

## Site de StocaMine : mécanismes en jeu et hypothèses retenues dans les évaluations de l'Ineris

Mars 2025

L'installation de stockage de déchets de StocaMine a été aménagée dans une ancienne mine de potasse sur la commune de Wittelshein (Haut-Rhin). Son exploitation a débuté en 1999 et a été interrompue en 2002 suite à un incendie. A l'issue d'une série d'expertises auxquelles l'Ineris a contribué pour le compte de la société des Mines de Potasse d'Alsace (MDPA), actuellement responsable du site, les pouvoirs publics ont décidé de procéder au confinement de l'installation. La présente note rassemble les éléments techniques permettant de comprendre la configuration du stockage et son environnement géologique, les mécanismes qui détermineront son évolution à long terme ainsi que les hypothèses retenues par l'Ineris lors de ses expertises successives pour évaluer les risques de contamination des eaux souterraines.

L'installation de stockage souterrain de StocaMine est située à environ 550 mètres de profondeur. Elle est aménagée dans des galeries creusées dans une couche de sel gemme, à une vingtaine de mètres sous une couche de potasse exploitée sur deux niveaux superposés, par une ancienne mine souterraine (cf. Figure 1 ci-après). Le sommet de la formation salifère est surmonté par une série de

formations géologiques imperméables (argiles et marnes notamment) épaisse de 250 à 300 m. Ces formations sont elles-mêmes surmontées de terrains quaternaires épais d'une trentaine de mètres, au sein desquels se trouve la nappe d'Alsace. Les couches de potasse exploitées présentent une légère pente et s'approfondissent vers le nord, passant ainsi sous le niveau du stockage.

### Les enjeux

La présence de déchets dangereux dans le stockage souterrain de StocaMine soulève la question d'une éventuelle pollution des eaux souterraines suite à l'ennoyage de la mine et à la remontée vers la nappe d'Alsace des substances dangereuses qu'ils contiennent. (voir la succession des 3 figures suivantes). Dans cette hypothèse, l'évaluation de l'impact lié aux usages des eaux souterraines s'avère nécessaire.

De nombreuses études ont été réalisées par l'Ineris à la demande des MDPA<sup>1</sup>, dans le cadre de la cessation d'activité du site de StocaMine, afin d'évaluer la possibilité de transfert de polluants depuis le stockage vers la nappe d'Alsace et, le cas échéant, afin d'envisager des solutions de prévention et de limitation des risques associés.

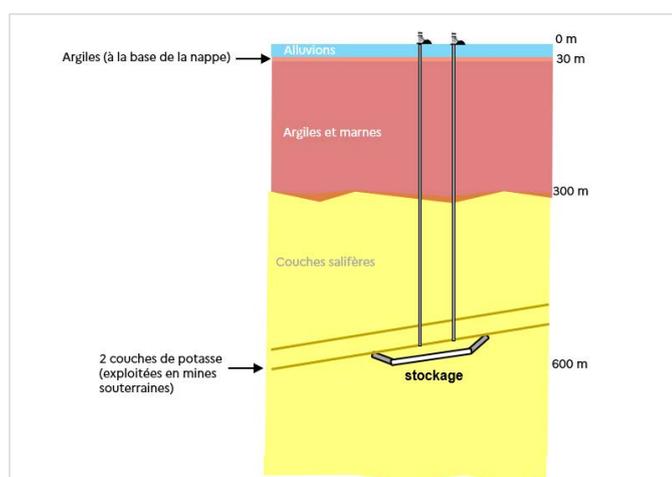


Figure 1 /  
Représentation schématique du site de StocaMine dans son environnement géologique.

## Présentation du mécanisme de transfert et des phénomènes mis en jeu

Le transfert des eaux souterraines depuis le stockage vers la nappe d'Alsace nécessite la combinaison de trois phénomènes principaux (figures 2, 3 et 4) :

- / l'ennoyage des vides miniers (tel que défini en fig. 2) ;
- / la mise en solution des substances polluantes contenues dans les déchets ;
- / la convergence (ou fermeture) des vides miniers plus ou moins concomitante de l'ennoyage.

