercuriels » sont bien ceux qui contiennent la majorité du mercure stocké.

4.1.4 Les quantités après déstockage

Le déstockage en cours s'inscrit dans la logique de mise en sécurité du stockage mais il ne fait pas partie du dossier de fermeture. C'est pourquoi les aspects techniques du déstockage (méthodes, risques, destination des déchets, ...) n'ont pas été décrits dans l'étude d'impact fournie dans le dossier. Le projet est une transformation du stockage réversible en stockage de durée illimitée. Le déstockage est pris en compte seulement dans ses conséquences sur les tonnages qui seront au final confinés sur place.

Pour aider à cerner comment le déstockage s'organise, pourquoi il ne cible qu'une certaine catégorie de déchets et pourquoi il est relativement lent parce que délicat, un document a été réalisé par MDPa et joint en annexe 4 du présent rapport.

Il faut retenir que le déstockage partiel des déchets contenant du mercure constitue une sécurité supplémentaire en cas de sortie de polluants dans la nappe. Pour tenir compte du planning de la procédure d'instruction et du planning des travaux de fermeture envisagés⁷, le dossier est déposé alors que le déstockage n'est pas terminé. On constate effectivement que la déformation des galeries du stockage au fil du temps est un problème pour y travailler il y a donc un intérêt de sécurité à éviter les temps morts dans le déroulement du projet.

Le déstockage concerne les déchets mercuriels, dont on sait où ils sont localisés grâce aux plans décrivant le stockage (voir : pièce « la demande » exemple de plan page 41).

Au vu de ces plans et des contraintes techniques pour retirer les déchets, il a été considéré inenvisageable de retirer la totalité du mercure présent dans le stockage, le maximum possible serait de 93 à 95% de la masse de mercure. Par ailleurs, étant donné les difficultés pressenties, la sécurité des travailleurs étant primordiale, il n'est pas certain que le déstockage puisse être conduit dans certains secteurs où les déformations des galeries sont plus importantes et où les déchets présentent des risques plus élevées lors de leur manipulation (amiante). C'est pourquoi il a été considéré dès le lancement du déstockage qu'il était possible que celui-ci atteigne un résultat intermédiaire (56%). Les études sur les phénomènes pouvant conduire à une remontée de polluants jusqu'à la nappe ont toujours étudié un « scénario sans déstockage » et des scénarios intermédiaires (« déstockage 56 % du mercure », déstockage 93% du mercure).

⁷ Voir chapitre 6 du présent document.

Le déstockage va faire baisser significativement la masse de mercure stockée mais modifiera peu les masses des autres contaminants. Le détail des tonnages est présenté en annexe 5, on propose de s'intéresser directement ci-après aux **variations associées sur le « terme source » (la saumure qui atteindrait les déchets).**

4.1.5 Le "terme source"

Le « terme source » correspond à la composition d'une saumure dans laquelle les déchets auraient été longuement baignés et remués, sans tenir compte d'un éventuel effet protecteur des emballages (big-bags, fûts). Autrement dit, on imagine que de la saumure envahit toutes les galeries du stockage et dissout tous les éléments chimiques qu'elle peut en fonction des constantes chimiques de chaque élément et des interactions éventuelles entre éléments.

Le terme source est dépendant des masses de contaminants laissés en place et du comportement de chaque élément dans la saumure. Du fait de certaines interactions entre éléments, le fait d'enlever un composant peut favoriser le passage en solution d'un autre. Ces phénomènes ont été pris en compte dans les modélisations du terme source (MDPA a fourni notamment à l'INERIS l'évaluation des teneurs en cyanures et en ammonium). Certains polluants ne passeront pas en totalité dans la saumure, par contre toute la masse de mercure, ou de chrome par exemple est considérée comme soluble⁸. L'INERIS* a tenu compte d'une saumure très concentrée, avec un volume de seulement 7 000 m³. Une cinquantaine d'éléments sont pris en compte dans les calculs mais ne sont présentés que les éléments pour lesquels on obtient des valeurs significatives (Tableau 2).

| Eléments | | Composition d'une saumure concentrée (7000 m ³) baignant les déchets, concentrations en g/L | | | | | |
|-----------------|-----------------|--|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | Terme source d'après données < 2015 [56] | | | Nouveau terme source [A7] | | |
| | | Sans déstockage | Avec "déstockage 56%" du Hg | Avec "déstockage 93%" du Hg | Sans déstockage | Avec "déstockage 56%" du Hg | Avec "déstockage 93%" du Hg |
| Argent | Ag | 3,88,E-02 | 5,30,E-02 | 5,20,E-02 | | | |
| Arsenic | As | 1,54,E-02 | 1,42,E-02 | 1,39,E-02 | 4,50,E-04 | 4,70,E-04 | 4,90,E-04 |
| Baryum | Ba | 2,30,E-07 | 2,39,E-07 | 2,42,E-07 | 6,10,E-06 | 5,80,E-06 | 5,60,E-06 |
| Bismuth | Bi | 6,95,E-06 | 6,96,E-06 | 6,96,E-06 | | | |
| Cadmium | Cd | 1,54,E-03 | 1,56,E-03 | 7,12,E-01 | 2,30,E-03 | 9,10,E-02 | 1,10,E+00 |
| Chrome | Cr | 7,07,E+00 | 7,07,E+00 | 8,27,E+00 | 5,60,E+00 | 6,10,E+00 | 6,70,E+00 |
| Cobalt | Co | 8,29,E-06 | | 4,74,E-02 | 1,10,E-05 | 1,70,E-03 | 2,20,E-02 |
| Cuivre | Cu | 1,93,E-07 | 1,94,E-07 | 1,95,E-07 | 6,60,E-07 | 9,30,E-07 | 1,30,E-06 |
| Mercure | Hg | 7,52,E+00 | 3,46,E+00 | 5,26,E-01 | 4,50,E+00 | 2,20,E+00 | 2,80,E-01 |
| Nickel | Ni | 3,05,E-07 | 7,78,E-07 | 1,00,E-03 | 7,20,E-07 | 1,20,E-03 | 1,20,E-03 |
| Plomb | Pb | 4,53,E-07 | 4,56,E-07 | 4,57,E-07 | 2,10,E-07 | 2,10,E-07 | 2,10,E-07 |
| Antimoine | Sb | 1,89,E-01 | 1,92,E-01 | 1,92,E-01 | 1,00,E-03 | 1,00,E-03 | 1,00,E-03 |
| Cyanures | Cyanures | 6,80,E-01 | 7,67,E-01 | 8,42,E-01 | 7,70,E-01 | 8,70,E-01 | 9,60,E-01 |

Tableau 2 : Terme source 2016 (et comparaison avec les données antérieures).

⁸ C'est également du fait de cette caractéristique que le mercure est souvent retenu dans les réflexions de l'INERIS : la masse mobilisable du mercure (en % de la masse totale stockée) est directement liée à la réduction de volume du stockage (en % du volume initial), ce qu'explique l'INERIS dans le document [A7].

Le calcul du terme source aboutit ainsi parfois à des résultats étonnants. Par exemple, les analyses récentes des déchets conduisent à considérer un tonnage d'arsenic plus important que celui retenu avant 2015, mais le terme source qui en résulte présente une concentration 30 à 40 fois inférieure. Ceci est lié aux interactions de l'arsenic avec le calcium et le baryum (qui est réévalué à la hausse dans le nouveau terme source suite aux récentes analyses).

Le terme source est une représentation très théorique de la saumure au contact des déchets. Il correspond à un mélange homogène avec dissolution de tous les déchets alors que le stockage correspond à un réseau de galeries en impasse et que les galeries se seront refermées autour des déchets au moment de l'arrivée de la saumure. Là encore, il s'agit bien d'évaluer le scénario le plus défavorable d'évolution du site.

Les éléments présentés dans le tableau 2 sont des éléments non organiques. Dans ses calculs de mobilisation de polluants, l'INERIS* a retenu une liste de 50 éléments inorganiques, les composés organiques ayant été évalués comme non significatifs.

La tierce-expertise approuve cette affirmation⁹ mais a néanmoins demandé aux MDPAs de préciser les données concernant le zirame, produit phytosanitaire (traitement de la vigne) présent à hauteur de 28 tonnes dans le stockage.

Les investigations complémentaires récentes (analyses, tests de solubilité dans la saumure) permettent de préciser que (source INERIS*) :

- ce produit phytosanitaire avait été traité à la chaux à la demande de l'Adème avant son stockage ce qui a contribué à sa dégradation partielle ;
- les tests de solubilité montrent que ce produit traité ne se dissout que très peu dans la saumure (0,094%),
- en intégrant ce polluant dans les calculs de concentrations en nappe (cf. chapitre 4.3), la concentration prévisionnelle dans la nappe est 3000 fois inférieure à la norme de qualité pour l'alimentation en eau potable, égale à 0,1 µg/l.

Ainsi, les données complémentaires fournies permettent d'affirmer que la présence du zirame ne remet pas en cause les principes de confinement et donc le dossier déposé.

4.2 Concentrations dans la nappe

En intégrant le fait que :

- les barrières de confinement rendront extrêmement faibles les débits de saumure qui pourraient pénétrer dans le stockage (10 à 15 m³/an),
- et que, de plus, ces débits doivent remplir l'intégralité des galeries du stockage avant de pouvoir passer du stockage vers la mine,

les tiers-experts et ITASCA concluent que, si la saumure polluée parvenait à s'écouler à l'extérieur du stockage, ce ne serait que bien au-delà de 1000 ans. Le débit de saumure pollué (lié à réduction résiduelle des vides) serait alors de moins de 2 m³/an au total (INERIS [55]).

⁹ K-Utech [A4] précise par exemple que les dioxines et furanes ne sont presque pas solubles dans l'eau ce qui permet de les exclure des calculs d'impact (concentrations non mesurables au final étant donné les faibles tonnages dans le stockage).

D'après le tiers-expert, il est même tout à fait possible que le confinement, notamment s'il intègre une partie en sel (qui pourrait retrouver une perméabilité* de 10^{-21} m² après moins d'une centaine d'années), aboutisse à une impossibilité totale de sortie de saumure polluée du stockage. En effet, les pertes de charges* dans la barrière de confinement seraient alors supérieures à la pression exercée par le fluage (72 MPa contre 14 MPa), et le moteur d'expulsion permettant la circulation de la saumure serait alors bloqué.

Il est également envisageable qu'en cas de pollution de la saumure en souterrain, celle-ci ne remontera jamais jusqu'à la nappe parce que la saumure polluée est plus dense que la saumure non polluée (tierce-expertise géochimique : la densité de la saumure polluée pourrait atteindre 1,4 à 1,5 g/cm³ contre 1,25 g/cm³ pour saumure non polluée). **Mais le travail de l'INERIS* a été de tenir compte d'une succession d'hypothèses défavorables pour s'assurer que si elles se produisaient et se cumulaient, les impacts sur la nappe d'Alsace resteraient faibles et circonscrits.** L'INERIS* ayant travaillé avec des hypothèse de matériaux (bentonite*, etc.) pour lesquels le retour d'expérience concernant leur évolution dans le temps est limité, l'hypothèse d'une dégradation des ouvrages au fil du temps a été retenue. (Avec le sel, la tendance serait inverse : il y aurait amélioration des caractéristiques des barrières au fil du temps).

Les impacts estimés ci-après ne correspondent ainsi pas à ce qu'il se produira, mais à une évaluation du risque de pollution en cas de scénario dégradé entraînant une sortie de polluant plus tôt que les études ITASCA ne le laissent envisager.

Le scénario décrit correspond à l'objectif « de base » fixé pour le confinement soit une sortie de polluant au plus tôt dans 1000 ans.

La nappe phréatique est constituée de trois niveaux aquifères (appelés « couches » dans les études INERIS*) séparés par des terrains argileux faisant barrière entre les différentes couches. La couche supérieure est la plus proche du sol, la couche inférieure est la plus profonde, l'eau de cette dernière est peu utilisée car de moindre qualité (et plus difficile à pomper).

Les concentrations en polluants engendrées par une sortie de saumure polluée ont été évaluées pour les 3 couches de la nappe, au plus proche des points de sortie c'est-à-dire les puits de mine du secteur dans lequel se trouve le stockage (compartiment Amélie) : puits Joseph, Else, Amélie 1, Amélie 2 et Max.

Les valeurs présentées dans le dossier de janvier 2015 étaient calculées en tenant compte de l'estimation 2015 des tonnages pour les différents produits. Les valeurs présentées ici intègrent les données de la tierce-expertise et l'estimation réalisée en 2016 des tonnages de contaminants.

Les concentrations sont calculées dans l'environnement proche de chaque puits (maille de 125 m x 125 m)¹⁰. Les chiffres détaillés, issus de l'INERIS* [A7], sont fournis en annexe 6.

Les résultats montrent que :

- toutes les concentrations obtenues sont inférieures aux valeurs de référence de l'environnement local témoin¹¹ et aux valeurs limites des eaux destinées à la consommation humaine ;

¹⁰ Utilisation du modèle de nappe MARTHE réalisé par le BRGM pour la nappe d'Alsace.

¹¹ C'est-à-dire les concentrations observées dans la nappe avant la création du stockage.

- les concentrations les plus élevées sont obtenues pour la couche profonde de la nappe parce qu'elle s'écoule plus lentement (elles sont 4 à 10 fois plus faibles dans la couche intermédiaire et environ 15 fois plus faibles dans la couche la plus proche de la surface).

Concrètement cela signifie que, si elle se produisait, la sortie de saumure polluée n'engendrerait pas d'augmentation significative des concentrations de la nappe. Pour la majorité des polluants, les valeurs sont même très éloignées des valeurs-guides :

- pour le cuivre, le baryum, le plomb, il faudrait que les concentrations soient plusieurs milliards de fois plus élevées pour que la nappe ne soit pas potable ;
- le facteur de sécurité est de plusieurs millions pour le nickel, l'arsenic ; il est de plusieurs centaines de milliers pour l'antimoine, de plusieurs milliers pour les cyanures et de plusieurs centaines pour le chrome.

Si aucun déstockage n'est réalisé, pour le mercure le facteur de sécurité serait de 20 dans la couche inférieure par rapport à la norme pour l'eau potable et 150 dans la couche supérieure de la nappe alluviale. Le déstockage actuellement visé (93 à 95 % de la masse initiale de mercure en moins) permet d'aboutir à des concentrations 300 fois plus faibles que la norme de potabilité dans la couche inférieure (et 2000 fois plus faibles dans la couche supérieure).

Le cadmium est un élément particulier puisque le déstockage du mercure accroît ses possibilités de mise en solution. Dans la nappe, en cas de sortie de saumure, le facteur de sécurité par rapport à la norme de potabilité passe de plusieurs centaines de milliers sans déstockage à 300 si le mercure est déstocké à 93% (4000 si le déstockage est de 56%).

Ces calculs d'impact montrent que même à une distance relativement réduite des puits de mine (le calcul est fait dans un carré¹² de 125 m x 125 m), les concentrations dans la nappe sont inférieures aux normes de potabilité. Le tiers-expert a souhaité que les calculs soient également effectués à quelques mètres des puits, bien qu'il soit prévu d'inscrire un périmètre de sécurité autour des puits de mine dans les documents administratifs liés à ces terrains. Les facteurs de sécurité sont tels - par rapport aux limites de dégradation de la qualité de la nappe - que les conclusions ne changent pas (concentrations engendrées dans la nappe < aux valeurs-seuils) mais pour le mercure l'INERIS* a présenté, à la demande du tiers-expert des « panaches » de dispersion dans la nappe à l'aval immédiat des puits de mine (présentation, centrée sur les puits, des panaches tracés jusqu'à présent à l'échelle du modèle BRGM).

Trois cas sont étudiés : en l'absence de déstockage (« sans retrait »), avec un déstockage de 56% du mercure et avec un déstockage de 93% du mercure.

Ces zooms autour des puits de mine sont présentés en annexe 7. Ils concernent uniquement la couche la plus profonde de la nappe et montrent que :

- il faut augmenter fortement l'échelle de représentation des isovaleurs (maille de 2 m par 2 m) pour faire apparaître des concentrations qui dépassent les normes de référence (environnement local témoin et norme de potabilité) ;
- dans la couche profonde de la nappe, les concentrations de mercure dépasseraient la valeur de référence de l'environnement témoin et celle de potabilité, dans l'axe d'écoulement de la nappe à proximité des puits sur 15 à 150 m selon les hypothèses de déstockage retenues.

¹² Qui correspond à la maille du modèle du BRGM

La situation la plus défavorable apparaîtrait autour du puits Amélie 2 avec des teneurs localement supérieures à 1 µg/l sur 150 m en aval du puits en l'absence de déstockage (à noter que cette situation majorante n'est déjà plus envisageable puisque, actuellement, déjà 20% du mercure a été déstocké). Le déstockage permet de réduire significativement le dépassement de norme en mercure : les concentrations ne dépasseraient alors la norme de potabilité que sur un secteur réduit (100 m au maximum pour un déstockage de 93% du mercure).

En revanche, pour les puits Amélie 1, Joseph et Else, les panaches supérieures à la norme de potabilité sont plus courts. En l'absence de déstockage ils font environ 80 m de longueur et seulement 50 m pour le puits Else, Avec un déstockage de 93% du mercure, les panaches sont réduits à une vingtaine de mètres pour ces trois puits.

Dans tous les cas, ces représentations concernent la couche inférieure de la nappe, les situations sont plus favorables dans les deux couches moins profondes de la nappe (les dilutions sont 4 à 8 fois plus importantes dans la couche 2 et 10 à 20 fois dans la couche 1). Dans ces conditions, la représentation de panaches, portant sur des concentrations non mesurables, n'aurait plus de réelle signification.

Par ailleurs, le tiers-expert K-Utech [A4] rappelle que le mercure pourrait ne pas passer totalement en solution du fait de la présence de cyanures solubles, les concentrations présentées par l'INERIS* sont donc potentiellement sur-estimées.

