

"Avertissement aux lecteurs : le présent texte français est une traduction de l'étude rédigée en langue anglaise. Cette traduction n'a pas été validée par les auteurs de l'étude et ne saurait prévaloir d'aucune manière sur le texte original qui seul fait foi".

# RAPPORT

## Conception de l'opération de remblayage et de la construction de barrages sur le site de dépôt de déchets toxiques de Stocamine

ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft  
Geotechnik und Bergbau mbH  
Amstaedter Strasse 28  
99096 Erfurt  
Allemagne

Téléphone : +49 361 3810 500  
Fax : +49 361 3810 505  
E-mail :  
mining@ercosplan.comSite  
Web :  
www.ercosplan.comDirecteur opérationnel : Dr  
Henry Rauche

**Client :** **StocaMine**  
Avenue Joseph-Else  
68310 Wittelsheim  
France

**Consultant :** **ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft  
Geotechnik und Bergbau mbH**  
Arnstaedter Str. 28  
99096 Erfurt  
Allemagne

**Référence du projet :** EGB 07-042N01

**Erfurt, 12.12.2011**

Dr Henry Rauche  
Directeur opérationnel et PDG

## SOMMAIRE EXECUTIF

StocaMine prévoit d'assurer l'étanchéité complète du site de stockage de déchets au sein des installations souterraines de la mine Amélie, avant l'envoyage de celle-ci. Dans le présent rapport, ERCOSPLAN commence par résumer les informations et données obtenues à la suite d'études techniques conduites par l'INERIS et présente ensuite 3 variantes possibles du concept de sécurité intitulé "système multi-barrières", incluant les estimations de coûts et le calendrier des travaux. Enfin, ERCOSPLAN fournit la liste de ses recommandations et conclusions.

## T A B L E D E S M A T I E R E S

<b>1</b>	<b>Historique</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Programme de l'étude</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Législation environnementale et industrielle en France</b>	<b>8</b>
3.1	Durée des permis, fin de l'exploitation	8
3.2	Fermeture de StocaMine, Modifications de la législation	9
<b>4</b>	<b>Synthèse des études techniques réalisées par l'INERIS</b>	<b>9</b>
4.1	Étude géomécanique de StocaMine	9
4.2	Étude hydrogéologique de StocaMine	11
4.3	Synthèse des études techniques	12
<b>5</b>	<b>Concept de sécurité "Système à barrières multiples" pour l'inclusion totale des déchets toxiques</b>	<b>14</b>
5.1	Description des barrières géologiques	15
5.2	Conception technique de la variante 1	16
5.2.1	Éléments de conception de base	16
5.2.1.1	Données de base	16
5.2.1.2	Conditions de base	19
5.2.2	Conception de barrages étanches à la saumure	20
5.2.2.1	Principe de conception d'ingénierie	20
5.2.2.2	Matériaux de construction stables à long terme	20
5.2.2.3	Conception technique des barrages étanches à la saumure	21
5.2.3	Pré-dimensionnement des composants multi-structures	23
5.2.3.1	Pré-dimensionnement des butées A1 et A2	23
5.2.3.2	Pré-dimensionnement des éléments d'étanchéité	24
5.2.3.3	Longueurs des barrages résultants	25
5.2.4	Technique de construction	26
5.3	Conception technique de la variante 2	26
5.3.1	Éléments de conception de base	26
5.3.2	Matériau de remblayage	28
5.3.3	Technique de remblayage	28
5.4	Conception technique de la variante 3	30
5.4.1	Éléments de conception de base	30
5.4.2	Matériau de remblayage	32
5.4.3	Technique de remblayage	32
<b>6</b>	<b>Estimation des coûts et du temps nécessaire à la construction</b>	<b>33</b>
6.1	Estimation du coût de la variante 1	33
6.2	Estimation du coût de la variante 2	34
6.3	Estimation du coût de la variante 3	35
6.4	Estimation préliminaire du temps nécessaire aux travaux de remblayage	36
<b>7</b>	<b>Recommandations et conclusions</b>	<b>37</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Évaluation géomécanique et hydrogéologique attendue de StocaMine et du secteur ouest global	13
Figure 2	Présentation schématique du SConcept de sécurité “Système à barrières multiples” pour le dépôt de déchets souterrain de StocaMine	15
Figure 3	Aperçu de l'emplacement des barrages prévus	17
Figure 4	Conception de construction dérivée pour les constructions d'étanchéité de galerie	21
Figure 5	Présentation de l'emplacement des barrages prévus ainsi que des galeries principales qui doivent être remblayées	27
Figure 6	Technique de remblayage avec une installation de remblayage à la surface	29
Figure 7	Présentation de l'emplacement des barrages prévus ainsi que des galeries et cavités principales qui doivent être remblayées dans les blocs de stockage	31

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Dimensions des galeries au milieu des barrages prévus	17
Tableau 2	Paramètres de calcul des saumures d'intrusion à 25 °C	19
Tableau 3	Pré-dimensionnement des butées de galeries simples	24
Tableau 4	Pré-dimensionnement des butées de galeries doubles	24
Tableau 5	Pré-dimensionnement des éléments d'étanchéité	25
Tableau 6	Longueurs des barrages résultants conformément au pré-dimensionnement	25
Tableau 7	Volume de cavité des principales galeries	27
Tableau 8	Volume de cavité restant des blocs de stockage	32
Tableau 9	Estimation des coûts de la variante 1 – Construction de barrage dans les galeries d'accès	34
Tableau 10	Estimation des coûts de la variable 2 – Construction de barrage dans les galeries d'accès et remplissage supplémentaire des galeries principales par du ciment de remblai	35
Tableau 11	Estimation des coûts de la variante 3 – Construction de barrage dans les galeries d'accès et remplissage supplémentaire des galeries principales et des cavités restantes dans les blocs de stockage par du ciment de remblai	36
Tableau 12	Estimation préliminaire du temps nécessaire aux travaux de remblayage	37

## LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE A Plan général du site de dépôt de déchets de Stocamine et recommandations relatives aux positions du barrage de la variante 1
- ANNEXE B Coupe transversale des barrages étanches à la saumure
- ANNEXE C Plan général du site de dépôt de déchets de Stocamine, positions du barrage et zone de remblayage de la variante 2
- ANNEXE D Plan général du site de dépôt de déchets de Stocamine, positions du barrage et zone de remblayage de la variante 3

## LISTE DES ABREVIATIONS

Les abréviations des unités/constants physiques utilisées dans tout ce

rapport sont les suivantes : g	gramme
g/cm <sup>3</sup>	gramme par centimètre cube
g/l	gramme par litre
H <sub>2</sub> O	eau
ha	hectare oxyde
K <sub>2</sub> O	de potassium
KCl	chlorure de <i>potassium</i>
kg	kilogramme
km	kilomètre
km <sup>2</sup>	kilomètre carré
m	mètre
m <sup>2</sup>	mètre carré mètre
m <sup>3</sup>	cube
m <sup>3</sup> /	mètres cubes par an
a	mètres cubes par jour
m <sup>3</sup> /	mètres cubes par heure
d	pourcentage de la masse
m <sup>3</sup> /	magnésium
h	chlorure de magnésium
m%	millimètre
Mg	chlorure de
MgCl <sub>2</sub>	sodium tonne
mm	métrique
NaCl	tonnes métriques par an
t	tonnes métriques par jour
t/a	tonnes métriques par
t/d	heure
t/h	
%	pourcentage

## 1 Historique

StocaMine exploite un dépôt de déchets dans le champ minier de l'ancienne mine de potasse Amélie, à proximité de Wittelsheim, où environ 42 000 tonnes de déchets ont été déposées dans des blocs de stockage développés dans le sel gemme, sous le gisement de potasse. Ces déchets sont principalement constitués de cendres industrielles, mais aussi de matériaux contenant des métaux lourds, des cyanures, de l'amiante, des pesticides ainsi que des déchets de laboratoire et de sols contaminés. À la suite d'un incendie survenu dans l'un des blocs d'élimination, les activités de stockage dans Stocamine ont cessé en 2002. Ensuite, la fermeture du site de dépôt des déchets a été décidée.

La fermeture du site de stockage doit être planifiée en tenant compte d'une invasion potentielle d'eau / de saumure dans la mine de potasse abandonnée, qui est reliée au site d'élimination par de nombreuses galeries.

Plusieurs études ont été menées pour évaluer les variantes qui consistent à enlever les déchets ou à procéder à leur inclusion totale (par exemple BMG Engineering AG, 2004 ; ERCOSPLAN, 2008). À la suite de l'évaluation de ces études par la DIRECTION DES RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL de l'INERIS, d'autres études ont été menées sur les aspects géomécanique hydrogéologiques. Le résultat de ces études a permis de définir les conditions de base pour la fermeture du site d'élimination des déchets.

Le 26 mai 2011, StocaMine a engagé ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH (ERCOSPLAN) sur la base de la proposition commerciale révisée (en date du 9 Mai 2011) en lui fournissant les documents d'évaluation de l'INERIS pour mettre à jour la base de données pour l'évaluation de la fermeture du site de stockage et le développement de concepts techniques selon trois variantes de fermeture. La faisabilité technique et économique ainsi que la stabilité à long terme de l'inclusion des déchets pour chacune de ces variantes doit être étudiée pour comparer les variantes.

## 2 Programme de l'étude

Le programme de l'étude a été décomposé selon les 3 tâches suivantes :

TACHE A :

Examen et évaluation des documents de l'INERIS /4/ & /5/ liés à la mise à jour des données géologiques, hydrogéologiques et/ou mécaniques de la roche et liés aux conceptions techniques d'isolement des déchets dangereux des autres parties de StocaMine. ERCOSPLAN résumera toutes les informations actualisées et pertinentes pour les travaux à venir (conditions de base).

TACHE B :

Conception de base pour chacune des conceptions techniques suivantes pour l'isolement des déchets dangereux des parties restantes de Stocamine ainsi que de la mine Amélie :

1. construction de barrages étanches à l'eau/la saumure dans les galeries d'accès au stockage souterrain de déchets,
2. construction de barrages étanches à l'eau/la saumure dans les galeries d'accès au stockage souterrain de déchets et remblayage supplémentaire des galeries présentes à l'intérieur du périmètre confiné au moyen de matériau adapté,

3. construction de barrages étanches à l'eau/la saumure dans les galeries d'accès au stockage souterrain de déchets et remblayage supplémentaire des galeries présentes à l'intérieur du périmètre confiné dans la zone d'élimination des déchets au moyen de matériau adapté et remblayage des vides restants dans les blocs de stockage autour des déchets dangereux stockés.

La conception de base pour chaque variante contient en outre une évaluation de la quantité/le débit de l'eau / la saumure qui pénètre sur le site d'élimination des déchets et une estimation des dépenses connexes en capital (CAPEX) et des dépenses opérationnelles initiales (OPEX) pour la période restante jusqu'à l'abandon de StocaMine.

TACHE C :

Dans le cadre de la tâche B, toutes les variantes précitées seront évaluées par ERCOSPLAN en utilisant les critères suivants : (i) faisabilité technique et (ii) analyse coûts-bénéfices. Dans ce cas, le bénéfice correspond au niveau de sécurité réalisable en termes de possibilité d'émanation éventuelle de solutions dangereuses dans la biosphère.

### **3 Législation environnementale et industrielle en France**

Le permis initial accordé par l'AUTORISATION PREFECTORALE D'EXPLOITATION /1/ a été approuvé et délivré à StocaMine le 3 février 1997. À cette époque, le stockage des déchets devait satisfaire aux critères législatifs en vigueur en France, liés aux :

- INSTALLATIONS CLASSEES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT selon la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 et de son décret d'application du 21 septembre 1977,
- ETABLISSEMENTS, DANGEREUX, INSALUBRES INCOMMUNES, selon un décret en date du 20 mai 1953 et l'article 5 de la loi du 19 décembre 1917,
- ELIMINATION DES DECHETS ET RECUPERATION DES MATERIAUX, selon la loi du 15 juillet 1975.

