

VERSION COMPLETEE DU RAPPORT

Concept technique de scellement des galeries d'accès du site de stockage souterrain de déchets StocaMine et de mise en place de matériau de remblayage dans certaines zones du site de stockage

ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft
Geotechnik und Bergbau mbH
Arnstädter Straße 28
D - 99096 Erfurt
Allemagne

Téléphone : +49 361 3810 500
Télécopie : +49 361 3810 505
E-mail : mining@ercosplan.com
Internet : www.ercosplan.com
Gérant : Dr. Henry Rauche

LE PRESENT RAPPORT COMPREND
38 Pages
5 Annexes

Donneur d'ordre : Mines de Potasse d'Alsace (MDPA)
Avenue Joseph-Else
68310 Wittelsheim
France

Auftragnehmer: ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft
Geotechnik und Bergbau mbH
Arnstädter Straße 28
D - 99096 Erfurt
Allemagne

Numéro de projet : 17-009EA01

Erfurt, le 14/05/2019

Dr. Henry Rauche
Gérant

VERSION COMPLETEE DU RAPPORT

Concept technique de scellement des galeries d'accès du site de stockage souterrain de déchets StocaMine et de mise en place de matériau de remblayage dans certaines zones du site de stockage

Version: Version finale rév.02

La présente version complétée et le rapport à la base de cette dernière ont été élaborés sous la responsabilité de :

Lehmer, Babett
Radünz, André
Pfeifer, Stephan
Assmuth, Christian

Le contrôle de la qualité et du contenu a été réalisé par

Jockel, Andreas

TABLE DES MATIERES

1	Origine de la mission	5
6	Concept technique de réalisation des barrières géotechniques dans les galeries d'accès à la zone du site de stockage	6
6.2	Avant-projet des ouvrages de scellement de galerie	6
6.2.1	Bases de l'avant-projet	6
6.2.2	Prémises d'étude	6
6.2.3	Plan d'utilisation des ouvrages de scellement de galerie	7
6.2.4	Avant-projet de l'ouvrage	8
6.3	Dimensionnement des éléments de l'ouvrage	11
6.4	Exigences applicables aux matériaux de construction	11
6.4.1	Stabilité à long terme	11
6.4.2	Exigences hydrauliques, géomécaniques, géochimiques et constructives	12
6.4.3	Procédés de mise en œuvre	14
6.5	Méthode et technologie de construction	16
6.5.1	Ouvrages de scellement de galeries dans les galeries simples	21
6.5.2	Ouvrages de scellement de galeries dans les galeries doubles	23
7	Concept technique de mise en œuvre de remblai dans certaines zones du site de stockage	27
7.1	Bases de l'avant-projet	28
7.2	Matériaux de remblayage	29
7.3	Technologies de mise en œuvre envisageables du remblai	31

LISTE DES FIGURES

Figure 9	Conception de base des futurs ouvrages de scellement de galerie (MDPA, 2016b, /30/)	9
Figure 10	Représentation schématique de la zone EDZ et du contour confectionné sur le site d'implantation du barrage pilote, avant sa construction	22
Figure 11	Représentation schématique, en coupe longitudinale, d'un ouvrage de scellement de galerie implanté dans une galerie simple (cf. MDPa, 2019, /35/)	23
Figure 12	Vue en coupe schématique de la construction en plusieurs phases d'ouvrages de scellement de galerie dans les galeries doubles	26
Figure 13	Représentation schématique d'une projection horizontale de l'ouvrage de scellement de galerie avec joints longitudinaux entre les segments de béton dans le cadre de la construction en plusieurs phases d'un ouvrage dans une galerie du système de galeries doubles	27
Figure 14	Plan de mine du site de stockage de déchets, avec les blocs de stockage et les galeries principales à remblayer dans la zone de stockage à confiner	28
Figure 15	Technologie de remblayage au coulis de ciment, avec l'installation de préparation du matériau en surface	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4	Evolution dans le temps du site de stockage souterrain de déchets StocaMine (INERIS, 2011a, /20/, 2011b, /21/; ITASCA, 2016, /24/; (date de début actualisée)	8
Tableau 5	Récapitulatif des spécifications techniques/constructives applicables aux remblais en sel gemme, et des méthodes de mise en œuvre pour la réalisation des ouvrages de scellement de galerie	20

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 5	Tableau récapitulatif des sites d'implantation de barrage, précisant les volumes de surexcavation	
----------	---	--

1 Origine de la mission

MDPA est l'exploitant d'un site de stockage souterrain de déchets, situé dans les vieux travaux de l'ancienne mine de potasse Amélie près de Wittelsheim, qui a été exploité jusqu'en 2002. Environ 42 000 t de déchets ont été stockés dans les blocs du stockage souterrain, situés en dessous des deux couches de potasse (partiellement exploitées) "CS" et "CI". Après la cessation de l'exploitation, la fermeture du site de stockage souterrain de déchets a été décidée.