De même, il signale que les refiorms (résidus d'incinération de déchets ménagers), qui constituent la moitié des déchets du stockage, ont une capacité forte de rétention de fluide et pourraient piéger, en souterrain, dans leur structure un volume de saumure pollué (ordre de grandeur 3000 m³) malgré la pression du fluage.

Comme indiqué dans le dossier de 2015, le confinement naturel géologique et le confinement assuré par le remblayage et par les barrières de faible perméabilité* permettront de retarder le contact éventuel de la saumure avec les déchets et la lente expulsion de saumure polluée en cas de poursuite du fluage. Ainsi, même si de la saumure atteint les déchets, les débits qui pourraient être mobilisés ne seront qu'extrêmement faibles.

En utilisant le modèle hydrogéologique du BRGM, l'INERIS* démontre dans son étude de 2012 [69] qu'une sortie de saumure au bout de 1000 ans¹³ n'engendrerait une augmentation de concentration dans la nappe que sur un périmètre extrêmement restreint.

Aucun dépassement des normes (environnement local et potabilité) n'apparaît dans ce modèle, même dans la couche la plus profonde qui est le siège d'une plus faible dilution et les facteurs de sécurité par rapport à la norme de potabilité sont élevés (au minimum 20 pour le mercure et 300 à plusieurs milliards suivant les éléments, même sans déstockage).

¹³ Hypothèse défavorable car ITASCA et le tiers-expert n'envisagent pas une sortie de saumure avant 1700 ans.

Dans son étude de 2016, l'INERIS [A7] fait un zoom précis autour des puits, pour l'élément mercure, dans la couche profonde de la nappe, qui permet de visualiser l'extension du panache supérieur à la norme de potabilité (150 m en l'absence de déstockage et 100 m pour un déstockage de 93% du mercure au point le plus défavorable Amélie 2).

Au total, même pour le scénario défavorable d'une sortie de saumure polluée au bout de 1000 ans, les concentrations dans la nappe seront largement inférieures aux normes de potabilité au-delà de 150 m des puits, pour tous les éléments, quelles que soient les hypothèses de déstockage.

5. Synthèse et variabilité des résultats

Une migration de polluants depuis le stockage souterrain jusque dans la nappe alluviale ne peut apparaître qu'au terme de plusieurs étapes :

- il faut d'abord qu'un liquide atteigne les déchets (qui sont originellement secs et solides) pour les rendre mobilisables par dissolution,
- il faut ensuite qu'une force (contraire à la gravité) pousse le liquide pollué jusqu'en surface, cette force existe potentiellement du fait du fluage du sel.

C'est le rétrécissement des galeries autour des remblais et des déchets (sous l'effet du fluage du sel) qui définit le volume de saumure mobilisable. Les hypothèses peuvent varier, mais les scientifiques les plus expérimentés dans le domaine s'appuient, pour quantifier le phénomène, sur les lois de comportement du sel et des matériaux de remplissage des galeries, qui contribueront à soutenir les parois des galeries du stockage. Conscients des incertitudes sur ces quantifications et parce que les lois de comportement sont des équations complexes, les chiffres ne sont pas annoncés avec précision mais arrondis de façon sécuritaire.

En prenant appui sur différents modèles, les géomécaniciens concluent que la vitesse actuelle de réduction des vides (la convergence, qui est le moteur qui fait circuler la saumure) sera divisée par 100 d'ici 200 à 300 ans, et par 1000 d'ici 1000 à 2000 ans. Ce ralentissement dans le temps est le facteur favorable qui permet de prévoir une évolution des phénomènes de moins en moins propice à une sortie de saumure au fil du temps.

Plus le temps passe moins le fluage (l'auto cicatrisation naturelle des terrains) peut mobiliser de saumure polluée. Or l'ennoyage de la mine n'est envisagé qu'à vitesse très lente. Le temps pour atteindre un ennoyage total est fonction du volume à remplir et du débit d'alimentation. L'ancienne mine de potasse a laissé des vides en souterrain et, même si les chiffres sont donnés avec des fourchettes variables selon les experts, ces vides (étendus sur une grande surface) représentent plusieurs dizaines de millions de m³ à remplir avant que la saumure ne parvienne à la hauteur du stockage. Par ailleurs, les débits qui peuvent alimenter ce volume ne sont, d'avis unanime, que de quelques milliers de m³ par an puisqu'ils proviendraient des puits de mine remblayés et que tout a été mis en œuvre pour réduire au maximum les infiltrations d'eau.

Comme le stockage est en position haute dans la mine Amélie, il ne sera atteint par la saumure qu'à la fin de l'ennoyage (hypothèse admise par l'INERIS* : 240 ans environ, hypothèse pessimiste¹⁴ de la tierce-expertise : 70 ans).

Comme toutes les galeries d'accès au stockage seront équipées de barrières de confinement avec noyau* de faible perméabilité*, et que le comportement du sel montre un effet de cicatrisation autour de ces barrages, plus le temps passe plus l'étanchéité du confinement s'accroîtra. Les matériaux qui seront employés pour assurer la faible perméabilité* des noyaux* des ouvrages de confinement sont ceux dédiés aux ouvrages d'étanchéité les plus élaborés (tels qu'ils peuvent déjà être mis en place dans des stockages allemands). Cette faible perméabilité*, associée à une longueur de 5 ou 6 mètres est conforme au double objectif de retarder la percolation de la saumure à travers les barrières et de retarder l'ennoyage complet du stockage.

¹⁴ Cette hypothèse est pessimiste car plus l'ennoyage est rapide et plus les ouvrages de confinement du stockage seront atteints rapidement par la saumure

Les remblais dans le stockage assureront également ce rôle : en étant étanches ils empêcheront la saumure d'atteindre les déchets, dans le cas contraire, leurs vides interstitiels devront être remplis par la saumure (ce qui se fera très lentement).

Les modélisations de ces phénomènes successifs aboutissent à des durées de plusieurs siècles pour envoyer le stockage. A ces échéances, le fluage du sel autour du stockage ne pourra repousser vers la mine que des débits extrêmement faibles de saumure polluée. Dès le début de ses études, l'INERIS* a indiqué que le confinement devait être conçu pour tenir un objectif de sortie de saumure après 1000 ans, objectif atteignable dans l'état de l'art actuel avec différents types de matériaux disponibles présentant des perméabilités inférieures à 1.10^{-18} m^2 .

En cas de sortie de saumure du stockage vers la mine, les polluants pourraient remonter, poussés par le même phénomène de fluage, jusque dans la nappe alluviale par l'intermédiaire des puits de mine (en admettant que la pression de la saumure polluée soit suffisante). L'évaluation de l'impact potentiel de cette sortie de saumure sur la qualité de la nappe nécessite au préalable la quantification du fluage résiduel des galeries du stockage (avec des lois de géomécanique comme indiqué plus haut) et l'évaluation des quantités de contaminants en solution dans la saumure polluée.

La marge d'erreur qui existe sur les quantités de contaminants stockés n'est pas très significative (ces dernières ont été réévaluées en 2016 à partir de nouvelles analyses très précises). Par contre, il est impossible d'évaluer la quantité de déchets qui sera atteinte par la saumure. Par sécurité, les effets d'un contact de la saumure avec TOUS les déchets ont été pris en compte dans la définition des concentrations de la saumure polluée au sein du stockage (terme-source).

Les différentes études concernant le terme-source convergent vers les mêmes résultats : la plupart des éléments sont en quantités insuffisantes pour polluer la nappe eu égard aux faibles débits potentiels pouvant sortir par fluage du périmètre confiné (toujours évalué à quelques m^3/an) et aux dilutions importantes qui interviennent dans la mine, puis dans la nappe (débit de la nappe évalué à plusieurs millions de m^3/an dans chaque maille du modèle hydrodynamique).

L'INERIS* a réalisé des calculs de concentration dans la nappe, en cas de sortie de saumure, à échéance 1000 ans¹⁵ et à l'échelle d'un maillage de 125 m x 125 m (modèle mathématique créé par le BRGM pour la plaine d'Alsace). Le résultat de ces calculs ne montre aucun dépassement des normes de référence retenues dans la nappe, même dans les mailles de calcul les plus proches des puits de mine.

Les écarts entre normes de références et concentrations engendrées dans la nappe au terme des calculs d'impact sont très importants. En comparaison des limites de qualité, ces facteurs de sécurité sont supérieurs à 100 et atteignent plusieurs milliards pour certains éléments étudiés, excepté pour le mercure qui présente un facteur de sécurité plus faible (au minimum il est de 20 dans la couche la plus profonde de la nappe en l'absence de déstockage, ce facteur de sécurité passe à 320 avec déstockage de 93% du mercure, données 2016). En comparaison des valeurs de référence de l'« environnement local témoin » (parfois plus sévère que la limite de qualité liée à la potabilité), le constat est similaire avec des facteurs de sécurité très importants, les plus faibles étant attribués au mercure (au minimum le facteur de sécurité est de 4 dans la couche la plus profonde de la

¹⁵ Bien que les modèles indiquent que le phénomène de confinement ira bien au-delà de cette durée (minimum envisagé 1700 ans), l'INERIS* a gardé cette échéance comme référence dans sa description des concentrations engendrées dans la nappe en cas de sortie de saumure polluée.

nappe en l'absence de déstockage, ce facteur de sécurité passe à 63 avec déstockage de 93% du mercure, données 2016).

Etant donné le nombre d'étapes successives pour aboutir à une sortie de polluant dans la nappe, il existe une marge d'incertitude sur les concentrations annoncées (dans le dossier 2015, les concentrations en mercure était par exemple deux fois plus élevées que celles présentées précédemment). Ce qui est important ce ne sont pas les valeurs elles-mêmes mais les facteurs de sécurité qui en résultent par rapport à la norme de référence. Dans le cas présent, les facteurs de sécurité résultants sont élevés.

Comme les concentrations peuvent être plus élevées que la concentration moyenne calculée en certains points à l'intérieur de ce champ de 125 m par 125 m, l'INERIS* a préconisé une zone de sécurité autour des puits de mine. Pour préciser le phénomène, le tiers-expert a demandé des calculs à une échelle plus fine. Une représentation spécifique des concentrations en mercure a donc été réalisée, avec un maillage de 2 m par 2 m, dans la couche profonde de la nappe (situation la plus défavorable mise en évidence par les calculs précédents). Le résultat est un dépassement de la norme de potabilité et de la norme « environnement local témoin » sur des secteurs très limités en aval des puits de mine. En l'absence de déstockage, ces « panaches » atteindraient, au maximum, et uniquement 150 m en l'absence de déstockage et 100 m pour un déstockage de 93% du mercure.

Le tiers expert avait précisé que, concernant le mercure, les concentrations calculées par l'INERIS correspondent bien à l'impact maximum qui peut avoir lieu, le mercure pouvant ne passer que partiellement en solution du fait des cyanures.

Pour conforter son analyse, l'INERIS* a également travaillé sur des scénarios de confinement moins efficaces avec des sorties de saumure à plus courtes échéances (300 ans et 500 ans), démontrant que même dans ces cas, les concentrations en mercure dans la nappe ne pourraient que très localement dépasser les références retenues et en aucun cas mener à une pollution généralisée de la nappe d'Alsace. Ces scénarios sont considérés comme très peu probables par les autres experts dès lors qu'un confinement est mis en place. Le tableau ci-dessous récapitule ainsi les résultats des différents scénarios présentés dans le dossier de 2015 et mis à jour avec le nouveau terme source.

| "worst-case" (pire cas : l'élément MERCURE (Hg) dans la couche profonde (C3) de la nappe) | | | | |
|--|--|-------|--|--|
| Scénario de sortie par les 5 puits de la mine Amélie, situation la plus défavorable : puits Amélie 1 | | | | |
| | | | Dossier 2015 maille 125 x 125 m, concentration Hg (µg/l) | Ajustement 2016 maille 125 x 125 m concentration Hg (µg/l) |
| | <i>Rappel norme "Environnement Local Témoin"</i> | | 0,2 | 0,2 |
| | <i>Rappel norme "Limite de Qualité"</i> | | 1 | 1 |
| Sans déstockage Hg | Sortie polluant à 300 ans | p 151 | 2,4 | 1,222* |
| | Sortie polluant à 500 ans | p 151 | 0,98 | 0,499* |
| | Sortie polluant à 1000 ans | p 151 | 0,1 | p 11 [A7] 0,0509 |
| Déstockage 56% Hg | Sortie polluant à 300 ans | | 1,056* | 0,580* |
| | Sortie polluant à 500 ans | | 0,431* | 0,216* |
| | Sortie polluant à 1000 ans | | 0,004* | p 11 [A7] 0,0246 |
| Déstockage 93% Hg | Sortie polluant à 300 ans | | 0,168* | 0,092* |
| | Sortie polluant à 500 ans | | 0,069* | 0,038* |
| | Sortie polluant à 1000 ans | p 108 | 0,0072 | p 11 [A7] 0,00315 |

p _ : page du dossier 2015 ou du rapport INERIS 2016 [A7] dans laquelle on retrouve cette donnée

Code couleur

| | |
|---|--|
| Concentration dans la nappe < aux 2 normes (environnement local témoin et limite de qualité) | |
| Concentration dans la nappe < à la limite de qualité mais > à la norme environnement local témoin | |
| Concentration dans la nappe > à la limite de qualité | |

Les concentrations 2016 dans la nappe (maille 125 x 125) sont environ 2 fois plus faibles que ce qui a été calculé en 2015, puisque les masses de mercure prises en compte ont été réajustées avec les analyses récentes qui aboutissent à des résultats deux fois plus faibles (données masse de mercure sans déstockage, en 2015 : 51 t, en 2016 : 28 t soit 1,82 fois moins).

Les concentrations pour le scénario "déstockage 56%" correspond à $1-0,56=0,44$ fois les concentrations du scénario sans déstockage. Les concentrations pour le scénario "déstockage 93%" correspond à $1-0,93=0,07$ fois les concentrations du scénario sans déstockage.

Ces certains chiffres sont donc calculés ici par simple règle de proportionnalité (chiffres avec *).

L'évolution au fil du temps (scénario 300 ans, 500 ans et 1000 ans) est décroissante de façon non linéaire, elle a été modélisée initialement par l'INERIS.

Tableau 3 : "worst-case", l'élément Hg dans la couche profonde de la nappe alluviale.

L'hypothèse retenue par le tiers-expert en géomécanique [A5] est que les barrières et le fluage du sel conduiront rapidement (en moins de 100 ans) à un confinement efficace et durable du site, s'améliorant de plus avec le temps. Les simulations réalisées par l'INERIS* peuvent donc être considérées comme les scénarios les plus pénalisants envisageables et dotés d'une possibilité de réalisation extrêmement faible.

6. Mesures de surveillance et possibilités d'intervention

Le tiers-expert définit dans son rapport géomécanique [A5] **le concept de « stockage-confinement » qui consiste à isoler de manière définitive et irréversible des substances toxiques de la biosphère, sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à un traitement ou à une surveillance ultérieure, une fois les opérations de confinement et d'isolation du stockage réalisées.**

Comme les milieux concernés présentent de très faibles perméabilités*, et comme le fluage du sel est un phénomène extrêmement lent, les études prennent en compte des échelles de temps extrêmement longues. Les phénomènes décrits se produiront en plusieurs siècles et il est donc impossible de mettre en place dès aujourd'hui une surveillance pour de telles échéances. Par contre, tout sera fait, jusqu'à la fermeture du site pour s'assurer que les points importants du dossier sont validés, à savoir :

- s'assurer que l'ennoyage du secteur minier dans lequel se situe le stockage se fera en plusieurs dizaines d'années, temps nécessaire pour que les terrains entourant les barrières de faible perméabilité* retrouvent leur intégrité et leur étanchéité (cf. forage VAPB2) ;
- contrôler la mise en œuvre des barrières et du remblayage pour atteindre les performances attendues.

Le déstockage des déchets mercuriels complète ces mesures de maîtrise du risque. Au vu des difficultés pressenties pour sortir les déchets, les MDPa avaient annoncé initialement que l'objectif de déstockage de 93% du mercure ne serait peut-être pas atteint. Tout sera fait pour atteindre ce but, considéré comme une sécurité complémentaire. Actuellement 5,6 t de mercure ont été extraites ce qui correspond à 22% de la quantité totale présente).

6.1 Suivi de l'ennoyage

Le forage VAPB2 a été foré dans le point bas du compartiment minier Amélie avec lequel le stockage est en lien (Figure 11). Il est donc dans une position optimale pour suivre l'ennoyage de ce compartiment.

Le forage a été réalisé en 2 étapes (2013 puis 2015) suite à des problèmes techniques liés aux grandes profondeurs à atteindre (900 mètres) et à la nature éboulées des matériaux atteints en fin de foration. Il n'a rencontré aucune venue d'eau dans la zone salifère au-dessus des deux couches de potasse exploitées.

Il a recoupé des terrains fracturés à la traversée du champ d'exploitation de la couche supérieure de potasse et de la couche inférieure. L'imagerie des parois permet d'estimer les vides résiduels à 10% environ dans ces secteurs exploités.

La présence de saumure dans les vides de la couche inférieure a été constatée. Vu la cote de la saumure, et l'emprise équivalente des terrains de foudroyage « noyés », le volume de saumure correspondant est évalué à environ 17 000 m³.

Depuis l'achèvement de ce forage en octobre 2015, le niveau de saumure n'est pas monté (suivi de novembre 2015 à juin 2016) alors que les hypothèses les plus rapides concernant l'ennoyage conduiraient à observer une montée du niveau d'au moins 2 m en 6 mois. Cette stabilité observée pourrait permettre d'écarter les hypothèses les plus défavorables d'un ennoyage « rapide »¹⁶. Il faut toutefois éviter les conclusions trop hâtives et retenir que le forage permettra de suivre l'ennoyage de la Mine Amélie dans les prochaines années, avant mise en œuvre du confinement définitif. Le tiers-expert [A2], au vu des résultats obtenus avec ce forage, a recommandé de réaliser un deuxième forage au point bas du secteur Ouest.