#### **3.1 Durée des permis, fin de l'exploitation**

Selon la DEMANDE DE PERMIS DU 19 février 1996, StocaMine avait l'autorisation d'exploiter, sous certaines conditions et avec les réserves spécifiées dans l'AUTORISATION PREFECTORALE D'EXPLOITATION de 1997. Le permis était valide pour une période maximale de 30 ans, et ensuite les déchets devaient être récupérés en l'absence de nouvelle extension d'autorisation.

Pendant cette période, le propriétaire devait satisfaire aux exigences indiquées dans l'autorisation et selon les lois françaises en vigueur (appliquées au stockage souterrain et en surface) :

- une quantité totale maximum de 320 000 tonnes de déchets stockés, avec une quantité annuelle de 50 000 tonnes, avec l'approbation de recevabilité des déchets et des critères d'exclusion,
- possibilités de déstockage, de réversibilité du stockage,
- programme de supervision du stockage souterrain (analyse chimique, mesures olfactives, contrôle de la température, surveillance mécanique, etc.),

- prévention de la pollution de l'air et de l'eau, respect des vibrations et des niveaux sonores selon les normes officielles,
- mesures de sécurité, organisation de l'établissement et information publique périodique.

### **3.2 Fermeture de StocaMine, modifications de la législation**

Le 10 septembre 2002, un incendie est survenu dans l'un des blocs de stockage de StocaMine. Ce feu a duré trois mois et a conduit à la fermeture de StocaMine en septembre 2003 avec un volume total 44 000 m<sup>3</sup> de déchets stockés.

À la suite de cet incident, les modifications suivantes ont été apportées à la législation :

- Le code FRANCAIS DE L'ENVIRONNEMENT /2/ mis à jour le 29 juin 2006 précisait, conformément à l'autorisation administrative, que les déchets devaient être déstockés après la fin de la durée initiale de l'autorisation qui pouvait prolongée pour une durée indéterminée après un minimum de 25 ans d'exploitation et au moins un an de cessation de l'activité.
- Si un stockage de durée illimitée est envisagé, l'autorisation sera délivrée sur la base d'études d'évaluation d'impact écologique et de solutions alternatives pour un stockage durable et les conséquences à long terme, selon les règlements de la CEE 2003/33/CE./3/ mis à jour depuis la réglementation 1999/31/CE, relative à la mise en décharge des déchets spécifiée dans la directive 2000/532/CE et la transcription dans la loi française n°2002-540.

Depuis septembre 2003, de nombreuses études ont été réalisées dans le but de :

- évaluer la faisabilité de déstockage de StocaMine.
- évaluer les conséquences d'un stockage illimité, et les risques potentiels résultants à long terme (plusieurs centaines d'années).

## **4 Synthèse des études techniques réalisées par l'INERIS**

En décembre 2010 et mars 2011, deux études ont été effectuées, concernant les paramètres géomécaniques et hydrogéologiques, et décrivant l'évolution à long terme prévue de la mine. Ensuite, des données d'entrée relatives à l'évaluation technique de la zone de remblayage, et surtout la prise en compte de la durabilité à long terme, pourraient avoir changé. C'est l'objet de la présente mise à jour technique.

Les paramètres et les conclusions importantes, résultant des hypothèses /4/ et /5/ de l'INERIS seront présentés dans les chapitres suivants.

## 4.1 Étude géomécanique de StocaMine

L'ETUDE GEOMECHANIQUE DE STOCAMINE /4/a été conduite selon 3 objectifs:

- a) L'évaluation/estimation de la stabilité mécanique du site de stockage et des infrastructures d'accès correspondantes, avec des études détaillées sur l'accessibilité du site à moyen terme, et les possibilités de déstockage à court ou à long terme<sup>1</sup>.
- b) L'évaluation du taux de fluage/vitesse des différentes structures (zones de stockage, galeries, foudroyage des zones exploitées), en liaison avec le problème de l'impact sur le taux de fluage, sur la migration des contaminants, et sur la possibilité d'accéder au site souterrain au cours du temps.
- c) Évaluation des dommages sur le toit (terrains de couverture) du stockage induit par l'incendie du bloc 15 qui a posé la question d'un raccordement hydraulique possible à travers les formations salifères endommagées.

Approches importantes et pertinentes faisant l'objet des conclusions de l'INERIS :

- a) Sur la stabilité mécanique :
  - Les piliers des galeries d'accès sont endommagés, ce qui soulève le problème de stabilité et durabilité à moyen terme et d'accessibilité.
  - Le contact entre le toit et les déchets est inévitable et devrait se produire au bout d'une période d'environ 30 ans après l'excavation ; le déstockage est donc probablement impossible.
  - La stabilité locale du "Sto"<sup>2</sup> est donc compromise (lorsque la largeur est inférieure à 20 m), ce qui suggère que l'imperméabilité des barrières n'est pas assurée et que le secteur ouest complet sera affecté lors de l'ennoyage.
  - Le toit, les parois et les piliers affectés par le feu sont endommagés. L'étude a montré que les dommages n'ont pas atteint le niveau situé à 25 m au-dessus, supposant que la perméabilité de ce sel est encore faible sur les 13 derniers mètres.
- b) Sur le taux de fluage des structures souterraines :
  - Il est prévu que le taux de convergence toit/mur doit atteindre 0,9 % par an pour la zone de stockage et les galeries doubles à 550 m.
  - La zone de stockage (y compris les galeries) devrait être complètement fermée au bout d'environ 100 ans (la perméabilité restera toujours non négligeable après la fermeture).
  - Un taux de compactage de 0,1 % par an est prévu avant l'ennoyage.
  - Le phénomène de flexion/flambage et le compactage résiduel devront être pris en compte pour les migrations des déchets/contaminants et de la saumure.
- c) Sur l'interaction entre le phénomène de flexion/ flambage et l'ennoyage/le remblayage :
  - L'hypothèse de 5 % à 10 % d'ouverture résiduelle après l'ennoyage avec 90 % de taux effondrement pourrait être justifiée à des profondeurs de 1 000 m, mais probablement surestimée à l'échelle de StocaMine.

---

<sup>1</sup> les court, moyen et long termes correspondent respectivement à quelques années, quelques décennies et quelques siècles.

- L'ennoyage aura probablement lieu après plusieurs siècles. La fermeture des structures sera terminée d'ici là (encore que, la perméabilité restera élevée). La vitesse de fluage pourrait diminuer pour atteindre environ 0,01 % par an dans les zones exploitées (foudroyage), ou 1 mm/an, ce qui est imperceptible.

Remarques importantes :

- Même si le compactage résiduel sera très lent dans le long terme, le taux de fluage représentera une source importante pour la migration des fluides vers l'extérieur. Ce phénomène doit être pris en compte pour les études hydrogéologiques et la migration des fluides.
- Les instabilités observées telles que le décollement/déconsolidation des toits (terrains de couverture), des murs et piliers sont censés être accentuées/altérées au fil du temps. Par conséquent, les décisions concernant les interventions doivent être prises rapidement.

## 4.2 Étude hydrogéologique de StocaMine

Les principaux objectifs et les conclusions sont présentés ci-dessous :

- Le rapport hydrogéologique se concentre sur l'ennoyage des zones ouvertes de la mine, en tenant compte de leur taux de compactage au fil du temps. Le rapport fournit des solutions concernant les ennoyages avec des infrastructures de barrière.

Les conclusions hydrogéologiques, compte tenu des données les plus récentes, sont les suivantes :

- a) hypothèse pour l'ennoyage complet de la mine :
- L'étude d'ennoyage a été effectuée en tenant compte de l'ensemble du secteur ouest de la mine, et en tablant sur le fait que le flux traverse le "Stot" qui sépare la mine Marie-Louise de la mine Amélie.
  - L'INERIS a consulté plusieurs experts sur différents flux entrants potentiels ou l'origine de la migration existante dans l'ensemble de la mine. Les conclusions conduisent à la prévision que le principal apport d'eau passera à travers les puits existants obturés (où un comportement perméable a été observé). L'afflux initial global attendu dans la mine a été estimé à environ 105 000 m<sup>3</sup> par an à travers les 15 puits existants.
  - En tenant compte des <sup>3</sup> paramètres mécaniques préalablement déterminés, le flux général entrant dans la mine va diminuer tandis que la fermeture et le compactage du volume ouvert vont progresser pour atteindre environ 3 000 m<sup>3</sup> par an au stade ultime (à long terme).

---

<sup>2</sup>Le "Stot" (pilier de sécurité), constitue une barrière naturelle qui sépare le secteur ouest entre les mines Marie Louise (flux aval) et Amélie (en amont). Ce "Stot" doit être distingué du pilier "Stot" situé au-dessus des blocs 25 et 26.

<sup>3</sup>Taux de fermeture général d'environ 0,9 % pour StocaMine, taux de compactage de 0,1 % pour les zones non inondées et taux de compactage de 0,01 % pour les zones inondées. La mine doit être fermée mécaniquement 100 ans après l'excavation.

- Le niveau global de saumure <sup>4</sup> doit atteindre la zone de stockage au bout de 240 ans, en tenant compte qu'environ 7 % (2,06 millions m<sup>3</sup>) du secteur ouest est probablement déjà ennoyé. L'ensemble de la mine devrait être ennoyé au bout de 305 ans <sup>5</sup> (StocaMine et niveaux supérieurs de la mine Amélie).
  - Le volume d'air piégé global après l'ennoyage achèvement est estimé à 10 %.
- b) détails du scénario d'ennoyage prévu pour la zone de stockage en l'absence des structures de barrière :
- L'ennoyage de la mine sera constitué d'une combinaison de flux entrants potentiels de deux origines :  
Une partie de l'ennoyage ne devrait représenter que 2 % du flux entrant total de saumure et pénétrerait par infiltration dans les parties amont du secteur ouest, depuis les puits Joseph et Else. Le flux entrant de ces puits est estimé comme très faible, car ceux-ci doivent être obturés au moyen des dernières technologies<sup>6</sup>. En l'absence de barrages ou d'autres infrastructures de barrière, et en tenant compte d'une fermeture de la zone de stockage, il a été admis que StocaMine pourrait être ennoyée en limitant le lessivage des contaminants à une valeur faible pendant le processus de flux.  
La partie principale de l'ennoyage devrait provenir des niveaux en aval et devrait atteindre le site de stockage après 240 ans. Le site devrait être fermé mécaniquement, mais en supposant qu'une perméabilité suffisante persiste pour laisser le flux de saumure à environ 3 l/s, le scénario se composerait de 6 étapes :
  - La saumure mixte, qui soulève les niveaux inférieurs de la mine se propage d'abord au niveau 286 d'Amélie II, puis traverse TB2 et arrive à l'"Atelier Réseaux".
  - Ensuite, la saumure inonde l'"Atelier Réseaux" et traverse les galeries AM1 et AM2.
  - La saumure atteint les premiers déchets dans le bloc 21 par AM2, puis envoie progressivement la zone de stockage complète et est simultanément contaminée.
  - Une fois le remplissage terminé, la saumure reflue dans TBO et atteint le puits Joseph et passe par le TBJOS.
  - Puis la saumure commence à ennoyer les quartiers des couches inférieures de potasse et arrive à TB910 et ennoyer progressivement les zones voisines.
  - La saumure inonde l'ensemble de la mine, puis remonte à travers les intrados et extrados des puits vers la surface.

---

<sup>4</sup> Il est estimé que la saumure est saturée et en équilibre avec les formations salines et le minerai de potasse. La densité de cette saumure a été estimée à 1,236 g/cm<sup>3</sup>.

