

"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 de suivi

Projet de construction pour la construction de barrières et le remblayage partiel pour le confinement du centre de stockage de déchets souterrain StocaMine

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

Téléphone : 00 49 361 3810 500
Télécopie : 00 49 361 3810 505
Courriel :
mining@ercosplan.com Site
Internet : www.ercosplan.com
Administrateur délégué :
Dr Henry Rauche

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

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

Référence du projet : EGB 07-042.N01

Erfurt, le
24 juin 2013

Dr Henry Rauche
Administrateur délégué et président-
directeur général

TABLE DES MATIÈRES

1	Situation	6
2	Nature des travaux	7
3	Base juridique environnementale et industrielle pour la fermeture du centre de stockage de déchets StocaMine	8
3.1	Durée de l'autorisation, fin de l'exploitation	8
3.2	Fermeture de StocaMine, changements de la législation	9
4	Résumé des études techniques de l'INERIS	10
4.1	Étude géomécanique de StocaMine	10
4.2	Étude hydrogéologique de StocaMine	11
4.3	Étude du terme source pour un stockage à durée illimitée sur le site	13
4.4	Résumé des études techniques de l'INERIS	14
5	Solution de scellement pour le confinement définitif des déchets déposés sur le site StocaMine	16
5.1	Description des barrières géologiques	17
5.2	Projet de construction de la barrière géotechnique « scellement de galerie »	18
5.2.1	Technologie avancée pour la conception d'ouvrages de scellement les ouvertures horizontales des mines de sel	18
5.2.2	Cahier des charges technique fourni par l'INERIS	23
5.2.3	Bases de conception	23
5.2.4	Conception des barrières de scellement de galerie	28
5.2.5	Pré-dimensionnement des différents composants	35
5.2.6	Description de la méthode de construction et de la technologie	38
5.3	Projet de construction de la barrière géotechnique « remblayage »	41
5.3.1	Bases de la conception	41
5.3.2	Matériaux de remblayage	44
5.3.3	Technologies de remblayage	45
6	Estimation des délais et des coûts	47
6.1	Estimation de la durée de construction des barrières et des ouvrages de	47
6.1.1	Estimation de la durée de construction des barrières	47
6.1.2	Estimation de la durée du remblayage partiel	48
6.1.3	Estimation de la durée totale	48
6.2	Estimation des coûts	49
6.2.1	Estimation du coût de construction des barrières	50
6.2.2	Estimation du coût du remblayage	51
6.2.3	Estimation des coûts totaux	52
7	Recommandations et conclusions	54

ILLUSTRATIONS

Figure 1	Évolution géomécanique et hydrogéologique prévue du site StocaMine et du secteur Ouest dans son	15
Figure 2	Aperçu schématisé du « système de barrières multiples » destiné à la sécurité du centre de stockage de déchets	17
Figure 3	Aperçu des emplacements prévus pour les barrières	25
Figure 4	Projet de construction d'une barrière de scellement de galerie	34
Figure 5	Aperçu de l'emplacement des sites des barrières prévus ainsi que des galeries principales et des vides à remblayer	42
Figure 6	Technologie de remblayage et station de remblayage à la surface	46

TABLEAUX

Tableau 1	Dimensions des galeries au centre des sites prévus pour les	26
Tableau 2	Paramètres de base des saumures d'infiltration à 37 °C	27
Tableau 3	Aperçu des risques et impacts potentiels résultants de chaque élément	30
Tableau 4	Évolution des impacts pour la zone de stockage au fil du	32
Tableau 5	Pré-dimensionnement des appuis	36
Tableau 6	Longueur résultante des barrières selon le pré-dimensionnement	37
Tableau 7	Volume des cavités des galeries principales	43
Tableau 8	Volume restant des cavités dans les blocs de stockage	43
Tableau 9	Estimation préliminaire de la durée de construction d'une	47
Tableau 10	Estimation préliminaire de la durée du remblayage	48
Tableau 11	Estimation préliminaire de la durée de construction des barrières et du remblayage	49
Tableau 12	Estimation des coûts de construction des barrières dans les	51
Tableau 13	Estimation des coûts de remplissage des galeries principales et des blocs 15, 16, 25 et 26	52
Tableau 14	Estimation des coûts des barrières de scellement dans les galeries d'accès et du remblayage des galeries principales et des blocs 15, 16, 25 et 26 avec du mortier de remplissage	53

ANNEXES

ANNEXE A	Plan général du site de stockage de déchets StocaMine et des emplacements recommandés pour les barrières
ANNEXE B	Coupe transversale de la construction d'une barrière
ANNEXE C	Plan général du site de stockage de déchets StocaMine et du remblayage des galeries principales et des blocs de stockage 15, 16, 25 et 26

ABRÉVIATIONS

Abréviations des unités physiques / constantes utilisées dans la présente étude :

g	gramme
g/cm ³	gramme par centimètre cube
g/l	gramme par litre
H ₂ O	eau
ha	hectare
K ₂ O	oxyde de potassium
KCl	chlorure de potassium
kg	kilogramme
km	kilomètre
km ²	kilomètre carré
m	mètre
m ²	mètre carré
m ³	mètre cube
m ³ /a	mètres cubes par an
m ³ /j	mètres cubes par jour
m ³ /h	mètres cubes par heure
m%	pourcentage de la masse
Mg	magnésium
MgCl ₂	chlorure de magnésium
mm	millimètre
NaCl	chlorure de sodium
t	tonne métrique
t/a	tonne métrique par an
t/j	tonne métrique par jour
t/h	tonne métrique par heure
t/m ³	tonne métrique par mètre cube
vol. %	pourcentage du volume
%	pour cent

1 Situation

StocaMine gère un centre de stockage de déchets souterrain dans la concession de l'ancienne mine de potasse « Amélie », près de Wittelsheim, où près de 42 000 tonnes de déchets ont été entreposés dans des blocs de stockage aménagés dans le sel gemme en-dessous de la veine de potasse. Ces déchets sont principalement constitués de cendres industrielles, mais également de matériaux contenant des métaux lourds, des cyanures, de l'amiante, des pesticides, ainsi que des déchets de laboratoires et des terres contaminées. Suite à un incendie dans l'un des blocs de stockage, les activités d'entreposage de StocaMine ont cessé en 2002. Par la suite, la fermeture du site de stockage a été décidée.

La fermeture du site doit être organisée en prenant en compte les potentielles infiltrations d'eau ou de saumure dans la mine abandonnée, qui est reliée au centre de stockage par de nombreuses galeries.

Plusieurs études ont été menées afin d'évaluer les différentes possibilités de déstockage ou de confinement total des déchets (par exemple, BMG Engineering AG, 2004; ERCOSPLAN, 2008). L'évaluation de ces travaux par la Direction des risques du sol et du sous-sol de l'INERIS a conduit à de nouvelles études portant sur les aspects géomécaniques, hydrogéologiques et chimiques. Celles-ci ont donné lieu à des conditions-cadre pour la fermeture du site de stockage.

StocaMine a fait appel à ERCOSPLAN pour analyser les rapports de l'INERIS afin de mettre à jour la base de données pour l'évaluation de la fermeture du site de stockage et l'élaboration d'une solution technique pour la fermeture par remblayage partiel et construction de barrières.

Lors d'une réunion tenue en septembre 2011 sur le site de StocaMine, les travaux à effectuer ont été débattus, afin de prendre en compte les derniers résultats de l'INERIS et d'élaborer une solution technique pour la fermeture du site de stockage des déchets selon des critères d'évaluation fixes. La nature des travaux à effectuer a ensuite été réévaluée au cours de l'année 2012 en fonction des débats sur la solution la plus adaptée aux conditions du site. La solution technique déterminée lors d'une réunion en février 2013 doit être livrée sous forme d'un rapport de suivi.

2 Nature des travaux

La solution technique pour la fermeture du centre de stockage de déchets inclura la construction de barrières et un remblayage partiel ; elle répondra aux exigences des critères d'évaluation de l'INERIS et tiendra compte des conditions spécifiques du site d'entreposage, donnera une estimation des délais et des coûts des aménagements pour la fermeture ainsi que des recommandations pour sa mise en œuvre.

Les travaux ont été répartis en sous-tâches :

- Explication de la base juridique environnementale et industrielle et définition d'objectifs de sécurité en découlant
- Résumé des conditions limites intrinsèques du site (géologie, hydrogéologie, mécanique des roches)
- Résumé des exigences techniques pour la construction des barrières fournies par l'INERIS
- Projet de construction des barrières, notamment :
 - (i) Description des connaissances scientifiques actuelles et de la technologie de construction de systèmes de scellement de galeries pour des sites de stockage de déchets souterrains
 - (ii) Création d'un plan d'utilisation pour le système de scellement des galeries
 - (iii) Compilation d'une liste de matériaux de construction potentiels
 - (iv) Conception de la structure des barrières
 - (v) Pré-dimensionnement de chacun des composants
 - (vi) Description de la méthode de construction
 - (vii) Estimation de la durée de construction
 - (viii) Estimation approximative des quantités
 - (ix) Estimation des coûts à une précision de $\pm 35 \%$
- Projet de remblayage partiel du site de stockage, notamment :
 - (i) Compilation d'une liste de matériaux de remblayage potentiels
 - (ii) Conception du remblayage partiel du site de stockage des déchets
 - (iii) Description des opérations de remblayage
 - (iv) Estimation de la durée de remblayage
 - (v) Estimation approximative des quantités
 - (vi) Estimation des coûts à une précision

de $\pm 35 \%$, ainsi que

- **Recommandations d'ERCOSPLAN pour la suite des opérations.**

3 Base juridique environnementale et industrielle pour la fermeture du centre de stockage de déchets StocaMine

L'autorisation initiale, à savoir, l'AUTORISATION PRÉFECTORALE D'EXPLOITATION (1997, /2/) a été approuvée et accordée à StocaMine le 3 février 1997. À l'époque, le stockage des déchets devait se conformer aux exigences réglementaires françaises suivantes :

- INSTALLATIONS CLASSÉES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT Loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 et décret du 21 septembre 1977,
- ÉTABLISSEMENTS CLASSÉS COMME DANGEREUX, INSALUBRES OU INCOMMUNES, selon un décret daté du 20 mai 1953 et l'article 5 de la loi du 19 décembre 1917,
- ÉLIMINATION DES DÉCHETS ET RÉCUPÉRATION DES MATÉRIAUX, selon la Loi du 15 juillet 1975.

3.1 Durée de l'autorisation, fin de l'exploitation

D'après l'ENQUÊTE D'AUTORISATION du 19 février 1996, la société StocaMine était autorisée à exploiter le site dans certaines conditions et sous les réserves décrites dans l'AUTORISATION PRÉFECTORALE D'EXPLOITATION de 1997. L'autorisation avait été accordée pour une période maximale de 30 ans. Par la suite, les déchets devaient être récupérés en l'absence d'une extension de l'autorisation.

Au cours de cette période, le propriétaire devait répondre à des exigences définies dans l'autorisation et conformément à la législation en vigueur (relative au stockage souterrain et de surface) :

- Entreposage d'une masse totale maximum de 320 000 tonnes de déchets, avec un taux annuel de 50 000 tonnes, sous réserve de l'approbation pour l'admission des déchets et des critères d'exclusion
- Aménagement de la possibilité d'un déstockage et de la réversibilité du stockage
- Établissement d'un calendrier de supervision du stockage souterrain (analyses chimiques, mesures olfactives, contrôle de la température, surveillance mécanique, etc.)
- Prévention de la pollution de l'air et de l'eau, suivi des vibrations et des niveaux sonores, conformément aux normes officielles
- Mesures de sécurité, organisation des infrastructures et information régulière du public.

3.2 Fermeture de StocaMine, changements de la législation

Le 10 septembre 2002, un incendie s'est déclaré dans l'un des blocs de stockage de StocaMine. Le feu a duré trois mois et a mené à la fermeture du site en septembre 2003 avec un volume total de 44 000 m³ de déchets entreposés.

Après cet incident, les évolutions législatives suivantes ont eu lieu :

- Le CODE FRANÇAIS DE L'ENVIRONNEMENT (2006, /3/), mis à jour le 29 juin 2006, impose, selon les dispositions administratives, le déstockage des déchets à la fin du délai initial imparti ou l'extension de ce délai pour une durée illimitée au terme d'un minimum de 25 ans d'exploitation et au moins un an de suspension d'activité.
- Si la durée illimitée du stockage est envisagée, l'autorisation est accordée sur la base d'études d'évaluation de l'impact écologique et de solutions alternatives pour la durabilité à long terme de l'entreposage, conformément à la réglementation européenne 2003/33/CE (2003, /4/) mise à jour à partir de la directive 1999/31/CE concernant la classification des déchets énoncée dans la décision 2000/532/CE et sa transcription française dans le décret n° 2002-540.

Depuis septembre 2003, de nombreuses études ont été menées afin d'évaluer la faisabilité du déstockage de StocaMine ainsi que les conséquences du stockage illimité et les risques potentiels à long terme (plusieurs centaines d'années). Suite à cette décision, il a été décidé de fermer StocaMine en décembre 2012 avec déstockage partiel d'un type de déchets, stockage illimité des déchets restants et confinement du site d'entreposage par remblayage partiel et construction de barrières. En confinant le site de stockage, il convient d'éviter ou de réduire au strict minimum toute pollution à long terme de l'environnement, et particulièrement de la nappe souterraine.

4 Résumé des études techniques de l'INERIS

En décembre 2010 et mars et novembre 2011, trois études relatives aux paramètres géomécaniques, hydrogéologiques et chimiques ont été menées, expliquant l'évolution du site prévue à long terme. Ces études ont permis de réviser les données d'entrée de l'évaluation technique du confinement du centre de stockage de déchets, et particulièrement de la durabilité à long terme.

Les paramètres significatifs et les conclusions résultants des hypothèses de l'INERIS (INERIS 2010, /7/; 2011, /10/; 2011, /8/), seront présentés dans les sections suivantes.

4.1 Étude géomécanique de StocaMine

L'ÉTUDE GÉOMÉCANIQUE DU STOCKAGE DE STOCAMINE (INERIS 2010, /7/) a été motivée par trois objectifs :

- a) Évaluer la stabilité mécanique du site de stockage et des infrastructures d'accès

correspondantes, avec des études détaillées d'accessibilité au site à moyen terme et des possibilités de déstockage à court ou long terme¹

- b) Évaluer la vitesse de fluage des différentes structures (zones de stockage, galeries, zones de chantier foudroyées), liée au problème de son impact sur la migration des polluants, et la possibilité d'accéder au site souterrain dans le temps
- c) Évaluer l'endommagement du toit de stockage lié à l'incendie du bloc 15, qui a mis en avant la question d'une éventuelle connexion hydraulique à travers les formations de sel endommagées.