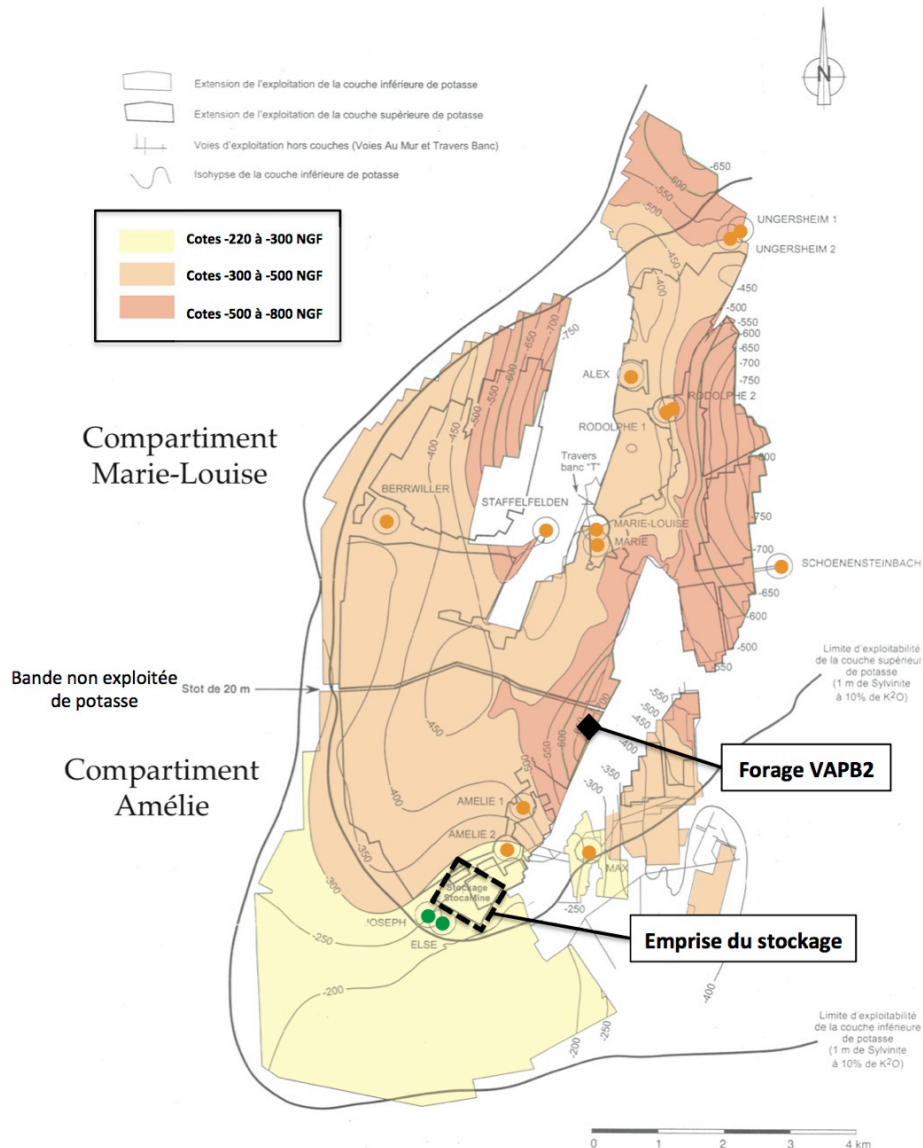
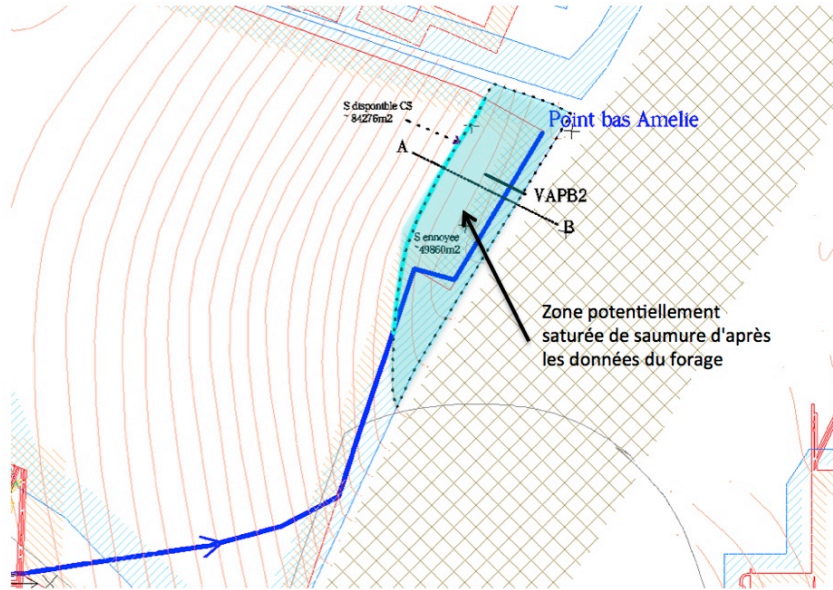


Figure 11 : Localisation du forage VAPB2.

¹⁶ Il se peut également que la saumure de la couche inférieure soit en train de pénétrer dans la couche supérieure par l'intermédiaire du forage (ce qui confirmerait le caractère étanche des 20 mètres de sel entre deux zones exploitées), dans ce cas il faudra attendre le remplissage de la couche supérieure jusqu'au même niveau que la couche inférieure pour observer une reprise de la montée du niveau de saumure.

Extrait des plans d'exploitation des 2 couches de potasse



Représentation en coupe

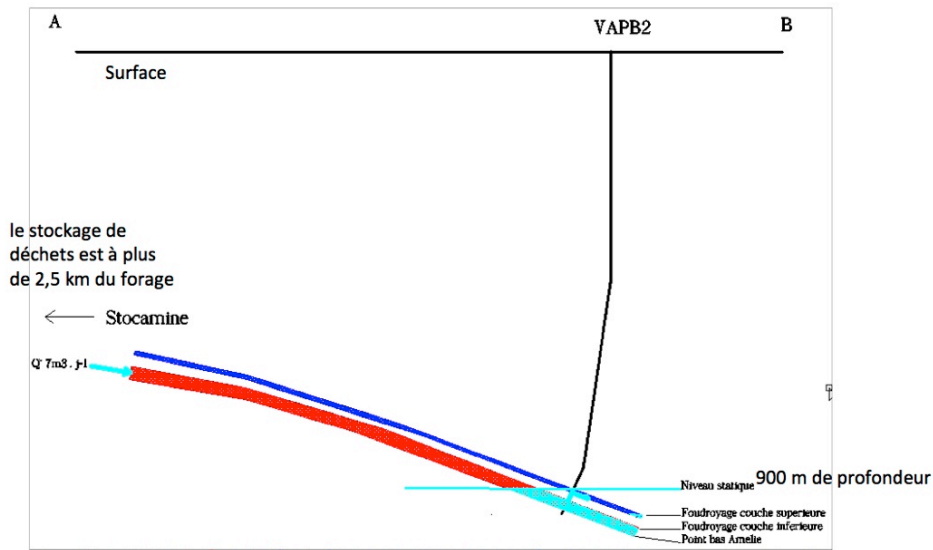


Figure 12 : Forage VAPB2 et secteur noyé.

La durée de l'envoyage de la mine de potasse est un paramètre très important. Jusqu'à présent, seules des évaluations théoriques ont été proposées. Le forage VAPB2 réalisé en 2015 permet une vision plus concrète du phénomène d'envoyage et en confirme la lenteur. Un second forage sera à réaliser au bas du secteur Ouest.

6.2 Suivi des niveaux en surface

Le suivi du niveau du sol en surface se poursuivra. Ces données seront utilisées pour tracer des courbes d'envoyage de la mine de potasse selon différentes hypothèses de vides résiduels dans la mine et de débit d'alimentation afin de vérifier que les durées annoncées pour l'envoyage dans les différentes études sont bien cohérentes avec les observations de ces prochaines années.

6.3 Contrôles de mise en œuvre du confinement

Le planning ci-dessous présente les étapes prévues avant mise en œuvre du confinement, avec notamment la poursuite des études sur les matériaux, des tests en place, et une présentation de la conception définitive du dispositif de confinement / remblayage à l'administration ou a minima à la CSS (Commission de Suivi du Site, constituée de représentants de l'Etat, des collectivités territoriales, des riverains et associations, des salariés et de l'exploitant).

Les étapes de la fermeture

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|---|------|------------------------------|---|--|--|------|------|--|------|------------------------|
| Dépôt et instruction du dossier de fermeture | | Dépôt du dossier Avis A.E | Tierce-expertise Enquête publique | Arrêté Préfectoral | | | | | | |
| Déstockage des déchets mercuriels dans les Blocs 21, 12 et 23 | | | | Fin envisagée (variable selon contraintes de terrain) | | | | | | |
| Pilotes de confinement (Tests = construction de "pilotes" dans les galeries) | | Etudes | Construction | Suivis / contrôles | | | | | | |
| Forage profond atteignant les travaux miniers MDPA | | Travaux | Suivi du niveau de saumure dans l'ouvrage (mine MDPA) | | | | | | | |
| Construction des barrages de confinement | | | Appel d'offre maîtrise d'œuvre Préparation (études / tests) | Présentation conception définitive | | | | Travaux + contrôles | | |
| Remblayage du Bloc 15, des blocs non stockés et des galeries d'accès | | | Tests matériaux et méthodes | | Présentation conception définitive | | | Travaux + contrôles | | |
| Fermeture des puits Joseph et Else | | | | | | | | Présentation conception définitive | | Travaux + contrôles |

Figure 13 : Planning de la fermeture du site.

La mise en œuvre du confinement s'accompagnera de tests et contrôles qualité à toutes les étapes.

Le confinement du site est planifié au cours des années 2018-2021. Les 2 années à venir permettront de faire (en parallèle de la poursuite du déstockage) les tests in situ* nécessaires à la validation des matériaux et des méthodes.

6.4 Réglementation, surveillance et moyens d'intervention

Le Département de Prévention et de Sécurité Minière du BRGM assure, pour le compte de la DREAL, une surveillance des anciens puits de mine remblayés des Mines de Potasse d'Alsace.

La réglementation impose que les projets tels que des prélèvements d'eau, ou des forages ne soient envisagés qu'après des études approfondies de l'environnement dans lesquels ils s'inscrivent. Ces études prendront donc en compte la présence des puits, de l'ancienne mine et du stockage de déchets ultimes, inscrite dans tous les documents d'urbanisme et dans les bases de données du sous-sol.

Les MDPA sollicitent les restrictions suivantes :

- interdiction de forages de plus de 300 mètres à l'aplomb et à proximité immédiate du site de stockage souterrain ;
- restriction d'usage de la nappe alluviale dans un périmètre de 125 m autour des puits de mine (pouvant être réduit si un suivi précis de la qualité de l'eau est instauré).

Indépendamment de la présence du stockage, l'envoyage de la mine de potasse et la poursuite du fluage souterrain peuvent entraîner une remontée de saumure le long des puits de mine. Si cela se produit, le phénomène engendrera une salinisation localisée de la nappe alluviale.

Ceci ne passera pas inaperçu s'il y a des usages en aval des puits de mine et conduira forcément à une surveillance accrue de la qualité de l'eau (permettant de vérifier l'absence de contaminant).

7. Conclusion

Le projet faisant l'objet du dossier actuellement à l'instruction consiste à isoler de manière définitive et irréversible les substances toxiques stockées en souterrain dans les galeries de StocaMine.

Les géotechniciens indiquent que le stockage est implanté dans un massif de sel, à 550 m de profondeur, dans un site favorable et que l'aménagement réalisé (creusement de galeries pour le stockage séparées par des piliers larges de 20 mètres) est stable et peut être rendu étanche par la mise en place de bouchons dans les galeries d'accès.

Un confinement élaboré est prévu, avec des barrières comportant un noyau* de très faible perméabilité* dans toutes les galeries d'accès du stockage.

Dans le stockage lui-même, il est prévu de mettre en place des remblais dans les blocs de stockage ne contenant pas de déchets, afin d'assurer la stabilité d'ensemble de la zone qui sera confinée.

L'objectif du confinement est de retarder d'au moins 1000 ans la sortie de saumure polluée du périmètre confiné du stockage.

La tierce-expertise réalisée suite au dépôt du dossier en 2015 confirme que les modalités envisagées par les MDPA sont adaptées pour retarder le phénomène de mobilisation de saumure polluée bien au-delà de 1000 ans. En effet, les calculs réalisés mettent en évidence une émergence potentielle depuis le stockage au bout de 1 700 à 20 000 ans suivant les hypothèses retenues en particulier pour la porosité des matériaux de remblai mis en place dans les galeries non utilisées.

Le tiers-expert géomécancien [A5] démontre que le « blocage » du phénomène pourrait se produire et empêcher les transferts de saumure au travers des barrières de confinement car les pertes de charge et forces de tension superficielles au sein des matériaux étanches seraient plus fortes que la pression lithostatique susceptible de mettre en mouvement la saumure.

De façon générale, la tierce-expertise [A2] valide les hypothèses et résultats des études présentées dans le dossier déposé ; les compléments d'étude ont été réalisés et ne remettent pas en cause les conclusions existantes.

Bibliographie (postérieure à janvier 2015)

- [A1] Avis délibéré de l'Autorité environnementale sur la prolongation pour une durée illimitée du stockage souterrain de produits dangereux sur la commune de Wittelsheim – n°Ae : 2015-58 – 9 septembre 2015
- [A2] 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 – Artélia, K-UTEC, IfG– Avril 2016
- [A3] Dossier de prolongation pour une durée illimitée de l'autorisation du 03 février 1997 relative au stockage souterrain de produits dangereux non radioactifs – Tierce expertise – Rapport hydraulique – Artélia, K-UTEC, IfG– Mai 2016
- [A4] Evaluation des données, rapports et expertises d'inventaire existants pour les substances dangereuses stockées dans l'ancien site de stockage souterrain de déchets STOCAMINE et leur potentiel de mobilisation après confinement / la fermeture du site minier – K-UTEC – 2 mai 2016
- [A5] Dossier de prolongation pour une durée illimitée de l'autorisation du 03 février 1997 relative au stockage souterrain de produits dangereux non radioactifs – Tierce expertise – Rapport géomécanique – Artélia, K-UTEC, IfG– Mai 2016
- [A6] 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 – Note relative à la réévaluation des quantités en contaminants – Artélia, K-UTEC, IfG– Avril 2016
- [A7] Réponse aux sollicitations de l'Autorité Environnementale et du tiers expert – INERIS, rapport d'étude – DRS-16-157108-05017A – 1^{er} juin 2016
- [A8] Evaluation des flux potentiels de saumure contaminée en considérant le remplissage des blocs vides du stockage avec des havrils de sel et des barrages en béton spécial – ITASCA - Rapport 16R-006A1 – 3 juin 2016
- [A9] Note de synthèse sur les observations réalisées sur le puits VA PB2 – MDPA
- [A10] Recherche des mécanismes des fractures observées dans le stockage de StocaMine à partir de modélisations 3D – INERIS – DRS-15-152897-05557A – 15 juin 2016
- [A11] Constat d'experts concernant StocaMine – MDPA Wittelsheim. Résultat des mesures de contraintes du terrain au moyen de la fracturation hydraulique dans les zones de déstockage des colis situés dans les blocs 12, 21 et 23 – K-Utec – 19 novembre 2015 (traduction)
- [A12] Analyse déchet B0, échantillon n°1 (réf. Dr. Marx : 16-03696) – DAkkS, Dr. Marx – 4 mai 2016
- [A13] Constat d'experts concernant StocaMine – MDPA Wittelsheim. Evaluation géomécanique de la tenue des toits et des parements dans le contexte du déstockage des déchets dans le Bloc 21 – K-Utec – 15 septembre 2015
- [A14] Constat d'experts concernant StocaMine – MDPA Wittelsheim. Evaluation géomécanique de la tenue des toits et des parements dans le contexte du déstockage des déchets dans le Bloc 21 – K-Utec – 25 septembre 2015 (traduction)

ANNEXES

Annexe 1

Nomenclature ICPE

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

Toute exploitation industrielle ou agricole susceptible de créer des risques ou de provoquer des pollutions ou nuisances, notamment pour la sécurité et la santé des riverains est une installation classée.

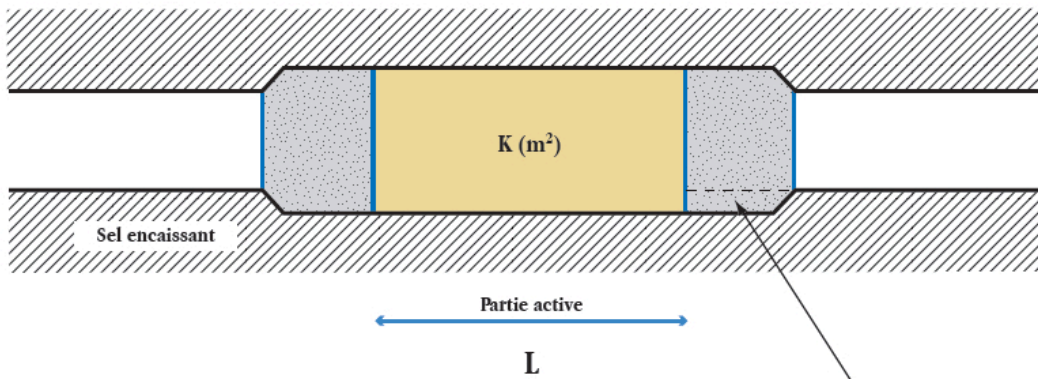
A sa création le stockage était référencé comme ICPE à la rubrique 167. Dans le cadre des évolutions de la nomenclature, l'activité est maintenant référencée dans la rubrique 3660.