<sup>5</sup> La référence temporelle est l'année 2010.

<sup>6</sup> Débit total prévu de 1 700 m<sup>3</sup> par an.

Le volume résiduel estimé de la zone de stockage devrait être d'environ 7 000 m<sup>3</sup> (volume initial de 300 000 m<sup>3</sup>). Étant donné qu'une barrière hydrogéologique parfaite à long terme pour la zone de stockage est difficile à obtenir ; un débit contaminé d'environ 0,7 m<sup>3</sup>/an pourrait être observé. La porosité prévue des déchets a été évaluée à 31 % en moyenne après la fin de l'ennoyage.

### **4.3 Synthèse des études techniques**

Les résultats des études techniques /4/ et /5/ de l'INERIS sont récapitulés à la Figure 1.

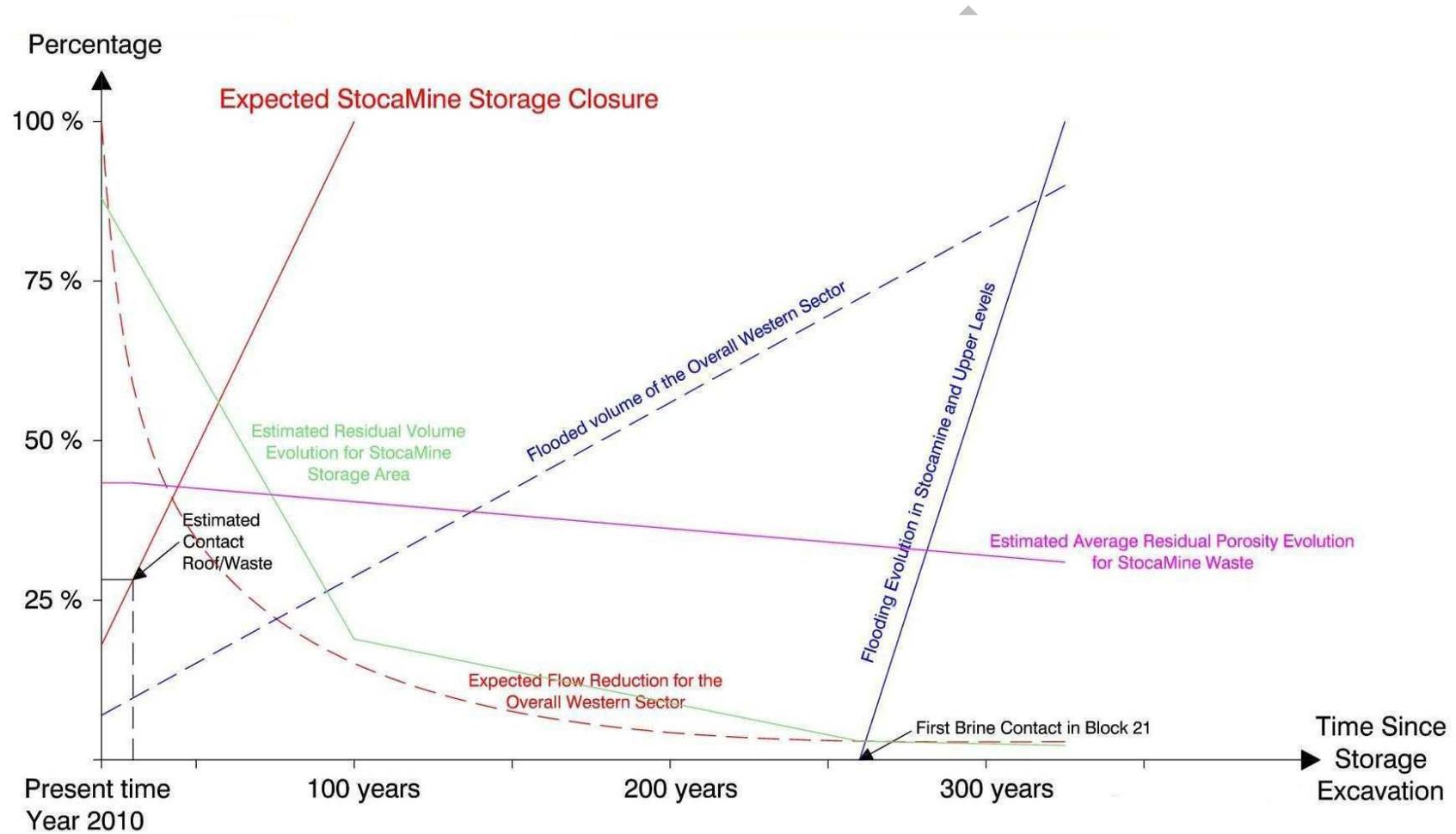


Figure 1 Évaluation géomécanique et hydrogéologique attendue de StocaMine et du secteur ouest global

## 5 Concept de sécurité du "Système à barrières multiples" pour l'inclusion totale des déchets toxiques

L'isolation permanente requise des déchets déposés dans StocaMine par rapport à la biosphère ne peut être réalisée qu'en incluant complètement les déchets dans la roche hôte, le sel gemme. Comme le complexe de barrière externe, comprenant :

- les barrières géologiques autour des mines Amélie et Marie-Louise.  
qui comprend la zone supérieure de sel d'environ 550 m d'épaisseur et la zone intermédiaire de sel d'environ 300 m d'épaisseur. Elles sont imperméables, exemptes d'eau et contiennent les marnes du Stampien intermédiaire, au-dessus de la zone supérieure de sel qui présente une perméabilité très faible.
- les barrières géotechniques,  
qui se composent de tous les puits et trous de forage de surface bouchés, qui traverse des barrières géologiques du complexe de barrière extérieure.
- la barrière géochimique,  
qui se compose des marnes du Stampien. Si un matériau élué quelconque devait atteindre ces marnes, le caractère absorbant de la marne permettrait de le lier à ces strates, fonctionne uniquement comme une barrière hydraulique en raison de fuites dans les barrières géotechniques existantes, de sorte que les mines Amélie et Marie-Louise sont soumises à un processus d'envoyage, l'inclusion totale efficace à long terme des déchets doit être effectuée par un complexe de barrières internes. Ce complexe de barrières internes se compose des éléments suivants :
  - les barrières géologiques autour du site d'élimination des déchets,  
qui comprennent le pilier entre le site d'élimination des déchets et la couche inférieure de potasse "Cl", le pilier de sécurité autour des puits Joseph Else et la zone de sel intermédiaire et supérieure adjacente.
  - les barrières géotechniques,  
qui se composent de tous les puits et sondages de surface obturés et des barrages de confinement qui ont été prévus dans la variante 1, au travers des barrières géologiques du complexe de barrières internes.
  - le cas échéant, les barrières intérieures,  
qui consistent à remplir les galeries principales de matériau approprié et qui étaient également prévues dans la variante 2, afin de réduire l'affaiblissement du pilier entre le site d'élimination des déchets et la couche inférieure de potasse "Cl"  
ou  
qui consistent à remplir les principales galeries et les cavités restantes dans les blocs de stockage de matériau approprié qui étaient également prévues dans la variante 3, afin de minimiser l'affaiblissement du pilier entre le site d'élimination des déchets et la couche inférieure de potasse "Cl" et de bloquer chimiquement les substances dangereuses dans le matériau de remblai.
- les barrières techniques, constituées par les contenants des déchets.

Une présentation schématique du concept de sécurité "Système multi-barrières" du site d'élimination des déchets souterrain de StocaMine est présentée à la Figure 2.

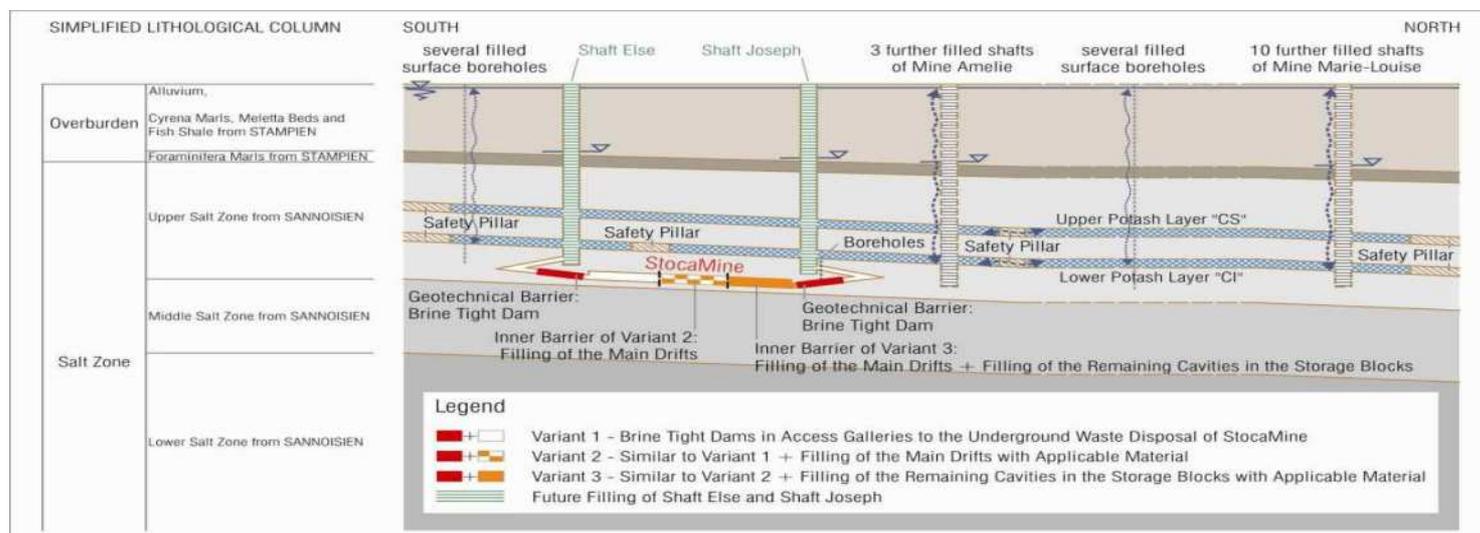


Figure 2 Présentation schématique du Concept de sécurité "Système multi-barrières" du site d'élimination des déchets souterrain de StocaMine

Dans les sections suivantes, les composants individuels du complexe effectif de barrière interne pour l'isolement futur des déchets par rapport à la biosphère seront décrits. En outre, un schéma conceptuel des barrières géotechniques intérieures sera présenté.

## 5.1 Description des barrières géologiques

Les barrières géologiques autour du site d'élimination des déchets comprennent les terrains de couverture entre le site d'élimination des déchets et la couche inférieure de potasse "CI", le pilier de sécurité autour des puits Joseph et Else et les zones salifères intermédiaire et supérieure adjacentes.

Le pilier entre le site d'élimination des déchets et la couche inférieure de potasse "CI" est composée de de halite massive interstratifiée avec des couches marno-anhydritiques de la partie inférieure de la zone salifère supérieure. Il a été démontré que cette particularité géologique a un impact sur la vitesse de fluage.

L'épaisseur moyenne de la couche est d'environ 25 m et elle sépare la couche de potasse inférieure "CI" exploitée dans la mine Amélie des blocs de stockage et des galeries. Il a été considéré que, la perméabilité globale de cette barrière géologique reste faible<sup>7</sup> ; même pour les zones endommagées telles que la zone touchée par l'incendie du bloc 15 en 2002 ou les zones affectées par les creusements, qui ne concernent que les 12 premiers mètres de l'épaisseur du toit (terrains de couverture) du stockage.