Conclusions pertinentes de l'INERIS :

- a) Sur la stabilité mécanique,
 - Les piliers intermédiaires des galeries doubles sont endommagés, ce qui pose le problème de la stabilité, de la durabilité à moyen terme et de l'accessibilité
 - Le contact entre le toit et les déchets est inévitable et devrait avoir lieu en moyenne 30 ans après excavation ; le déstockage sera alors probablement impossible
 - La stabilité locale du « stot »² est compromise (lorsque la largeur est inférieure à 20 m), ce qui suggère que la barrière imperméable n'est pas assurée et que l'ensemble du secteur Ouest sera menacé par l'ennoyage
 - Le toit et les piliers touchés par l'incendie sont endommagés. L'étude a montré que les dégâts, qui se propagent à environ 12 m dans le toit, n'ont pas atteint la couche de potasse 25 m plus haut, ce qui implique que la perméabilité du sel est toujours faible sur les 13 derniers mètres.
- b) Sur la vitesse de fluage des structures souterraines,
 - Le taux de convergence toit/mur devrait atteindre 0,9 % par an pour la zone de stockage et les galeries doubles à 550 m
 - La zone de stockage (galeries comprises) devrait être complètement fermée au terme d'environ une centaine d'années (la perméabilité restera toujours non négligeable après fermeture)
 - Un taux de compaction de 0,1 % par an est prévu avant l'ennoyage
 - Le phénomène de flexion / flambage et la compaction résiduelle devront être considérés pour la prévision de la migration des déchets, des polluants et des saumures
- c) Sur l'interaction entre la flexion / le flambage et l'ennoyage / le remblayage,
 - L'hypothèse d'une ouverture résiduelle de 5 à 10 % après l'ennoyage et d'une fermeture de 90 % pourrait être justifiée à une profondeur de 1 000 m, mais elle risque d'être surestimée pour l'échelle de StocaMine. L'ennoyage aura probablement lieu au terme de plusieurs centaines d'années. La fermeture des structures sera terminée d'ici là (pourtant, la perméabilité restera élevée). La vitesse de fluage devrait diminuer, atteignant environ

¹ Court, moyen et long terme signifient respectivement quelques années, quelques décennies et plusieurs siècles.

² Le « stot » (pilier de protection) est une barrière naturelle séparant le secteur Ouest entre les mines Marie Louise (en aval) et Amélie (en amont). Il convient de faire la distinction entre ce « stot » et le pilier (« stot ») situé au-dessus des blocs 25 et 26.

0,01 % par an dans les zones exploitées (zones de chantier foudroyées) ou 1 mm/an, ce qui est imperceptible.

Remarques importantes :

- Même si la compaction résiduelle devrait être très faible à long terme, la vitesse de fluage représentera une cause importante de migration de fluides vers l'extérieur. Ce phénomène doit être pris en compte lors des études sur l'hydrogéologie et la migration des fluides.
- Les instabilités observées, comme le clivage / délaminage sur les toits et les piliers, devraient s'accroître avec le temps. Des décisions relatives aux interventions doivent donc être prises rapidement.

4.2 Étude hydrogéologique de StocaMine

L'ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE L'ENNOYAGE DU SITE (INERIS 2011, /10/) est complémentaire avec les analyses géomécaniques. Les objectifs et conclusions principaux sont présentés ci-dessous :

- Le rapport hydrogéologique se concentre sur l'ennoyage des zones ouvertes de la mine, en prenant en considération le taux de compaction au fil du temps. Ce document apporte des solutions relatives à l'ennoyage à l'aide d'une infrastructure de barrières.

Au vu des dernières données, les conclusions hydrogéologiques sont les suivantes :

a) Hypothèse pour l'ennoyage de l'ensemble de la mine,

- L'étude de l'ennoyage a été menée sur l'ensemble du secteur Ouest de la mine, en prévoyant une communication de flux entre le « stot » séparant la mine Marie-Louise de la mine Amélie
- L'INERIS a consulté plusieurs experts à propos de différentes infiltrations potentielles ou sources de migrations existantes dans l'ensemble de la mine. Les conclusions ont confirmé que les principales infiltrations d'eau se produiraient par les puits bouchés existants (où un comportement perméable a été observé). L'infiltration initiale globale prévue dans la mine a été estimée à environ 105 000 m³ par an à travers les 15 puits existants
- En prenant en compte les paramètres mécaniques déterminés précédemment³, l'infiltration générale restera constante jusqu'à ce que l'ennoyage soit complet, tandis que la fermeture et la compaction d'un volume ouvert dans le secteur Ouest progresseront pour atteindre environ 3 000 m³ par an dans la dernière phase (à long terme). Ce volume de 3 000 m³ correspond au volume de saumure expulsé annuellement par les puits vers la couche aquifère. Simultanément, un volume de 0,7 m³ de saumure polluée migrera chaque année de la zone de stockage des déchets de StocaMine vers la mine inondée, où il sera dilué
- Le niveau global de saumure⁴ devrait atteindre la zone de stockage après

³ Taux de fermeture général d'environ 0,9 % pour StocaMine. Taux de compaction des zones non ennoyées : 0,1 %. Taux de compaction des zones ennoyées : 0,01 %. La mine devrait être mécaniquement scellée 100 ans après excavation.

⁴ On estime que la saumure sera saturée et atteindra l'équilibre avec les formations salines et le minerai de masse. La densité de cette saumure a été estimée à 1,236 g/cm³.

240 ans, en tenant compte du fait que près de 7 % (2,06 millions de m³) du secteur Ouest sont peut-être déjà ennoyés. L'intégralité de la mine serait ennoyée après 305 ans⁵ (StocaMine et les niveaux supérieurs de la mine Amélie)

- Le volume global estimé d'air piégé après ennoyage total devrait atteindre 10 %.

b) Détails du scénario d'ennoyage prévu pour la zone de stockage en l'absence de barrières,

- L'ennoyage de la mine résultera de deux sources d'infiltrations potentielles :

Une partie de l'ennoyage devrait représenter seulement 2 % des infiltrations totales de saumure et devrait circuler par percolation depuis les zones amont du secteur Ouest, depuis les puits Joseph et Else. L'infiltration en provenance de ces puits devrait être très faible, puisqu'ils devraient être colmatés grâce aux technologies les plus avancées⁶. En l'absence de toute forme de barrière et dans la perspective de la fermeture de la zone de stockage, il a été admis que le site StocaMine pourrait être ennoyé en tolérant la lixiviation d'une petite partie des polluants au cours du processus.

La partie principale de l'ennoyage devrait provenir des niveaux en aval et devrait atteindre le site de stockage au terme de 240 ans. Le site devrait être fermé mécaniquement, mais en supposant que la perméabilité reste suffisante pour laisser la saumure s'infiltrer à un rythme de 3 l/s environ, le scénario suivrait 6 étapes :

- La saumure mélangée, qui s'élève des niveaux inférieurs de la mine, s'étend d'abord au niveau 286 d'Amélie 2, puis coule à travers la galerie TB2 vers l'« atelier réseaux » (un atelier souterrain).
- Ensuite, la saumure envahit l'« atelier réseaux » et coule à travers les galeries AM1 et AM2.
- Elle atteint la zone de stockage périphérique (à l'extérieur des barrières) par la galerie AM2 et envahit progressivement l'intégralité de la zone de stockage, ce qui a pour effet de la polluer.
- Après remplissage total, la saumure reflue par la galerie TB0, atteint le puits Joseph et passe par TB JOS.
- Puis, elle commence à ennoyer les quartiers des niveaux de potasse inférieurs, arrive à TB910 et inonde progressivement les quartiers avoisinants.
- La saumure emplit totalement le volume de la mine, puis remonte par l'intrados et l'extrados des puits vers la surface.

Remarques importantes :

- Le volume résiduel estimé de la zone de stockage après achèvement devrait atteindre environ 7 000 m³ (pour un volume initial de 300 000 m³). Étant donné la difficulté d'obtenir une barrière hydrogéologique parfaite à long terme autour de la zone de stockage, des infiltrations polluées d'environ 0,7 m³/an pourraient se produire. La porosité des déchets a été estimée à 31 % en moyenne après ennoyage.

⁵ La référence temporelle est l'année 2010.

⁶ débit total prévu : 1 700 m³ par an.

4.3 Étude du terme source pour un stockage à durée illimitée sur le site StocaMine

L'ÉVALUATION DU TERME SOURCE DANS LE SCÉNARIO DU STOCKAGE ILLIMITÉ (INERIS 2011, /8/) est complémentaire avec les études géotechniques et géomécaniques. Les objectifs et conclusions principaux sont présentés ci-dessous :

- Le présent rapport a pour but d'établir le volume de polluants présents sur le site de stockage et les concentrations potentielles qu'ils peuvent atteindre dans les saumures lors de l'ennoyage de la zone d'entreposage, leurs possibilités de déplacements, ainsi que dans l'air en équilibre avec ces concentrations. Ce document se fonde sur l'interprétation des informations disponibles et sur des données recueillies au cours de l'ensemble de la période d'exploitation du site, entre 1999 (début des opérations) et 2002 (arrêt).

Les conclusions pertinentes de l'INERIS, selon deux scénarios d'ennoyage distincts, (absence ou présence de barrières) sont les suivantes :

a) Volume de polluants présents dans la zone d'entreposage

- Les résultats du bureau d'étude BMG indiquent que les quantités de polluants entreposés sont très variables pour un même type de déchet. Les quantités de polluants stockés ont été recalculées au moyen de la masse enregistrée pour le Certificat d'acceptation préalable (CAP) et le contenu moyen en polluants a été extrapolé à partir de l'analyse des lots entreposés (avec une pondération pour les conteneurs et le plâtre ajouté) pour le poids des lots. Les résultats de BMG sont confirmés par l'INERIS (malgré quelques différences mineures). Les quantités de polluants calculées sont exploitables et pourraient être déterminées définitivement en saisissant les masses par lot.

b) Concentrations de ces polluants dans la saumure d'ennoyage et solubilité

- La solubilité des polluants entreposés calculée par équilibre géochimique mène à des concentrations à l'équilibre approximatives de 1 mg/l pour le Cd, entre 10 et 100 mg/l pour le Cr, le Hg et le Sb pour le scénario d'absence de barrières (dilution dans 6,2 millions de m³ de saumure) et à des concentrations de 1 mg/l pour le Cd, entre 1 et 10 g/l de Cr, Hg et Sb pour le scénario avec barrières (dilution dans 7 000 m³ de saumure).

c) Gaz dans l'atmosphère souterraine

- Les niveaux actuels dans l'air atmosphérique n'ont révélé aucune trace d'activité biologique mais ont indiqué de légers signes d'activité chimique. Comme le conclut BMG, l'émission de composés créés dans une atmosphère réductrice (AsH₃, Hg⁰) après l'ennoyage est peu probable. Les concentrations d'acide cyanhydrique après ennoyage HCN_g, estimées à partir du cyanure libre, du pH du lieu de stockage et de la complexation par les métaux, atteignent entre 10⁻³ et 10⁻⁶ mg/m³.

Remarques importantes :

- La concentration des polluants dans la saumure dans la zone de StocaMine pourrait atteindre des niveaux considérables mais serait diluée dans le volume de saumure qui envahirait la totalité du secteur minier.
- La contamination des nappes aquifères par expulsion de saumure

polluée par les puits possible serait marginale et resterait bien en-deçà des limites autorisées.

4.4 Résumé des études techniques de l'INERIS

Les résultats des études techniques de l'INERIS portant sur les aspects géomécaniques et hydrogéologiques (2010, /7/ et 2011, /10/) sont résumés à la Figure 1. Les principaux aspects présentés sont la fermeture prévue des blocs de stockage et des galeries après une centaine d'années et l'envoyage de la zone d'entreposage qui devrait commencer au terme de 240 ans environ pour se terminer après environ 300 ans. La concentration de polluants dans la saumure potentiellement contaminée sera diluée si

la saumure est expulsée en dehors de la zone de stockage vers le secteur minier avoisinant. La dilution de la saumure serait encore accentuée si la solution entrerait en contact avec l'eau souterraine dans la nappe aquifère.

En prenant en compte le confinement de la zone d'entreposage des déchets grâce à une combinaison de remblayage et de constructions de barrières, on estime que la situation sera encore plus favorable que celle décrite ci-dessus.

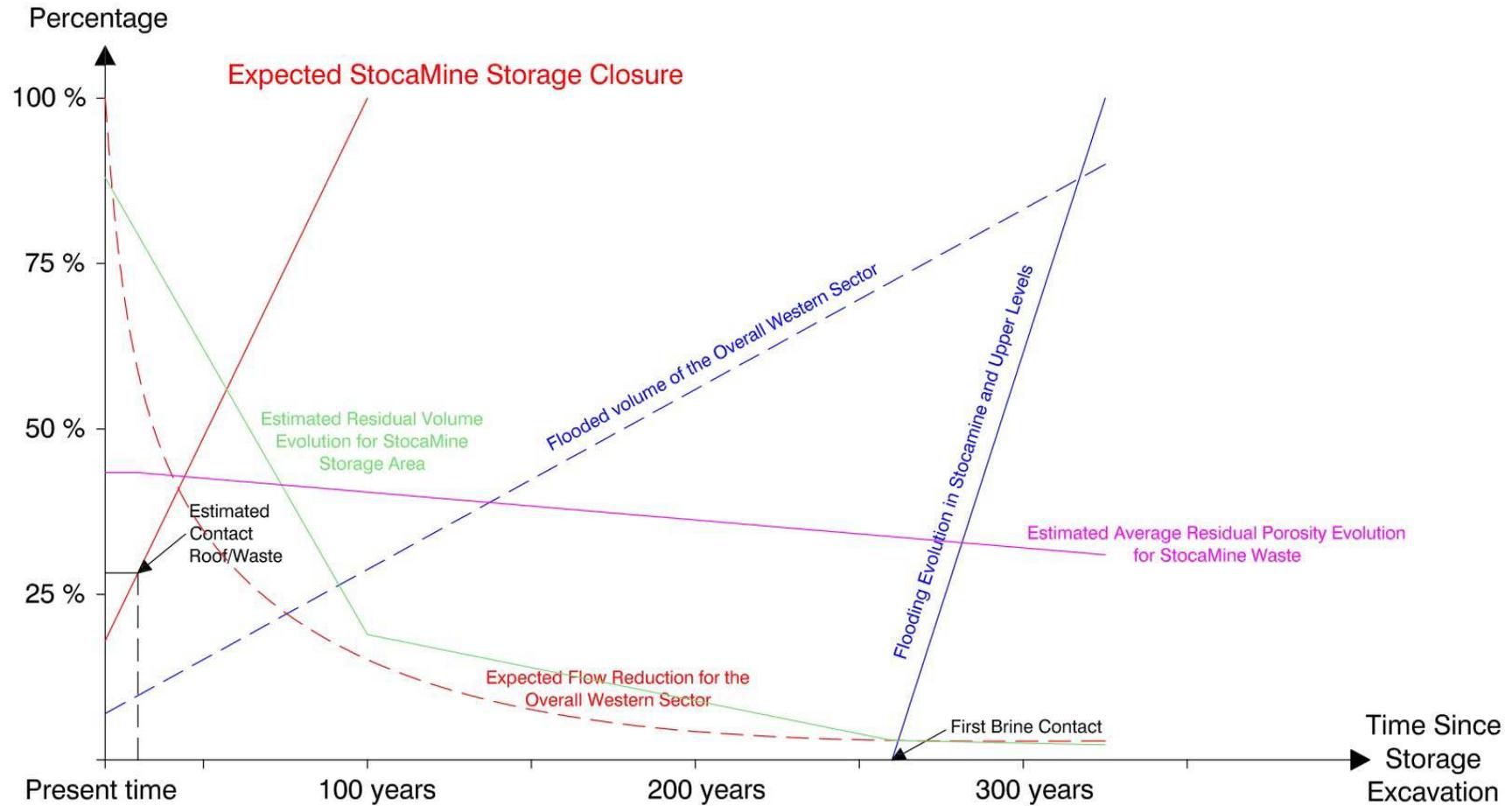


Figure 1 Évolution géomécanique et hydrogéologique prévue du site StocaMine et du secteur Ouest dans son ensemble

5 Solution de scellement pour le confinement définitif des déchets déposés sur le site StocaMine

Le confinement permanent des déchets entreposés sur le site de StocaMine qui est requis pour les isoler de la biosphère ne peut être obtenu que par l'inclusion totale des déchets dans la roche hôte (dans ce cas, le sel gemme) grâce à un système de barrières multiples. Le complexe de barrières externes est formé des éléments suivants :

- Barrières géologiques autour des mines Amélie et Marie-Louise
Elles comprennent la zone saline supérieure, d'une épaisseur d'environ 550 m, et la zone saline intermédiaire, d'une épaisseur d'environ 300 m. Elles sont imperméables, sans eau, et contiennent les marnes du Stampien intermédiaire, à la très faible perméabilité, au-dessus de la zone saline supérieure.
- Barrières géotechniques
Elles sont constituées de l'ensemble des ouvrages de colmatage des puits et des trous de sonde, qui traversent les barrières géologiques du complexe de barrières externes.
- Barrière géochimique
Elle repose sur les marnes du Stampien. Le caractère absorbant de ces marnes lierait tout matériau élué à ces strates.