- **Activités IED** (émissions industrielles)
- Stockage souterrain de déchets dangereux
- **Rubrique 3660 : Stockage souterrain de déchets dangereux, avec une capacité totale supérieure à 50 tonnes**
- Rubrique créée par le Décret n° 2013-375 du 2 mai 2013
- **Régime autorisation** – Affichage : 3 km

Annexe 2

Exemple de barrières de confinement

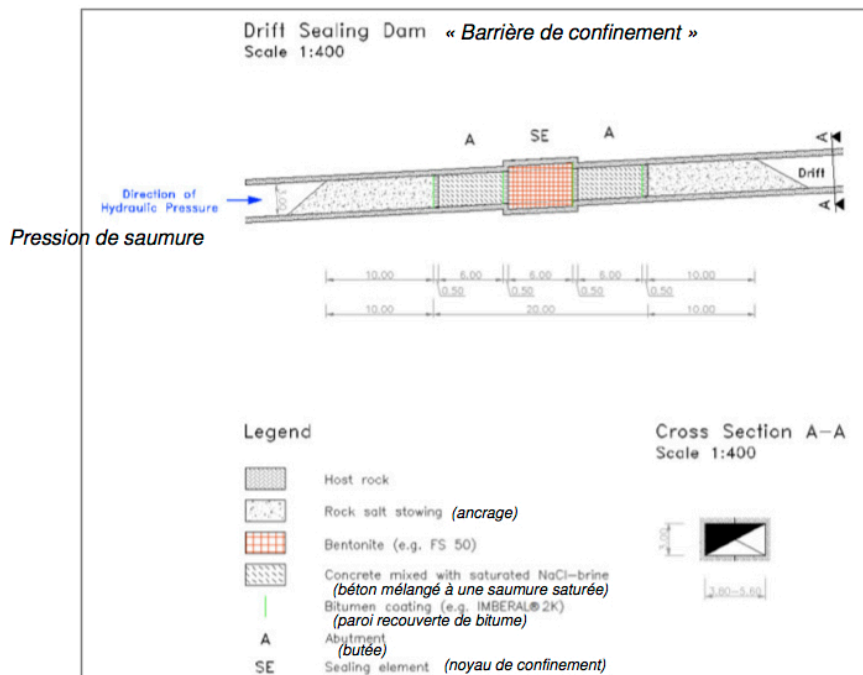
Schéma de principe de conception des barrières à faible perméabilité



- Partie active de la barrière constituée de matériau faiblement perméable (K) sur une longueur L permettant de retarder l'entrée de la saumure dans le stockage et la sortie potentielle de la saumure polluée du stockage sous l'effet de la convergence des terrains.

- Partie assurant le maintien de la géométrie de la partie active de la barrière dans la galerie (et par conséquent son objectif de performance).

Partie sur-excavée au droit des barrières pour éliminer la zone endommagée autour de la galerie. L'extension de la zone sera évaluée par des travaux de reconnaissances spécifiques (endoscopies et mesures de perméabilité).

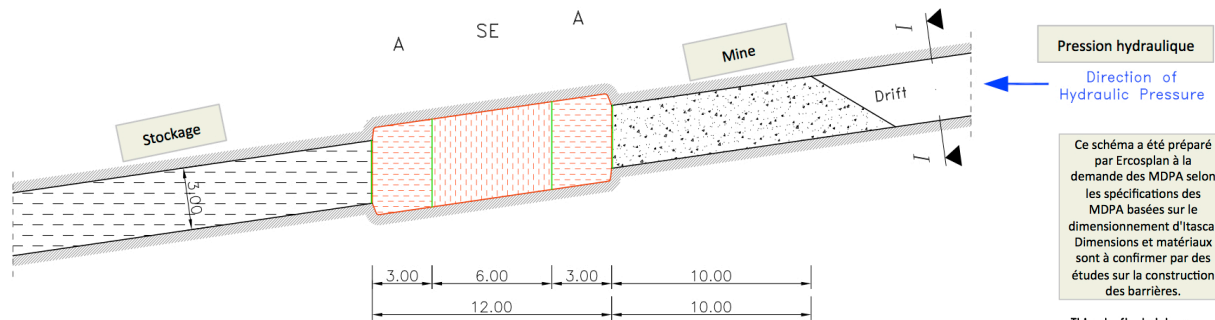


Exemple de barrière de confinement (ERCOSPLAN) avec noyau de bentonite (argile gonflante)

Schéma issu des dernières études en cours :

Drift Sealing Dam
 Scale 1:200

Coupe-type transversale d'une barrière de confinement (projet MDP)



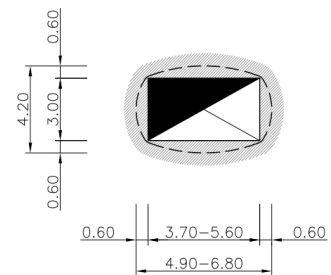
Ce schéma a été préparé par Ercosplan à la demande des MDPA selon les spécifications des MDPA basées sur le dimensionnement d'Itasca. Dimensions et matériaux sont à confirmer par des études sur la construction des barrières.

This draft sketch was prepared by ERCOSPLAN upon request from MDPA according to MDPA specifications based on dimensioning calculation results by ITASCA. Dimensions and materials are subject to confirmation by dam construction studies.

Legend

- Host rock **Roche hôte**
- Filling grout (e.g. lean concrete) **Remplissage par coulis (béton maigre)**
- Concrete with load bearing function only (e.g. salt concrete) **Béton avec fonction de portance uniquement (béton de sel)**
- Concrete mixed with saturated NaCl-brine (shotcrete or cast concrete technology currently tested) **Béton mélangé avec une saumure saturée en NaCl (à tester : technologie du béton projeté ou du béton coulé)**
- Rock salt stowing **Ancrage par sel gemme**
- Bitumen coating **Revêtement de bitume**
- A** Abutment **Butée**
- SE** Sealing element **Elément d'étanchéité**

Cross Section I-I
 Scale 1:200



Preliminary Conceptual Design
 for a Dam Construction
ENCLOSURE A
 Cross Section of the
 Drift Sealing Dam
 Construction
ERCOSPLAN
 Geotechnik und Bergbau

Source:
 ITASCA's report 14R-028A3E (10.03.2015, English version 17.04.2015)

Annexe 3

Extrait de [A2] Analyses récentes sur les échantillons de déchets.

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

Annexe 4

Précisions sur le déstockage et les difficultés rencontrées. MDPA Juin 2016 (Etat du stockage avant confinement)

Introduction :

Rappel sur le dossier déposé :

Le dossier de fermeture de StocaMine qui a été déposé répond au Code de l'environnement, il constitue la demande d'autorisation pour une durée illimitée du stockage de déchets ultimes. Il traite donc du confinement de StocaMine. Il ne concerne pas le déstockage mais celui-ci, suivant le niveau qu'il aura atteint, conditionnera l'inventaire des déchets présents dans le stockage avant confinement. Le déstockage demandé par l'Etat, actionnaire des MDPAs, vise à sortir 93% du mercure présent dans le stockage avec une solution de repli à 56%. Attention, les pourcentages évoqués concernent le mercure contenu dans le stockage et non la masse totale des déchets du stockage. Néanmoins, comme un arrêt du déstockage ne peut être exclu avant d'atteindre les 56%, le dossier a aussi présenté une hypothèse 0%, même si 2299t de déchets contenant 5,6t de mercure ont déjà été déstockés et qu'il n'en reste plus que 288t à sortir. Cette hypothèse de départ où aucun colis n'aurait été déstocké constitue une hypothèse majorante en termes d'impact sur l'environnement.

Rappel sur l'estimation des substances présentes :

La réévaluation des substances chimiques présentes dans le stockage, menée par les tiers experts, a montré qu'il y avait nettement moins de mercure qu'estimé initialement, certains déchets, principalement ceux qui sont très riches en arsenic, n'en contiennent même quasiment pas. Cette différence s'explique par le fait que la méthode de mesure utilisée par StocaMine à l'arrivée des déchets était semi-quantitative. L'INERIS avait établi une incertitude de 50% sur les quantités d'éléments chimiques retenues dans le dossier déposé. La nouvelle estimation, fondée sur des mesures faites par un laboratoire indépendant sous le contrôle du tiers expert, conclut à un tonnage total initial de mercure de 25,5t contre 51t auparavant. L'objectif maintenu de 93% de taux de déstockage du mercure conduit donc à réviser le projet de déstockage en l'adaptant aux zones effectivement les plus riches en mercure. Le périmètre du déstockage concerne 4 blocs sur les 9 stockés initialement, les blocs 21, 11, 12 et 23. Le nouveau zonage du déstockage conduit à modifier légèrement les objectifs initiaux de 56% et de 93%, car il ne s'agit pas de s'arrêter strictement sur ces pourcentages si d'autres déchets contenant du mercure sont directement accessibles, et ils correspondent en pratique à 57% et à 95%. Nous conserverons par la suite les appellations 56% et 93% pour les désigner. Le scénario 93% correspond finalement au confinement définitif de 1,3 t de mercure.

La recherche d'opérateurs expérimentés :

Les estimations de coûts présentées initialement lors de la concertation publique de 2014 s'appuyaient sur des performances de déstockage qui n'intégraient pas lors de leur étude une inconnue : les difficultés minières induites par le vieillissement du stockage. Ces estimations se sont appuyées sur ce qui avait été réalisé en 2001 par StocaMine et les essais réalisés en surface par le prestataire du déstockage. Elles ont donc été présentées comme volontairement optimistes par comparaison avec la solution de confinement global des déchets au fond.

Les deux photos ci-après (1 et 2, stockage initial de big bags et de fûts) montrent des galeries intactes sur un côté du stockage, permettant d'intervenir facilement.



Photo 1 : stockage initial de fûts



Photo 2 : stockage initial de big bags

A l'époque, il était encore possible d'imaginer qu'il suffisait d'aller chercher les palettes supportant les colis de déchets au moyen d'un chariot élévateur dans des galeries de stockage peu déformées, même si un recensement fait à partir des extrémités accessibles des galeries de stockage montrait déjà que dans deux tiers des cas des colis stockés étaient déjà au contact avec le plafond des galeries.

L'intervention d'un opérateur connaissant ce type de conditions et apte à extraire rapidement les colis avec des méthodes et des engins adaptés semblait également possible. StocaMine a fait appel au principal stockeur allemand de déchets dont il était annoncé qu'il maîtrisait ce type d'opérations. Après avoir procédé à des visites croisées entre StocaMine et ce stockeur de déchets ultimes, celui-ci a indiqué à StocaMine qu'il ne pratiquait pas ce type d'opérations. StocaMine a donc élargi son appel d'offres portant sur le déstockage à un maximum d'acteurs en procédant par un appel d'offres ouvert au niveau européen, tant en ce qui concerne l'opérateur du déstockage que le maître d'œuvre, et en mettant à disposition les études portant sur les précautions particulières à prendre pour un tel chantier. Par ailleurs, dans la mesure où la mine qui accueille le stockage présente un risque vis-à-vis du méthane (grisou), les MDPAs, après conduite d'une étude de dangers, ont sollicité le classement de la zone de déstockage en zone franche, afin d'y autoriser l'utilisation de matériels et d'engins qui ne soient pas de sécurité vis-à-vis du risque d'inflammation ou d'explosion de méthane. Ce classement a été autorisé à la condition d'une installation de nombreux capteurs pour détecter toute pollution de l'air minier, et de mettre en place un système d'alarme et de déclenchements automatiques.

Malgré cet élargissement de la zone franche (pas de nécessité de restreindre techniquement les matériels), seuls deux opérateurs ont répondu et les MDPAs ont retenu celui qui était le plus compétent dans ce type particulier de domaine souterrain.

Le renforcement des circuits logistiques :

Le déstockage partiel préalable a nécessité la mise en œuvre de gros travaux préparatoires ainsi que des moyens supplémentaires pour permettre au déstockage d'avoir lieu sur deux postes. Parmi ces travaux on peut citer :

- l'élargissement et le nivellement des galeries d'accès au stockage ont été réalisés (photos 3 et 4 pour permettre la circulation des engins adaptés au transport des colis reconditionnés vers le puits Joseph (photo 5). Il s'agit d'éviter tout risque de détérioration de ces colis lors du transport au fond,
- l'installation d'un réseau électrique plus puissant (photo 6) afin d'alimenter les installations de déstockage, ventilateurs, éclairages, machines,...).



Photo 3 : machine Paurat élargissant une galerie



Photo 4 : rabasseneuse aplanissant le sol



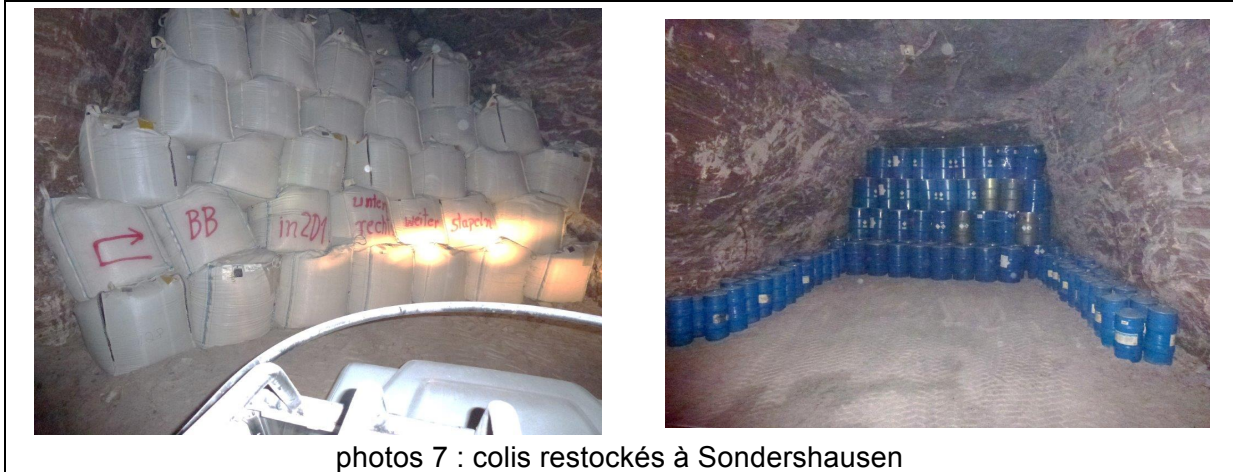
Photo 5 : engin de transport JPL



Photo 6 : salle électrique à proximité du stockage

Une base vie a été équipée au milieu du stockage pour organiser la décontamination des opérateurs et pour leur permettre de se reposer entre deux vacations et de s'équiper, Un autre marché européen a été passé pour choisir un opérateur chargé du traitement des colis sortant de StocaMine. Les solutions proposées consistent à les restocker dans une autre mine de sel en Allemagne.

Les spécifications de reconditionnement exigées par le transporteur et le restockeur ont été répercutées au niveau du déstockage et les dossiers d'autorisation auprès des administrations françaises et allemandes afin de transporter les déchets et de les restocker en Allemagne (photos 7) ont été rédigés.



L'exploitation des puits de mine et le support technique aux activités souterraines sont réalisés sur deux postes afin d'augmenter la période de déstockage, l'entretien des puits a été quant à lui décalé au poste de nuit.

Des modernisations portant sur les machines d'extraction ont été lancées au niveau des puits afin de fiabiliser les transports verticaux, de plus une alimentation de secours par groupe électrogène a été installée pour pouvoir remonter le personnel, même en cas d'interruption de l'alimentation électrique par ERDF.

La mise au point du déstockage :

Les méthodes de déstockage ont été mises au point et améliorées au fil de l'expérience durant la première année en profitant des compétences du prestataire allemand SAARMontan, du maître d'œuvre BG/MSE, de l'assistant à maître d'ouvrage l'APAVE Mulhouse et des MDPAs. Exceptionnellement, l'inspection du travail a été déléguée à la DREAL qui suivait déjà les travaux miniers, et le suivi médical des opérateurs et des agents suivant le déstockage a été renforcé par la médecine du travail pour contrôler d'éventuelles ingestions de substances toxiques. De nombreux dispositifs ont été introduits et en particulier :

- le chantier de déstockage a été placé sous confinement dynamique avec une aspiration puissante et des étages de filtration adaptés aux poussières les plus fines, en particulier à l'amiante (photos 8),



Photos 8 : installations de ventilation

- les opérateurs sont équipés de tenues étanches et de masques ventilés durant les opérations d'extraction et de reconditionnement provisoire des déchets (photo 9),
- les opérateurs réalisent des vacations d'une durée comprise entre 1h et 1h 30 en fonction de la température, qui peut dépasser 30 degrés, et passent dans un sas de décontamination chimique (photo 10) à l'issue de chaque vacation,



Photo 9 : opérateurs en zone rouge

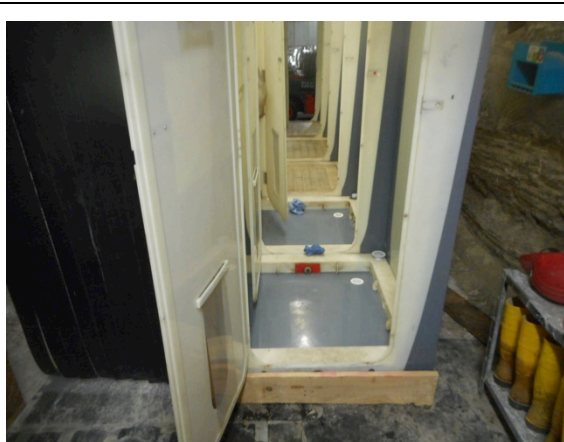


Photo 10 : le SAS de décontamination

- un dispositif de suivi spécifique de la santé des personnes intervenant en zone rouge a été élaboré, avec contrôle hebdomadaire des urines et contrôle périodique par prise de sang, afin de vérifier que personne n'est contaminé par les substances toxiques lors du déstockage, en sus d'un suivi médical renforcé,
- un atelier spécifique de reconditionnement des colis a été créé pour améliorer l'avancement dans le bloc 21 (photo 11),



Photo 11 : atelier de reconditionnement

- deux machines d'abattage à attaque ponctuelle ont été introduites pour aplanir le sol et pour abattre les plaques décollées (photos 12)



Photos 12 : les deux machines d'abattage

- une méthode de soutènement provisoire à distance a été mise au point avec une chargeuse, des étaçons hydrauliques et des boulons en fibre de verre pour tenir les plaques décollées du plafond (toit) avant d'extraire les déchets et de faire tomber ces plaques par havage (photo 13),



Photo 13 : pose d'un étaçon

- un aspirateur puissant muni de filtres très performants permet de dégonfler les big bags collés contre le toit afin de pouvoir les extraire et les reconditionner (photos 14),



Photos 14 : opérations d'aspiration d'un big-bag

- un détecteur portable de substances chimiques permet de vérifier que le chantier a bien été décontaminé avant renforcement du soutènement et havage (photo 15),



Photo 15 : contrôle de décontamination

- des capteurs de gaz, de particules, de débit et d'humidité ont été installés avec retransmission des informations sur synoptique au poste de contrôle en surface (photo 16),



Photo 16 : synoptique du chantier au poste de contrôle

- des prélèvements destinés à détecter l'éventuelle présence de fibres d'amiante sont réalisés périodiquement,
- une convention a été passée avec le SDIS 68 et des exercices sont périodiquement réalisés au fond afin de maîtriser un départ d'incendie ou de porter secours à d'éventuels accidentés (photo 17).