Compte tenu des mécanismes décrits précédemment, le transfert des polluants vers la nappe sera d'autant plus limité que la convergence sera avancée lorsque l'ennoyage surviendra. En effet :

- / si l'ennoyage se produit alors que les vides miniers sont encore largement ouverts, la compaction des terrains expulsera une quantité d'eau souterraine plus importante qui pourra atteindre le stockage au cours de sa remontée et se retrouver potentiellement polluée par la dissolution des déchets ;
- / à l'inverse, si l'ennoyage survient alors que les anciens vides miniers sont en grande partie refermés, le volume d'eau expulsé sera limité et il en sera de même pour la part de ce volume susceptible de traverser le stockage de déchets.

Les études de l'Ineris ont notamment consisté à décrire et quantifier chacun des 3 phénomènes précédemment évoqués. Les approches proposées reposent sur la définition d'hypothèses « majorantes », c'est-à-dire prudentes, et sur l'évaluation de leur conséquence sur le transfert potentiel de polluants vers la surface. Ces hypothèses ont été faites en surestimant délibérément les risques, afin de garantir une marge de sécurité aux évaluations réalisées, au regard des connaissances et des éléments disponibles au moment de la réalisation des études.

## L'ennoyage des anciens vides miniers

Au moment de l'arrêt de l'exploitation minière souterraine des mines de potasse des MDP, dans les années 1950, les pompages ont été progressivement stoppés et les puits ont été progressivement bouchés.

À ce jour, 2 puits sont utilisés pour accéder au stockage et restent donc ouverts. Les 13 autres ont été comblés et mis en sécurité afin d'en assurer la stabilité géotechnique d'une part, et de limiter la circulation d'eau au travers des ouvrages (rôle de barrière hydraulique), d'autre

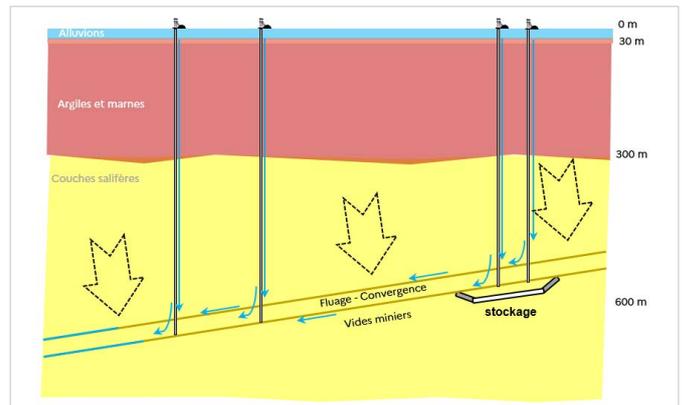


Figure 2 /  
À long terme, et malgré leur comblement et les bouchons mis en place, les 15 puits constituent une voie de transfert des eaux de surface du fait de la dégradation dans le temps de l'étanchéité de ces ouvrages. L'arrivée d'eau dans les vides souterrains conduit à leur remplissage progressif ou ennoyage.