Ce complexe de barrières externes joue uniquement le rôle de barrière hydraulique à cause des fuites dans les barrières géotechniques existantes et parce que les mines Amélie et Marie-Louise sont sujettes à ennoyage. L'inclusion efficace des déchets à long terme doit être réalisée au moyen d'un complexe de barrières internes. Celui-ci est composé des éléments suivants :

- Barrières géologiques autour du site d'entreposage des déchets
Elles incluent la structure de sel gemme du toit entre le site de stockage et la couche de potasse inférieure « Cl », le pilier de protection autour des puits Joseph et Else et les zones salines intermédiaires et supérieures adjacentes.
- Barrières géotechniques
Elles sont constituées de l'ensemble des ouvrages de colmatage des puits et des systèmes de scellement des galeries, qui traversent les barrières géologiques du complexe de barrières internes.
- Barrières techniques
Ce sont les contenants dans lesquels les déchets sont entreposés.

Un aperçu schématique du « système de barrières multiples » destiné à la sécurité du centre de stockage de déchets souterrain StocaMine est donné à la Figure 2.

Les sections suivantes décrivent les différents composants du complexe effectif de barrières internes pour isoler les déchets de la biosphère. En outre, un projet de construction de la barrière géotechnique « barrière de scellement de galerie » et de remblayage partiel du site de stockage des déchets est développé.

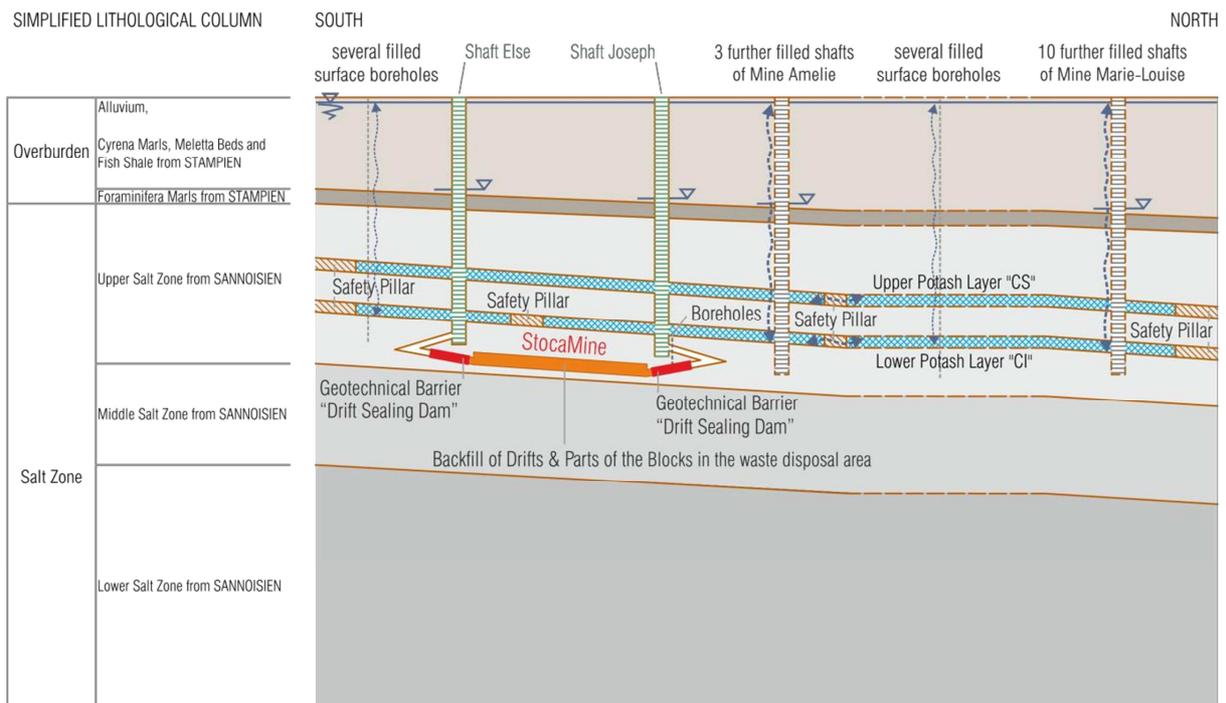


Figure 2 Aperçu schématique du « système de barrières multiples » destiné à la sécurité du centre de stockage de déchets souterrain Stocamine

5.1 Description des barrières géologiques

Les barrières géologiques entourant le site incluent la structure de sel gemme du toit entre le site de stockage et la couche de potasse inférieure « CI », le pilier de protection autour des puits Joseph et Else et les zones salines intermédiaires et supérieures adjacentes.

La structure supérieure entre le site de stockage et la couche de potasse inférieure « CI » est composée d'halite massive interstratifiée avec des couches marno-anhydritiques stratifiées de la partie inférieure de la zone salifère supérieure. Il a été démontré que cette particularité géologique a une influence significative sur la vitesse de fluage.

L'épaisseur moyenne de la structure du toit 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. L'INERIS considère dans son ÉTUDE GÉOMÉCANIQUE DU STOCKAGE DE STOCAMINE (2010, /7/) que la perméabilité globale de cette barrière géologique reste faible⁷, même pour les zones endommagées comme celle qui a été touchée par l'incendie dans le bloc 15 en 2002 ou les zones affectées par l'extraction, ce qui ne concerne que les 12 premiers mètres de l'épaisseur du toit de la zone de stockage.

⁷ 10^{-21} m^2 à 10^{-20} m^2 pour les zones intactes, par endroit inférieur à 10^{-18} m^2 autour des zones endommagées par l'excavation et 10^{-17} m^2 à 10^{-15} m^2 pour les zones endommagées par l'incendie.

Pour le scellement du site d'entreposage, les barrières géologiques (à l'exception des barrières géotechniques) forment les éléments de sécurité qui seront décisifs à long terme ; leur intégrité doit rester intacte au cours de la totalité de la période considérée pour l'évaluation de sécurité. Le sel gemme est seulement imperméable aux liquides et aux gaz dans des conditions de roches intactes, puisque aucun volume de pore connecté n'existe dans le sel gemme dans ces conditions.

La certification de l'intégrité des barrières de sel gemme ne fait pas partie des services pour lesquels la société ERCOSPLAN a été engagée par StocaMine. Cependant, cette tâche devra faire partie de la certification du confinement à long terme du site StocaMine.

5.2 Projet de construction de la barrière géotechnique « scellement de galerie »

Le projet de construction de la barrière géotechnique « barrière de scellement de galerie » inclut les étapes suivantes :

- Description des connaissances scientifiques actuelles et de la technologie de construction de systèmes de scellement de galeries pour des sites de stockage de déchets souterrains
- Spécification des exigences techniques fournies par l'INERIS
- Résumé des bases de conception
- Création d'un plan d'utilisation pour les barrières de scellement de galeries
- Conception de la structure des barrières
- Pré-dimensionnement de chacun des composants
- Description de la méthode de construction et de la technologie employée
- Estimation de la durée de construction
- Estimation approximative des quantités et des coûts de construction.

5.2.1 Technologie avancée pour la conception d'ouvrages de scellement dans les ouvertures horizontales des mines de sel

Au cours des dernières décennies, plusieurs projets de recherche et développement (R & D) traitant de la construction d'ouvrages de scellement de puits stables à long terme dans les formations salines ont été menés. Ces recherches s'inscrivaient dans une démarche de scellement à long terme de sites de stockage de déchets souterrains, de réutilisations de dépôts souterrains, qui devaient être isolés de la biosphère. Ces travaux ont été menés en coopération avec des instituts de recherche et des exploitants miniers (P. Ex. : TU BERGAKADEMIE FREIBERG 2003, /15/ ; 2009, /16/ ; K+S, 2002, /11/ ; GTS, 2008, /5/). L'objectif principal était de compiler des informations sur les technologies avancées déjà utilisées pour des travaux de scellement et de les analyser. Grâce à l'évolution de ces technologies, il a été possible de recueillir des informations sur les principes de construction mis en œuvre avec succès et de poursuivre le développement des solutions existantes. Un autre exemple d'une

construction de scellement réussie est décrit par HANDKE (2002, /6/) et SANDIA NATIONAL LABORATORIES (1995, /12/).

On peut affirmer que le scellement hydraulique de galeries dans le sel gemme est réalisable, au moins pour plusieurs centaines d'années, si cette installation envisage des perspectives suffisamment longues pour la protéger des fluides corrosifs, qui ont pleinement saturés dans le remblai de sel gemme, en comparaison avec la roche avoisinante. Plus aucune réaction chimique ne se produira donc avec le sel gemme. En conséquence, les infiltrations de saumure ne sont pas à même de dissoudre plus de matériau, et aucune dissolution du toit et des piliers ne pourrait avoir lieu même à des pressions supérieures (pour protéger la Zone d'excavation déconsolidée [EDZ] contre des fluides corrosifs, la saumure saturée).

Sur la base des technologies existantes en matière de structures de scellement dans les formations salines, il est essentiel d'obtenir des informations sur les fondations, les roches avoisinantes et les contraintes dépendantes du temps dont on peut prévoir l'action sur le système barrière-roche.

5.2.1.1 Prérequis de la planification

Avant d'aborder la phase de planification, des informations géologiques, minéralogiques, hydrauliques et techniques relatives à cette mine précise doivent être connues ou déterminées pour les emplacements cibles :

- Année de construction de la mine et type de construction
- Profondeur des galeries
- Dimensions géométriques de la mine, notamment hauteur du toit et des parements
- Description de la géologie, minéralogie et géologie économique des sites en ce qui concerne les affleurements de sel, leur répartition, le type de dépôts, les distances verticales et horizontales par rapport aux niveaux d'excavation supérieurs, inférieurs et latéraux, les anomalies géologiques (p. ex. : clivages, sections transversales, etc.)
- Perméabilité de la zone d'excavation déconsolidée dans les roches perturbées et intactes
- Profondeur de la zone d'excavation déconsolidée entourant les galeries (parements, toits, sol), ainsi que
- Convergences et contraintes dans les parties de la roche pertinentes.

Il est nécessaire, pour concevoir la structure de la construction des barrières, d'acquérir les informations suivantes sur les impacts et contraintes qui s'exerceront avec le temps sur le système barrière-roche :

- Chimie et minéralogie des saumures d'infiltration et leurs interactions avec les roches avoisinantes en fonction du temps
- Direction des infiltrations de saumure par rapport aux barrières (dans une seule ou deux directions)

- Pression prévue des fluides (pression hydrostatique pour les saumures dans des systèmes ouverts et pression lithostatique pour les solvants dans les systèmes fermés)

ainsi que

- Séquence chronologique des contraintes exercées sur le système barrière-roche.

5.2.1.2 Principes de conception

Au vu des connaissances existantes sur les barrières dans les formations salines, les exigences spécifiques et principes de construction suivants doivent être pris en considération :

- Séparation des éléments de construction selon qu'ils exercent une fonction statique ou une fonction de scellement (éléments de scellement à court et long terme)
- Redondance de la mise en place des éléments de scellement, c'est-à-dire, plusieurs éléments de scellement similaires placés de façon consécutive
- Diversité de la disposition des éléments de scellement. En d'autres termes, plusieurs éléments de scellement composés de matériaux différents placés de façon consécutive

Ces mesures visent à un niveau de sécurité augmentant avec le temps pour l'ensemble du système. La recherche des objectifs de redondance et de diversité s'effectue avec le recours conjoint au remblayage des galeries d'accès dans la zone de stockage et au confinement de cette zone par des barrières formées d'éléments en béton et en bentonite. L'injection dans la zone de contact entre l'appui et la roche hôte permet une étanchéité encore meilleure le long de l'appui. En outre, les principes de conception suivants s'appliquent :

- Recours à des matériaux de construction remplissant leur fonction statique ou de scellement avec fiabilité au moins durant la période requise
- Découpage méticuleux des galeries avoisinant la zone d'excavation déconsolidée près des éléments des barrières ayant une fonction de confinement, sauf pour les roches stables et imperméables
- Emploi de matériaux de scellement présentant une conductibilité hydraulique contre la saumure du même ordre de grandeur que celle de la roche hôte
- Scellement du joint de contact entre la roche et le matériau de scellement – afin d'éviter la formation d'une voie d'écoulement privilégiée
- Ajustement des caractéristiques mécaniques de la construction de scellement en fonction des charges attendues
- Afin d'améliorer la sécurité de l'ensemble du système, il est conseillé de construire l'élément d'étanchéité de telle façon à lui permettre de supporter une partie de la répartition de la charge

et enfin

- Assurer la fonction des barrières de scellement de galeries en appliquant les mesures techniques appropriées et en effectuant des choix pertinents pour les

emplacements, de telle sorte que les infiltrations de saumures soient saturées et donc qu'aucune dissolution n'ait lieu.

Les constructions de confinement de galeries doivent être réalisées de manière à éliminer la nécessité de tout entretien, à les rendre très robustes et à faciliter leur mise en place à un coût maîtrisé en utilisant des procédés existants éprouvés.

5.2.1.3 Matériaux de construction stables à long terme

Les matériaux suivants pour la construction des barrières ont été envisagés. Ils assurent l'étanchéité pour une stabilité supérieure à 100 ans, comme cela a été démontré pour des cas naturels analogues. Ils ont été testés ou utilisés au cours de plusieurs projets de recherche et développement ou pour des ouvrages de scellement de galeries mis en œuvre dans le passé :

- Bitumes / asphaltes et bétons bitumineux
- Argiles / bentonites
- Agrégats minéraux,

ainsi que

- Grenaille de sel / sel concassé.