## 5.2 Conception technique de la variante 1

Dans la variante 1, la construction de barrages étanches à la saumure dans les galeries d'accès au site de stockage souterrain des déchets est étudiée. Pour la conception technique de la barrière géotechnique (barrage étanche à la saumure), les étapes suivantes seront effectuées :

- Les bases de la conception seront résumées,
- le concept d'étanchéité sera développé,
- les composants individuels de construction seront pré- dimensionnés et
- la conception de la construction fera l'objet d'une illustration structurelle.

### 5.2.1 Éléments de conception de base

Les éléments de conception de base comprennent d'une part toutes les données de base qui ont trait à l'emplacement des barrages ainsi que l'intrusion potentielle de saumure et d'autre part, toutes les autres contraintes desquelles les exigences en termes de conception de construction peuvent être déduites.

#### 5.2.1.1 Données de base

Pour la conception technique de la variante 1, les données de base suivantes s'appliquent :

- a) concernant les emplacements des barrages

Afin d'isoler la zone de stockage du reste de la mine, la construction de barrages d'étanchéité en galeries concernera 11 emplacements. Une vue d'ensemble des emplacements des constructions prévues se trouve à la Figure 3 et à l'ANNEXE A.

---

<sup>7</sup>  $10^{-21}$  à  $10^{-20}$  m<sup>2</sup> pour les zones intacts, localement inférieure à  $10^{-18}$  m<sup>2</sup> autour des zones endommagées par l'exploitation et  $10^{-17}$  à  $10^{-15}$  m<sup>2</sup> pour les zones endommagées par l'incendie.

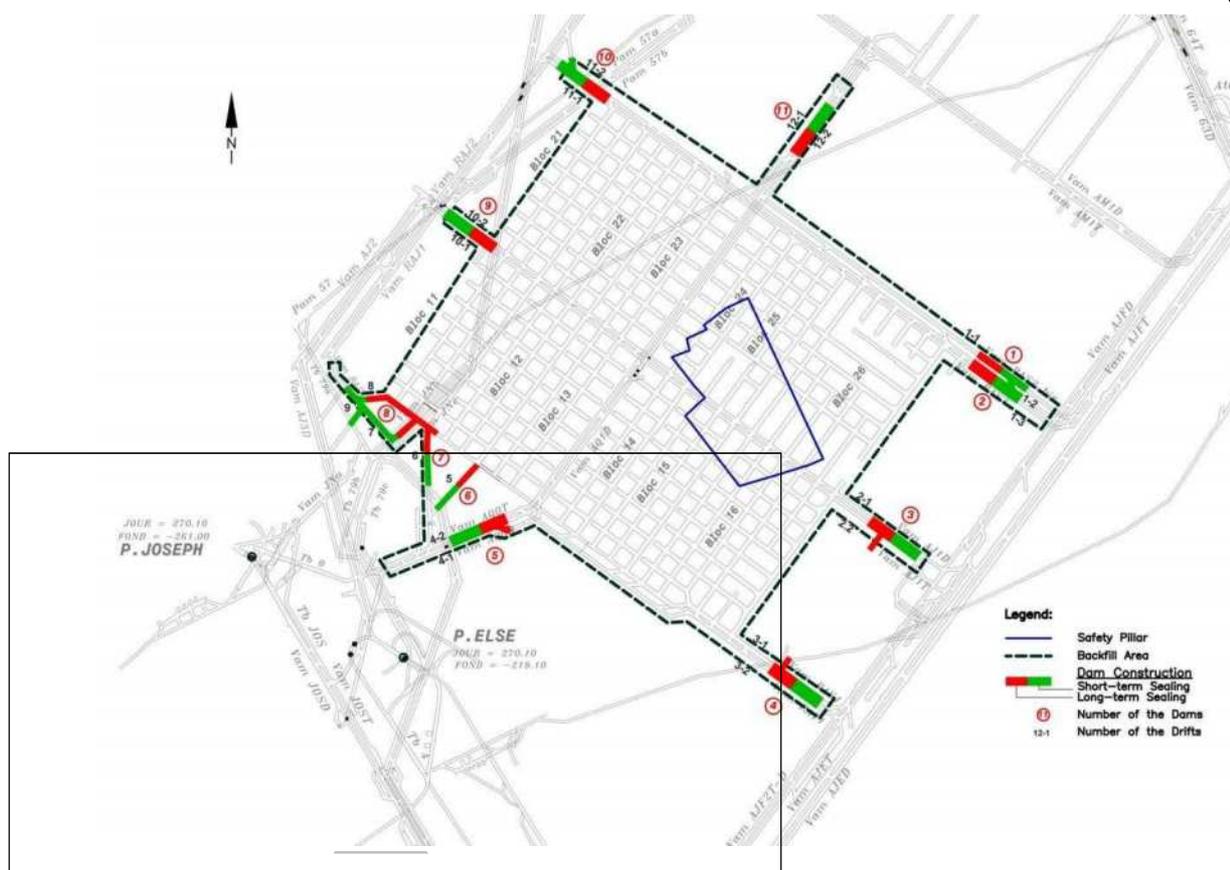


Figure 3 - Aperçu de l'emplacement des barrages prévus

b) concernant les dimensions des galeries d'accès

Les largeurs des barrages et des piliers aux emplacements des barrages ont été obtenus à partir du plan de la mine. Il est supposé que pour les barrages qui doivent être construits dans des doubles galeries, le pilier intermédiaire doit être retiré et, par conséquent, le barrage sera donc très large. Une hauteur de 3,0 m a été retenue pour les galeries. Un aperçu des dimensions des galeries est récapitulé au Tableau 1

Tableau 1 Dimensions des galeries au niveau des barrages prévus

ID galerie	Hauteur en m	Largeur en m	Largeur de pilier en m	Type de galerie	N° barrage	Largeur de barrage en m	Hauteur de barrage en m
1-1	3,0	5,6		Galerie parallèle	1	5,6	3,0
			7,1				
1-2	3,0	3,8					
			3,0	Double galerie	2	10,7	3,0
1-3	3,0	3,9					

ID galerie	Hauteur en m	Largeur en m	Largeur de pilier	Type de galerie	N° barrage	Largeur de barrage	Hauteur de barrage
2-1	3,0	3,8					
			3,2	Double galerie	3	10,8	3,0
2-2	3,0	3,8					
3-1	3,0	5,5					
			3,2	Double galerie	4	13,7	3,0
3-2	3,0	5					
4-1	3,0	4,8					
			3,2	Double galerie	5	11,8	3,0
4-2	3,0	3,8					
5	3,0	3,8		Galerie simple	6	3,8	3,0
6	3,0	3,8		Galerie simple	7	3,8	3,0
7	3,0	4,2		Galerie simple	8-1	4,2	3,0
8	3,0	3,8		Galerie simple	8-2	3,8	3,0
9	3,0	4,3		Galerie simple	8-3	4,3	3,0
10-1	3,0	3,9					
			3,2	Double galerie	9	10,9	3,0
10-2	3,0	3,8					
11-1	3,0	3,8					
			3,1	Double galerie	10	10,8	3,0
11-2	3,0	3,9					
12-1	3,0	3,8					
			3,3	Double galerie	11	10,9	3,0
12-2	3,0	3,8					

c) concernant l'environnement géologique des emplacements du barrage

Les emplacements des barrages se trouvent toujours dans le sel gemme. La masse rocheuse est supposée être exempte de fissures dans les sites de construction prévus. Les barrières géologiques du complexe de barrière interne sont réputées intactes. L'expansion de la zone déconsolidée (EDZ) est généralement estimée à 0,50 m. Elle sera retirée de la zone entourant les constructions d'étanchéité. Pour la perméabilité du sel gemme surexcavé, une valeur inférieure ou supérieure à  $10^{-18}$  m<sup>2</sup> est estimée. Toute autre considération repose sur une température de la roche de 25 ° C, car cela représente un cas normal en ce qui concerne les viscosités.

d) en ce qui concerne l'intrusion potentielle de saumure et de la charge de compression attendue.

Dans la phase postérieure à la fermeture du site d'élimination des déchets de StocaMine, les intrusions d'eau salée feront l'objet d'estimations. L'échéance de

l'arrivée de la saumure au niveau du stockage est attendue selon /5/, au bout de 240 ans, au plus tôt. La saumure entrante sera potentiellement constituée par la combinaison de solution saturée en NaCl et d'une solution qui est à l'équilibre avec la roche hôte (Saumure à dominante de NaCl et de KCl avec une quantité marginale de MgCl<sub>2</sub>). Un aperçu des paramètres de base des saumures à une température de roche de 25 °C est présenté dans le Tableau 2.

Tableau 2 Paramètres de calcul des saumures entrantes à 25 °C

Densité	de la saumure de pénétration $\rho$ en g/cm <sup>3</sup>
Saumure saturée en NaCl	1,197
Saumure à dominante de NaCl et de KCl avec une quantité marginale de MgCl <sub>2</sub>	1 236

La pression de fluide prévue maximum s'élève à 7,3 MPa<sup>8</sup>. Selon /5/, les constructions d'étanchéité seront atteintes après 240 ans, au plus tôt.

### 5.2.1.2 Conditions de base

Les conditions de base suivantes liées à l'état de la mine ont une influence sur la conception :

a) Capacité de transport et de levage du puits

Capacité de l'équipement de levage disponible dans les puits existants :

- Cage d'extraction d'une capacité de 5,0 tonnes dans le puits Joseph (entraînée par une poulie « Köepe ») avec contrepoids et câble d'équilibre.
- Cage d'extraction d'une capacité de 4,5 tonnes (tenant compte de son volume) dans le puits Else.

b) Équipement mécanique disponible

Pour la production de minerai d'Halite, une zone de réserve près du stockage est prête à produire la quantité requise pour la construction des barrages. Un équipement souterrain tel qu'un mineur continu "PAURAT E 195" et un équipement de découpe en longue taille "JOY 15 RU", en état de fonctionnement sont disponibles pour les opérations.

c) zone utilisable

Une analyse du plan de la mine montre qu'il n'y a qu'un espace limité disponible pour le stockage des matériaux de construction, etc.

<sup>8</sup> Approche conservatrice, qui suppose que la colonne d'eau atteint la surface.

En outre, les conditions de base requises par /6/ de l'INERIS s'appliquent :

a) concernant la durée de vie des constructions d'étanchéité

Les constructions d'étanchéité doivent être conçues pour avoir une durée de vie de 10 000 ans.

b) concernant les matériaux des éléments d'étanchéité

Il est préférable d'utiliser la bentonite comme matériau pour les éléments d'étanchéité, car elle possède non seulement les propriétés d'étanchéité nécessaires, mais aussi un effet absorbant sur les métaux lourds.

c) concernant le rapport perméabilité-longueur des matériaux des éléments d'étanchéité.

Pour le pré-dimensionnement des éléments d'étanchéité, le rapport perméabilité-longueur de l'équation (5.1) a été utilisé.

$$\bullet \frac{K}{L^2} < 10^{-21} \quad (5.1)$$

avec : K Perméabilité intrinsèque de l'élément d'étanchéité [m<sup>2</sup>]

L Longueur de l'élément d'étanchéité [m]

## 5.2.2 Conception de barrages étanches à la saumure

### 5.2.2.1 Principe de conception d'ingénierie

La planification de la stabilité à long terme des ouvrages d'étanchéité dans le sel gemme repose sur les principes de conception d'ingénierie suivants /7/, /8/ :

- classement des éléments d'étanchéité en éléments ayant une fonction d'étanchéité et en éléments ayant une fonction statique,
- redondance dans la disposition des éléments d'étanchéité, à savoir de nombreux éléments d'étanchéité semblables sont placés consécutivement,
- diversité dans l'agencement des éléments d'étanchéité, à savoir, de nombreux éléments d'étanchéité qui sont fabriqués à partir de matériaux différents sont placés consécutivement,

ce qui assure un niveau de sécurité augmenté au fil du temps ciblée pour l'ensemble du système.