À l'initiative de MDPA, un certain nombre d'études ont été réalisées, concernant le comportement géomécanique et hydrogéologique du site, concernant les aspects chimiques du stockage souterrain de déchets, mais également concernant la problématique du déstockage de déchets, les mesures de scellement d'ordre général, et le scellement de galeries d'accès. Les résultats de ces études ont permis de définir les conditions de base du scellement du site de stockage souterrain de déchets.

En 2011, MDPA a chargé ERCOSPLAN d'exploiter les études, et en priorité l'étude de l'INERIS, pour actualiser la base de données en vue de l'évaluation de la mesure de scellement du site souterrain, et du développement d'un concept technique de confinement du site de stockage souterrain de déchets, grâce à un remblayage partiel des vides miniers et grâce au scellement des galeries d'accès à la zone de stockage au moyen de barrages. À cette occasion, un Avant-Projet de conception pour l'essai d'éléments d'étanchéité et pour le futur confinement du site de stockage a été établi en 2013 (ERCOSPLAN, 2013, /9/). Ce rapport a été versé au dossier de demande de stockage illimité de déchets, déposé par MDPA, désigné "LA DEMANDE" (MDPA, 2015, /28/).

Entre-temps, les conditions de base définies à l'époque ont fait l'objet d'actualisations au vu d'autres investigations et d'études supplémentaires. Sur cette base, le concept de confinement a été révisé. À la place du scellement des galeries d'accès au moyen de barrages comportant un élément d'étanchéité en bentonite, il est désormais prévu de procéder à un déstockage partiel des déchets, et au scellement des galeries d'accès à la zone de stockage au moyen de barrages avec un élément d'étanchéité confectionné en béton de saumure.

En juin 2017, ERCOSPLAN a été mandatée pour établir une version actualisée de "Concept technique de scellement des galeries d'accès du site de stockage souterrain de déchets StocaMine et de mise en place de matériau de remblayage dans des parties du site de stockage". Cette actualisation a été effectuée en premier lieu sur la base du MÉMOIRE COMPLÉMENTAIRE (MDPA, 2016c, /31/) de juin 2016, y compris les rapports Tierce expertise: Rapport Geomecanique - (ARTELIA et al., 2016b, /4/) et A8 - Evaluation des flux potentiels de saumure contaminée - (ITASCA, 2016, /24/) des références y afférentes.

Dans le cadre d'une discussion de l'avant-projet présenté le 28/02/2019 à Wittelsheim (ERCOSPLAN, 2019, /12/), divers aspects de l'exécution des travaux de construction ont été étudiés, sur la base de l'avancement de l'état de la technique et des planifications. Il a été décidé de formuler les précisions mises au point et les compléments d'explication convenus au cours de la réunion sous forme d'ajout au document d'étude présenté. L'insertion des ajouts devant ici cadrer avec le concept présenté, les chapitres pertinents reprennent la structure in et la numérotation initiales du rapport.

6 Concept technique de réalisation des barrières géotechniques dans les galeries d'accès à la zone du site de stockage

Le concept technique des barrières géotechniques de type "ouvrage de scellement de galerie" est mis au point sur la base des étapes de traitement ci-après :

- description de l'état de la science et de la technique en matière de construction d'ouvrages de scellement de galerie dans des sites de stockage souterrain de déchets ;
- récapitulation des bases de conception (avant-projet), y compris la description du plan d'utilisation des ouvrages de scellement de galerie ;
- avant-projet des ouvrages de scellement de galerie ;
- pré-dimensionnement des différents éléments ;

description de la méthode et de la technologie de construction.

6.2 Avant-projet des ouvrages de scellement de galerie

L'avant-projet des ouvrages de scellement de galerie doit tenir compte non seulement des conditions environnementales de chacun des sites d'implantation prévues, mais également des exigences formulées dans le dossier de demande d'autorisation déposé par les MDPAs, résultant des études approfondies réalisées par l'INERIS et ITASCA.

6.2.1 Bases de l'avant-projet

Aucun changement par le rapport d'origine.