Les bitumes et les asphaltes, les argiles, les bentonites et les agrégats minéraux ont une efficacité immédiate, à savoir, ils sont fonctionnels dès qu'ils sont ajoutés à la structure. Cependant, le spectre de leurs propriétés peut évoluer sur de plus longues périodes. La grenaille de sel et le sel concassé ne peuvent acquérir les propriétés d'étanchéité requises qu'après une compaction au fil du temps. C'est pourquoi la fonction pour laquelle ils sont prévus ne prend effet qu'au terme d'une période de mise en place.

Pour la construction d'appuis (éléments à fonction statique), les matériaux suivants pourraient être utilisés :

- Matériaux de construction cohésifs, p. ex. : béton classique, béton de saumure, béton de sel, béton de Sorel
- Maçonnerie (p. ex. : scories de mâchefer) comme murs secs ou avec des joints de mortier,

ainsi que

- Matériaux de construction non cohésifs, p. ex. : graviers, sables (avec ou sans ajout de bentonites), argiles (agrégats minéraux), grenaille de sel ou sel concassé (après compaction suffisante) ou composés de maçonnerie en pierres naturelles.

Les appuis en matériaux de construction cohésifs ainsi que les ouvrages de maçonnerie en pierre naturelle sont immédiatement efficaces, stables contre la convergence et ils répartissent la charge dans la roche en place avoisinante afin de maintenir les éléments de scellement en position. Tous les matériaux à base de ciment comme le béton normal, le béton mélangé à de la saumure saturée de NaCl (béton de saumure) ou le béton de sel sont plus ou moins sujets à des processus de corrosion. Leur stabilité à long terme reste donc à prouver dans chaque cas d'utilisation spécifique. Le béton de

Sorel n'étant stable que contre les saumures saturées de chlorure de magnésium, il n'est pas envisagé pour cette situation, qui ne présente que des traces ou de faibles quantités de $MgCl_2$ dans les infiltrations de saumure.

Une méthode de fabrication du béton à utiliser pour le scellement du site StocaMine doit être élaborée en prenant en compte la composition des saumures d'infiltration. Il s'agit de minimiser et de retarder les effets de la corrosion jusqu'à ce que les appuis soient fermement maintenus en place par les effets de convergence et de compression.

Afin de garantir l'efficacité des appuis faits de sel gemme concassé ou de grenaille de sel, les matériaux de construction doivent être incorporés jusqu'au niveau du toit de la galerie, et ce avec une forte densité. Les appuis sont fixés en place à cause des convergences des roches accumulées par la suite.

5.2.2 Cahier des charges technique fourni par l'INERIS

Les critères suivants pour le projet de construction des barrières de scellement de galeries ont été confirmés par l'INERIS (2011, /9/ et /14/).

- I. Exigences techniques de la mine :
 - À une profondeur de 550 m
 - La température de la roche est proche de 37 °C
 - La pression hydrostatique maximale est d'environ 6 MPa
 - La pression lithostatique maximale est d'environ 12 MPa
 - La section transversale totale de l'ouverture initiale de toutes les galeries d'accès est d'environ 290 m².
- II. Processus d'ennoyage :
 - La durée pour que le liquide atteigne le niveau du site de stockage des déchets est estimée à environ 240 ans
 - La durée pour que le liquide atteigne le niveau de la nappe souterraine est estimée à environ 300 ans
- III. Rythmes de fermeture des galeries (se reporter également à la section 4.1) :
 - Avant ennoyage, 0,9 % par an
 - Après la fin de l'ennoyage, 0,1 % par an, en décroissant en fonction de la rigidité des barrières (dans la zone où les barrières ont été construites)
- IV. Exigences relatives à l'élément de scellement :
 - Chaque élément de scellement doit répondre aux critères de conception suivants : $K / L^2 \leq 10^{-21}$, où L est la longueur de l'élément de scellement (en mètres) et K la perméabilité intrinsèque de l'élément de scellement (en mètres carrés). Ce cahier des charges a été avancé par l'INERIS mais StocaMine ne vise plus cet objectif, car des enquêtes ultérieures ont mené à la conclusion selon laquelle il est impossible de construire des barrières répondant à ces exigences.
 - De la bentonite devrait plutôt être utilisée comme matériau pour l'élément de scellement, puisqu'elle possède les propriétés d'étanchéité requises et dispose en outre d'un pouvoir absorbant sur les métaux lourds.
 - La perméabilité de chaque barrière doit être assurée pour une période de 1 000 ans, après saturation complète de chaque barrière jusqu'à la fin de l'ennoyage du site de stockage. Le temps de saturation dépendra des propriétés et de la conception des barrières.
 - L'efficacité totale des barrières est assurée après leur saturation totale et l'augmentation de la pression de gonflement de quelques MPa.

5.2.3 Bases de conception

Les bases de la conception incluent d'une part l'ensemble des données de base relatives aux emplacements des barrières ainsi qu'aux potentielles infiltrations de saumure et d'autre part toutes les autres contraintes pouvant exiger des critères de construction spécifiques.

5.2.3.1 Données de base

Pour la conception technique de la construction des barrières, les données de base suivantes s'appliquent.

a) Emplacements des barrières :

Afin de confiner la zone de stockage du reste de la mine Amélie, des ouvrages de scellement des galeries seront construits en 12 points. Les emplacements proposés doivent être confirmés par des études poussées sur le site.

La Figure 3 et l'ANNEXE A offrent un aperçu de ces emplacements.

b) Dimensions des galeries d'accès :

Les largeurs des galeries et des piliers aux emplacements des barrières ont été obtenues à partir du plan de la mine. La hauteur des galeries est estimée entre 2,7 et 3,0 m. Dans le cas des galeries doubles, il a été choisi de situer les barrières où se produit une jonction entre les galeries. L'élément de scellement en bentonite devrait être positionné au point de jonction, afin d'éviter que le pilier intermédiaire n'affecte la capacité d'étanchéité. Lorsqu'aucune jonction n'est disponible et si cela est absolument nécessaire, une ouverture minimale pourrait être pratiquée sur le pilier intermédiaire pour construire l'élément de scellement en bentonite. Pour les autres parties de la construction des barrières, le pilier intermédiaire devra être laissé intact. Le Tableau 1 offre une vue d'ensemble des dimensions des galeries.

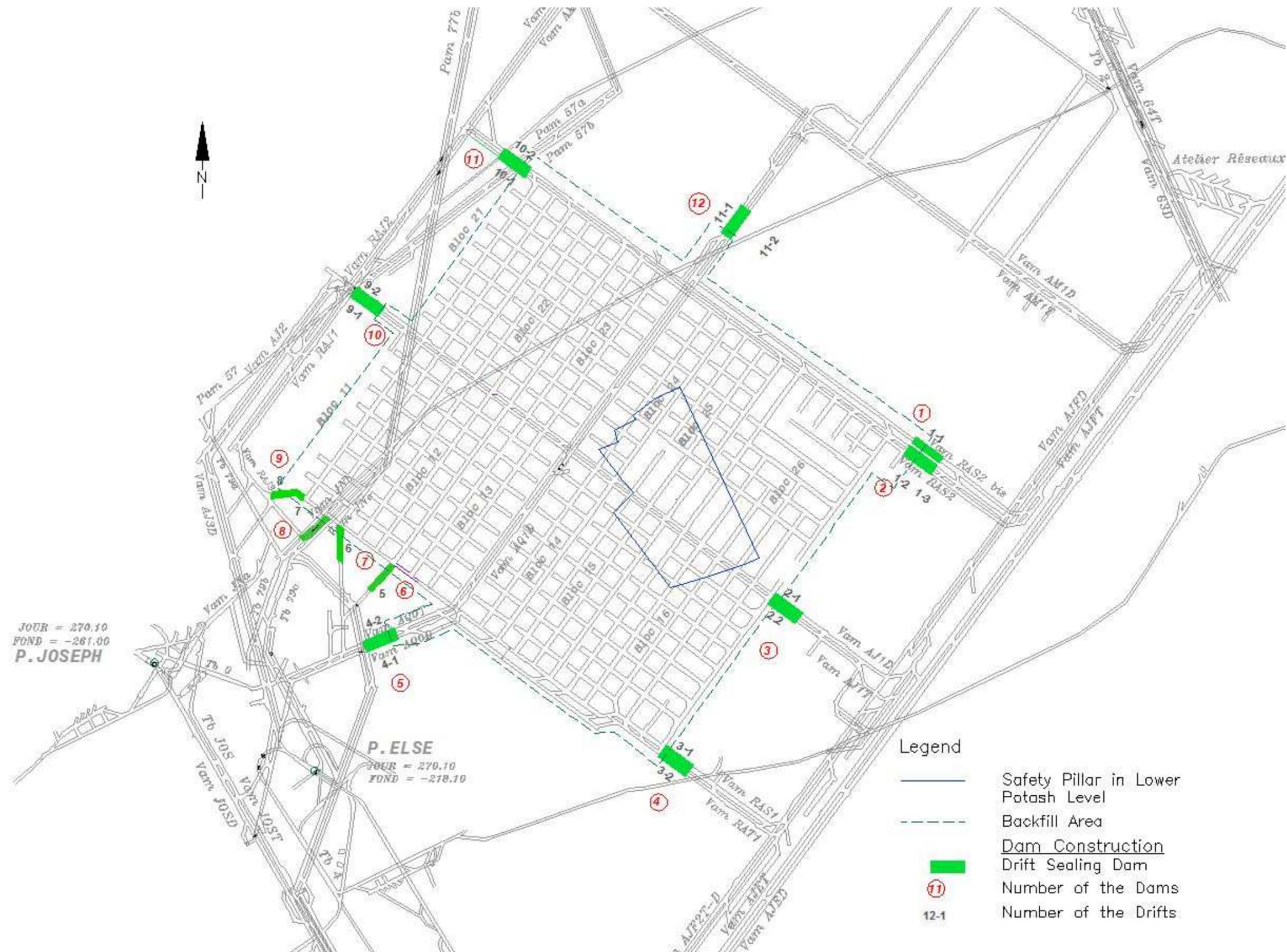


Figure 3 Aperçu des emplacements prévus pour les barrières

Tableau 1 Dimensions des galeries au centre des sites prévus pour les barrières

N° de galerie	N° de site de barrière	Hauteur (m)	Largeur (m)	Type de galerie
1-1	1	3,0	5,6	Galerie parallèle
1-2	2	3,0	3,8	Galerie double
1-3	2	3,0	3,9	Galerie double
2-1	3	3,0	3,8	Galerie double
2-2	3	3,0	3,8	Galerie double
3-1	4	2,7	5,5	Galerie double
3-2	4	2,7	5,0	Galerie double
4-1	5	3,0	4,8	Galerie double
4-2	5	3,0	3,8	Galerie double
5	6	3,0	3,8	Galerie simple
6	7	3,0	3,8	Galerie simple
7	8	3,0	4,2	Galerie simple
8	9	3,0	3,8	Galerie simple
9-1	10	3,0	3,9	Galerie double
9-2	10	3,0	3,8	Galerie double
10-1	11	3,0	3,8	Galerie double
10-2	11	3,0	3,9	Galerie double
11-1	12	3,0	3,8	Galerie double
11-2	12	3,0	3,8	Galerie double

c) Paramètres géologiques des emplacements des barrières :

Le 9 mai 2012, une inspection a eu lieu sur les sites des barrières n° 3, 4, 5, 6 et 10. En règle générale, les barrières géologiques du complexe de barrières interne sont considérées intactes. Les emplacements de scellement sont tous situés dans la partie inférieure de la zone salifère supérieure, formée de sel gemme interstratifié avec quelques fines couches de marne d'une épaisseur généralement inférieure à 10 cm.

Il a été convenu entre StocaMine et ERCOSPLAN de couper 1 m de la zone d'excavation déconsolidée pour chaque élément de scellement, mais les conditions concernant les emplacements de chacune des barrières étant très variables, cela doit être confirmé par de nouvelles études pour chaque emplacement.

Pour cette étude, la découpe de l'EDZ est estimée à 1,00 m pour la zone avoisinant l'élément de scellement. On estime une valeur $\leq 10^{-19}$ m² pour la perméabilité du sel gemme taillé. Toutes les considérations ultérieures sont établies pour une roche à 37 °C, puisqu'il s'agit d'une estimation prudente eu

égard aux viscosités.

Il est nécessaire de vérifier tous ces postulats avant les prochaines phases de planification en conduisant une étude approfondie et en établissant une description des emplacements de chacune des barrières (p. ex. : cartographie de face de la mine, mesures des contraintes latérales des piliers, des convergences, des contraintes de la roche et de la perméabilité).

d) Infiltrations potentielles de saumure et pression de fluide estimée :

Lors de la phase suivant la fermeture du centre de stockage des déchets de StocaMine, on prévoit des infiltrations de saumure. Selon l'ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE DE L'ENNOYAGE DU SITE (INERIS, 2011, /10/), de telles infiltrations devraient se produire, au niveau du site d'entreposage, au terme de 240 ans au plus tôt. La durée pour que le liquide atteigne le niveau de la nappe souterraine est estimée à environ 300 ans.

Les infiltrations potentielles de saumure seraient composées de deux solutions : une solution saturée de NaCl, et une solution à l'équilibre avec la roche hôte, une saumure saturée de NaCl et de KCl avec des quantités marginales de MgCl₂ (voir section 4.2).

Les quantités de MgCl₂ dissous seront si infimes que son pouvoir corrosif devrait être insignifiant dans le centre de stockage StocaMine. Avec une densité supérieure, ces saumures se déposeront dans les endroits les plus profonds de la mine, ce qui réduira énormément leur influence sur les barrières de scellement et probablement sur les sections affectées à l'entreposage.

Le Tableau 2 donne un aperçu des paramètres de base des saumures d'infiltration pour une roche à 37 °C.

Tableau 2 Paramètres de base des saumures d'infiltration à 37 °C

Saumure d'infiltration	Densité en g/cm ³	Viscosité dynamique en mPa s
Saumure saturée de NaCl	1,197	1,380
Saumure saturée de NaCl et KCl avec quantités ⁸	1,236	1,377

La pression de fluide maximale devrait atteindre 6 MPa (voir section 5.2.2).

e) Extrusion potentielle de saumure :

La composition des saumures extrudées est inconnue. Dans son ÉVALUATION DU TERME SOURCE DANS LE SCÉNARIO DU STOCKAGE ILLIMITÉ (INERIS, 2011, /8/), l'INERIS estime que certaines quantités des éléments As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn et de cyanure seront présentes. Les effets corrosifs de ces éléments chimiques sur les matériaux des barrières ou du remblai ne sont pas connus de façon précise et nécessitent une étude plus approfondie. On considère que pour le processus de corrosion le NaCl et le KCl présents dans les

⁸ ERCOSPLAN se fonde sur ~ 20 g/l MgCl₂

saumures seront plus déterminants que les éléments chimiques mentionnés dans l'évaluation du terme source pour une période de stockage illimitée.