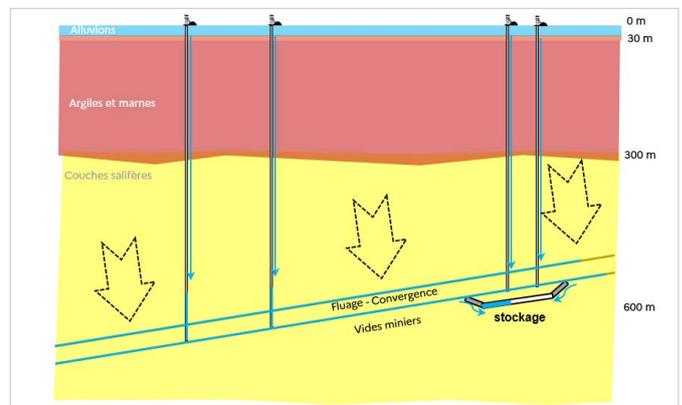


Figure 3 /  
L'eau envahit d'abord les parties les plus basses avant d'atteindre le niveau du stockage et d'arriver au contact des déchets en conduisant potentiellement à la mise en solution de leur contenu. L'ennoyage du stockage peut être retardé ou limité par la mise en place de barrières étanches au niveau des ouvrages le reliant à l'ancien réseau minier.

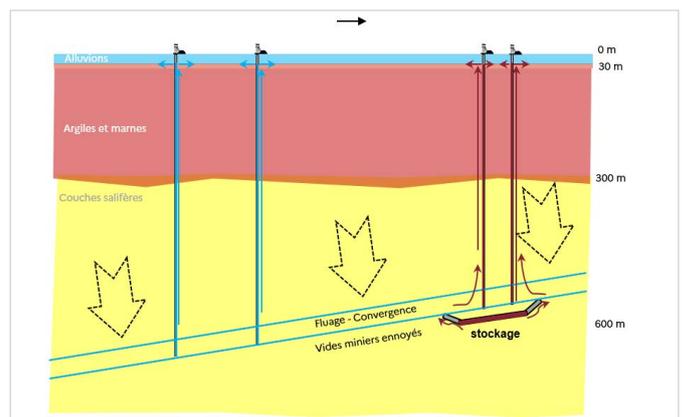


Figure 4 /  
Les vides miniers situés en grande partie en dessous du niveau du stockage continuent de se refermer (par convergence) en expulsant l'eau chargée en sel (saumure) vers les puits et finalement vers la base de la couche la plus profonde de la nappe d'Alsace. C'est par ce mécanisme que l'eau ayant transitée par le secteur du stockage pourrait conduire à une remontée de saumure à l'origine d'une pollution localisée de la nappe d'Alsace.

part. L'intégralité de la hauteur des puits, entre la surface du sol et les travaux miniers souterrains desservis, soit plusieurs centaines de mètres, est comblée de matériaux peu perméables. Le comblement est constitué de serrements en béton, mis en place au niveau de la première couche de potasse exploitée, d'une alternance de couches de graviers roulés et de cendres volantes (particulièrement peu perméables), de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, sur les passages où des venues d'eau ont été identifiées (Figure 5). La présence de la colonne de cendres volantes (matériau ayant des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire ayant la capacité de se cimenter au contact de l'eau) au niveau des horizons caractérisés par une arrivée d'eau, contribue au confinement du cuvelage.

La mise en place d'un comblement du même type est prévue pour les deux puits encore ouverts.

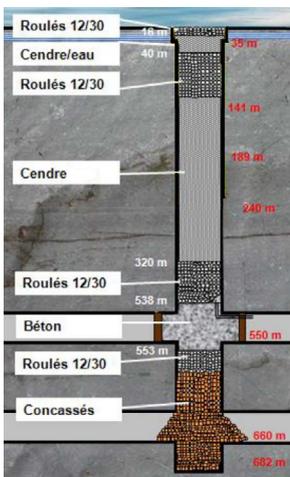


Figure 5 / Coupe schématique type des travaux de comblement et de mise en sécurité des anciens puits de mine (source MDPA intégrant des modifications apportées par l'Ineris).

Pour mémoire, le cuvelage (tel que défini en Figure 6) joue un double rôle pendant la phase d'exploitation : un rôle mécanique, en évitant que les roches traversées ne s'éboulent et, un rôle hydraulique, en limitant les quantités d'eau drainées par les puits.