### 5.2.2.2 Matériaux de construction stables à long terme

Les constructions de barrage dans les galeries d'accès au stockage souterrain de déchets doivent être conçues pour une durée de vie de 10 000 ans. Fondamentalement, les matériaux suivants qui sont stables sur le long terme pour assurer l'étanchéité d'une section de galerie contre l'intrusion prévue de la saumure sont disponibles :

- bitume / asphalte,
- argile / bentonite / mélanges de minéraux,
- grains de sel / havrit de sel
- béton de sel / coulis de remblayage faits à partir de matériaux salifères s'apparentant au sel.

Les groupes de matériaux de bitume/asphalte ainsi que de l'argile, la bentonite, les mélanges de minéraux doivent être positionnés au-delà de la butée dans la section d'étanchéité pour assurer leur fonction d'étanchéité. Seuls des matériaux appartenant au groupe béton de sel / coulis de remblayage peuvent être envisagés pour une utilisation dans les conditions de base applicables ici. Les bétons normaux ainsi que les bétons mélangés avec de la saumure sont soumis à des processus corrosifs, de telle sorte que leurs propriétés matérielles sont modifiées de façon significative au cours de la période de référence. Des butées en maçonnerie sans joints fabriquées à partir de pierre naturelle, qui possèdent une stabilité à long terme sont possibles théoriquement, mais pour la quantité nécessaire ici, c'est inenvisageable pour des raisons économiques et techniques.

Le groupe de matériaux de grains de sel / havrit de sel ainsi que les matériaux de type béton de sel / coulis de remblayage n'assurent un effet d'étanchéité complète qu'après un certain laps de temps, après que la surpression ait augmenté le contact entre la construction et la roche à la suite d'une convergence croissante, c'est-à-dire, après une "phase de mise en place ou stabilisation".

### 5.2.2.3 Conception technique des barrages étanches à la saumure

La conception technique repose principalement sur la constitution de la construction d'étanchéité au moyen de composants structurels respectivement efficace à long terme et à court terme. L'étanchéité des galeries efficace à long terme devrait être un élément combiné de butée et d'étanchéité en béton de sel. La performance de ce type de construction repose sur une phase de mise en place ou stabilisation, pendant laquelle, en raison de la vitesse de fluage élevée (voir Section 4.1), une durée maximum de 500 ans est supposée. Etant donné que selon l'ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE STOCAMINE /5/, l'intrusion la plus proche possible dans le temps peut déjà se produire après 240 ans, soit alors que la performance de cette composante de la construction n'est pas complètement vérifiable, une composante supplémentaire avec un effet instantané doit être placée du côté où est prévue l'intrusion de saumure. Ce composant sera constitué de deux éléments d'étanchéité en bentonite disposés de manière redondante ainsi que d'un élément d'étanchéité en béton bitumeux positionné de manière hétérogène par rapport aux éléments de bentonite. Les éléments d'étanchéité seront positionnés entre les butées de béton de saumure dans la galerie (Voir Figure 4).

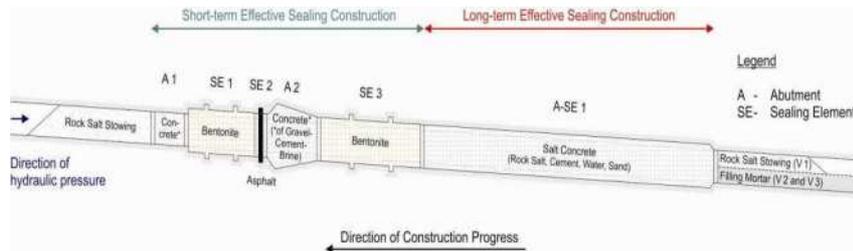


Figure 4 Principe de conception pour la construction des ouvrages d'étanchéité en galeries.

La construction de base du barrage ainsi que la fonction des composants de construction individuels peuvent être décrites comme suit :

- **Remblayage de sel gemme**

Afin d'harmoniser les différences de rigidité entre les butées extérieures et la section transversale de la galerie qui doit être laissée ouverte, un remblai d'environ 15 m de long à base havrit de sel gemme sera placé au droit de chaque construction de barrage. Le havrit de sel doit être clavé au niveau de la voute.

- **Butée (A 1)**

La butée A 1 présente une fonction à court terme et agit comme un barrage de blocage. Elle absorbe la pression de gonflement induite par l'élément d'étanchéité SE 1. Le contour de la galerie ne sera pas prolongé dans cette zone, mais seulement retiré rétroactivement. Pour cette butée temporaire, il est prévu d'utiliser un mélange de gravier-ciment-sel-béton. La durée de fonctionnement des constructions en béton peut être spécifiée comme pouvant durer jusqu'à 1 000 ans. La construction de structures comparables représente une technologie qui a été essayée et testée pendant de nombreuses années dans l'industrie allemande de la potasse.

- **Élément d'étanchéité (SE 1)**

L'élément d'étanchéité SE 1 en briques moulées de bentonite a une fonction à court terme et isole contre les pénétrations de saumure sur une période de temps plus longue. SE 1 sera équipé de tranchées d'étanchéité circonférentielles. Afin d'augmenter la perméabilité initiale dans la section centrale opposée à celle de la section externe (contact d'étanchéité entre l'élément/roche), ainsi que pour obtenir une accumulation optimale de la pression de gonflement "de l'intérieur" vers les contours, des pierres de filtration (pierres Korund-LS) seront placées au milieu des deux premières rangées, côté pression. Le massif encaissant doit être surexcavé pour éliminer la zone déconsolidée au niveau du contact avec les parements, au toit et au mur. La profondeur de la zone à surexcaver est estimée à 0,5 m et doit être confirmée au cours de la construction par des mesures de perméabilité.

- **Élément d'étanchéité (SE 2)**

L'élément d'étanchéité SE 1 est suivi par l'élément d'étanchéité SE 2, en briques d'asphalte coulé qui entaillent la circonférence de la roche. Les tranchées circonférentielles doivent présenter une profondeur de 0,5 m et une largeur de 0,5 m.

- **Butée (A 2)**

La butée A 2 a une fonction à court terme. Elle sera conçue sous la forme d'un cône tronqué et doit présenter un frottement faible. La galerie sera élargie pour la construction du cône tronqué en utilisant une machine de creusement à attaque ponctuelle, qui réalise une découpe soignée sans endommager la roche en place. La butée A2 prend en charge la transmission de charge axiale pendant la pénétration de la saumure. Un mélange de gravier-ciment-sel- béton est prévu pour être utilisé comme matériau de construction pour la butée 1 et la butée 2

- **Élément d'étanchéité (SE 3)**

Élément d'étanchéité SE 3, qui est également fabriqué en briques moulées de bentonite, a une fonction d'isolation redondante pour l'élément d'étanchéité SE1. Dans la zone de l'élément d'étanchéité SE3, le massif encaissant doit être surexcavé pour éliminer la zone déconsolidée au niveau du contact avec les parements, au toit et au mur. La profondeur sur laquelle le massif doit être retiré est estimée à 0,5 m et doit être confirmée au cours de la construction par des mesures de perméabilité.

- **Élément combiné de butée et d'étanchéité (A-SE 1)**

L'élément combiné de butée et d'étanchéité qui est réalisé en béton de sel, a une fonction à long terme. Après une phase de mise en pression de 500 ans maximum, il assure l'étanchéité de la section de galerie exclusivement sur la période de référence. Une telle performance est possible, en raison des processus de convergence des mécanismes de déformation induits, qui mèneront ensuite à un contact parfait entre le béton de sel et la roche encaissante. Dans la zone de l'élément combiné de butée et d'étanchéité, le massif doit être surexcavé soigneusement dans les joints, la voûte et le sol de la zone de décompactage. La profondeur sur laquelle le massif doit être retiré est estimée à 0,5 m et doit être confirmée au cours de la construction par des mesures de perméabilité.

- **Remblai de sel gemme (uniquement si la variante 1 est sélectionnée)**

Afin d'équilibrer les différences de rigidité entre l'élément combiné de butée et d'étanchéité et la section de la galerie qui doit être laissée ouverte, un remblai d'environ 15 m de long à base de havrit de sel gemme sera placé en face de chaque construction de barrage. Le havrit de sel gemme doit être clavé jusqu'au niveau de la voûte.

### 5.2.3 Pré-dimensionnement des composants multi-structures

Dans les sections suivantes, les butées ainsi que les éléments d'étanchéité seront pré-dimensionnés. Le pré-dimensionnement ne remplace pas les études de dimensionnement en matière de résistance en fonction du temps pour cette construction. Il sert seulement de guide pour définir les dimensions des éléments de structure.

#### 5.2.3.1 Pré-dimensionnement des butées A1 et A2

Conformément au SITZ 1982 /7/, le pré-dimensionnement de barrages en forme de cône tronqué, parallèles et interverrouillés, la vérification reposant sur les équations (5.2) et (5.3) est nécessaire.

- Analyse de contrainte de cisaillement : (5.2)

avec  $L_1$  Longueur requise de la butée [m]  
 $p$  Pression hydrostatique du fluide [N/cm<sup>2</sup>]  
 $A$  Superficie de la section de la galerie [m<sup>2</sup>]  
 $P_e$  Périmètre de la galerie [m]  
 $\tau$  Contrainte de cisaillement admise du matériau de construction [N/cm<sup>2</sup>]

- Analyse de contrainte de flexion  $L_2 = \sqrt{\frac{p \cdot d^2}{\sigma \cdot \sigma_z}}$  (5.3)

avec : $L_2$	Longueur requise de la butée [m]
$p$	Pression hydrostatique du fluide [N/cm <sup>2</sup> ]
$d$	Dimension de la galerie la plus courte [m]
$\sigma_z$	Contrainte de flux admise par le matériau de construction [N/cm <sup>2</sup> ]

La pression hydrostatique maximum devait être de 7,3 MPa. Les mesures de galerie, qui forment la base du pré-dimensionnement, sont répertoriées au Tableau 1. Le béton mélangé avec de la saumure devrait être utilisé comme matériau de construction pour les butées 1 et 2. Pour ce matériau de construction, les valeurs suivantes sont applicables à la catégorie de résistance C25 / 30.

- Contrainte de cisaillement admise  $\tau$  170 N/cm<sup>2</sup>,
- Contrainte de flux admise  $\sigma_z$ : 110 N/cm<sup>2</sup>,

Les mesures des butées reposent sur ces valeurs et sont répertoriées au Tableau 3 et Tableau 4.

Table 3 Pré-dimensionnement des butées de galeries simples

Longueur requise	de la butée $L_1$	Longueur requise $L_2$	Longueur choisie de la butée
A 1	5,1 m à 6,0 m	3,1 m	6,00 m
A 2	6,7 m à 7,6 m	4,2 m	8,00 m

Tableau 4 Pré-dimensionnement des butées de galeries doubles

Longueur requise	de la butée $L_1$	Longueur requise $L_2$	Longueur choisie de la butée
A 1	6,9 m à 7,3 m	3,1 m	7,50 m
A 2	8,8 m à 9,3 m	4,2 m	9,50 m

### 5.2.3.2 Pré-dimensionnement des éléments d'étanchéité

Le pré-dimensionnement des éléments d'étanchéité requis a été calculé en fonction du rapport perméabilité-longueur (cf. équation (5.1)) spécifié par l'INERIS /6/. Pour la perméabilité intrinsèque, les valeurs suivantes ont été supposées :

- pour les briques en bentonite :  $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 /6/$ ,
- pour le béton de sel :  $10^{-18} \text{ m}^2$ .

Les résultats sont résumés au Tableau 5.