5.2.3.2 Conditions de base

Les conditions de base imposées par le site minier ont une influence sur la conception :

a) Capacité de levage du puits

Capacité des machines d'extraction disponibles dans les puits existants :

- Capacité d'extraction de 5,0 tonnes pour la cage du puits Joseph (entraînée par une poulie « Koepe ») avec convertisseur sur le balancier,
- Capacité d'extraction de la cage de 4,5 tonnes (en prenant en compte son volume) dans le puits Else.

b) Équipement mécanique disponible

Pour l'extraction du sel gemme, une zone de réserve près du site de stockage est prête à produire le volume nécessaire à la construction des barrières. Des équipements souterrains en état de marche, comme le mineur continu « PAURAT E 195 » et des équipements plus légers d'exploitation en longues tailles comme la haveuse « JOY 15 RU », sont disponibles. Avant d'envisager l'emploi de ces équipements ou de tout autre matériel pour le havage ou le travail minier, ils devront faire l'objet d'une vérification technique et d'un entretien mécanique afin de s'assurer de leur bon fonctionnement et de leur disponibilité pour les tâches demandées. Pour cette étude, nous postulons que les autorités responsables accordent leur autorisation pour l'utilisation des équipements existants en vue de l'extraction du sel gemme et que ce matériel est en bon état de fonctionnement.

c) Espace de travail

Une analyse du plan de la mine montre que l'espace pour le stockage, notamment de matériaux de construction, est limité.

5.2.4 Conception des barrières de scellement de galeries

Par comparaison avec des structures conventionnelles de génie civil, les barrières de scellement de galeries doivent répondre à des critères de sécurité plus élevés que la normale. Cela exige une approche structurée lors de la phase de conception. C'est pour cette raison que tous risques et impacts potentiels seront consignés, et ultérieurement combinés, de telle sorte que des scénarios de risques et impacts puissent être élaborés pour la construction. Sur la base de ces scénarios, une solution de départ pour les barrières ouvragées sera conçue ultérieurement.

5.2.4.1 Analyse des risques et impacts

L'objectif de protection principal est le confinement permanent des déchets entreposés pour les isoler de la biosphère. Le cahier des charges des barrières de scellement de galeries a déjà été décrit à la section 5.2.2. La prochaine étape consistera à consigner l'ensemble des impacts pouvant théoriquement s'exercer sur la construction, puis à décrire leur évolution au fil du temps et leur état final.

Les impacts possibles sur les ouvrages de scellement pourraient

- a) Dériver de l'usage de la construction, p. ex. :
 - Pressions de fluides, résultant du processus d'envoyage de la mine Amélie qui est reliée au site et qui ont été estimées à 6 MPa à la section 5.2.2
 - Corrosion des matériaux de construction à la suite d'impacts mécaniques, thermiques, physiques, chimiques et biologiques
- b) Découler de l'environnement naturel de la construction, p. ex. :
 - Des propriétés mécaniques et hydrauliques de la roche
 - Des processus de dissolution et des changements de température
- c) Être affectés par la construction, à cause, p. ex. :
 - Du poids mort de l'ouvrage de scellement
 - De l'importance des pressions de gonflement et de cristallisation
 - Des changements de températures liés à l'installation ou à la construction
 - Des processus de transport et de la désintégration
 - De la géométrie de la construction
- d) Être déclenchés par des erreurs humaines, à cause, p. ex. :
 - D'erreurs de construction
 - D'une intrusion humaine durant la phase post-fermeture

et enfin

- e) Découler de circonstances imprévisibles, p. ex. :
 - Excitation dynamique causée par des séismes
 - Influences tectoniques
 - Changements climatiques.

Des scénarios de risques et impacts sont envisagés à partir de ces impacts théoriquement possibles. Un scénario de risque et impact est défini par un risque majeur et des risques secondaires. Sur la base des scénarios de risques et impacts, une barrière de scellement de galerie peut être conçue et évaluée.

Les impacts susceptibles de s'exercer sur les barrières de scellement de galeries pour le centre de stockage de déchets souterrain de StocaMine sont résumés dans le Tableau 3.

Tableau 3 Aperçu des risques et impacts potentiels résultants de chaque élément

		Scénarios des risques et impacts					
	Source	Impacts possibles	Infiltration de fluides / saumures	Extrusion de fluides / saumures	Réduction de la fonction de scellement ⁹	Translation d'un appui	
Risques et impacts possibles, à cause de la source...	a) Fluides	Pression de fluide à l'extérieur de la zone de stockage	Risque majeur	X	X	X	
		Pression de fluide à l'intérieur de la zone de stockage	Zéro (estimation prudente)	Risque majeur	X	-	
		Corrosion / détérioration structurelle des matériaux de construction à cause des changements de la composition chimique des fluides / saumures	X	X	Risque majeur	X	
	b) Nature, échelle locale	Pression de la roche	X	X	X	X	
		Processus de dissolution	X	X	X	X	
	c) Construction technique	Poids mort de la construction	X	X	X	X	
		Pression de gonflement	X	X	X	Risque majeur	
		Changements de température	Significatif durant la phase de construction				
		Retrait	Significatif durant la phase de construction				
		Séparation des matériaux	Limitation des risques grâce à un bon système de gestion de la qualité				
	d) Humain	Erreurs de construction	Limitation des risques grâce à un bon système de gestion de la qualité				
		Intrusion humaine	Risque acceptable				
	e) Nature, grande échelle	Séismes	Risque acceptable				
		Changements climatiques	Risque acceptable				
		Influences tectoniques	Risque acceptable				

⁹ Le pouvoir de scellement des éléments de bentonite peut être réduit à cause de la corrosion / de détériorations structurelles si la composition chimique des fluides d'infiltration, d'extrusion ou des saumures varie en fonction du niveau de saturation.

5.2.4.1 Matériaux de construction stables à long terme

Les barrières des galeries d'accès au site de stockage souterrain doivent être conçues pour une durée de service de 1 000 ans. Les matériaux suivants sont stables à long terme pour le scellement transversal d'une galerie contre les infiltrations de saumure. Ils représentent l'essentiel des matériaux disponibles.

- Bitume / asphalte
- Argile / bentonite / mélanges minéraux
- Grenaille / débris de sel
- Matériaux de construction à base de ciment (béton de sel et béton mélangé à de la saumure) et
- Remblayage de laitance comme matériaux semblables au sel.

Les groupes des bitumes et asphaltes, ainsi que des argiles, bentonites et mélanges minéraux, doivent être positionnés sur les appuis dans la section transversale du scellement afin de garantir une étanchéité parfaite. Seuls les éléments appartenant au groupe des matériaux à base de ciment, comme le béton de sel, le béton de saumure et le remblayage de laitance peuvent être considérés pour une utilisation dans les conditions de base qui s'appliquent ici. Les bétons conventionnels, les bétons de sel ou de saumure subissent à divers degrés des processus de corrosion, le ciment étant utilisé comme agent de liaison, et ils évolueront au cours de la période de référence en fonction de leur composition. Celle-ci doit donc être adaptée aux conditions du site StocaMine afin de garantir le bon fonctionnement des éléments des barrières dans un scénario de convergence et compaction. En théorie, il est possible de construire des appuis en maçonnerie de pierre naturelle sans joints, très stables à long terme. Mais pour la quantité requise ici, cela ne serait pas réalisable pour des raisons économiques et techniques.

Les matériaux de grenaille et de débris de sel, ainsi que les matériaux proches du sel, faits de béton de sel et le remblayage de laitance n'assureront l'étanchéité parfaite qu'après un certain laps de temps, lorsque l'excès de pression augmentera le contact entre la construction et la roche suite à une convergence accrue, en d'autres termes, après ladite « phase de prologue ».

5.2.4.2 Plan d'utilisation pour la construction de scellement de galeries

Chaque scénario des risques et impacts élaboré est étudié dans son déroulement au fil du temps et sa phase finale. Pour cela, un plan d'utilisation de la construction de scellement de galerie est tracé, afin que le cahier des charges puisse être défini pour toutes les phases d'utilisation pertinentes (voir le Tableau 4).

Tableau 4 Évolution des impacts pour la zone de stockage au fil du temps

Cadre temporel	Évolution d'après les prévisions de l'INERIS (voir section 4.4)	Impacts comme décrits au Tableau 3	Exigences
Maintenant 2013	15 ans après l'excavation du stockage	-	Déstockage ou confinement total des déchets
1. Phase 5 à 10 prochaines années	Construction des barrières	...des éléments b), c), d) et e)	Programmes d'assurance qualité rigoureux et stricte supervision de la construction
2. Phase 90 prochaines années	La zone de stockage (galeries incluses) devrait être intégralement fermée	...des éléments b), d) et e)	Stabilité suffisante des éléments de construction
3. Phase 240 prochaines années	De la saumure atteint les alentours de la zone de stockage (à l'extérieur des barrières)	...des éléments a), b), d) et e)	Cahier des charges d'étanchéité fourni par l'INERIS
4. Phase 350 prochaines années	La saturation des barrières est terminée. Début d'ennoyage de la zone de stockage estimé	...des éléments a), b), d) et e)	Cahier des charges d'étanchéité fourni par l'INERIS
5. Phase 1 000 prochaines années	Fin d'ennoyage de la zone de stockage estimé	...des éléments a), b), d) et e)	Cahier des charges d'étanchéité fourni par l'INERIS
6. Phase Après 1 000 ans	De la saumure polluée pourrait fuir vers la nappe aquifère	...des éléments a), b), d) et e)	Cahier des charges d'étanchéité fourni par l'INERIS
7. Phase Après 10 000 ans	Processus de transport diffusifs et convectifs	...des éléments a), b), d) et e)	-

5.2.4.3 Projet de construction d'une barrière de scellement de galerie

La conception de barrières ouvragées proposée repose sur un élément scellant à long terme fait d'un mélange de sable et de bentonite, ce qui nécessite des appuis stables à long terme. Les propriétés de scellement à long terme doivent être assurées par des blocs de bentonite compactée contenant une forte proportion de sable. La proportion de sable et de minéraux argileux dans les blocs de bentonite doit être ajustée de façon à atteindre une perméabilité d'au moins $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Cette valeur découle des grandes exigences attendues d'un mélange bentonite-sable. Sa structure ne peut être garantie que par un programme d'assurance qualité complet. L'élément de scellement en bentonite, qui gonfle au contact de fluides, est immédiatement efficace et restera stable à long terme.

Afin d'assurer la fonction d'appui à court terme, des appuis de béton mélangés à de la

saumure saturée de NaCl seront mis en place. Du point de vue de l'ingénierie technique, afin de satisfaire aux principes de la redondance et de la diversité pour une efficacité à court terme au moins (< 500 ans), des injections sur la zone de contact entre roche hôte et appui scelleront ce dernier et assureront la redondance de l'étanchéité.

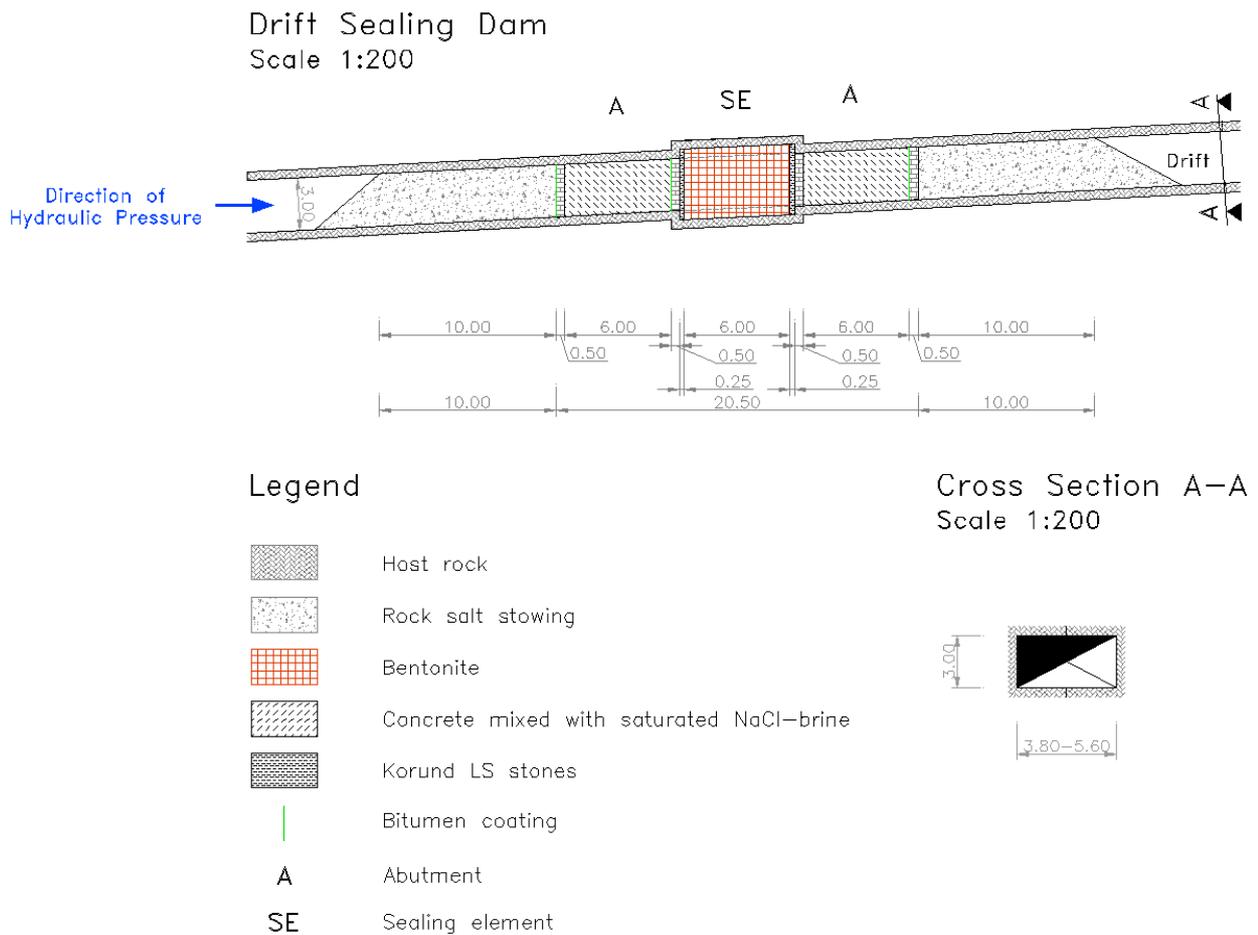


Figure 4 Projet de construction d'une barrière de scellement de galerie

La structure de la barrière ainsi que les fonctions de chacune de ses composantes peuvent être décrites de la sorte :

- **Remblai de sel gemme**

Afin d'harmoniser les transitions de rigidité entre les appuis et la section transversale de la galerie qui doit rester ouverte, un remblai composé de grenaille de sel gemme d'environ 10 m de longueur sera placé devant chacune des barrières. Les galeries devront être remblayées avec cette grenaille du sol jusqu'au toit.

- **Appui (A)**

L'appui joue un rôle de barrière de blocage à court terme. Il absorbera la pression de gonflement de l'élément de scellement. Le contour de la galerie ne sera pas élargi dans cette zone, mais taillé. Pour cet appui temporaire, on envisage le recours à du béton mélangé à de la saumure saturée de NaCl. La durée d'efficacité des constructions en béton peut être avancée jusqu'à un maximum de 500 ans. La construction de structures comparables est une technologie qui a été mise en œuvre et testée durant de nombreuses années dans l'industrie de la potasse en Allemagne. Pour de meilleures capacités de

scellement des barrières, la zone de contact entre la roche hôte et l'appui sera fermée par injection d'un coulis de ciment.