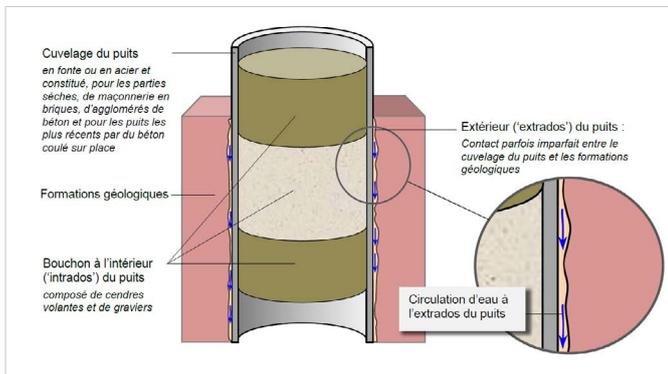


Figure 6 / Représentation schématique de la circulation d'eau à l'extrados d'un puits, source [Artelia. K-Utec. IFG. 2016].

Une fois les puits comblés sur toute leur hauteur, le rôle mécanique est repris par les matériaux de comblement. Dans ces conditions, le cuvelage ne joue plus de rôle mécanique et sa dégradation est donc sans conséquence sur la stabilité des puits. La dégradation du cuvelage peut en revanche accroître sa perméabilité et augmenter les flux d'eau le traversant.

Conformément aux processus détaillés précédemment, les études réalisées par l'Ineris ont retenu l'hypothèse d'un remplissage progressif des vides miniers par de l'eau chargée en sel (ou saumure). Même si la zone où se trouve le stockage est située dans une formation géologique imperméable et exempte d'eau, il a en effet été considéré une arrivée d'eau depuis les formations surmontant les couches salifères via les 15 anciens puits de mine du secteur. Même comblés, ceux-ci sont supposés constituer des voies préférentielles pour la circulation des eaux souterraines (ils constituent des drains hydrauliques) entre les anciens vides miniers et les terrains situés au-dessus. Il est à noter que la circulation de l'eau au travers de la colonne de matériaux de comblement des puits implique de considérer le cuvelage comme perméable : son éventuelle dégradation est de ce fait sans conséquence sur les évaluations effectuées.

#### Estimation des débits d'ennoyage :

Une première approche envisageable pour évaluer les débits d'ennoyage consiste à considérer que le flux d'eau transite au travers du cuvelage (supposé perméable) puis via les drains hydrauliques constitués par les 15 puits comblés. Le débit  $Q_1$  évalué dans ce cas dépend alors principalement de la perméabilité des matériaux de comblement utilisés. Ce débit constitue la valeur à considérer si aucune évolution de la configuration actuelle n'est prise en compte.

Dans une seconde approche, l'Ineris a considéré qu'à long terme la corrosion des parties métalliques des cuvelages des puits et la dégradation des maçonneries et du ciment, assurant originellement le contact entre les puits et les roches des terrains traversés, allaient créer des circulations préférentielles des eaux d'ennoyage, [Ineris. 2011]. Cette zone située autour des puits comblés (zone dite à l'extrados), également soumise à des phénomènes localisés de dissolution des roches salifères, présente en effet une perméabilité significativement supérieure à celle des matériaux de comblement. Le débit correspondant a été évalué par l'Ineris comme 2,5 à 3 fois supérieurs à celui estimé dans les matériaux de comblement. Le débit  $Q_2$ , retenu *in fine* par l'Ineris comme débit d'ennoyage majorant, correspond au maximum des débits issus de ces estimations et des débits maximaux de pompage en cours d'exploitation minière.

L'estimation des débits d'ennoyage sur les 15 puits selon ces hypothèses a conduit à une valeur  $Q_2$  environ 5 fois plus importante que  $Q_1$ . Cette même valeur  $Q_2$  est par ailleurs 1,5 fois plus importante que celle retenue comme sécuritaire par les experts de K-Utec et IFG, lors de la tierce-expertise conduite en 2016 [Artelia. K-Utec. IFG. 2016].