Tableau 5 Pré-dimensionnement des éléments d'étanchéité

Élément d'étanchéité	Matériau d'étanchéité	Longueur requise du SE	Longueur choisie du SE
SE 1	Briques en	7 m	8 m
SE 3	bentonite	7 m	12 m
A-SE 1	Béton de sel	31,6 m	35 m

### 5.2.3.3 Longueurs des barrages résultants

Sur la base des longueurs pré-dimensionnées pour les butées et les éléments d'étanchéité, les longueurs de constructions d'étanchéité de la galerie <sup>9</sup> ont été calculées et les résultats sont présentés dans le Tableau 6. Dans ce cas, il est possible de distinguer 3 types de constructions :

- Barrage de Type 1 : barrages des galeries simples,
- Barrage de Type 2 : barrages des galeries doubles,
- Barrages de type 3 : une construction spéciale connectée (Barrage 8), qui s'étend sur de nombreuses galeries simples.

Table 6 Longueurs des barrages résultants conformément au pré-dimensionnement

Composants de construction	Longueur en m		
	Type de barrage 1	Type de barrage 2	Type de barrage 3
Butée (A 1)	6,0	7,5	
Élément d'étanchéité (SE 1)	8,0	8,0	
Élément d'étanchéité (SE 2)	0,5	0,5	
Butée (A 2)	8,0	9,5	Construction spéciale
Élément d'étanchéité (SE 3)	12,0	12,0	
Combiné			
Élément d'étanchéité - butée (À SE 1)	35,0	35,0	
Murs de coffrage (7 unités à 0,5 m)	3,5	3,5	
<b>Longueur du barrage <sup>9</sup></b>	<b>73,0</b>	<b>76,0</b>	<b>~270,0<sup>10</sup></b>

Un exemple de la conception pour la construction d'élément d'étanchéité appartenant au barrage de type 1 se trouve dans l'ANNEXE B.

<sup>9</sup> Pour les longueurs du paragraphe 5.2.3.3, le remblai de barrage d'environ 15 m en débris de sel gemme n'a pas été pris en compte. Si la variante 1 a été choisie, ce barrage Vorschüttung devrait être placé sur les deux côtés et si la variante 2 ou 3 a été choisie, il serait ajouté sur le côté au risque de pénétration de saumure.

<sup>10</sup> La longueur requise de la construction a été déterminée sur la base du plan de la mine.

## 5.2.4 Technique de construction

...Ce chapitre sera terminé dans le rapport final.

## 5.3 Conception technique de la variante 2

Avec la variante 2, un concept d'étanchéité est poursuivi dans lequel, en dehors de la construction d'étanchéité de la galerie stable à long terme dans les galeries d'accès au site d'élimination des déchets, un remplissage supplémentaire des galeries principales à l'intérieur du périmètre confiné du stockage est prévu. Avec cette barrière intérieure supplémentaire qui est placée en complément de la barrière géotechnique (étanchéité de la galerie), les vides résiduels dans les principales galeries devraient être réduits afin de minimiser les processus de déformation à long terme et d'éviter l'affaiblissement associé des terrains de couverture situés entre le stockage et la couche des déchets et la couche inférieure de potasse "Cl". Grâce à cette mesure de remblayage, l'intégrité de la barrière géologique "Pilier de sécurité entre la zone d'élimination des déchets et la couche inférieure de potasse " peut être maintenue.

### 5.3.1 Éléments de conception de base

Pour la conception technique de la variante 2, en plus de ceux mentionnés à la section 5.2.1, les données de base et les conditions de base suivantes s'appliquent également :

- a) concernant les dimensions des galeries principales

L'emplacement des galeries principales qui doivent être remblayées est illustré dans la Figure 5 et à l'ANNEXE C.

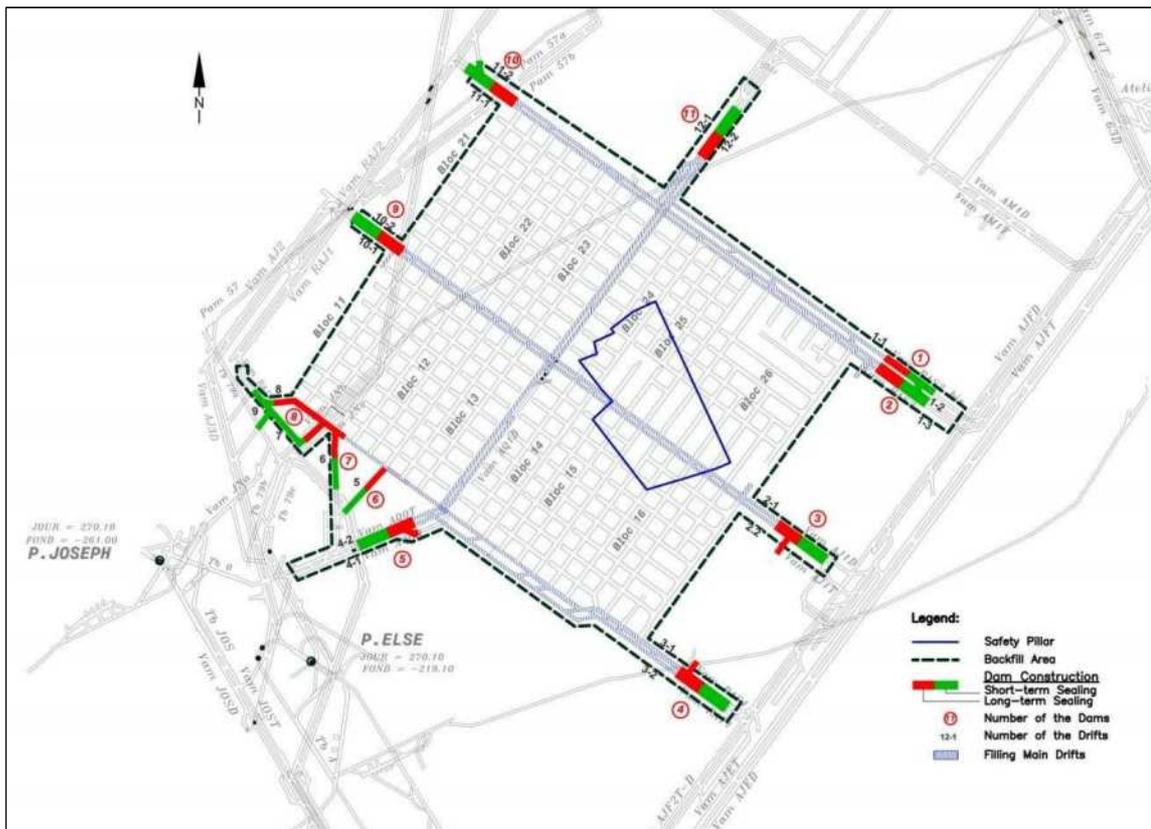


Figure 5 Présentation de l'emplacement des barrages prévus ainsi que des galeries principales qui doivent être remblayées

b) concernant les dimensions des galeries principales

Les dimensions, à savoir, les longueurs et largeurs des galeries qui doivent être remblayées ont relevées sur le plan de la mine. La hauteur de la galerie a été estimée uniformément à 3 m. Le volume des cavités dans les 4 principales galeries a été calculé sur la base de ces données et se trouve dans le Tableau 7.

Table 7 Volume de cavité des principales galeries

Nom de la galerie	Volume de la cavité du système de la galerie en m <sup>3</sup>
Vam RAS2 bis & Vam RAS2	19 913,7
Vam AJ1D & Vam AJ1T	15 351,9
Vam RAS1 & Vam RAT1	16 247,1
Vam AQ0T & Vam AQ0D	16 185,0
<b>Total</b>	<b>67 697,7</b>

c) concernant l'environnement géologique des galeries principales

Les principales galeries se trouvent toutes dans la couche inférieure de sel gemme (Zone salifère supérieure du Sannoisien).

### 5.3.2 Matériau de remblayage

Pour le remblayage des galeries principales, les matériaux de remblai suivants sont à envisager, en fonction des conditions de base (roche hôte, sel gemme, chimie des saumures qui risquent de s'infiltrer : et saumures à dominante KCl avec des quantités marginales de  $MgCl_2$ ) :

- havrit de sel gemme,
- béton de sel

et

- ciment de remplissage (mélangé à de la saumure).

Pour l'utilisation du havrit de sel gemme, un nouveau site d'extraction pour le sel gemme doit être défini. La possibilité d'obtenir un nouveau permis d'extraction devra être examinée. Sinon, il sera possible d'acheter du sel broyé auprès d'une autre mine. Toutefois, le transfert du sel broyé acheté prendra beaucoup de temps en raison de la capacité limitée de transport du puits (Voir Section 5.2.1.2).

Les deux variantes de béton de sel et de béton de remplissage peuvent être mises en œuvre par pompage souterrain à partir de la surface de telle sorte qu'un flux continu de matériaux de construction puisse être assuré. Ce flux ne serait dépendant que de la conception / du dimensionnement de l'installation de mélange de remblai ainsi que du dimensionnement des canalisations pour le matériau de construction.

Étant donné qu'aucune exigence n'est formulée sur la barrière intérieure du système à multi-barrières, en termes de perméabilité ainsi qu'en terme de stabilité à long terme du matériau de construction, car le rôle d'isolement de la zone de stockage des déchets est entièrement pris en charge par les « barrages de scellement » des barrières géotechniques, la barrière intérieure sert principalement à remplir les vides résiduels. Le ciment de remplissage <sup>11</sup> (mélangé à de la saumure) doit être utilisé comme matériau de remblayage. En termes d'économie, il s'agit de la meilleure alternative.

### 5.3.3 Technique de remblayage

Le processus de remblayage comporte les étapes suivantes :

- la livraison et le stockage des composants du matériau de remblai,
- le transport des composants à l'installation de mélange de remblai.
- la préparation du matériau de remblayage dans l'installation de mélange,
- le transport du matériau de remblayage dans les chambres préparées et

---

<sup>11</sup> par exemple, du mortier de remplissage DM 1.25 de QUICK-MIX ([www.quick-mix.de](http://www.quick-mix.de))

- le remplissage des chambres.

En raison de l'espace au sol limité en souterrain, l'installation de mélange pour le matériau de construction doit être construite en surface. Cela présente également un avantage, car

- aucune installation souterraine n'est nécessaire, à l'exception des canalisations et
- les différences de hauteur géodésiques du puits peuvent être utilisées pour transporter le matériau de remblai sur le site de remblai en sous-sol.

La position de l'installation de mélange de remblai dépend de l'espace nécessaire et de la distance de transport maximale possible pour le matériau de remblai préparé.

Le matériau de remblai ainsi mélangé est pompé vers le bas pour les chambres préparées via des canalisations. Le remblayage sera effectué par sections, de sorte que les sections individuelles doivent être séparées par des murs de coffrage. Le matériau de remblai peut être stocké temporairement dans un réservoir souterrain pour une répartition efficace dans les blocs sur de courtes distances (Voir Figure 6).