Photo 17 : exercice de désincarcération

Les difficultés du déstockage :

Les difficultés principales rencontrées au cours des opérations de déstockage sont liées aux fortes dégradations minières observées en pénétrant dans les galeries de stockage et aux risques chimiques dus à la nature des déchets et exacerbés par le fait que les colis sont déjà prisonniers des terrains :

- Dans une mine de sel, les terrains fluent, c'est-à-dire viennent progressivement remplir tous les vides disponibles. Dans le stockage, soumis à la pression des terrains de recouvrement, les galeries se referment régulièrement, « elles convergent », en moyenne de 2cm par an en hauteur et en largeur. Certaines sont soumises à des pressions plus importantes ou à variations très localisées de pression, en liaisons avec les zones de potasse exploitées il y a plusieurs dizaines d'années au-dessus, qui produisent de fortes dégradations au niveau du stockage. C'est ainsi que des portions de minerai laissées en place dans les couches supérieures exploitées (piliers ou stots) induisent des pressions plus importantes dans le stockage, et de fortes dégradations. De même, les éboulis qui ont rempli les vides miniers se remettent en pression à commencer par le milieu des zones exploitées (photo 18).

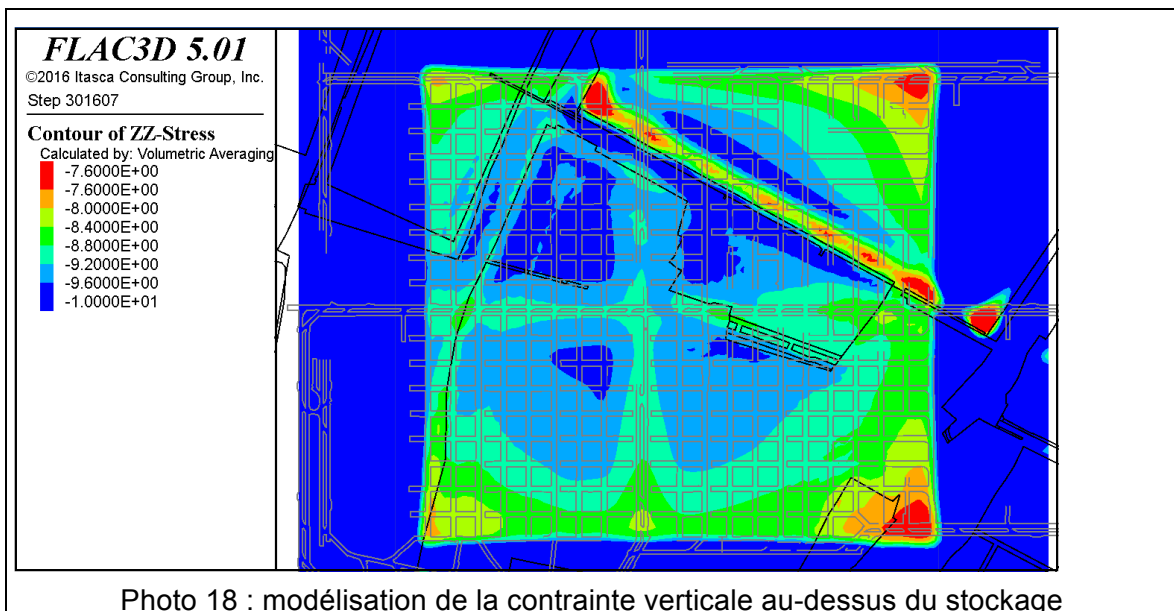


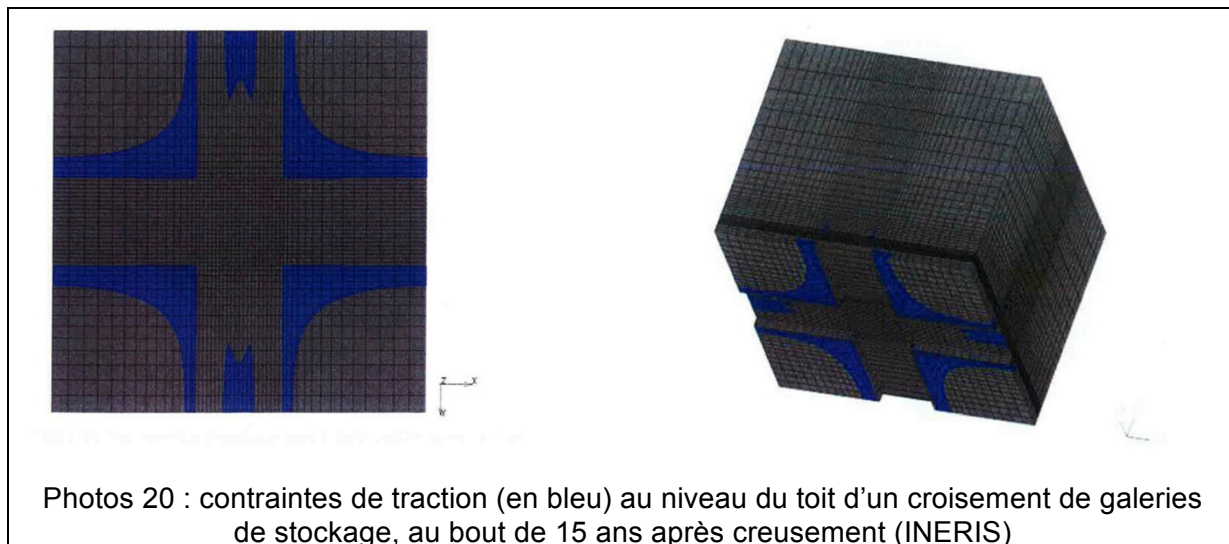
Photo 18 : modélisation de la contrainte verticale au-dessus du stockage

Cela se traduit par un soufflage du mur (le sol se soulève car la pression des terrains s'exerce dans tous les sens et les bancs les plus faibles se déforment plus, produisant des soulèvements parfois supérieurs à un mètre), des décollements importants du plafond (toit) ou des parements (murs), des fissures verticales et horizontales conduisant à des chutes de plaques. Le déstockage dans le bloc 21 a été arrêté par deux fois pour cette raison (photo 19).



Photo 19 : front arrêté

Des fissures ouvertes transversales sont apparues dès le début du déstockage du bloc 21, faisant apparaître un risque d'éboulement massif dans les galeries de stockage. L'INERIS a été sollicité pour établir un diagnostic de ces phénomènes et de leurs conséquences. Il en a déduit que ces fissures verticales, tout comme les décollements horizontaux du toit étaient inexorables et allaient se répandre dans tout le stockage (photos 20 et rapport spécifique INERIS [A10]) et a préconisé un contrôle renforcé de la tenue du toit.



C'est ce qui est fait à l'aide de quelques stations de mesure de l'ouverture des fissures transversales (voir photo 21) mais surtout régulièrement par foration de trous de 3 m dans le toit et auscultation endoscopique (photo 22) pour déterminer le dispositif de boulonnage à mettre en place afin de renforcer le toit.



L'Administration des Mines a par ailleurs imposé de faire appel à un expert indépendant au cas où les colis seraient de plus coincés sous le toit déconsolidé, afin de déterminer s'il est possible de poursuivre le déstockage avec des mesures appropriées. Les MDPA ont fait appel au tiers expert allemand K-Utec [A11] qui a réalisé des mesures de contraintes mais n'a pas détecté d'anomalies flagrantes. Il a validé les mesures prises pour poursuivre l'avancement en cas de forte poussée du toit dans le bloc 21 [A11].

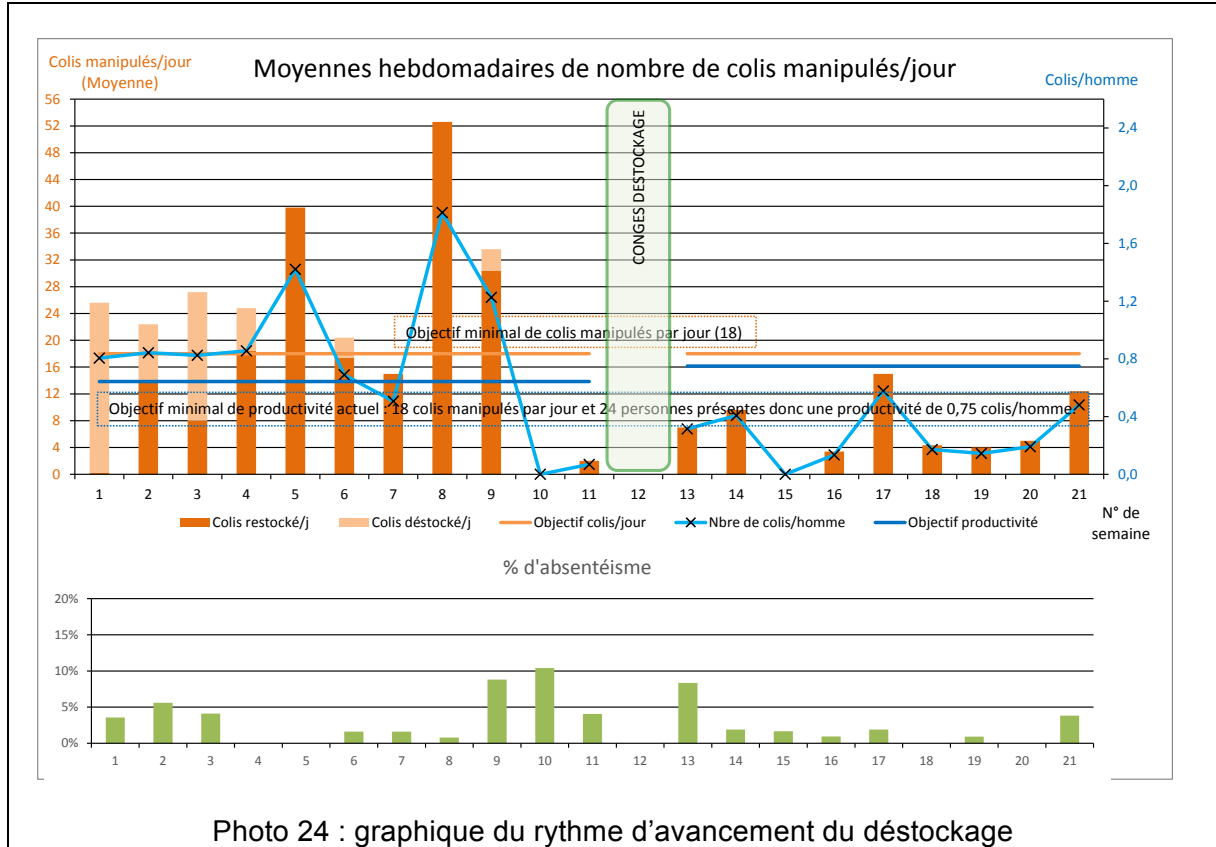
Par ailleurs, les MDPA ont sollicité une société experte en robots dans les domaines militaires et nucléaire afin de voir si d'autres moyens plus rapides et moins dangereux pouvaient être utilisés pour déstocker. Concernant les rythmes de progression, ce type de moyen ne peut pas rivaliser avec l'intervention humaine mécanisée comme elle l'est actuellement car les conditions sont très délicates dans les zones dégradées et nécessiteraient une équipe d'ingénieurs en permanence pour adapter l'utilisation du robot. Dans les bonnes zones, ce type de moyen n'est pas nécessaire. De plus, la société ne pouvait pas se libérer avant un an et considérait le milieu d'évolution d'un robot comme très délicat. Nous n'avons donc pas poursuivi.

- Les colis constitués de 4 fûts ou d'un big bag posé sur une palette se déforment, sont parfois coincés, ce qui rend leur extraction très délicate (voir photos 23). Les big bags coincés doivent être ouverts et aspirés pour être dégagés. Il est arrivé que certains s'ouvrent et répandent leur contenu sur le sol où le déchet doit être aspiré. Leur contenu est souvent toxique (résidus de fumées d'incinération d'ordures ménagères) ou très toxique (trioxyde d'arsenic, autrefois utilisé comme mort aux rats). Les opérations de décontamination de la matrice minière sont alors très longues et demandent souvent de creuser le sol pour évacuer tout le sel imprégné de substances toxiques.



Photos 23 : big-bags et fûts coincés par soulèvement du mur

- Toutes ces difficultés se traduisent dans les performances d'avancement du chantier de déstockage, avec de fortes baisses (voir graphique ci-dessous), le rythme moyen étant de 24 colis extraits par jour dans les bonnes zones et de l'ordre de 8 colis dans les mauvaises zones.



Les perspectives :

Les pronostics de performances futures sur le déstockage sont difficiles à établir. L'INERIS a réalisé une modélisation locale à l'échelle d'un pilier du stockage et en a déduit que toutes les dégradations que nous observons vont affecter tout le stockage, principalement du fait du fluage du sel et de la géométrie du stockage. Il estime que l'augmentation des contraintes due aux exploitations supérieures n'est pas suffisante pour limiter les dégradations aux seules zones concernées, les surcontraintes n'atteignant pas plus que 15%. Les experts allemands n'ont quant à eux pas non plus mesuré de grosses surcontraintes. Une méthode par mesure de contrainte dans certains piliers du stockage a été mise en œuvre mais elle n'a en effet pas permis de formaliser de conclusions (voir photo 25).



Photo 25 : opérateur réalisant une mesure de contraintes

Néanmoins, les MDPA et le tiers expert ont observé que les dégradations dans le bloc 21 correspondaient bien à l'existence de minerai laissé en place dans les exploitations supérieures. La lecture des anciens plans de mine et leur superposition avec le stockage sont plus éclairantes (voir schéma de superposition avec incidents lors du déstockage). A cet horizon de temps, il semble donc qu'une augmentation de contrainte, même relativement faible, mais s'exerçant depuis plus de 15 ans sur le stockage, peut conduire aux dégradations observées.

Nous avons enfin été surpris de retrouver de grosses dégradations dès l'entrée du bloc 12 (voir photo 26) alors qu'aucune particularité d'exploitation n'existait au niveau des couches de potasse supérieures.



Photo 26 : allée 1 du bloc 12

Nous avons alors relié ces dégradations avec un phénomène de remise en pression des éboulis (foudroyage) au centre de la zone exploitée au-dessus du stockage. Les modélisations réalisées par ITASCA confirment une remontée en pression dans cette zone (photo 27), de l'ordre de 10% dans les zones dégradées.

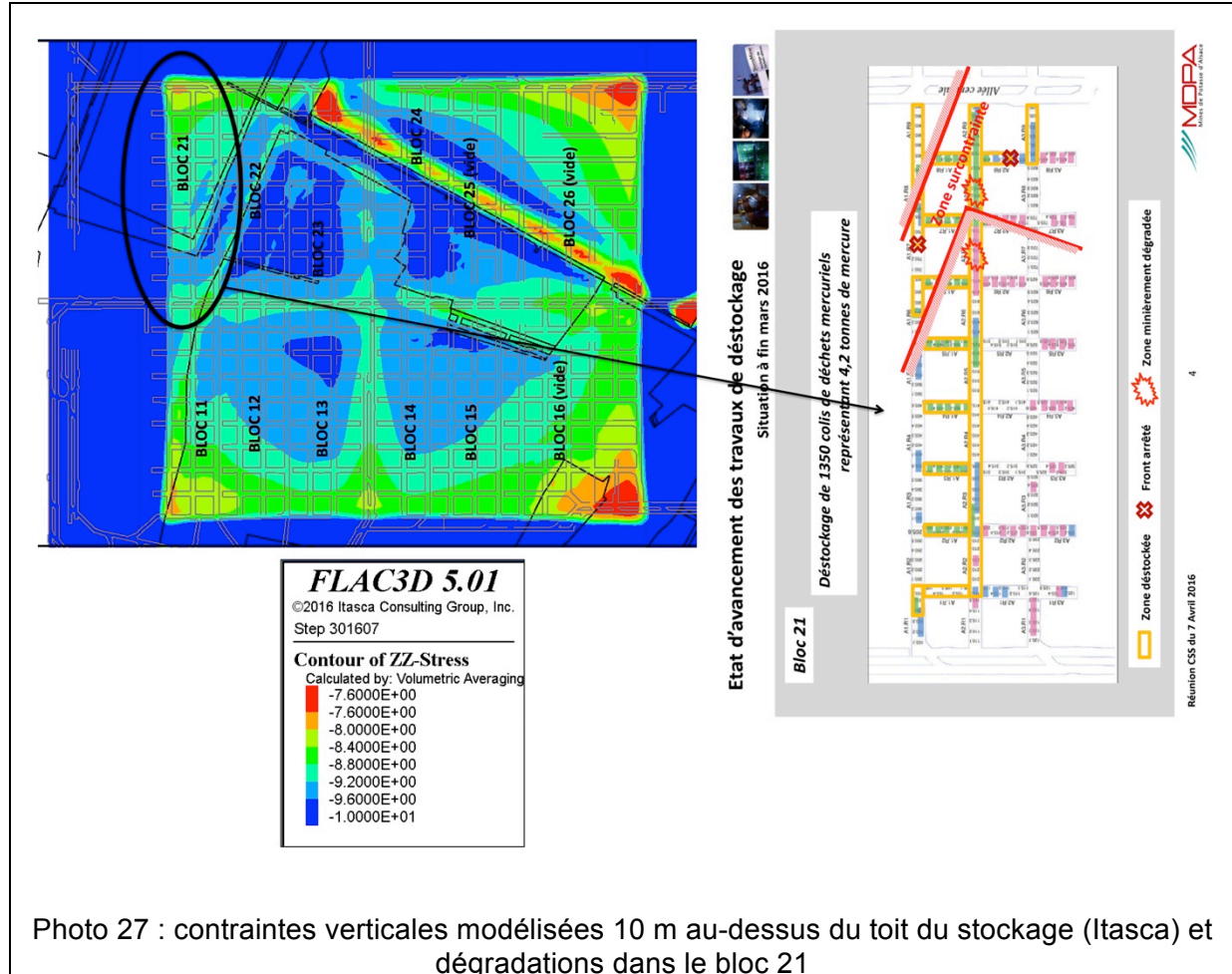


Photo 27 : contraintes verticales modélisées 10 m au-dessus du toit du stockage (Itasca) et dégradations dans le bloc 21

Les modélisations réalisées dans le cadre de la fermeture du stockage permettent de mieux expliquer ces dégradations, aussi bien dans le bloc 21 que dans le bloc 12. Si elles disent vrai aussi pour la suite, nous aurons de grosses difficultés tout au long du déstockage du bloc 23 et peut-être des blocages.