Les études réalisées postérieurement [Antea group-Tractebel, 2020] confirment le caractère sécuritaire de la valeur  $Q_2$  retenue par l'Ineris. Cette valeur est par ailleurs cohérente avec le suivi des niveaux de saumure [Commission suivi, 2024] qui restent significativement inférieurs à ceux fournis par les évaluations.

Une fois évaluée la valeur de débit,  $Q_2$ , il est possible, en croisant les données de convergence (cf. § suivant), d'estimer le temps nécessaire à l'ennoyage complet des vides miniers. Pour cela, l'Ineris a retenu une valeur de débit d'ennoyage constante au cours du temps. Estimer la cinétique de dégradation des cuvelages et de dissolution des terrains à l'extrados a en effet été jugé trop complexe pour qu'il soit possible de justifier une autre loi d'évolution du débit. La valeur fixe  $Q_2$  retenue dès le début de l'ennoyage, conduit à maximiser le débit d'arrivée de l'eau et donc à un remplissage plus rapide du volume minier résiduel,  $Vol_{res}$ , par rapport à une hypothèse d'augmentation progressive du débit avec la dégradation du cuvelage et la dissolution du sel (cf. la représentation schématique en Figure 7 suivante).

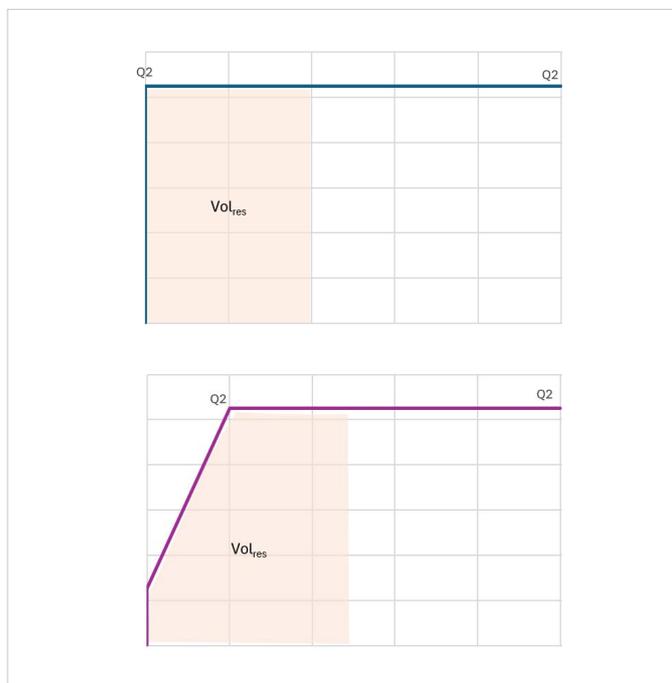


Figure 7 / Représentation schématique de l'évolution des débits d'ennoyage (en ordonnées) en fonction du temps (en abscisses) dans les deux hypothèses : débits constants, en haut, et débits évolutifs, en bas (l'aire sous la courbe représente le volume des vides miniers ennoyés ;  $Vol_{res}$  est atteint plus rapidement en haut qu'en bas).

## La convergence et l'écrasement des anciens vides miniers souterrains

Les roches évaporitiques (comme le sel et la potasse) se comportent comme des fluides visqueux régis par un phénomène appelé « fluage<sup>2</sup> ». Dans le contexte d'un gisement salifère, le fluage désigne le phénomène par lequel la pression exercée par les terrains situés au-dessus du gisement conduit à la fermeture progressive des vides qui se trouvent au cœur des couches de sel exploitées. La vitesse de fluage décroît dans le temps, au fur et à mesure que les vides résiduels se compactent (effet d'opposition), pour s'annuler lorsque tout l'espace vide s'est refermé. Cette fermeture progressive a pour conséquence de chasser l'eau et l'air contenus dans les vides miniers. Dans le cas de StocaMine, le fluage est susceptible de conduire les eaux d'ennoyage vers la surface jusqu'à éventuellement atteindre la partie inférieure de la nappe d'Alsace. C'est ce mécanisme qui contrôle le transfert de l'eau potentiellement polluée par la présence du stockage et détermine le débit atteignant la nappe.