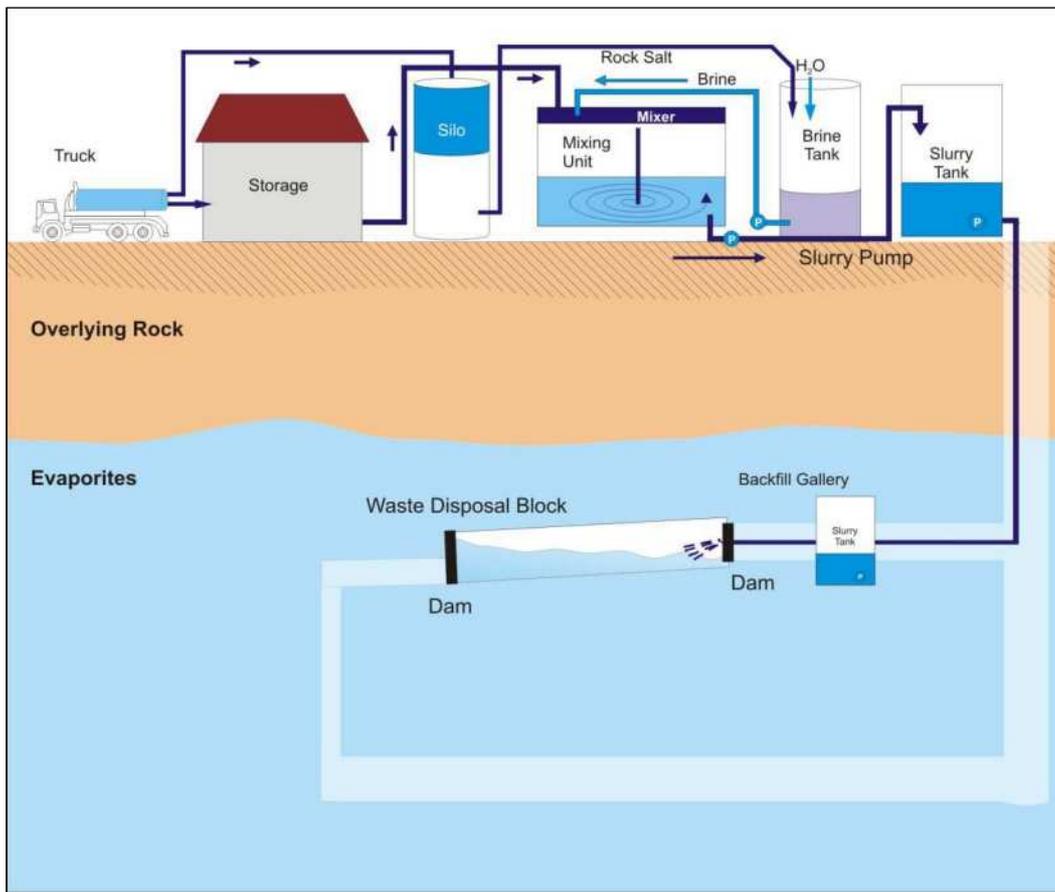


Figure 6 Technique de remblayage avec une installation de remblayage à la surface

Pour réduire le nombre de cavités restées ouvertes, le matériau de remblai doit être inséré au point de la section géodésiquement la plus élevée à être remblayée.

Un total d'environ 67 700 m<sup>3</sup> de mortier de remblai mélangé avec de la saumure (par exemple 1.25 DM de Quick- Mix ou matériau similaire) devrait être transporté dans les galeries principales.

## **5.4 Conception technique de la variante 3**

La variante 3 est similaire à la variante 2, avec un remplissage complémentaire des cavités restantes dans les blocs de stockage entre ou au-dessus des déchets. L'objectif de cette variante de remblayage est la réduction des vides résiduels afin de maintenir l'intégrité de la barrière géologique "Pilier de sécurité entre le site de stockage des déchets et la couche inférieure de potasse "Cl".

### **5.4.1 Éléments de conception de base**

Pour la conception technique de la variante 3, en plus de celles mentionnées à la section 5.3.1, les données de base et les conditions de base sont les suivantes :

- a) concernant l'emplacement des blocs de stockage

L'emplacement des blocs de stockage qui doivent être remblayés est illustré dans la Figure 7 et à l'ANNEXE D.

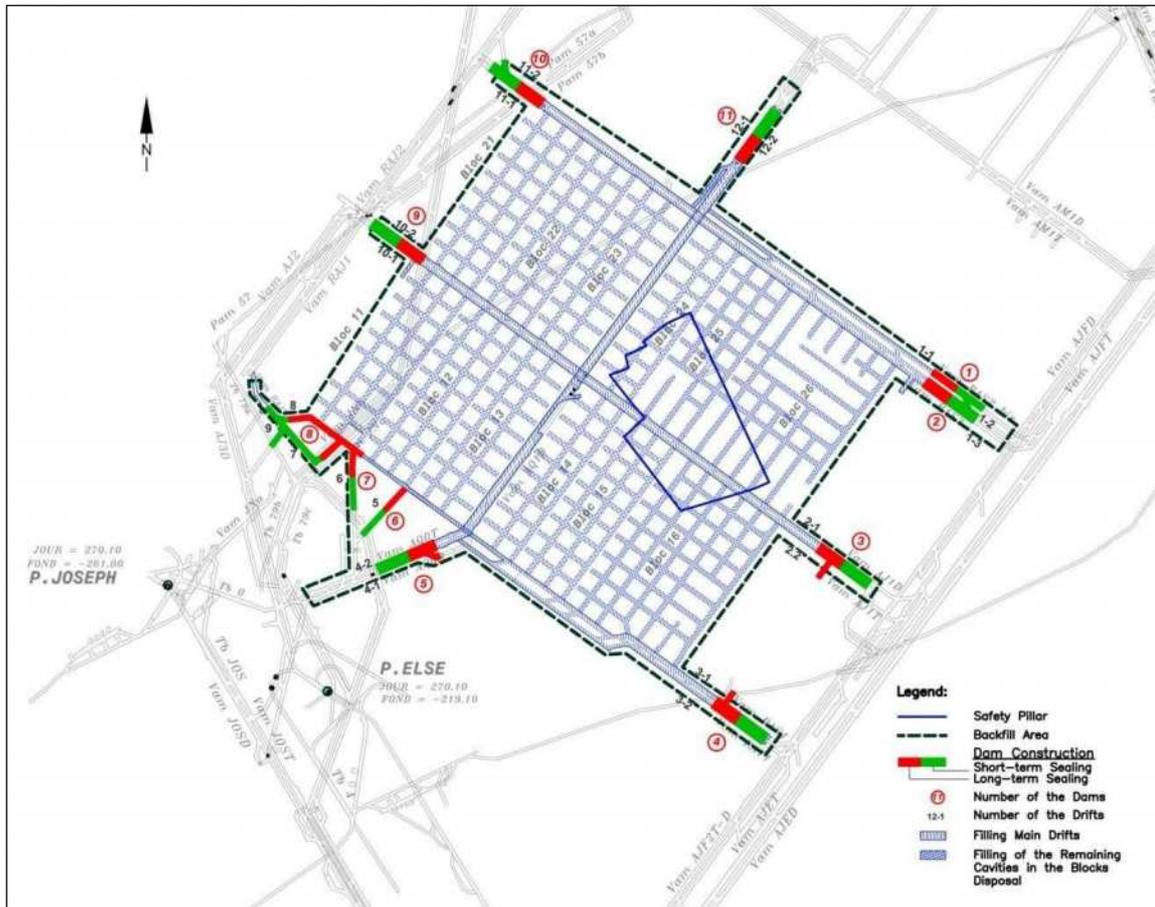


Figure 7 Présentation de l'emplacement des barrages prévus ainsi que des galeries et blocs vides qui doivent être remblayés dans les blocs de stockage

b) concernant le volume de vides restant dans les blocs de stockage

Les dimensions des blocs de stockage qui doivent être remblayés ont été relevées dans le plan de la mine. La hauteur des galeries a été estimée uniformément à 3 m. Pour l'estimation des déchets stockés, on a supposé qu'environ 70 % des cavités ouvertes dans les blocs de mémoire sont remplies de déchets. Le volume des vides restants qui a été calculé sur la base de ces données est répertorié au Tableau 8.

Tableau 8

Volume de vides restant dans les blocs de stockage

Numéro de bloc	Volume ouvert avant le stockage en m <sup>3</sup>	Volume des déchets en m <sup>3</sup>	Volume de vides restant dans les blocs en m <sup>3</sup>
11	18,222.0	12,755.4	5,466.6
12	18,680.7	13,076.5	5,604.2
13	15,746.1	11,022.3	4,723.8
14	13,743.9	9,620.7	4,123.2
15	18,639.3	3,639.3	15,000.0
16	34,834.5	-	34,834.5
21	18,579.3	13,005.5	5,573.8
22	18,717.9	13,102.5	5,615.4
23	15,702.9	10,992.0	4,710.9
24	13,493.1	9,445.2	4,047.9
25	16,797.9	-	16,797.9
26	27,579.9	-	27,579.9
<b>Total</b>	<b>230,737.5</b>	<b>96,659.4</b>	<b>134,078.1</b>

#### 5.4.2 Matériau de remblayage

Le seul matériau de remblai qui peut être utilisé dans les conditions de base spécifiées :

- Roche encaissante : sel de gemme,
- saumures d'infiltration potentielles (Voir Section 5.2.1.1) : Saumure saturée de NaCl et saumure à dominante de NaCl et de KCl avec une quantité marginale de MgCl<sub>2</sub>

et

- cavités restantes inaccessibles dans les blocs de stockage

est du ciment de remplissage. Ce matériau de remblai est largement auto-nivelant et présente une bonne aptitude à couler, ce qui lui permet de pénétrer en profondeur dans les cavités restantes. Lorsque le mortier de remplissage est mélangé avec de la saumure saturée en NaCl, le matériau n'est pas potentiellement soluble dans le substrat.

### 5.4.3 Technique de remblayage

La technique de remblayage est identique à celle décrite à la Section 5.3.3.

Pour le remplissage des vides qui subsistent dans les blocs de stockage, environ 127 500 m<sup>3</sup> de mortier de remplissage mélangé avec de la saumure (par exemple 1,25 DM de Quick- Mix ou matériau similaire) seront nécessaires. Cette estimation repose sur l'hypothèse selon laquelle un maximum de 95 % des vides résiduels peut être rempli, car des "ombres de remblayage" seront inévitablement créées à l'intérieur des sections remblayées en raison de la forme géométrique des galeries au niveau du toit.

### Estimation des coûts et du temps nécessaire à la construction

Les estimations de coûts pour la mise en œuvre des variantes 1 à 3 concernant le confinement des déchets dangereux par rapport aux autres parties de la mine Amélie reposent sur :

- le projet de construction schématique des barrages des galeries (ANNEXE B) et les concepts de remblayage illustrés à l'ANNEXE C et l'ANNEXE D, respectivement,
- la détermination des quantités estimées

correspondantes ainsi que

- les prix de référence, qui ont été déterminés en examinant des projets, des devis budgétaires et des bases de données de prix comparables.

La précision des estimations de coûts pour chaque option de remblayage individuelle s'élève à environ 35 %. Tous les coûts de construction sont estimés et donnés toutes taxes comprises.

### 6.1 Estimation du coût de la variante 1

Les prix toutes taxes comprises de la construction de barrages étanches à la saumure dans des galeries d'accès au stockage souterrain de déchets sont présentés dans le Tableau 9 et incluent les éléments de travail suivants :

- installation sur site, y compris le maintien de la disponibilité du site, mise en place et fonctionnement de la ventilation auxiliaire nécessaire et le repli du site en fin d'opération,
- tous les travaux préliminaires et supplémentaires en souterrain ou en surface, par exemple petits travaux les installations d'infrastructure, etc.
- travaux de creusement, par exemple
  - i. Découpage de zone décompactée (EDZ),
  - ii. Mise à profit de la section pour l'élément de butée A 2,

ainsi que

- iii. fraisage des tranchées pour les éléments d'étanchéité,
- Montage de parois et travaux de nettoyage y compris la livraison et le montage des briques de sable de chaux afin de monter les murs à ossature, y compris l'enduit de ces murs et la projection avec, par exemple, un produit d'étanchéité IMBERAL®

ainsi que

- la livraison/le transfert de
  - i. havrit ou sel broyé présentant une taille de grain appropriée,
  - ii. béton mélangé avec de la saumure,
  - iii. de la bentonite,
  - iv. des briques d'asphalte coulé, y compris le produit d'étanchéité

ainsi que

- v. le béton de sel

jusqu'aux sites de construction des barrages et le montage des différents composants de construction particuliers.