Conclusion :

Dans la mesure où le déstockage s'avère plus problématique qu'envisagé initialement, il existe une réelle incertitude quant à la quantité de déchets contenant du mercure qu'il sera effectivement possible de déstocker. Cette incertitude est relativement faible quand elle est chiffrée en tonnage de déchets (moins de 1%), ou même en tonnage de colis contenant du mercure (moins de 12%) mais elle est plus importante en matière de quantité de mercure résiduelle après déstockage. Elle n'affecte que très peu les autres substances chimiques contenues dans le stockage. Si 22% du mercure ont déjà été déstockés à mi-mai 2016 il en reste encore 71% à déstocker. Cependant, dans tous les cas, les dispositifs de confinement prévus permettent d'éviter tout impact significatif sur la nappe. Ceci a été démontré par les experts mandatés par les MDPA et a été confirmé par les tiers experts.

Les MDPA s'efforcent néanmoins de poursuivre le déstockage afin de respecter les instructions de l'Etat.

Annexe 5

**Masses qui resteront dans le stockage au moment de sa fermeture,
en fonction du déstockage qui aura pu être réalisé.**

| Quantités de contaminants dans le stockage souterrain (estimation tenant compte des analyses 2016) | | | |
|---|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | SANS DESTOCKAGE | "DESTOCKAGE 56%" | "DESTOCKAGE 93%" |
| As | 1747 | 1735 | 1734 |
| Ba | 78,6 | 78 | 77,8 |
| Cd | 32,94 | 32,69 | 32,64 |
| Cr | 31,77 | 30,5 | 30,46 |
| Cu | 103,7 | 103,5 | 103,1 |
| Hg | 25,7 | 11,02 | 1,28 |
| Mo | 6,32 | 6,27 | 6,26 |
| Ni | 23,63 | 22,94 | 22,88 |
| Pb | 250 | 247,8 | 246,9 |
| Sb | 99,69 | 99,46 | 99,45 |
| Se | 2,88 | 2,87 | 2,87 |
| Zn | 260 | 258,2 | 258 |
| Cyanures libres | 4,37 | 4,37 | 4,37 |
| | soit, retrait du mercure | 57% | 95% |

Annexe 6 : Concentrations dans la nappe alluviale (1000 ans), INERIS

| Substance | Environnement Local Témoin (µg/L) | Limite de Qualité (µg/L) | 1 | | | | | | | | | | | 2 | | | 3* | | | | | | | | | |
|-----------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | Couche → | | | Amélie 1 | Amélie 2 | Eise | Joseph | Max | Amélie 1 | Amélie 2 | Eise | Joseph | Max | Amélie 1 | Amélie 2 | Eise | Joseph | Max | | | | | | |
| | | | Puits → | Option ↓ | Option ↓ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hg | 0,2 | 1 | Sans déstockage | 3,62E-03 | 1,62E-03 | 2,06E-03 | 1,97E-03 | 6,34E-03 | 4,31E-03 | 1,25E-02 | 4,13E-03 | 4,13E-03 | 2,97E-03 | 4,41E-02 | 5,09E-02 | 2,72E-02 | 3,45E-02 | 3,22E-02 | 2,97E-03 | 4,41E-02 | 5,09E-02 | 2,72E-02 | 3,45E-02 | 3,22E-02 | | |
| | | | Déstockage 56% | 1,75E-03 | 7,86E-04 | 9,95E-04 | 9,52E-04 | 3,06E-03 | 6,05E-03 | 2,08E-03 | 6,05E-03 | 2,08E-03 | 2,00E-03 | 1,44E-03 | 2,13E-02 | 2,46E-02 | 1,32E-02 | 1,67E-02 | 1,58E-02 | 1,44E-03 | 2,13E-02 | 2,46E-02 | 1,32E-02 | 1,67E-02 | 1,58E-02 | |
| | | | Déstockage 93% | 2,24E-04 | 1,00E-04 | 1,27E-04 | 1,22E-04 | 3,92E-04 | 7,73E-04 | 2,67E-04 | 2,55E-04 | 7,73E-04 | 2,67E-04 | 2,55E-04 | 1,84E-04 | 2,73E-03 | 3,15E-03 | 1,68E-03 | 2,13E-03 | 2,02E-03 | 1,84E-04 | 2,73E-03 | 3,15E-03 | 1,68E-03 | 2,13E-03 | 2,02E-03 |
| | | | Sans déstockage | 5,52E-03 | 2,48E-03 | 3,14E-03 | 3,00E-03 | 9,66E-03 | 1,91E-02 | 6,57E-03 | 6,29E-03 | 1,91E-02 | 6,57E-03 | 6,29E-03 | 4,53E-03 | 6,72E-02 | 7,76E-02 | 4,15E-02 | 5,25E-02 | 4,97E-02 | 4,53E-03 | 6,72E-02 | 7,76E-02 | 4,15E-02 | 5,25E-02 | 4,97E-02 |
| Cr | 7 | 50 | Déstockage 56% | 5,97E-03 | 2,68E-03 | 3,39E-03 | 3,25E-03 | 1,04E-02 | 2,06E-02 | 7,11E-03 | 6,80E-03 | 6,80E-03 | 4,90E-03 | 7,27E-02 | 8,39E-02 | 4,49E-02 | 5,68E-02 | 5,39E-02 | 4,90E-03 | 7,27E-02 | 8,39E-02 | 4,49E-02 | 5,68E-02 | 5,39E-02 | | |
| | | | Déstockage 93% | 6,57E-03 | 2,95E-03 | 3,74E-03 | 3,58E-03 | 1,15E-02 | 2,27E-02 | 7,83E-03 | 7,49E-03 | 7,49E-03 | 5,39E-03 | 8,00E-02 | 9,24E-02 | 4,94E-02 | 6,25E-02 | 5,92E-02 | 5,39E-03 | 8,00E-02 | 9,24E-02 | 4,94E-02 | 6,25E-02 | 5,92E-02 | | |
| | | | Sans déstockage | 7,58E-04 | 3,40E-04 | 4,31E-04 | 4,13E-04 | 1,33E-04 | 2,62E-03 | 9,03E-04 | 8,64E-04 | 8,64E-04 | 6,22E-04 | 9,24E-04 | 1,07E-02 | 5,70E-03 | 1,07E-02 | 5,70E-03 | 6,83E-03 | 6,22E-04 | 9,24E-04 | 1,07E-02 | 5,70E-03 | 6,83E-03 | | |
| | | | Déstockage 56% | 8,56E-04 | 3,84E-04 | 4,86E-04 | 4,66E-04 | 1,50E-03 | 2,96E-03 | 1,02E-03 | 9,75E-04 | 9,75E-04 | 7,02E-04 | 1,04E-02 | 1,20E-02 | 6,44E-03 | 1,20E-02 | 6,44E-03 | 7,71E-03 | 7,02E-04 | 1,04E-02 | 1,20E-02 | 6,44E-03 | 7,71E-03 | | |
| CN | <100 | 50 | Déstockage 93% | 9,43E-04 | 4,23E-04 | 5,36E-04 | 5,13E-04 | 1,65E-03 | 3,26E-03 | 1,12E-03 | 1,12E-03 | 1,08E-03 | 7,74E-04 | 1,15E-02 | 1,33E-02 | 7,09E-03 | 8,98E-03 | 8,50E-03 | 7,74E-04 | 1,15E-02 | 1,33E-02 | 7,09E-03 | 8,98E-03 | 8,50E-03 | | |
| | | | Sans déstockage | 9,85E-07 | 4,42E-07 | 5,60E-07 | 5,36E-07 | 1,72E-06 | 3,40E-06 | 1,17E-06 | 1,12E-06 | 1,12E-06 | 1,12E-06 | 8,08E-07 | 1,20E-05 | 1,38E-05 | 7,41E-06 | 9,38E-06 | 8,87E-06 | 8,08E-07 | 1,20E-05 | 1,38E-05 | 7,41E-06 | 9,38E-06 | 8,87E-06 | |
| | | | Déstockage 56% | 1,00E-06 | 4,49E-07 | 5,69E-07 | 5,44E-07 | 1,75E-06 | 3,46E-06 | 1,19E-06 | 1,14E-06 | 1,14E-06 | 1,14E-06 | 8,21E-07 | 1,22E-05 | 1,41E-05 | 7,52E-06 | 9,52E-06 | 9,01E-06 | 8,21E-07 | 1,22E-05 | 1,41E-05 | 7,52E-06 | 9,52E-06 | 9,01E-06 | |
| | | | Déstockage 93% | 1,02E-06 | 4,56E-07 | 5,78E-07 | 5,53E-07 | 1,78E-06 | 3,51E-06 | 1,21E-06 | 1,16E-06 | 1,16E-06 | 1,16E-06 | 8,34E-07 | 1,24E-05 | 1,43E-05 | 7,65E-06 | 9,67E-06 | 9,16E-06 | 8,34E-07 | 1,24E-05 | 1,43E-05 | 7,65E-06 | 9,67E-06 | 9,16E-06 | |
| As | <10 | 10 | Sans déstockage | 4,39E-07 | 1,97E-07 | 2,50E-07 | 2,39E-07 | 7,69E-07 | 1,52E-06 | 5,23E-07 | 5,01E-07 | 5,01E-07 | 3,61E-07 | 5,35E-06 | 6,18E-06 | 3,30E-06 | 4,18E-06 | 3,95E-06 | 3,61E-07 | 5,35E-06 | 6,18E-06 | 3,30E-06 | 4,18E-06 | 3,95E-06 | | |
| | | | Déstockage 56% | 4,60E-07 | 2,07E-07 | 2,62E-07 | 2,50E-07 | 8,06E-07 | 1,59E-06 | 5,48E-07 | 5,25E-07 | 5,25E-07 | 3,78E-07 | 5,61E-06 | 6,47E-06 | 3,48E-06 | 4,35E-06 | 4,15E-06 | 3,78E-07 | 5,61E-06 | 6,47E-06 | 3,48E-06 | 4,35E-06 | 4,15E-06 | | |
| | | | Déstockage 93% | 4,82E-07 | 2,16E-07 | 2,74E-07 | 2,62E-07 | 8,44E-07 | 1,67E-06 | 5,74E-07 | 5,49E-07 | 5,49E-07 | 3,96E-07 | 5,87E-06 | 6,78E-06 | 3,63E-06 | 4,59E-06 | 4,34E-06 | 3,96E-07 | 5,87E-06 | 6,78E-06 | 3,63E-06 | 4,59E-06 | 4,34E-06 | | |
| | | | Sans déstockage | 2,30E-06 | 1,03E-06 | 1,31E-06 | 1,25E-06 | 4,02E-06 | 7,93E-06 | 2,74E-06 | 2,62E-06 | 2,62E-06 | 1,88E-06 | 2,80E-05 | 1,73E-05 | 2,80E-05 | 3,23E-05 | 2,19E-05 | 2,07E-05 | 1,88E-06 | 2,80E-05 | 3,23E-05 | 2,19E-05 | 2,07E-05 | | |
| Cd | 0,7 | 5 | Déstockage 56% | 9,02E-05 | 4,05E-05 | 5,13E-05 | 4,91E-05 | 1,58E-04 | 3,12E-04 | 1,07E-04 | 1,03E-04 | 7,40E-05 | 1,10E-03 | 1,27E-03 | 6,78E-04 | 8,58E-04 | 8,12E-04 | 7,40E-05 | 1,10E-03 | 1,27E-03 | 6,78E-04 | 8,58E-04 | 8,12E-04 | | | |
| | | | Déstockage 93% | 1,08E-03 | 4,86E-04 | 6,16E-04 | 5,90E-04 | 1,90E-03 | 3,74E-03 | 1,29E-03 | 1,24E-03 | 1,24E-03 | 8,89E-04 | 1,32E-02 | 1,52E-02 | 8,15E-03 | 1,03E-02 | 9,76E-03 | 8,89E-04 | 1,32E-02 | 1,52E-02 | 8,15E-03 | 1,03E-02 | 9,76E-03 | | |
| | | | Sans déstockage | 2,08E-10 | 9,35E-11 | 1,18E-10 | 1,13E-10 | 3,64E-10 | 7,19E-10 | 2,48E-10 | 2,37E-10 | 2,37E-10 | 1,71E-10 | 2,54E-09 | 2,93E-09 | 1,57E-09 | 1,98E-09 | 1,88E-09 | 1,71E-10 | 2,54E-09 | 2,93E-09 | 1,57E-09 | 1,98E-09 | 1,88E-09 | | |
| | | | Déstockage 56% | 2,10E-10 | 9,41E-11 | 1,19E-10 | 1,14E-10 | 3,67E-10 | 7,25E-10 | 2,50E-10 | 2,39E-10 | 2,39E-10 | 1,72E-10 | 2,55E-09 | 2,95E-09 | 1,58E-09 | 2,00E-09 | 1,89E-09 | 1,72E-10 | 2,55E-09 | 2,95E-09 | 1,58E-09 | 2,00E-09 | 1,89E-09 | | |
| Pb | 13 | 10 | Déstockage 93% | 2,10E-10 | 9,43E-11 | 1,19E-10 | 1,14E-10 | 3,68E-10 | 7,26E-10 | 2,50E-10 | 2,40E-10 | 2,40E-10 | 1,72E-10 | 2,56E-09 | 2,95E-09 | 1,58E-09 | 2,00E-09 | 1,89E-09 | 1,72E-10 | 2,56E-09 | 2,95E-09 | 1,58E-09 | 2,00E-09 | 1,89E-09 | | |
| | | | Sans déstockage | 7,15E-10 | 3,21E-10 | 4,06E-10 | 3,89E-10 | 1,25E-09 | 2,47E-09 | 8,51E-10 | 8,15E-10 | 8,15E-10 | 5,86E-10 | 8,70E-09 | 1,00E-08 | 6,80E-09 | 6,44E-09 | 5,86E-10 | 8,70E-09 | 1,00E-08 | 6,80E-09 | 6,44E-09 | 5,86E-10 | | | |
| | | | Déstockage 56% | 1,22E-06 | 5,48E-07 | 6,94E-07 | 6,64E-07 | 2,14E-06 | 4,21E-06 | 1,45E-06 | 1,39E-06 | 1,39E-06 | 1,00E-06 | 1,49E-05 | 1,72E-05 | 9,18E-06 | 1,16E-05 | 1,10E-05 | 1,00E-06 | 1,49E-05 | 1,72E-05 | 9,18E-06 | 1,16E-05 | 1,10E-05 | | |
| | | | Déstockage 93% | 1,22E-06 | 5,48E-07 | 6,94E-07 | 6,64E-07 | 2,14E-06 | 4,22E-06 | 1,45E-06 | 1,39E-06 | 1,39E-06 | 1,00E-06 | 1,49E-05 | 1,72E-05 | 9,18E-06 | 1,16E-05 | 1,10E-05 | 1,00E-06 | 1,49E-05 | 1,72E-05 | 9,18E-06 | 1,16E-05 | 1,10E-05 | | |
| Ni | 3,7 | 20 | Sans déstockage | 6,00E-09 | 2,69E-09 | 3,41E-09 | 3,26E-09 | 1,05E-08 | 2,07E-08 | 7,15E-09 | 6,84E-09 | 6,84E-09 | 4,92E-09 | 7,31E-08 | 8,43E-08 | 4,51E-08 | 5,40E-08 | 4,92E-09 | 7,31E-08 | 8,43E-08 | 4,51E-08 | 5,40E-08 | | | | |
| | | | Déstockage 56% | 5,76E-09 | 2,58E-09 | 3,27E-09 | 3,13E-09 | 1,01E-08 | 1,99E-08 | 6,86E-09 | 6,56E-09 | 6,56E-09 | 4,73E-09 | 7,01E-08 | 8,10E-08 | 4,33E-08 | 5,48E-08 | 5,19E-08 | 4,73E-09 | 7,01E-08 | 8,10E-08 | 4,33E-08 | 5,48E-08 | 5,19E-08 | | |
| | | | Déstockage 93% | 5,49E-09 | 2,46E-09 | 3,12E-09 | 2,99E-09 | 9,60E-09 | 1,90E-08 | 6,53E-09 | 6,25E-09 | 6,25E-09 | 4,50E-09 | 6,68E-08 | 7,71E-08 | 4,13E-08 | 5,22E-08 | 4,94E-08 | 4,50E-09 | 6,68E-08 | 7,71E-08 | 4,13E-08 | 5,22E-08 | 4,94E-08 | | |
| | | | Sans déstockage | 6,51E-10 | 2,92E-10 | 3,70E-10 | 3,54E-10 | 1,14E-09 | 2,25E-09 | 7,75E-10 | 7,42E-10 | 7,42E-10 | 5,34E-10 | 7,92E-09 | 9,15E-09 | 4,89E-09 | 6,19E-09 | 5,89E-09 | 5,34E-10 | 7,92E-09 | 9,15E-09 | 4,89E-09 | 6,19E-09 | 5,89E-09 | | |
| Ba | nm | 700 | Déstockage 56% | 9,13E-10 | 4,10E-10 | 5,19E-10 | 4,97E-10 | 1,60E-09 | 3,15E-09 | 1,09E-09 | 1,04E-09 | 7,49E-10 | 1,11E-08 | 1,28E-08 | 6,87E-09 | 8,69E-09 | 8,22E-09 | 7,49E-10 | 1,11E-08 | 1,28E-08 | 6,87E-09 | 8,69E-09 | 8,22E-09 | | | |
| | | | Déstockage 93% | 1,24E-09 | 5,55E-10 | 7,04E-10 | 6,73E-10 | 2,17E-09 | 4,28E-09 | 1,47E-09 | 1,41E-09 | 1,41E-09 | 1,02E-09 | 1,51E-08 | 1,74E-08 | 9,31E-09 | 1,18E-08 | 1,11E-08 | 1,02E-09 | 1,51E-08 | 1,74E-08 | 9,31E-09 | 1,18E-08 | | | |
| | | | Sans déstockage | 2,10E-10 | 9,43E-11 | 1,19E-10 | 1,14E-10 | 3,67E-10 | 7,25E-10 | 2,50E-10 | 2,39E-10 | 2,39E-10 | 1,72E-10 | 2,55E-09 | 2,95E-09 | 1,58E-09 | 2,00E-09 | 1,89E-09 | 1,72E-10 | 2,55E-09 | 2,95E-09 | 1,58E-09 | 2,00E-09 | 1,89E-09 | | |
| | | | Déstockage 56% | 1,22E-06 | 5,48E-07 | 6,94E-07 | 6,64E-07 | 2,14E-06 | 4,21E-06 | 1,45E-06 | 1,39E-06 | 1,39E-06 | 1,00E-06 | 1,49E-05 | 1,72E-05 | 9,18E-06 | 1,16E-05 | 1,10E-05 | 1,00E-06 | 1,49E-05 | 1,72E-05 | 9,18E-06 | 1,16E-05 | 1,10E-05 | | |
| Cu | 7,2 | 1000 | Sans déstockage | 6,00E-09 | 2,69E-09 | 3,41E-09 | 3,26E-09 | 1,05E-08 | 2,07E-08 | 7,15E-09 | 6,84E-09 | 6,84E-09 | 4,92E-09 | 7,31E-08 | 8,43E-08 | 4,51E-08 | 5,40E-08 | 4,92E-09 | 7,31E-08 | 8,43E-08 | 4,51E-08 | 5,40E-08 | | | | |
| | | | Déstockage 56% | 5,76E-09 | 2,58E-09 | 3,27E-09 | 3,13E-09 | 1,01E-08 | 1,99E-08 | 6,86E-09 | 6,56E-09 | 6,56E-09 | 4,73E-09 | 7,01E-08 | 8,10E-08 | 4,33E-08 | 5,48E-08 | 5,19E-08 | 4,73E-09 | 7,01E-08 | 8,10E-08 | 4,33E-08 | 5,48E-08 | 5,19E-08 | | |
| | | | Déstockage 93% | 5,49E-09 | 2,46E-09 | 3,12E-09 | 2,99E-09 | 9,60E-09 | 1,90E-08 | 6,53E-09 | 6,25E-09 | 6,25E-09 | 4,50E-09 | 6,68E-08 | 7,71E-08 | 4,13E-08 | 5,22E-08 | 4,94E-08 | 4,50E-09 | 6,68E-08 | 7,71E-08 | 4,13E-08 | 5,22E-08 | 4,94E-08 | | |
| | | | Sans déstockage | 6,51E-10 | 2,92E-10 | 3,70E-10 | 3,54E-10 | 1,14E-09 | 2,25E-09 | 7,75E-10 | 7,42E-10 | 7,42E-10 | 5,34E-10 | 7,92E-09 | 9,15E-09 | 4,89E-09 | 6,19E-09 | 5,89E-09 | 5,34E-10 | 7,92E-09 | 9,15E-09 | 4,89E-09 | 6,19E-09 | 5,89E-09 | | |