### Estimation des volumes de vides miniers et des vitesses résiduelles de convergence :

Sur la base de son expérience de l'après-mine, notamment en exploitation salifère, l'Ineris a estimé 3 grandeurs :

- /  $Vol_{init}$ , le volume de vides miniers initiaux,
- /  $Vol_{res}$ , le volume de vides miniers résiduels, liés à la méthode d'exploitation minière,
- / et  $V_{res}$ , la vitesse de convergence ou d'écrasement résiduel due au fluage [Ineris. 2011].

Ces 3 grandeurs ont été déterminées sur la base de données et de mesures faites dans l'ancienne mine de MDPA et notamment sur la base du suivi des niveaux topographiques de surface ainsi que sur l'expertise de l'Ineris quant au comportement des roches salifères. Dans le cas des mines exploitées par foudroyage<sup>3</sup>, comme les mines de MDPA (Figure 8), les vides miniers résiduels sont responsables d'affaissement des terrains de surface dont l'ampleur est proportionnelle au volume de ces vides.

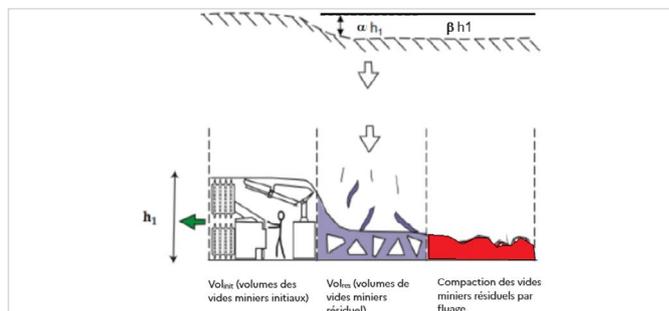


Figure 8 / Relation entre les mesures d'affaissement de surface et la hauteur (ou les volumes) de vides miniers résiduels au sein d'une exploitation souterraine de type foudroyage.

Les valeurs assignées par l’Ineris aux 3 grandeurs précédentes visent à évaluer de manière conservatrice l’interaction et la compétition entre phénomènes (ennoyage des vides miniers et convergence des terrains) dont les conséquences sont déterminantes au regard de l’évaluation des risques de pollution de la nappe.

## La mise en solution des déchets

Dans ses premières évaluations, l’Ineris a considéré l’ensemble des déchets initialement stockés. Ceux-ci comprenaient des déchets arséniés, mercuriels, chromiques, amiantés, de laboratoire, de galvanisation, des résidus d’incinération de déchets, des sels de trempe cyanurés, des produits phytosanitaires et des terres polluées. Les quantités de déchets retenues par l’Ineris pour ses évaluations reposent sur les données d’exploitation du site de stockage (suivi et traçabilité des déchets entrants).

L’Ineris a ainsi pris en considération :

- / les cyanures totaux ;
- / et des éléments traces métalliques (ETM) : l’argent (Ag), l’arsenic (As), le baryum (Ba), le bismuth (Bi), le cadmium (Cd), le cobalt (Co), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et l’antimoine (Sb).

L’hypothèse retenue par l’Ineris a été de considérer, qu’à terme, la saumure vient au contact de l’intégralité des colis de déchets stockés et conduit à la mise en solution des éléments qu’ils contiennent jusqu’à atteindre un équilibre géochimique<sup>4</sup> avec la saumure d’ennoyage. Ces hypothèses sont majorantes car :

- / d’une part, le volume réellement disponible devrait être moindre du fait de la convergence des galeries qui vont « compresser » les colis de déchets ;
- / d’autre part, les réactions chimiques impliquant les différentes substances constitutives des déchets

et de la saumure pourraient limiter la solubilité des ETM et réduire les quantités quittant le stockage.