Table 9 Estimation des coûts de la variante 1 – Construction de barrage dans les galeries d'accès

Élément	Description courte	Coûts de construction
1	installation sur site	9 599 500 EUR
2	Travaux préliminaires et supplémentaires	2 870 700 EUR
3	Travaux de creusement	2 158 700 EUR
4	Ancrage du barrage	2 308 200 EUR
5	Travaux maçonnerie et de nettoyage	1 808 900 EUR
6	Travaux de mise en place des bétons et de l'étanchéité	28 016 800 EUR
7	Ingénierie technique : Supervision, rapports d'exécution, documentation, essai des matériaux de construction	849 300 EUR
<b>Sous-total</b>		<b>47 612 100 EUR</b>
5.00%	Divers	2 380 605 EUR
<b>Total</b>		<b>49 992 705 EUR</b>

Selon ces chiffres, la construction de barrages étanches à la saumure dans les galeries d'accès au site d'élimination des déchets souterrain coûtera environ **50 000 000 EURO** toutes taxes comprises. Ce prix peut être subdivisé en les éléments suivants :

- matériaux / construction de tous les barrages 17 500 K EURO,
- équipement du chantier & supervision 32 500 K EURO.

## 6.2 Estimation du coût de la variante 2

Les prix taxes comprises de la construction de barrages étanches à la saumure dans des galeries d'accès au stockage souterrain de déchets et le remplissage des principales galeries de la zone de stockage avec du matériau approprié sont présentés dans le Tableau 10 et incluent les éléments de travail suivants :

- La mise en œuvre complète de la variante 1,
- l'installation (la désinstallation qui s'ensuit) d'une station de pompage et de malaxage pour le matériau de construction, y compris le silo et les cuves de stockage en surface, une unité de mélange de la saumure, une unité de mélange de remblai, une canalisation de puits, des canalisations souterraines, une unité de commande de système etc...,
- la construction de cloisons de coffrage étanche dans les entrées des allées de stockage

et

- le remplissage complet des galeries principales avec du mortier de remplissage.

Tableau 10 Estimation des coûts de la variante 2 – Constructions de barrages dans les galeries d'accès et remplissage supplémentaire des galeries principales avec du mortier de remplissage

Élément	Description courte	Coûts de construction
1	Installation/Désinstallation de l'unité de mélange de remblai	
1.1	Unité de mélange de remblai	4 021 000 EUR
1.2	Installation	1 137 000 EUR
1.3	Désinstallation	380 000 EUR
2	Remplissage des galeries principales	
2.1	Matériau de remplissage	1 790 500 EUR
2.2	Remblayage	2 685 800 EUR
3	Mise en œuvre de la variante 1	
3.1	Matériaux / Construction de tous les barrages	17 500 000 EUR
3.2	Équipement du chantier et supervision	32 500 000 EUR
<b>Total</b>		<b>60 014 300 EUR</b>

Selon ces chiffres, la construction de barrages étanches à la saumure dans les galeries d'accès au stockage souterrain de déchets et le remplissage supplémentaire des galeries principales de la zone de stockage avec un matériau approprié coûtera environ **60 014 300 EURO** taxes comprises.

### 6.3 Estimation du coût de la variante 3

Les prix toutes taxes comprises de la construction de barrages étanches à la saumure dans des galeries d'accès au stockage souterrain de déchets et le remplissage des galeries principales de la zone de stockage et des vides résiduels dans les blocs de déchets entre et au-dessus des déchets sont présentés dans le Tableau 11 et incluent les éléments de travail suivants :

- La mise en œuvre complète de la variante 2,
- l'étanchéité des sections de bouchage particulières avec des cloisons en planches correspondantes,
- la meilleure obturation possible des vides restants dans les blocs de déchets autour des déchets avec du mortier de remplissage (mêlé à la saumure).

Tableau 11 Estimation des coûts de la variante 3 – Constructions de barrages dans les galeries d'accès et remplissage supplémentaire des galeries principales et des cavités restantes dans les blocs de stockage avec du mortier de remplissage

Élément	Description courte	Coûts de construction
1	Installation/Désinstallation de l'unité de mélange de remblai	
1.1	Unité de mélange de remblai	4 021 000 EUR
1.2	Installation	1 137 000 EUR
1.3	Désinstallation	380 000 EUR
2	Remplissage des principales galeries et des cavités restantes dans les blocs de stockage	
2.1	Matériau de remplissage	14 001 000 EUR
2.2	Remblayage	6 000 600 EUR
3	Mise en œuvre de la variante 1	
3.1	Matériaux / Construction de tous les barrages	17 500 000 EUR
3.2	Équipement du chantier et supervision	32 500 000 EUR
<b>Total</b>		<b>75 539 600 EUR</b>

Selon ces chiffres, la construction de barrages étanches à la saumure dans les galeries d'accès au stockage souterrain de déchets et le remplissage supplémentaire des galeries principales de la zone de stockage de matériau approprié et le remplissage des vides restants dans les blocs de stockage autour des déchets dangereux éliminés coûtera environ **75 540 000 EURO** taxes comprises.

## 6.4 Estimation préliminaire du temps nécessaire aux travaux de remblayage

Les variantes de remblayage individuel peuvent être réalisées selon les calendriers de construction estimés présentés au Tableau 12.

Tableau 12 Estimation préliminaire de la durée des travaux de remblayage

Éléments	Durée en semaines		
	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Installation/Désinstallation de l'unité de mélange de remblai			
Unité de mélange de remblai			
Installation		22	22
Désinstallation		5	5
Remplissage des cavités restantes dans le site d'élimination de déchets			
Matériau de remblayage			
Remblayage		45	192
Mise en œuvre de la variante 1			
Matériau / Construction de tous les	416	416	416
Équipement du site de construction et supervision			
<b>Total</b>	<b>416</b>	<b>488</b>	<b>635</b>

## 7 Recommandations et conclusions

Les variantes précitées 1 à 3 ont été évaluées en utilisant une analyse coûts - avantages. Dans ce cas, le bénéfice correspond au niveau de sécurité réalisable en termes de possibilité de libération éventuelle de solutions dangereuses dans la biosphère.

Selon le concept de sécurité décrit ci-dessus (Voir chapitre 5) les déchets ne peuvent être isolés de la biosphère sur le long terme que moyennant un système multi- barrières à l'intérieur de la roche hôte. Ce système se compose d'un complexe de barrières interne et externe.

En raison de fuites dans les barrières géotechniques existantes (puits et bouchages des trous de forage en surface), la barrière extérieure ne fonctionne que comme un retardateur hydraulique, ce qui conduit à un ennoyage des mines Amélie et Marie-Louise. Selon l'ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE STOCAMINE /5/ les cavités des mines seront ennoyées au plus tôt dans 240 ans à partir de maintenant, de sorte que le niveau de saumure atteindra la zone de stockage. En raison du fait que le complexe de barrière

extérieure représente un système ouvert (connexion hydraulique avec les aquifères) l'isolation requise des déchets par rapport à la biosphère (Voir chapitre 3) ne peut être atteinte qu'en utilisant un complexe supplémentaire formant une barrière intérieure. Un composant essentiel de ce complexe est la barrière géologique constituée par ces terrains de couverture entre le site d'élimination des déchets et la "couche inférieure de potasse" avec une épaisseur de pilier d'environ 25 m. En raison de l'incendie de 2002 dans le bloc de stockage 15, ces terrains ont été endommagés, ce qui conduit à supposer que sa fonction d'étanchéité à l'intérieur de la zone n'est plus affectée uniquement au-delà de 13 m (ETUDE GEOMECHANIQUE DE STOCAMINE /4/). Afin de garantir l'intégrité à long terme, les vides résiduels à l'intérieur de la zone de stockage doivent être réduits au minimum. Par conséquent, ce rapport examine aussi la possibilité d'installer des barrières internes supplémentaires (variante 2 et variante 3) en plus des barrières géotechniques nécessaires ("barrages étanches à la saumure", variante 1).

Aucune exigence n'existe pour les barrières internes concernant leurs effets d'étanchéité et leur stabilité à long terme. Leur objectif est de minimiser les processus de déformation à long terme et la dégradation résultant dans les terrains de couverture entre la zone de stockage et les couches de potasse inférieures "Cl". Ces processus de déformation sont renforcés dans les zones des blocs de stockage 14, 15, 16, 24, 25 et 26 en raison d'un pilier de sécurité dans la zone de la couche inférieure de potasse, ce qui provoque une dégradation du toit dans les galeries de stockage concernées. Bien que les barrières internes n'aient pas d'exigences en ce qui concerne leur fonction d'étanchéité et leur stabilité à long terme, elles forment une zone arrière de remblayage homogène, ce qui inhibe le lessivage des substances nocives en cas d'infiltration potentielle de saumure par des fissures au sein du pilier.

Les barrières géotechniques requises ("barrages étanches à la saumure") des trois variantes sont des constructions qui nécessitent une mise en œuvre d'ingénierie structurelle complexe. En particulier, les barrages, qui seront disposés dans les systèmes de doubles galeries, auront des largeurs allant jusqu'à 14 m, car le pilier intermédiaire et la zone de décompactage doivent être retirés dans cette zone. Il n'existe aucun projet de référence au monde comparable où l'étanchéité d'une galerie fonctionnelle est assurée à cette échelle. En outre, le nombre élevé de constructions d'étanchéité de galerie doit être pris en compte, ce qui aboutirait à des exigences strictes pour l'assurance qualité au cours de l'installation des composants de construction individuels. En général, la mise en œuvre de l'une des options de fermeture précitées est évaluée comme techniquement faisable.

Cependant, la sécurité est dans ce cas le plus grand atout et la variante 3 doit donc être recommandée, quel que soit l'effort technique et économique des dépenses nécessaires, comme l'alternative la plus sûre économiquement. La variante 3 est fortement recommandée, car elle offre la plus grande exclusion possible des risques et donc aussi le plus haut degré de sécurité, si l'objectif est de ne pas retirer les déchets du site. Un point important à considérer est que si les déchets doivent être déplacés vers un autre site, il sera soumis aux mêmes types de risques déjà présents.

## R E F E R E N C E S

- /1/ Arrêté Préfectoral n°970157 du 03.02.1997 délivré par le Préfet du Haut-Rhin et portant autorisation d'exploiter au titre des exploitations classées, 38 pages.
- /2/ Article L-515-7 du Code Français de l'Environnement du 29 Juin 2006, sur la base d'ancienne loi n°76-663 du 16 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (modifié par la loi n°92-646 du 13 juillet 1992, art6 JORF 14/07/92).
- /3/ EEC 2003/33/CE, Journal Officiel des Communautés Européennes, Décision du Conseil du 19 décembre 2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE.
- /4/ Rapport d'Etude DRS-10-108-130-14273A du 23/12/2010, « Étude Géomécanique du stockage de StocaMine », INERIS, 2011, 116 pages.
- /5/ Rapport d'Etude DRS-10-108-130-12810B du 09/03/11, « Stockage Souterrain de STOCA- MINE (68), Étude Hydrogéologique de l'Ennoyage du Site », INERIS, 2011, 190 pages.
- /6/ INERIS (2011): Rappel des précédents résultats de l'étude d'impact sur la nappe. - présentation PowerPoint, INERIS, 23.05.2011
- /7/ Sitz, P. (1982): Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen. – Freiburger Forschungsheft A 643, 151 Seiten, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982
- /8/ TU BAF (2009): Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. - Abschlussbericht zum mit Mitteln des BMBF unter 02C1124 geförderten Forschungsvorhaben, 307 Seiten, Freiberg, 2009

PATH

O:\@Projekte EGB aktuell\EGB\_07-042N01\_Stocamine\_Sealing\03proj\_AUSLIEFERUNG\Report\EGB\_07-042N01\_

REVISION

00

VERIFIE PAR

BL, XO, SGo