▪ **Élément de scellement (SE)**

L'élément de scellement est composé de briques de bentonite et de sable compactées. Il dispose d'un pouvoir de scellement à long terme et il isole des infiltrations de saumure sur une longue période de temps. Pour améliorer la perméabilité initiale dans la section centrale, par opposition à celle de la section externe (contact entre l'élément de scellement et la roche hôte), ainsi que pour favoriser une répartition optimale de la pression de gonflement du centre vers le pourtour, des roches filtres (corindon, Korund-LS) seront placées au centre du premier coffrage du côté où s'exercera la pression. Dans la section de galerie accueillant l'élément de scellement, le retrait de la zone d'excavation déconsolidée dans les parements ainsi que dans le toit et le sol devra être effectué avec précautions. La profondeur de l'EDZ où ce retrait doit être effectué est estimée à 1 m et devra être déterminée au cours de la construction grâce à des mesures de perméabilité. Le retrait ne sera pas nécessaire si la perméabilité de la roche hôte est inférieure à $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$.

5.2.5 Pré-dimensionnement de chacun des composants

Les sections suivantes décrivent les appuis et les éléments de scellement, ainsi que leur pré-dimensionnement. Ce dernier ne se substitue pas à l'épreuve de capacité portante ou de fonctionnement pour ces ouvrages. Il fait simplement office de guide pour les dimensions des composants structurels.

5.2.5.1 Pré-dimensionnement des appuis

Selon QUERSCHNITTSABDICHTUNGEN, UNTERTÄGIGER, HOHLRÄUME, DURCH DÄMME UND PFROPFEN (SITZ, 1982, /13/), il est nécessaire de procéder à des vérifications au moyen des équations (5.1) et (5.2) pour le pré-dimensionnement des barrières parallèles, verrouillées réciproquement, ou celles en forme de cône tronqué.

Analyse des contraintes tangentielles :
$$L_1 = \frac{\rho A}{P_e \tau_{0,7}}$$

où :

L_1	Longueur requise de l'appui [m]
ρ	Pression hydrostatique du fluide [N/cm ²]
A	Surface de la section transversale de la galerie [m ²]
P_e	Périmètre de la galerie [m]
τ	Contrainte tangentielle admissible du matériau de construction [N/cm ²]

Analyse des contraintes de flexion :

$$L_2 = \sqrt{\frac{p \cdot d^2}{6 \cdot \sigma_z}}$$

Où :	L_2	Longueur requise de l'appui [m]
	p	Pression hydrostatique du fluide [N/cm ²]
	d	Dimension la plus courte de la galerie [m]
	σ_z	Contrainte de flexion admissible du matériau de construction [N/cm ²]

La pression hydrostatique maximale donnée est d'environ 6 MPa. Les dimensions des galeries, qui forment la base du pré-dimensionnement, sont données dans le Tableau 1. Le béton mélangé à de la saumure saturée de NaCl devrait être utilisé pour la construction des appuis ayant une fonction de court terme. Pour ce matériau, les valeurs suivantes s'appliquent à la catégorie de force C 25/30 :

- Contrainte tangentielle admissible τ 170 N/cm²
- Contrainte de flexion admissible σ_z 110 N/cm²

Les dimensions des appuis ont été calculées sur la base de ces valeurs. Elles sont présentées dans le Tableau 5. La longueur retenue pour l'appui doit être supérieure ou égale à la plus grande longueur requise calculée.

Tableau 5 Pré-dimensionnement des appuis

Appui	Longueur requise L_1 en m	Longueur requise L_2 en m	Longueur retenue pour l'appui en m
A	De 5,1 m à 6 m	3,1 m	6 m

La perméabilité du béton mélangé à de la saumure saturée de NaCl comme matériau proposé pour l'appui est estimée à 10^{-18} m² pour assurer une bonne intégrité contre les processus de corrosion et ainsi satisfaire la relation de stabilité à long terme par rapport aux mécanismes de convergence et de compaction.

5.2.5.2 Pré-dimensionnement des éléments de scellement (SE)

Après concertation avec StocaMine à propos des exigences de perméabilité des éléments de scellement, il n'est plus demandé de suivre les relations perméabilité-longueur avancées par l'INERIS (2011, /9/ et 2012, /14/) :

$$\frac{k}{L^2} < 10^{-21} \quad (5.3)$$

Où : K Perméabilité intrinsèque de l'élément de scellement [m²]
L Longueur de l'élément de scellement [m]

Pour la perméabilité intrinsèque, les valeurs estimées suivantes ont été utilisées. Elles sont fondées sur la relation perméabilité - longueur (voir l'équation (5.3)) :

- Pour les briques sable-bentonite : 10⁻¹⁸ m².

Toutefois, au lieu d'un espace dédié pour la construction des éléments de scellement et à cause de l'espace disponible, ces éléments seront placés dans la jonction entre les doubles galeries, comme cela a été convenu entre StocaMine et ERCOSPLAN. Cela permettra d'assurer l'étanchéité parfaite des galeries en positionnant un élément de scellement sur la largeur totale des deux galeries et de l'espace de jonction, empêchant ainsi d'éventuelles fuites au travers de piliers intermédiaires détériorés. L'inspection et la mesure du plan de la mine indiquent une longueur moyenne de l'espace de jonction comprise entre 5 et 7 m. La longueur de l'élément de scellement en bentonite a donc été évaluée à 6 m en moyenne.

5.2.5.3 Longueurs des barrières résultantes

Selon les longueurs pré-dimensionnées des appuis et des éléments de scellement, les longueurs de l'ensemble de la construction des barrières¹⁰ ont été calculées et les résultats sont présentés dans le Tableau 6.

Chacune des structures de scellement est composée de barrières dans les galeries simples (chaque galerie faisant partie d'une galerie double est considérée comme une galerie simple).

Tableau 6 Longueur résultante des barrières selon le pré-dimensionnement

Composants de la construction	Longueur de la barrière en m
Appui (A1)	6,00
Appui (A2)	6,00
Élément de scellement (SE)	6,00
Murs de coffrage (4 éléments de 0,50 m)	2,00
Corindon (Korund-LS) (2 éléments de 0,25 m)	0,50
Longueur de la barrière¹⁰	20,50

La Figure 4 et l'ANNEXE B donnent une illustration schématique de la structure d'une barrière.

¹⁰ Pour les longueurs du Tableau 6, le remblai de sel gemme d'environ 10 m de long placé de chaque côté de la construction n'a pas été pris en compte.

5.2.5.4 Estimation du débit volume annuel

Le débit volume annuel à travers l'ensemble des barrières de scellement de galeries peut être évalué à l'aide de l'équation suivante (5.4) :

$$Q = \frac{\sum A_i \cdot k_i \cdot \Delta p}{\eta \cdot \Delta l} \quad (5.4)$$

Où :	Q	Débit volume [m ³ /an]
	K ₁ = 10 ⁻¹⁸ m ²	Perméabilité des éléments de scellement
	A ₁ = 440 m ²	Surface de la section transversale de l'ensemble des éléments de scellement ¹¹
	k ₂ = 10 ⁻¹⁹ m ²	Perméabilité de la nouvelle EDZ
	A ₂ = 73 m ²	Surface de la section transversale de l'ensemble des nouvelles EDZ ¹²
	Δl = 6 m	Longueur d'un élément de scellement
	η = 0,001377 Pa s	Viscosité dynamique
	Δp = 6 000 000 Pa	Pression de fluide

$$Q = \frac{((440 \cdot 10^{-18}) + (73 \cdot 10^{-19}) \cdot 6\,000\,000)}{0,001377 \cdot 6} = 3,24 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} = 10,24 \text{ m}^3/\text{an}$$

Au cours des 1 000 années à venir, une infiltration d'environ 10 240 m³ pourrait se produire dans la zone de stockage (pire scénario, négligence du temps de saturation de la barrière). Cette valeur est théorique puisque le volume ouvert résiduel après fermeture et compaction est estimé par l'INERIS à environ 7 000 m³ (voir section 4.2). La combinaison des matériaux de l'appui et du remblayage, bien que non définie comme un élément de scellement, aura un effet de soutien de la fonction d'étanchéité et les infiltrations calculées en seront encore réduites.

5.2.6 Description de la méthode de construction et de la technologie employée

Une inspection du site devra être menée pour la construction de chaque emplacement de barrière. Il s'agira d'analyser toutes les informations géomécaniques et géologiques disponibles pour chaque galerie. Cela permettra de sélectionner au mieux les emplacements les plus propices pour ces structures de scellement, en partant du principe selon lequel elles devraient être disposées le plus près possible des blocs de stockage des déchets et des galeries remblayées, afin de procéder à un confinement optimisé, d'un point de vue technique comme en matière de coûts.

Une étude de la sécurité du site doit être effectuée, en considérant que la résistance de la roche hôte devrait maintenir une parfaite sécurité structurale et d'excellentes conditions de stabilité pour les travaux de construction (selon les descriptions

¹¹ Hypothèse : Section transversale de la galerie après retrait de l'EDZ.

¹² Hypothèse : La profondeur de la nouvelle EDZ est estimée à 0,15 m.

géologiques et géomécaniques). Cette évaluation est d'une grande importance pour déterminer les excavations des contours et la localisation des éléments de scellement.

Lorsque des informations à jour sont disponibles à la suite des études de chaque site, un planning de répartition et un schéma de chacun des sites de barrière devront être établis, en considérant les diverses conditions géologiques et géomécaniques, la configuration particulière de chacune des galeries, leur taille, etc.

Le planning pour chaque site devra faire état des itinéraires d'accès pour transporter le personnel, les équipements et les matériaux, en utilisant les galeries existantes ou en construisant d'autres voies d'accès, si nécessaire. Ces itinéraires d'accès devront être étudiés pour optimiser les techniques de construction, les temps de transport et les coûts.

Toutes les voies d'accès devront être en bon état afin de permettre l'installation de pipelines pour l'acheminement de laitance de remblayage afin de remplir les blocs 15, 16, 25 et 26, qui ont été sélectionnés. Devront également être transportés des matériaux, le personnel, de l'équipement, de l'énergie et de l'eau vers chaque site de construction de barrière, et la ventilation devra être bien assurée.

Le cas échéant, le terrain devra être ancré par boulons afin d'assurer des conditions sécurisées sur tous les postes de travail.

À proximité de chaque site de construction de barrière, un espace servant au stockage des équipements et installations, à l'accueil du personnel et si possible un espace d'évacuation devront être sélectionnés.

La construction des barrières demandera un travail très intensif. Tous les sites devront donc disposer de suffisamment d'énergie, de ventilation et d'eau pour mener à bien les tâches de construction et d'excavation requises.

Les matériaux de construction et d'étanchéité (briques de bentonite, béton, sable, sel gemme, etc.) devront être acheminés par des moyens mécaniques vers chaque site. Une liste des équipements et matériaux requis devra être établie pour chaque barrière.

Le havage de la section devra être effectué dans les galeries sélectionnées antérieurement pour accueillir les éléments des barrières. Le sel gemme obtenu suite à cette opération pourra être utilisé pour le remblai servant à la construction.

Pour le havage de la section, l'équipement souterrain existant, comme le mineur continu « PAURATE 195 » pourra être utilisé. Avant d'envisager l'emploi de cet équipement pour le havage ou le travail minier, il devra faire l'objet d'une vérification technique et d'un entretien mécanique afin de s'assurer de son bon fonctionnement et de sa disponibilité pour les tâches demandées.

Le premier élément de la barrière à mettre en œuvre est le remblai de sel gemme. Comme décrit précédemment et pour des raisons techniques autant qu'économiques, le sel gemme extrait lors du havage devra être utilisé pour cette opération. La quantité de sel gemme manquante pour achever la construction pourra être extraite dans des zones de la mine sélectionnées au préalable au moyen d'équipements souterrains existants spécifiques. Le remblai de sel gemme est estimé à 10 m, à adapter aux conditions de chaque site. Il sera effectué simultanément avec la construction du premier coffrage afin d'assurer le contact entre le mur et le remblai sur toute la hauteur de la galerie.

La zone de la section de construction du premier appui sera inspectée et nettoyée afin

d'assurer un contact idéal entre le béton et la roche hôte. Un havage de 0,15 m de matériau meuble (zone déconsolidée) est estimé. La profondeur de havage pourra varier en fonction de la résistance de la roche hôte et des conditions de chaque site. La construction des appuis a une longueur estimée de 6 m mais elle devra être adaptée aux conditions de chaque site.

Après havage et nettoyage de la section pour le premier appui, la construction du premier coffrage pourra être commencée. Pendant ce temps, le remblayage de sel gemme se poursuivra et se terminera avant fermeture du mur. Le coffrage devrait avoir une épaisseur de 50 cm et être composé de briques de béton.

Après mise en place du premier coffrage, un revêtement de bitume sera appliqué. On estime qu'une épaisseur de 1 à 2 cm est nécessaire pour couvrir une face du coffrage. Le revêtement de cette face par du bitume achèvera cette séquence de construction.

Si nécessaire, pour une meilleure adhérence, de petits tuyaux pourront être installés dans la zone entourant les appuis. Une fois les appuis secs, du béton pourra être injecté pour étancher tout espace intermédiaire et combler tout espace restant.

Lorsque le premier coffrage sera terminé et revêtu de bitume, la construction du deuxième mur pourra commencer. Le remplissage de béton du premier appui pourra s'effectuer simultanément jusqu'à atteindre le niveau du toit. Le coffrage devrait avoir une épaisseur de 50 cm et être composé de briques de béton.

Pour le remplissage complet du premier appui, un dôme sera découpé dans le toit et des tuyaux seront insérés. Lorsque le deuxième mur de ce compartiment sera achevé, les tuyaux seront utilisés pour injecter du béton afin de remplir totalement le volume restant.

Lorsque le premier appui sera complètement rempli et que le deuxième coffrage sera terminé, on procédera à un revêtement de bitume. On estime qu'une épaisseur de 1 à 2 cm est nécessaire pour couvrir une face du coffrage. Le revêtement de cette face par du bitume achèvera cet élément de construction.

Après cette séquence, le havage de la section de 1 m sera effectué pour la mise en place de l'élément de scellement de bentonite. Le sel issu de cette excavation sera entreposé pour un usage ultérieur lors du prochain remblayage de sel gemme.

Lorsque la face de contact avec l'appui sera terminée, un mur de saturation composé d'un matériau perméable (compartiment de corindon, p. ex. : Korund-LS) d'une épaisseur estimée de 0,20 à 0,25 m sera monté.

Après avoir terminé le havage de la section de l'élément de scellement, la zone sera prête pour le remplissage de bentonite.

Les travaux suivants se poursuivront en reflétant à l'envers les opérations décrites ci-dessus, jusqu'à achèvement de la barrière, comme illustré à la Figure 4.