* on rappelle que la couche 3 n'existe pas au droit du puits Max

Traduction du tableau précédent en terme de rapport à la référence « Environnement Local Témoin » (= coefficient de sécurité)

| Substance | ELT (µg/L) | LO (µg/L) | Coef de sécurité ELT, couche 1 | | | | | | Coef de sécurité ELT, couche 2 | | | | | | Coef de sécurité ELT, couche 3 | | | | | | | | | |
|-----------|------------|-----------|--------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------|------|--------|--|--|--|
| | | | Amélie 1 | Amélie 2 | Eise | Joseph | Max | Amélie 1 | Amélie 2 | Eise | Joseph | Max | Amélie 1 | Amélie 2 | Eise | Joseph | Max | Amélie 1 | Amélie 2 | Eise | Joseph | | | |
| Hg | 0,2 | 1 | Sans déstockage | 55 | 123 | 97 | 102 | 32 | 16 | 46 | 48 | 67 | 5 | 4 | 7 | 6 | 6 | | | | | | | |
| | | | Déstockage 56% | 114 | 254 | 201 | 210 | 65 | 33 | 96 | 100 | 139 | 9 | 8 | 15 | 12 | 13 | | | | | | | |
| Cr | 7 | 50 | Déstockage 93% | 893 | 2 000 | 1 675 | 1 639 | 510 | 259 | 749 | 784 | 1 087 | 73 | 63 | 119 | 94 | | | | | | | | |
| | | | Sans déstockage | 1 268 | 2 823 | 2 229 | 2 333 | 725 | 366 | 1 065 | 1 113 | 1 545 | 104 | 90 | 169 | 133 | 141 | | | | | | | |
| CN | < 100 | 50 | Déstockage 56% | 1 173 | 2 612 | 2 065 | 2 154 | 673 | 340 | 985 | 1 029 | 1 429 | 96 | 83 | 156 | 123 | 130 | | | | | | | |
| | | | Déstockage 93% | 1 065 | 2 373 | 1 872 | 1 955 | 609 | 308 | 894 | 935 | 1 299 | 88 | 76 | 142 | 112 | 118 | | | | | | | |
| Sb | nm | 5 | Sans déstockage | 131 926 | 294 118 | 232 019 | 242 131 | 75 888 | 38 168 | 110 742 | 115 741 | 160 772 | 10 823 | 9 346 | 17 544 | 13 850 | 14 641 | | | | | | | |
| | | | Déstockage 56% | 116 822 | 260 417 | 205 761 | 214 592 | 66 667 | 33 784 | 98 039 | 102 554 | 142 450 | 9 615 | 8 333 | 15 528 | 12 285 | 12 970 | | | | | | | |
| As | < 10 | 10 | Déstockage 93% | 106 045 | 236 407 | 186 567 | 194 932 | 60 806 | 30 675 | 89 286 | 92 593 | 129 199 | 8 666 | 7 519 | 14 104 | 11 136 | 11 765 | | | | | | | |
| | | | Sans déstockage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cd | 0,7 | 5 | Déstockage 56% | 7 761 | 17 284 | 13 645 | 14 257 | 4 430 | 2 244 | 6 542 | 6 796 | 9 459 | 636 | 551 | 1 032 | 862 | | | | | | | | |
| | | | Déstockage 93% | 648 | 1 440 | 1 136 | 1 186 | 368 | 187 | 543 | 565 | 787 | 53 | 46 | 86 | 68 | 72 | | | | | | | |
| Pb | 13 | 10 | Sans déstockage | 62 500 000 000 | 139 037 433 155 | 110 169 491 525 | 115 044 247 788 | 35 714 285 714 | 18 080 667 594 | 52 419 354 839 | 54 862 320 675 | 76 023 391 813 | 5 118 110 236 | 4 436 860 068 | 8 280 254 777 | 6 865 656 566 | 6 914 893 617 | | | | | | | |
| | | | Déstockage 56% | 61 904 761 905 | 136 150 903 294 | 109 243 697 479 | 114 035 087 719 | 35 422 343 324 | 17 931 034 483 | 52 000 000 000 | 54 393 305 439 | 5 098 039 216 | 5 561 395 349 | 5 078 125 000 | 4 406 779 661 | 8 227 848 101 | 6 500 000 000 | 6 878 306 878 | | | | | | |
| Ni | 3,7 | 20 | Déstockage 93% | 61 904 761 905 | 137 667 900 318 | 109 243 697 479 | 114 035 087 719 | 35 326 086 957 | 17 906 336 088 | 52 000 000 000 | 54 166 666 667 | 75 561 395 349 | 5 078 125 000 | 4 406 779 661 | 8 227 848 101 | 6 500 000 000 | 6 878 306 878 | | | | | | | |
| | | | Sans déstockage | 5 174 825 175 | 11 526 479 751 | 9 113 300 493 | 9 511 568 123 | 2 960 000 000 | 1 497 976 709 | 4 347 626 087 | 4 539 877 301 | 425 287 356 | 6 313 993 174 | 425 287 356 | 370 000 000 | 687 732 342 | 544 117 647 | 574 554 161 | | | | | | |
| Ba | nm | 700 | Déstockage 56% | 3 032 787 | 6 751 825 | 5 331 412 | 5 572 289 | 1 728 972 | 878 860 | 2 551 724 | 2 861 871 | 3 700 000 | 248 322 | 215 116 | 403 050 | 318 966 | 336 364 | | | | | | | |
| | | | Déstockage 93% | 3 032 787 | 6 751 825 | 5 331 412 | 5 572 289 | 1 728 972 | 878 860 | 2 551 724 | 2 861 871 | 3 700 000 | 248 322 | 215 116 | 403 050 | 318 966 | 336 364 | | | | | | | |
| Cu | 7,2 | 1000 | Sans déstockage | 11 059 907 834 | 24 667 534 247 | 19 459 459 459 | 20 338 983 051 | 6 315 769 474 | 3 200 000 000 | 9 290 322 591 | 9 703 504 043 | 13 463 146 067 | 908 090 909 | 786 885 246 | 1 472 392 638 | 1 163 168 397 | 1 228 666 942 | | | | | | | |
| | | | Déstockage 56% | 7 886 089 814 | 17 560 975 610 | 13 872 832 370 | 14 486 921 529 | 4 500 000 000 | 2 265 714 286 | 6 605 504 587 | 6 923 076 923 | 648 648 649 | 9 612 817 089 | 648 648 649 | 562 500 000 | 1 048 034 934 | 828 538 550 | 875 912 409 | | | | | | |
| | | | Déstockage 93% | 5 806 451 613 | 12 972 972 973 | 10 227 272 727 | 10 690 365 527 | 3 317 972 350 | 1 682 242 991 | 4 887 959 184 | 5 106 392 979 | 7 058 923 529 | 476 821 192 | 413 793 103 | 773 361 976 | 610 169 492 | 648 648 649 | | | | | | | |

ELT : Environnement Local Témoin

LQ : Limite de Qualité

Les concentrations en Sb et Ba n'avaient pas été mesurées dans les études préalables à la création du stockage (pas de donnée « Environnement Local Témoin »)

Traduction du tableau précédent en terme de rapport à la référence « Limite de qualité » (= coefficient de sécurité, par rapport à la norme de potabilité)

| Substance | ELT (µg/L) | LQ (µg/L) | Coef de sécurité LQ couche 1 | | | | | Coef de sécurité LQ couche 2 | | | | | Coef de sécurité LQ couche 3 | | | | |
|-----------|------------|-----------|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | Couche Puits Option | Amélie 1 | Amélie 2 | Eise | Joseph | Max | Amélie 1 | Amélie 2 | Eise | Joseph | Max | Amélie 1 | Amélie 2 | Eise | Joseph |
| Hg | 0,2 | 1 | Sans distockage | 276 | 617 | 465 | 508 | 158 | 80 | 232 | 242 | 337 | 23 | 20 | 37 | 29 | 31 |
| | | | Distockage 55% | 571 | 1.272 | 1.065 | 1.050 | 327 | 165 | 481 | 500 | 894 | 47 | 41 | 76 | 60 | 63 |
| Cr | 7 | 50 | Sans distockage | 4.464 | 10.000 | 7.874 | 8.187 | 2.551 | 1.294 | 3.745 | 3.922 | 5.435 | 366 | 317 | 595 | 469 | 485 |
| | | | Distockage 93% | 9.058 | 20.161 | 15.924 | 16.667 | 5.176 | 2.618 | 7.610 | 7.949 | 11.038 | 744 | 644 | 1.205 | 952 | 1.006 |
| CN | < 100 | 50 | Sans distockage | 8.375 | 18.657 | 14.749 | 15.385 | 4.808 | 2.427 | 7.032 | 7.353 | 10.204 | 688 | 586 | 1.114 | 880 | 929 |
| | | | Distockage 93% | 7.610 | 16.949 | 13.389 | 13.966 | 4.348 | 2.203 | 6.386 | 6.676 | 9.276 | 625 | 541 | 1.012 | 800 | 845 |
| Sb | nm | 5 | Sans distockage | 65.963 | 147.058 | 116.089 | 121.065 | 37.594 | 19.084 | 55.371 | 57.870 | 80.386 | 5.411 | 4.673 | 8.772 | 6.925 | 7.321 |
| | | | Distockage 55% | 59.411 | 130.208 | 102.981 | 107.296 | 33.333 | 16.992 | 49.020 | 51.282 | 71.225 | 4.908 | 4.167 | 7.764 | 6.143 | 6.485 |
| As | < 10 | 10 | Sans distockage | 53.022 | 118.203 | 93.284 | 97.466 | 30.303 | 15.337 | 44.643 | 46.296 | 64.999 | 4.348 | 3.759 | 7.052 | 5.588 | 5.882 |
| | | | Distockage 93% | 5.076.142 | 11.312.217 | 8.928.571 | 9.328.658 | 2.908.977 | 1.470.588 | 4.664.286 | 4.846.286 | 6.188.119 | 416.887 | 362.319 | 674.764 | 533.049 | 563.688 |
| Cd | 0,7 | 5 | Sans distockage | 5.000.000 | 11.135.857 | 8.787.346 | 9.191.176 | 2.857.143 | 1.445.067 | 4.201.681 | 4.395.965 | 6.090.134 | 409.936 | 354.610 | 664.894 | 525.210 | 554.939 |
| | | | Distockage 93% | 4.801.961 | 10.964.912 | 8.650.519 | 9.041.951 | 2.808.989 | 1.424.501 | 4.132.231 | 4.310.345 | 5.985.204 | 403.226 | 348.650 | 653.595 | 517.063 | 545.652 |
| Pb | 13 | 10 | Sans distockage | 22.719.043 | 50.761.421 | 40.000.000 | 41.841.004 | 13.003.901 | 6.578.947 | 19.120.459 | 19.960.080 | 27.700.831 | 1.869.159 | 1.618.233 | 3.030.303 | 2.392.344 | 2.525.253 |
| | | | Distockage 55% | 21.739.130 | 48.309.179 | 38.167.939 | 40.000.000 | 12.408.948 | 6.289.308 | 18.248.175 | 19.047.619 | 26.455.026 | 1.782.531 | 1.545.995 | 2.880.173 | 2.285.105 | 2.408.639 |
| Ni | 3,7 | 20 | Sans distockage | 20.746.888 | 46.298.296 | 36.496.950 | 38.167.939 | 11.848.341 | 5.988.024 | 17.421.603 | 18.214.936 | 25.252.625 | 1.703.576 | 1.474.826 | 2.754.821 | 2.178.649 | 2.304.147 |
| | | | Distockage 93% | 2.173.913 | 4.854.389 | 3.816.754 | 4.000.000 | 1.243.761 | 630.517 | 1.906.397 | 2.659.574 | 1.906.397 | 1.78.571 | 154.799 | 288.017 | 228.311 | 241.546 |
| Ba | nm | 700 | Sans distockage | 55.432 | 123.457 | 97.466 | 101.833 | 31.646 | 16.026 | 46.729 | 48.544 | 67.668 | 4.545 | 3.937 | 7.375 | 5.928 | 6.158 |
| | | | Distockage 55% | 4.630 | 10.288 | 8.117 | 8.475 | 2.632 | 1.337 | 3.876 | 4.032 | 5.624 | 379 | 329 | 613 | 485 | 512 |
| Cu | 7,2 | 1000 | Sans distockage | 48.076.923.077 | 106.951.671.658 | 84.745.782.712 | 88.485.575.221 | 27.472.527.473 | 13.908.205.841 | 40.322.580.645 | 42.194.922.827 | 58.479.532.164 | 3.937.007.874 | 3.472.989.283 | 6.369.426.752 | 5.160.505.051 | 5.519.148.936 |
| | | | Distockage 55% | 47.619.947.619 | 106.269.925.811 | 84.033.613.445 | 87.719.298.246 | 27.247.956.403 | 13.793.103.448 | 40.000.000.000 | 41.841.004.184 | 58.139.534.884 | 3.921.568.827 | 3.389.830.508 | 6.329.113.924 | 5.000.000.000 | 5.391.005.291 |
| Joseph | nm | 1000 | Sans distockage | 47.619.947.619 | 106.044.538.706 | 84.033.613.445 | 87.719.298.246 | 27.173.913.043 | 13.774.104.683 | 40.000.000.000 | 41.841.004.184 | 58.139.534.884 | 3.906.250.000 | 3.389.830.508 | 6.329.113.924 | 5.000.000.000 | 5.391.005.291 |
| | | | Distockage 93% | 27.972.027.972 | 62.305.295.950 | 48.261.083.744 | 51.413.881.748 | 16.000.000.000 | 8.097.165.992 | 23.301.762.632 | 24.539.877.301 | 34.129.892.833 | 2.298.850.575 | 2.000.000.000 | 3.717.472.119 | 2.941.176.471 | 3.105.690.062 |
| Eise | nm | 700 | Sans distockage | 16.393.443 | 36.496.350 | 28.818.444 | 30.120.482 | 9.345.794 | 4.759.584 | 13.793.103 | 14.388.489 | 20.000.000 | 1.342.282 | 1.162.191 | 2.178.649 | 1.724.138 | 1.818.182 |
| | | | Distockage 93% | 16.393.443 | 36.496.350 | 28.818.444 | 30.120.482 | 9.345.794 | 4.759.584 | 13.793.103 | 14.388.489 | 20.000.000 | 1.342.282 | 1.162.191 | 2.178.649 | 1.724.138 | 1.818.182 |
| Amélie 1 | nm | 700 | Sans distockage | 116.666.666.667 | 260.223.048.327 | 205.278.592.375 | 214.723.926.380 | 66.666.666.667 | 33.616.425.121 | 97.902.097.902 | 102.339.161.287 | 142.276.422.764 | 9.575.993.993 | 8.303.677.943 | 15.824.064.302 | 12.259.184.396 | 12.982.962.963 |
| | | | Distockage 55% | 121.527.777.778 | 271.317.929.457 | 214.067.278.287 | 223.642.172.524 | 69.306.930.689 | 35.175.879.387 | 102.040.816.327 | 106.707.317.073 | 147.981.543.340 | 9.985.734.865 | 8.641.975.309 | 16.166.281.755 | 12.773.726.628 | 13.487.475.915 |
| Amélie 2 | nm | 700 | Sans distockage | 127.504.553.734 | 284.552.845.528 | 224.359.974.958 | 234.113.712.375 | 72.916.666.667 | 36.942.105.263 | 107.167.498.770 | 112.000.000.000 | 155.555.555.556 | 10.479.041.916 | 9.078.118.029 | 16.949.152.542 | 13.409.991.686 | 14.170.040.486 |
| | | | Distockage 93% | 1.536.089.310.292 | 3.424.697.534.247 | 2.702.702.702.703 | 2.824.869.797.062 | 877.192.992.456 | 444.444.444.444 | 1.260.322.580.645 | 1.347.708.694.879 | 1.872.659.176.030 | 126.292.626.263 | 109.289.617.486 | 204.498.977.595 | 161.550.886.530 | 170.948.464.164 |
| Eise | nm | 1000 | Sans distockage | 1.095.280.251.917 | 2.439.024.390.244 | 1.925.785.273.003 | 2.012.072.434.608 | 625.000.000.000 | 317.460.317.460 | 991.538.461.538 | 1.335.113.684.646 | 90.090.090.090 | 78.125.000.000 | 145.560.407.569 | 115.074.798.619 | 121.864.501.217 | |
| | | | Distockage 93% | 806.451.612.903 | 1.801.801.801.802 | 1.420.454.545.455 | 1.466.864.101.040 | 460.829.493.088 | 233.644.959.813 | 660.272.108.844 | 709.219.659.156 | 980.392.156.863 | 66.225.165.963 | 57.471.264.368 | 107.411.365.607 | 84.745.762.712 | 90.900.090.090 |