Pour compléter son évaluation et calculer les concentrations des ETM dans la nappe d’Alsace, l’Ineris, appuyé par le BRGM, a eu recours à des modèles de dilution et de diffusion reposant sur une représentation de cette nappe en 3 couches aquifères successives. Dans une approche majorante, les phénomènes de rétention<sup>5</sup> à travers les ouvrages et les terrains traversés n’ont pas été pris en compte.

Les résultats obtenus lors des premières évaluations ont conduit à établir que le risque sanitaire potentiel était principalement dû au mercure initialement présent dans le stockage. Les concentrations calculées les plus élevées étaient obtenues dans la couche la plus profonde de la nappe et dépassaient la limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine pour le mercure. Du fait de la densité de la saumure, supérieure à celle de l’eau douce, la saumure polluée remontant par les puits reste en effet localisée dans la partie basse de la nappe.

### Prise en compte des mesures de prévention

Sur la base des évaluations précédentes et afin d’abaisser le risque associé à une contamination de la nappe, les autorités ont pris la décision :

- / dans un premier temps, de retirer un maximum de déchets mercuriels de manière à limiter les concentrations en mercure susceptibles d’atteindre la nappe. L’opération de retrait a été réalisée entre 2014 et 2017 et a permis de réduire à hauteur de 95 % la masse de mercure présente ;
- / dans un second temps, de mettre en place des barrières en béton (Figure 9) sur toutes les galeries d’accès au stockage pour limiter les volumes de saumure pouvant entrer et sortir du stockage au cours de l’ennoyage des vides miniers et pour retarder l’ennoyage du stockage, si possible jusqu’à l’achèvement du phénomène de convergence des galeries par fluage du sel.

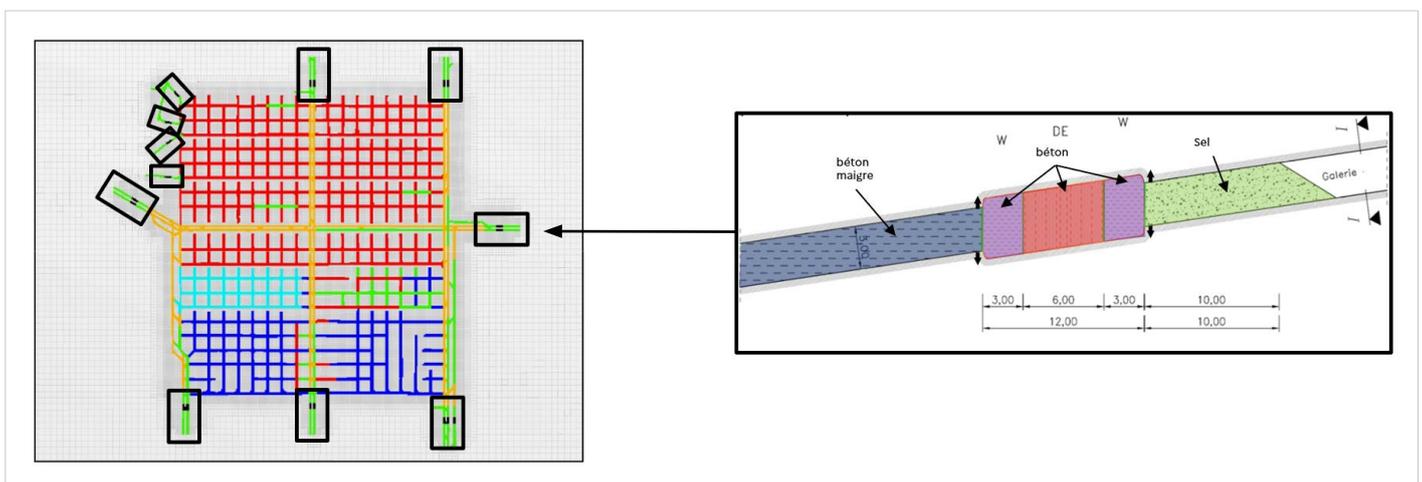


Figure 9 / Représentation schématique des barrières mises en place au niveau des ouvrages connectant le site de stockage aux autres secteurs miniers.