Selon l'échelle et la taille de chaque barrière, une supervision par des ingénieurs spécialisés pourra être nécessaire lors des étapes cruciales de la construction. Le niveau de supervision spécialisée requis est généralement proportionnel aux caractéristiques techniques de chaque barrière. Une expertise d'ingénierie doit être apportée durant la planification et la construction, ainsi que pour la surveillance après achèvement des travaux.

La conception générale des barrières avec cette méthode de construction et cette technologie est techniquement possible, comme cela a été évoqué dans les sections

précédentes.

5.3 Projet de construction de la barrière géotechnique « Remblayage »

Avec le remblayage, la solution de scellement envisagée vise à créer des barrières de scellement stables à long terme dans les galeries d'accès principales menant au site de stockage des déchets, mais également un remplissage des galeries principales du site d'entreposage. Ce projet de construction présente un remplissage supplémentaire des cavités restantes dans les blocs de stockage ne contenant pas de déchets afin de stabiliser la zone et de minimiser les vides restants.

Cette nouvelle barrière interne qui s'ajoute à la barrière géotechnique (scellement des galeries) réduit les vides réactifs dans les galeries principales afin d'atténuer les processus de déformation à long terme et d'éviter l'affaiblissement de la barrière entre le site de stockage et la couche de potasse inférieure « CI ». Cette mesure de remblayage permet de maintenir l'intégrité de la barrière géologique « Toit entre le site de stockage et la couche de potasse inférieure ».

5.3.1 Bases de conception

Pour la conception technique du remblayage, mis à part les éléments de la Section 5.2, les données et conditions élémentaires suivantes s'appliquent également :

a) Localisation des galeries principales et des blocs de stockage

La localisation des galeries principales et des blocs de stockage à remblayer est illustrée sur la Figure 5 et en ANNEXE C.

b) Dimensions des galeries principales :

Les dimensions, c'est-à-dire, les longueurs et largeurs des galeries à remblayer ont été extraites des plans de la mine. La hauteur de la galerie a été estimée de façon uniforme à 3 m. Le volume des vides dans les quatre galeries principales a été calculé sur la base de ces données et peut être trouvé dans le Tableau 7.



Figure 5 Aperçu de l'emplacement des sites des barrières prévus ainsi que des galeries principales et des vides à remblayer dans les blocs de stockage

Tableau 7 Volume des cavités des galeries principales

Nom de la galerie	Volume des cavités du système de galerie en m ³
Vam RAS2 bis et Vam RAS2	14 765,7
Vam AJ1D et Vam AJ1T	11 844,9
Vam RAS1 et Vam RAT1	13 076,1
Vam AQ0T et Vam AQ0D	14 988,0
Total	54 674,7
Total arrondi	54 700 m³

c) Volume restant des cavités des blocs de stockage

Les dimensions des blocs de stockage à remblayer ont été extraites des plans de la mine. La hauteur des galeries a été estimée de façon uniforme à 3 m. Le volume des restes des déchets dans le bloc 15 étant inconnu et le vide restant devant être estimé, et puisque les blocs 16, 25 et 26 n'ont pas été utilisés pour l'entreposage de déchets, le volume restant des cavités peut être calculé directement à partir des dimensions relevées concernant l'estimation du vide dans le bloc 15. Le volume restant des cavités qui a été calculé grâce à ces données est consigné dans le Tableau 8.

Tableau 8 Volume restant des cavités dans les blocs de stockage

Numéro du bloc	Volume ouvert avant stockage en m ³	Volume des déchets en m ³	Volume restant des cavités dans les blocs en m ³
15	18 639,3	3 639,3	15 000,0
16	34 834,5	-	34 834,5
25	16 797,9	-	16 797,9
26	27 579,9	-	27 579,9
Total	97 851,6	3 639,3	94 212,3
Total arrondi			94 300 m³

a) Paramètres géologiques des galeries principales et des blocs de stockage

Ces galeries et ces blocs se trouvent tous dans la couche inférieure de sel gemme (zone salifère supérieure du Sannoisien) et révèlent des couches de marne au niveau de l'excavation.

5.3.2 Matériau de remblayage

- a) Le remblayage des galeries principales pourra être effectué au moyen des matériaux suivants, en fonction des conditions (roche hôte : sel gemme, composition chimique des éventuelles saumures d'infiltration : saumure saturée de NaCl ou saumure saturée de NaCl et KCl avec quantités marginales de $MgCl_2$) :
- Débris de sel gemme
 - Béton de sel et
 - Mortier de remplissage (mélangé à de la saumure).

Pour l'utilisation de débris de sel gemme, une nouvelle zone d'extraction de sel gemme devra être désignée. La possibilité d'obtenir un nouveau permis d'extraction devra être examinée. Les débris pourront également être achetés à un autre site minier. Cependant, le transport des débris achetés prendra énormément de temps, à cause de la capacité limitée du puits (voir la section 5.2.1.2).

Le béton de sel est obtenu à partir d'un mélange de ciment, de cendres volantes, de sel concassé et de saumure saturée de NaCl. Le sel concassé joue le rôle d'additif et remplace le sable et le gravier ; la saumure remplace l'eau. Le mortier de remplissage est obtenu à partir d'un mélange de sable, de gravier de roche dure (granit), de ciment et de saumure de NaCl. Cette composition répartit uniformément les contraintes, ce qui permet de corriger les irrégularités des blocs.

Ces compositions de matériaux étant utilisées dans des environnements salins, des niveaux de cohérence spécifiques doivent être obtenus en considérant différents rapports saumure - ciment ; la composition finale de leurs mélanges doit être conçue et testée au cours du projet pour les conditions propres au site de StocaMine.

Les alternatives au béton de sel et au mortier de remplissage pourraient toutes deux être pompées depuis la surface afin qu'un flux continu de matériaux de construction puisse être assuré. Cet approvisionnement ne dépendrait que de la conception ou du dimensionnement des stations de mélange du remblai, ainsi que de celui des pipelines acheminant les matériaux.

La barrière interne du système de barrières multiples n'impose aucune exigence en ce qui concerne la perméabilité ou la stabilité à long terme des matériaux de construction, parce que la fonction de confinement de la zone de stockage est entièrement assurée par les barrières géotechniques « barrières de scellement de galeries » et que la barrière interne joue principalement le rôle de réduire le vide réactif. En conséquence, du mortier de remplissage (mélangé à de la saumure) devra être utilisé comme matériau de remblayage. En matière d'optimisation des coûts, il s'agit de la meilleure solution.

- a) Matériaux de remblayage pouvant être utilisés dans les blocs de stockage dans les conditions données :
- Socle : sel gemme
 - Saumures d'infiltration potentielles (voir la section 5.2.3.1) : saumure saturée de NaCl ou saumure saturée de NaCl et KCl avec quantités

marginales de $MgCl_2$

et

- Cavités restantes inaccessibles dans les blocs de stockage avec mortier de remplissage.

Ce matériau de remplissage se nivelle généralement seul et il présente de bonnes capacités d'écoulement. Il est donc indiqué pour bien remplir les cavités restantes. Lorsque le mortier de remplissage est mélangé à de la saumure saturée de $NaCl$, la roche hôte n'est pas dissoute par ce matériau de remblayage.

5.3.3 Technologie de remblayage

Le processus de remblayage se décompose en plusieurs étapes :

- Livraison et entreposage des composants du matériau de remblayage
- Transport des composants vers la station de mélange du remblayage
- Préparation du matériau de remblayage dans la station de mélange
- Transport du matériau de remblayage vers les cavités ouvertes préparées et
- Remplissage des cavités ouvertes.

Étant donné l'espace au sol limité sous terre, la station de mélange des matériaux devra être construite à la surface. Cela s'avèrerait également avantageux car

- aucune installation souterraine ne sera nécessaire,

à l'exception des pipelines et

- Les différences de hauteur géodésique dans le puits pourront être mises à profit pour transporter les matériaux de remblayage vers le chantier souterrain.

Les matériaux de remblayage mélangés pourront être pompés vers les cavités ouvertes au moyen de pipelines. Le remblayage s'effectuera par sections, chacune d'entre elles étant séparée des autres par un coffrage. Dans l'intervalle, les matériaux de remblayage pourront être stockés dans un réservoir souterrain pour un approvisionnement efficace des blocs sur de courtes distances (voir Figure 6).

Pour réduire les cavités ouvertes restantes, les matériaux de remblayage devront être insérés au point le plus haut de la section à remblayer.

Pour un rapport de remplissage des cavités de 95 %, un total d'environ 52 000 m³ de mortier de remplissage mélangé à de la saumure devra être amené dans les galeries principales et un total d'environ 90 000 m³ du même matériau devra être amené dans les blocs de stockage à remblayer.

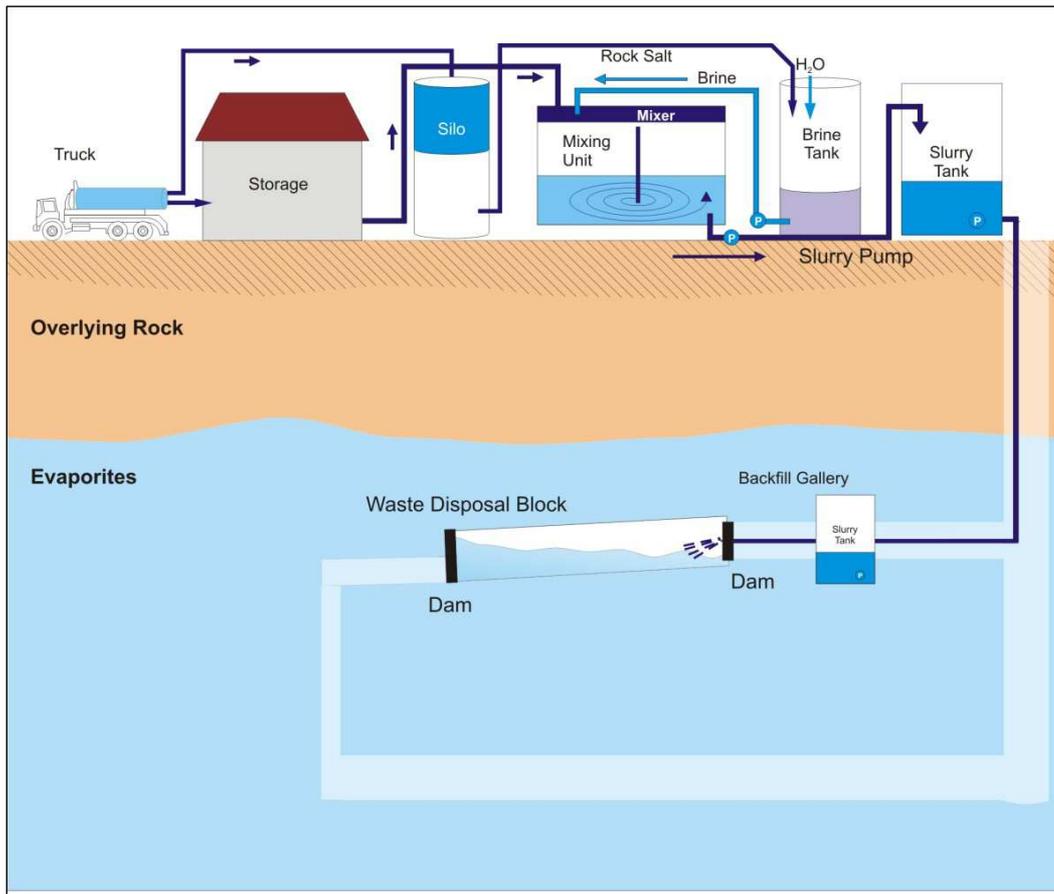


Figure 6 Technologie de remblayage et station de remblayage à la surface

6 Estimation des délais et des coûts

Le chapitre suivant présente un aperçu du temps estimé pour la construction des barrières et pour les opérations de remblayage, ainsi qu'une estimation des coûts pour toutes les étapes nécessaires au confinement du centre de stockage des déchets de StocaMine. La précision des données dépend de l'étape de la conception et devra être révisée plus finement lors des étapes de planification à venir.

6.1 Estimation de la durée de construction des barrières et des ouvrages de remblayage

Les estimations de temps pour la construction des barrières et le remblayage sont fondées sur les expériences de projets similaires, sur des postulats concernant les capacités des équipements et sur la disponibilité des matériaux.

6.1.1 Estimation de la durée de construction des barrières

Les étapes de la construction d'une barrière peuvent être réalisées dans le cadre des périodes de construction estimées décrites dans le Tableau 9. Cette estimation repose sur le postulat selon lequel le travail sera effectué en fonctionnant avec deux postes. Elle indique la durée de construction moyenne par barrière, qui pourrait s'avérer plus brève dans les galeries simples et plus longue dans les galeries doubles.

Tableau 9 Estimation préliminaire de la durée de construction d'une barrière

Désignation	Temps en semaines
Préparation du site de construction, provision de l'équipement et évacuation du site après achèvement de tous les travaux	4,0
Remblayage de sel gemme	2,0
Havage de la zone d'excavation déconsolidée	3,0
Construction de l'appui, A1	2,0
Durcissement de l'appui, A1	4,0
Construction de l'élément de scellement, SE	2,0
Durcissement de l'appui, A2	4,0
Construction de l'appui, A2	2,0
Remblayage de sel gemme	2,0
Total	25,0

Étant donné que le travail sera mené sur un site de construction à la fois, une période de construction de 300 semaines sera nécessaire pour les 12 sites de barrières. À raison de 50 semaines de travail tout au long de l'année, le confinement du centre de stockage de déchets souterrain prendra environ six ans. Ce délai pourra être réduit en menant les opérations de construction simultanément sur plusieurs sites, pour autant que des capacités de levage et de transport suffisantes soient disponibles. Des travaux simultanés dépendront également de l'ordre de construction et de l'accès aux différents sites. Pour optimiser le projet, les travaux de construction seront programmés simultanément lors des prochaines étapes de planification, lorsque plus d'informations sur le site seront disponibles.

6.1.2 Estimation de la durée du remblayage partiel

Le remblayage des galeries principales et des blocs de stockage 15, 16, 25 et 26 pourra être réalisé dans les périodes de construction estimées indiquées dans le Tableau 10.

Tableau 10 Estimation préliminaire de la durée du remblayage

Désignation	Temps en semaines
Installation/démantèlement de la station de mélange de remblayage	
Installation	22
Démantèlement	5
Remplissage des galeries principales et des blocs 15, 16, 25 et 26 sur le site de stockage des déchets	
Matériau de remblayage	
Remblayage	134
Total	161

6.1.3 Estimation de la durée totale

La durée totale de construction des barrières de scellement de galeries et de remblayage partiel peuvent être suivies dans le Tableau 11. Il s'agit d'une estimation prudente. La durée totale pourrait être réduite en procédant simultanément au remblayage et à la construction des barrières, mais une telle programmation ne peut être estimée à cette étape de la planification.

Tableau 11 Estimation préliminaire de la durée de construction des barrières et du remblayage

Désignation	Temps en semaines
Installation / démantèlement de la station de mélange de remblayage, remplissage des galeries principales et des blocs 15, 16, 25 et 26	161
Construction de toutes les barrières	300
Total	461

Le scellement du centre de stockage des déchets de StocaMine sera effectué selon la séquence suivante :

- Remplissage des blocs 15, 16, 25 et 26
- Construction de la plupart des barrières de scellement de galeries
- Remplissage des galeries principales

et

- Construction des dernières barrières de scellement de galeries.