ELT : Environnement Local Témoin
LQ : Limite de Qualité

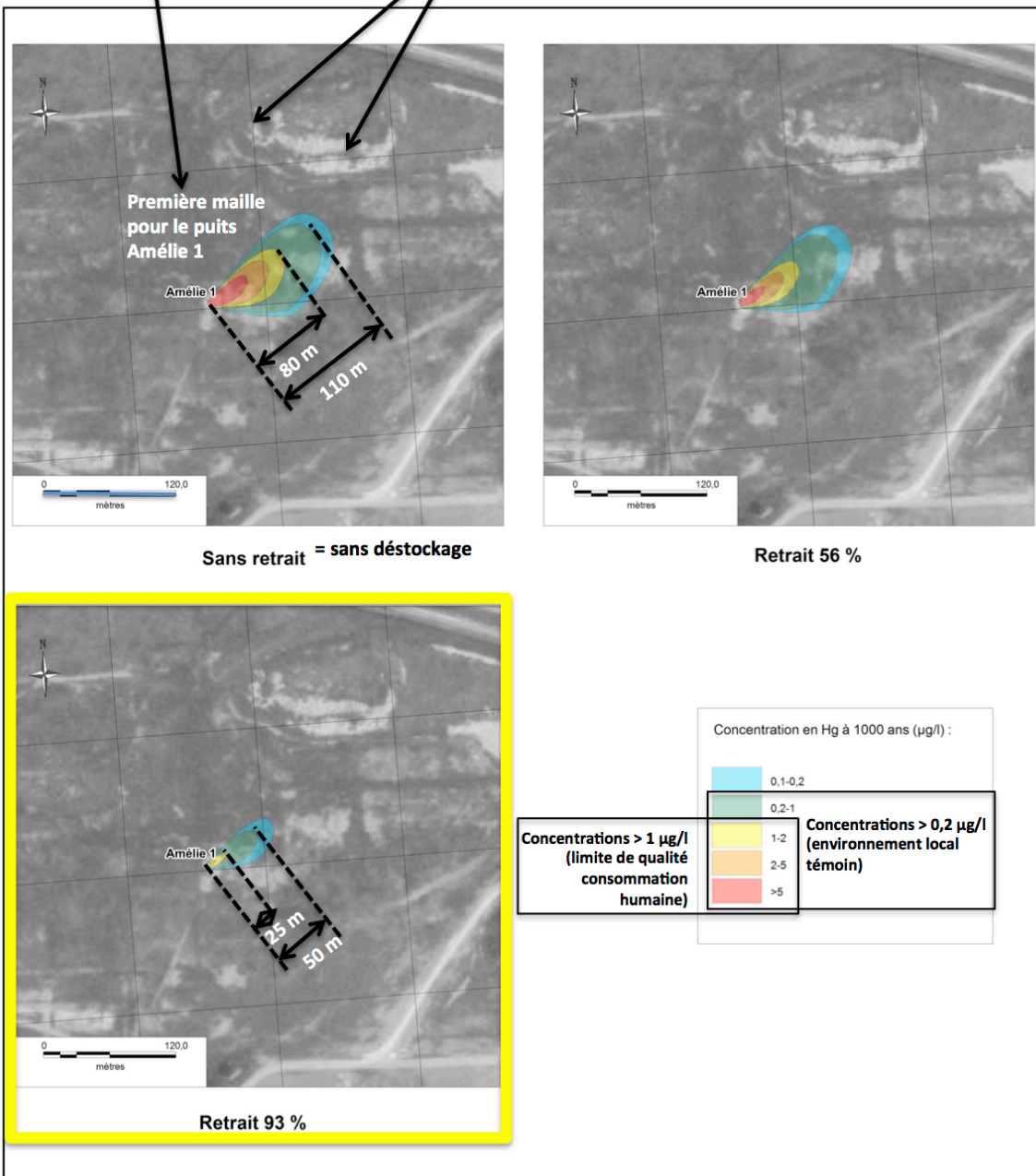
Annexe 7

Concentrations à 1000 ans, couche 3 de la nappe

Puits Amélie 1

La concentration en mercure de la "première maille du modèle", présentée dans les différents documents, est la valeur moyenne dans ce carré.

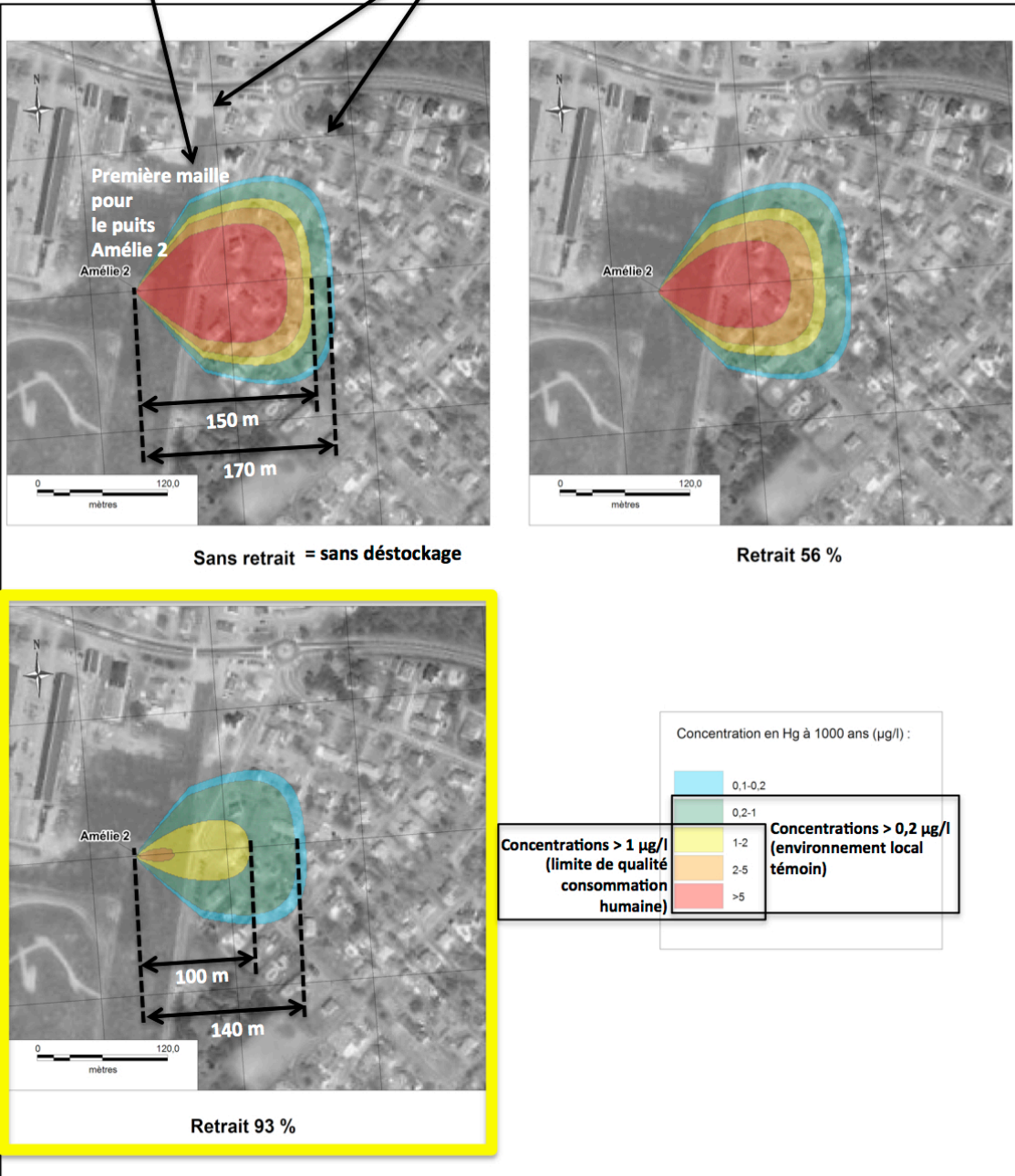
Lignes de quadrillage du maillage 125 mx 125m du modèle BRGM. Ce maillage est à l'échelle régionale. Le puits Amélie 1 se trouve dans une des mailles du modèle (première maille pour le puits Amélie 1).



Puits Amélie 2

La concentration en mercure de la "première maille du modèle", présentée dans les différents documents, est la valeur moyenne dans ce carré.

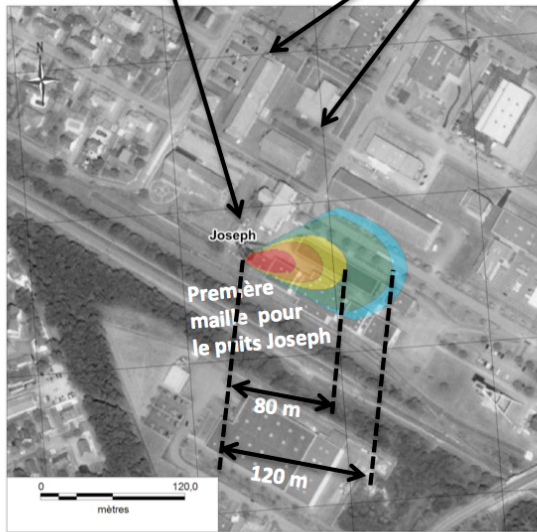
Lignes de quadrillage du maillage de 125 m x 125 m du modèle BRGM. Ce maillage est à l'échelle régionale. Le puits Amélie 2 se trouve à cheval sur 2 mailles du modèle. Le panache est ainsi réparti sur 4 mailles.



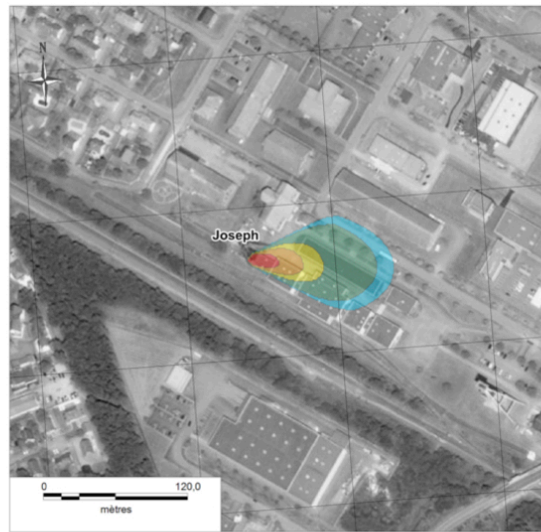
Puits Joseph

La concentration en mercure de la "première maille du modèle", présentée dans les différents documents, est la valeur moyenne dans ce carré.

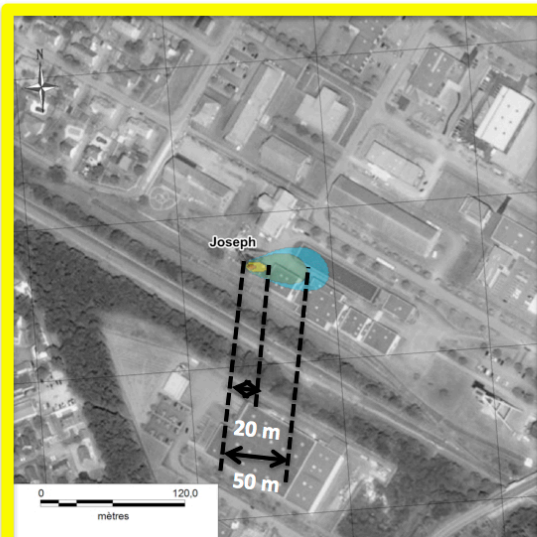
Lignes de quadrillage du maillage de 125 m x 125 m du modèle BRGM. Ce maillage est à l'échelle régionale. Le puits Joseph se trouve au milieu de l'une de ces mailles.



Sans retrait = sans déstockage

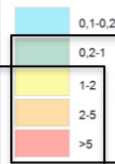


Retrait 56 %



Retrait 93 %

Concentration en Hg à 1000 ans ($\mu\text{g/l}$) :



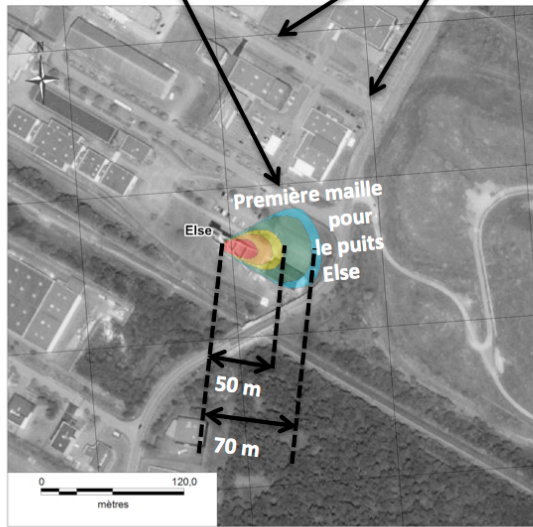
Concentrations > 1 $\mu\text{g/l}$
 (limite de qualité
 consommation
 humaine)

Concentrations > 0,2 $\mu\text{g/l}$
 (environnement local
 témoin)

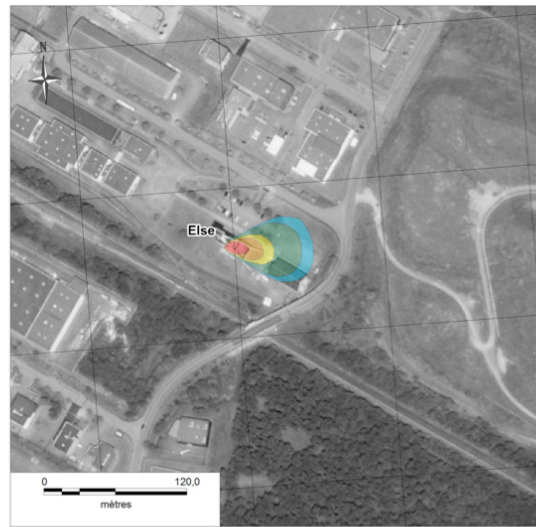
Puits Else

La concentration en mercure de la "première maille du modèle", présentée dans les différents documents, est la valeur moyenne dans ce carré.

Lignes de quadrillage du maillage de 125 m x 125 m du modèle BRGM. Ce maillage est à l'échelle régionale. Le puits Else se trouve en bordure de l'une de ces mailles, le panache se trouve dans la maille juste en aval.



Sans retrait= sans déstockage



Retrait 56 %



Retrait 93 %