La prise en compte des deux dispositions de prévention précédentes dans les calculs de l'Ineris en conservant, d'une part, les hypothèses majorantes précédentes et, d'autre part, en considérant de manière prudente, un débit de fuite des barrières, conduit à :

- / retarder de plusieurs siècles l'arrivée de la saumure au contact des déchets, à une période où l'ennoyage et la convergence des vides miniers seront plus avancés ;
- / réduire le débit annuel d'arrivée de saumure potentiellement polluée dans la nappe d'Alsace d'un facteur de l'ordre de 1000. Ce débit annuel (inférieur à 1 m<sup>3</sup>/an) représente environ une centaine de milliardièmes du volume de la nappe d'Alsace ;
- / réduire d'un facteur de l'ordre 10, voire 100, l'estimation des concentrations de mercure dans les trois couches de la nappe d'Alsace soit des concentrations maximales en mercure au moins 10 fois plus faible que les valeurs réglementaires de référence pour les eaux destinées à la consommation humaine.

## Bibliographie

- / Ineris, 2011. Stockage souterrain de StocaMine (68) - Étude hydrogéologique de l'ennoyage du site. Rapport Ineris DRS-10-108130-12810B.

/ Ineris, 2011. Évaluation du terme source dans le scénario du stockage illimité : quantités de contaminants stockés, et des concentrations potentielles en solution et en phase gazeuse en cas d'ennoyage, Rapport Ineris DRC-11-108130-08465A .

/ Artelia. K-Utec. IFG. 2016. 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.

/ Anteagroup-Tractebel, 2020. Étude technique et financière de la faisabilité de la poursuite d'un déstockage partiel, en parallèle de la poursuite du confinement Volet hydrogéologique. Projet n°ALSP190266 – 30 sept. 2020. Rapport n°104806/C.

/ Ineris, 2023. Étude écotoxicologique des composants des déchets susceptibles de polluer la nappe ou les sols. Rapport Ineris - 216503 - 2759285 - v2.0.

/ Ineris, 2023. Étude d'impact des séismes sur les puits de StocaMine. Rapport Ineris - 217537 - 2759347 - v1.0.

/ Commission Suivi, 2024. Présentation de la Commission de suivi de site du 15 avril 2024.

Enfin, l'Ineris rappelle que toutes les études réalisées par l'Institut pour les MDPAs sont disponibles en accès libre sur le site internet : <https://www.mdpa-stocamine.org/bibliographie/>. (les études d'autres experts et bureaux d'études s'y trouvent également).

<sup>1</sup> Toutes les études produites et réalisées par l'Ineris pour la prévention des risques liés à la cessation d'activité du site de StocaMine l'ont été dans un cadre contractuel pour un client public. Tous les rapports d'études Ineris ont de ce fait un statut public et sont librement accessibles sur le site internet des MDPAs (<https://www.mdpa-stocamine.org/bibliographie/>).

<sup>2</sup> Le fluage est la déformation lente et retardée d'un corps soumis à une contrainte constante provoquée par la durée d'application de cette contrainte.

<sup>3</sup> Le foudroyage est un éboulement provoqué volontairement à l'arrière d'un chantier minier souterrain dont l'exploitation totale est achevée. Il permet de stabiliser les terrains en comblant les vides. Les terrains exploités sont alors dits « foudroyés ».

<sup>4</sup> Les éléments chimiques contenus dans les déchets vont progressivement se dissoudre, au contact de la saumure, jusqu'à atteindre une concentration maximale correspondant à la limite de solubilité.

<sup>5</sup> La rétention est un phénomène connu en transport des polluants à travers les sols ; certains polluants vont en effet être fixés par les éléments présents dans les sols qu'ils traversent (conduisant à une diminution du flux et à un ralentissement des transports de polluants).