Si le travail de construction des barrières s'effectue sur deux ou trois sites de construction à la fois, une période de construction comprise entre 150 et 100 semaines pour l'ensemble des 12 sites de barrières pourrait être atteinte après avoir défini la coordination des tâches, en prenant en compte les accès, les temps de transport et des conditions de construction et de matériaux compatibles / adéquats pour chaque site. À raison de 50 semaines de travail tout au long de l'année, le confinement du centre de stockage de déchets souterrain prendra environ trois à quatre ans. Le remblayage pourrait être effectué en même temps que le travail sur les barrières, mais cela dépendra de l'évolution du projet, des travaux de construction, des conditions du site, etc.

Cette séquence sera effectuée selon la planification détaillée et sa précision devra être révisée lors d'étapes de planification ultérieures.

6.2 Estimation des coûts

Les estimations des coûts pour la mise en œuvre des barrières de scellement de galeries et du remblayage visant la séparation des déchets dangereux des autres parties de la mine Amélie sont fondées sur :

- Le plan de construction schématique pour les barrières de scellement de galeries indiqué en ANNEXE B et la solution de remblayage décrite en ANNEXE C,
- La détermination des quantités estimées correspondantes,

ainsi que

- Les prix de référence, déterminés à partir de projets comparables, de devis et de

bases de données de tarifications.

La fiabilité des estimations des coûts est d'environ $\pm 35 \%$. Tous les coûts de construction sont estimés et donnés en prix net avant taxes.

6.2.1 Estimation du coût de construction des barrières

Les prix nets pour la construction des barrières de scellement dans les galeries d'accès au site de stockage souterrain sont indiqués dans le Tableau 12 et incluent les éléments suivants de la construction intégrale de toutes les barrières :

- Préparation du site de construction, provision de l'équipement nécessaire, ventilation auxiliaire et évacuation du site
- Travaux préliminaires et supplémentaires sous terre / en surface (p. ex. : petites installations pour des infrastructures, etc.)
- Travaux de maçonnerie, y compris livraison et mise en place de briques silico-calcaires afin d'installer les coffrages, application d'un enduit sur ces murs et revêtement avec un composé de scellement

ainsi que

- Livraison / transfert de :
 - Grenaille de sel gemme calibrée pour la taille spécifiée
 - Béton mélangé à de la saumure saturée de NaClet
- Blocs de bentonite

jusqu'aux différents sites des barrières et mise en place dans les éléments de construction définis.

Les détails suivants n'ont pas été pris en compte pour ces estimations de coûts :

- Fourniture d'électricité : 230 V / 380 V.
- Fourniture d'air comprimé pour le forage.
- Fourniture d'eau.
- Les équipements utilisés pour le transport souterrain des matériaux, l'accès ou le transport du personnel vers les sites, le havage des zones d'excavation déconsolidées, le remblai de sel gemme, etc.
- La garantie des conditions opérationnelles de santé, de sécurité et de respect de l'environnement, ainsi que les plans d'évacuation pour le personnel impliqué.

Tableau 12 Estimation des coûts de construction des barrières dans les galeries d'accès

Désignation	Description sommaire	Coûts de construction
1	Installation du site	3 780 000 EUR
2	Travaux préliminaires et supplémentaires	1 260 000 EUR
3	Havage de la zone d'excavation déconsolidée	2 020 000 EUR
4	Remblayage de sel gemme	1 400 000 EUR
5	Maçonnerie et enduits	620 000 EUR
6	Béton et étanchéité	7 210 000 EUR
7	Ingénierie : planification, rédaction des appels d'offres, supervision, conservation de preuves, documentation, tests des matériaux de construction	1 280 000 EUR
Sous-total		17 570 000 EUR
	Imprévus : 5 %	880 000 EUR
Total		18 450 000 EUR

D'après ces calculs, la construction des barrières de scellement dans les galeries d'accès au site de stockage souterrain coûtera environ **19 000 000 d'euros**.

Chaque site de barrière de scellement de galerie devrait coûter en moyenne autour de 1 600 000 euros.

6.2.2 Estimation du coût du remblayage

Les prix nets du remblayage des galeries principales dans la zone d'entreposage et d'une partie des blocs du centre de stockage des déchets avec les matériaux requis sont indiqués dans le Tableau 13. Ils incluent les éléments suivants :

- Installation (puis démantèlement) d'une station de mélange et de pompage pour les matériaux de construction, avec notamment un silo de stockage et des réservoirs en surface, un poste de mélange de la saumure, un poste de mélange des matériaux de remblayage, un pipeline de puits, des pipelines souterrains, un poste de commande du système et des équipements auxiliaires
- Scellement des blocs de stockage et de la section transversale entre les différentes sections de colmatage avec des panneaux de coffrages correspondants
- Meilleur colmatage possible des cavités restantes dans les blocs 15, 16, 25 et 26 au moyen de mortier de remplissage (mélangé à de la saumure)
- Scellement des différentes sections de colmatage au moyen de panneaux

de coffrage correspondants, et

- Remplissage intégral des galeries principales à l'aide de mortier de remplissage.

Tableau 13 Estimation des coûts de remplissage des galeries principales et des blocs 15, 16, 25 et 26

Désignation	Description sommaire	Coûts de construction
1	Installation/démantèlement de la station de mélange de remblayage	
1.1	Station de mélange de remblayage	4 250 000 EUR
1.2	Installation	1 180 000 EUR
1.3	Démantèlement	410 000 EUR
2	Remplissage des galeries principales et des blocs 15, 16, 25 et 26	
2.1	Matériau de remblayage	10 020 000 EUR
2.2	Remblayage	4 300 000 EUR
3	Ingénierie : planification, rédaction des appels d'offres, supervision, conservation de preuves, documentation, tests des matériaux de construction	1 470 000 EUR
Sous-total		21 630 000 EUR
	Imprévus : 5 %	1 090 000 EUR
Total		22 720 000 EUR

D'après ces calculs, le remplissage des galeries principales et des blocs 15, 16, 25 et 26 coûtera environ **23 000 000 d'euros**.

6.2.3 Estimation du coût total

Les prix nets de la construction des barrières de scellement dans les galeries d'accès au centre de stockage de déchets souterrain et du remplissage des galeries principales et des blocs 15, 16, 25 et 26 de la zone d'entreposage avec les matériaux requis sont indiqués dans le Tableau 14.

Tableau 14 Estimation des coûts des barrières de scellement dans les galeries d'accès et du remblayage des galeries principales et des blocs 15, 16, 25 et 26 avec du mortier de remplissage

Désignation	Description sommaire	Coûts de construction
1	Mise en œuvre de la construction des barrières	19 000 000 EUR
2	Installation/démantèlement de la station de mélange de remblayage	23 000 000 EUR
	Remplissage des galeries principales et des blocs 15, 16, 25 et 26	
Total		42 000 000 EUR

D'après cette estimation, la construction des barrières de scellement dans les galeries d'accès au site de stockage souterrain avec le remblayage supplémentaire des galeries et d'une partie des blocs coûtera environ **42 000 000 d'euros**.

7 Recommandations et conclusions

Le site de stockage de déchets de StocaMine est situé immédiatement en dessous de la mine de potasse Amélie et il est relié aux niveaux de potasse exploités ainsi qu'à la biosphère par de nombreux puits et galeries. Les mines de potasse seront, à long terme, ennoyées, du fait de puits déjà bouchés. Le site de stockage devra donc être isolé de la mine qui l'entoure et de la biosphère. Le présent rapport décrit une solution réalisable qui a été étudiée pour assurer ce confinement.

Les conditions géologiques et géomécaniques, ainsi que la situation de la mine au niveau du stockage sont très complexes et nécessitent des moyens élaborés pour parvenir à un confinement efficace. Des facteurs défavorables (p. ex. : piliers et toit très détériorés, etc.) ainsi que des facteurs favorables (p. ex. : taux de fermeture élevés, etc.) doivent être envisagés lors du choix des composants d'un système de scellement. La conception proposée repose sur l'expérience de scénarios de confinement similaires, sur des informations acquises grâce aux plans fournis par StocaMine ou obtenus au cours de rencontres avec des représentants de StocaMine, et durant une inspection de plusieurs sites proposés pour les barrières, sur des données de l'INERIS concernant les aspects géomécaniques et hydrogéologiques du site de StocaMine, ainsi que sur les caractéristiques chimiques des déchets déposés.

Cependant, la situation géologique et géomécanique, ainsi que l'état des salles et des galeries de la mine demandent des études plus poussées avant de pouvoir mettre en œuvre cette solution dans les étapes de planification suivantes.

Ce projet de construction décrit le confinement du site de stockage par des barrières scellant les galeries reliant les blocs d'entreposage des déchets et la mine et en remblayant les galeries dans la zone d'entreposage et à l'intérieur des blocs 15, 16, 25 et 26. Le scellement par des barrières et le remblayage des galeries empêcheront efficacement les fluides d'entrer dans le site de stockage des déchets avant la fermeture des vides. Le remblayage de plusieurs blocs réduira efficacement les vides existants pour minimiser le vide restant après fermeture, susceptible d'être rempli par des fluides migrant vers le site à long terme.

Le projet de construction inclut le remblayage, opération qui devrait nécessiter 161 semaines de construction et coûter 23 000 000 d'euros, et la construction des barrières, estimée à 300 semaines de travail pour un coût de 19 000 000 d'euros. Chaque site de barrière de scellement de galerie devrait coûter en moyenne autour de 1 600 000 euros.

Ces estimations pour la construction des barrières de scellement ne tiennent pas compte des éléments suivants, entre autres :

- Fourniture d'électricité : 230 V / 380 V.
- Fourniture d'air comprimé pour le forage.
- Fourniture d'eau.
- Les équipements utilisés pour le transport souterrain des matériaux, l'accès ou le transport du personnel vers les sites, le havage des zones d'excavation déconsolidées, le remblai de sel gemme, etc.
- La garantie des conditions opérationnelles de santé, de sécurité et de respect de l'environnement, ainsi que les plans d'évacuation pour le personnel impliqué.

D'après l'étape de conception, l'estimation du coût se situe dans le domaine de précision de $\pm 35\%$. Les coûts sont donnés nets.

Les estimations des délais et des coûts sont fondées sur les hypothèses décrites dans le présent rapport. Elles devront être révisées après des études complémentaires lors d'étapes de planification plus détaillées.

La conception de barrières présentée consiste en un élément de scellement de bentonite logé entre deux appuis et dont la longueur est limitée par les conditions du site à l'emplacement déterminé. Il s'agit d'une conception générique généralement à même de confiner efficacement le site de stockage des déchets. Cette conception générique devra être adaptée à chaque site selon les résultats des inspections et des études concernant leurs propriétés géologiques, géomécaniques et minières spécifiques.

Il est donc recommandé de mener :

- Une étude géologique de l'emplacement de chaque barrière
- Une étude géotechnique de l'emplacement de chaque barrière
- Des carottages et des échantillonnages (particulièrement dans les sections de marne) pour chaque site
- Des mesures de la perméabilité (de préférence en utilisant les trous de carottage) pour chaque site

et

- Des mesures de convergence, particulièrement dans les zones connaissant des conditions difficiles.

En outre, il est recommandé d'étudier les possibilités de construction d'une barrière test in situ au niveau du site de stockage.

La solution de remblayage proposée est une conception générique généralement à même de remplir les vides des cavités avec efficacité. Cette conception devra être adaptée en matière de choix ou d'élaboration d'un matériau de remblayage possédant les propriétés requises.

Il est recommandé de localiser et de contacter des producteurs de bentonite, de béton et de matériaux adaptés au remblayage et, si un mélange approprié n'existe pas, de prévoir l'élaboration d'un mélange de bentonite, de béton et une composition de matériau de remblayage répondant aux exigences de cette application précise.

Il est en outre conseillé d'étudier l'impact potentiel de la saumure migrant vers la zone de stockage, ainsi que celui de la saumure polluée éventuellement extrudée depuis la zone de stockage sur le béton et la bentonite des éléments des barrières.

RÉFÉRENCES

- /1/ Aland, H.-J.M. u. a. (1999) : Langzeitfunktionstüchtiger Streckenverschluß aus kompaktiertem Bentonit im Bergwerk Sondershausen.- Glückauf 135 (1999) 3, Seiten 134 -139.
- /2/ 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.
- /3/ Article L-515-7 du Code Français de l'Environnement du 29 juin 2006, sur la base de l'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, art 6 JORF 14/07/92).
- /4/ 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.
- /5/ GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG (2004) : Entwicklung eines Grund- konzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) für UTD/UTV.- BMBF - Förderkennzeichen 02C0942.
- /6/ Handke, N. (2002) : Dammbau- und Abdichtungstechniken im Kali- und Steinsalzbergbau.- Thyssen Schachtbau Report 2002 ; Seiten 30 - 35.
- /7/ INERIS (2010) : Etude Géomécanique du stockage de StocaMine. - Rapport d'étude DRS- 10-108-130-14273A, 116 pages, INERIS, 23/12/2010.
- /8/ INERIS (2011) : Évaluation du terme source dans le scénario du stockage illimité : calculs des quantités de contaminants stockés, et des concentrations potentielles en solution et en phase gazeuse en cas d'ennoyage - Rapport d'étude DRC-10-108130-12610B, 113 pages, INERIS, 03/11/2011.
- /9/ INERIS (2011) : Rappel des précédents résultats de l'étude d'impact sur la nappe. - présentation PowerPoint, INERIS, 23.05.2011
- /10/ INERIS (2011) : Stockage souterrain de STOCAMINE (68), Étude hydrogéologique de l'ennoyage du site. - Rapport d'étude DRS- -10-108-130-12810B, 190 pages, INERIS, 09/03/2011.
- /11/ K+S Aktiengesellschaft (2002) : Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II.- BMBF - Förderkennzeichen 02C0516.
- /12/ Sandia National Laboratories (1995) : Case Studies of Sealing Methods and Materials Used in the Salt and Potash Mining Industries.- SAND95-1120, UC-721, November 1995.
- /13/ Sitz, P. (1982) : Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen. – Freiburger Forschungsheft A 643, 151 Seiten, VEB Deutscher Verlag für Grund- stoffindustrie, Leipzig, 1982
- /14/ StocaMine (2011) : New Assessment Criteria confirmed by INERIS. - Courriel du 06 octobre 2011.
- /15/ TU Bergakademie Freiberg (2003) : Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für UTD im Salinar, Bau und Test eines Versuchsverschluss- bauwerkes unter realen Bedingungen.- BMBF - Förderkennzeichen 02C05472.
- /16/ TU Bergakademie Freiberg (2009) : Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeit- stabile Verschlussbauwerke. - Abschlussbericht zum mit Mitteln des BMBF unter 02C1124 geförderten Forschungsvorhaben, 307 Seiten, Freiberg, 2009.

CHEMIN	O:\@Projekte EGB aktuell\EGB_07-
RÉVISION	042N01_Stocamine_Sealing\03proj_AUSLIEFERUNG\2013-06- 24_Final_Follow-Up-
VÉRIFIÉ PAR	00 CA, TT