6.2.2 Prémisses d'étude

L'avant-projet des ouvrages de scellement de galerie doit tenir compte des conditions environnementales visées aux chap. 3 et 4, mais avant tout, il devra satisfaire aux contraintes imposées par le dossier déposé tenant en particulier compte des études de l'INERIS (2010, /19/; 2011a, /20/) et aux actualisations apportées à ces contraintes par l'ITASCA (2016, /24/), par ARTELIA et al. (2016b, /4/) :

I. Exigences techniques

- Conditions présentes à une profondeur de 550 m :
 - température de la roche de 30°C ;
 - pression hydrostatique maximale d'env. 6 MPa ;

- pression lithostatique maximale d'env. 12 Mpa.
- la section totale de l'ensemble des galeries d'accès au stockage, avant la réalisation des travaux de confinement et de surexcavation, est d'environ 240 m².

II. Processus d'ennoyage

- La durée estimée jusqu'à l'arrivée de l'exhaure de la mine au niveau du site de stockage est d'env. 240 ans¹ ;
- La durée estimée jusqu'à l'arrivée de l'exhaure au niveau de la première nappe phréatique située au-dessus du terrain salifère est d'env. 300 ans².

III. Taux de convergence

- Avant l'ennoyage, le taux de convergence dans les galeries est de 0,9 % par an ;
- Après l'ennoyage, le taux de convergence dans les galeries est de 0,1 % par an et diminue dans le périmètre des ouvrages de scellement de galerie construits en fonction de la rigidité de la barrière.

IV. Exigences applicables aux éléments d'étanchéité

- Chaque élément d'étanchéité devra présenter une perméabilité intégrale de $K \leq 10^{-18} \text{ m}^2$;
- Le matériau retenu pour assurer l'étanchéité est un béton spécial de très faible perméabilité ;
- Selon l'INERIS (2010, /19/; 2011a, /20/), la période de justification pour la fonctionnalité des éléments d'étanchéité doit être de > 1 000 ans.

6.2.3 Plan d'utilisation des ouvrages de scellement de galerie

Pour la mise en pression des ouvrages de scellement de galerie, l'hypothèse retenue pour le déroulement chronologique du processus est représentée au Tableau 4.

¹ Dans le cadre de la tierce expertise (ARTELIA et al., 2016c, /5/), des hypothèses plus prudentes ont été retenues pour le processus d'ennoyage, réduisant le délai estimatif jusqu'à l'arrivée des exhaures au niveau du site de stockage à env. 72 ans. En même temps, les experts ont rappelé qu'à cette échéance, les barrières géotechniques auront retrouvé leur fonctionnalité intégrale depuis longtemps.

² Dans le cadre de la tierce expertise (ARTELIA et al., 2016c, /5/), le délai jusqu'à l'arrivée de l'exhaure au niveau de la première nappe phréatique, située au-dessus du terrain salifère, a été estimée à env. 120 ans.

Tableau 4 Evolution dans le temps du site de stockage souterrain de déchets StocaMine (INERIS, 2011a, /20/, 2011b, /21/; ITASCA, 2016, /24/; (date de début actualisée)

Repères chronologiques		Evénements pronostiqués dans le site de stockage souterrain de déchets StocaMine de MDPA
Derzeit	2018	Conditions ambiantes sèches, 21 ans après le creusement du site de stockage souterrain
1 ^{ème} étape	dans env. 1 à 5 ans	Construction des barrières géotechniques
2 ^{ème} étape	dans env. 100 ans	Réduction des vides miniers à 20 % de leur volume initial dans le site de stockage de déchets et dans les galeries adjacentes par l'action de la convergence
3 ^{ème} étape	dans env. 240 ans	Premier contact des barrières géotechniques avec la saumure. La durée estimée jusqu'à la remontée de la saumure au niveau de la couche inférieure de la nappe phréatique est d'env. 300 ans.
4 ^{ème} étape	dans env. 1 700 ans	Ennoyage du site de stockage probablement achevé
5 ^{ème} étape	dans env. 2 000 ans	Possibilité d'infiltration de saumures éventuellement polluées dans l'aquifère
6 ^{ème} étape	après 10 000 ans	Processus de transport dus à la diffusion et à la convection

6.2.4 Avant-projet de l'ouvrage

Le concept (avant-projet) de construction des ouvrages de scellement de galerie a été mis au point en intégrant le plan d'utilisation des ouvrages de scellement de galerie exposé au chapitre 6.2.3. L'avant-projet d'ouvrage des futurs ouvrages de scellement de galerie illustré à la Figure 9 tient compte des préconisations d'étude de MDPA (2016b, /30/) et a été validé par la tierce expertise réalisée par ARTELIA et al. (2016a, /3/). Les futurs ouvrages de scellement de galerie devront comporter les éléments fonctionnels ci-après :

- un élément d'étanchéité en béton spécial, d'une très faible perméabilité intégrale de $K \leq 10^{-18} \text{ m}^2$, susceptible de créer un scellement étanche de la section de galerie sur une longueur de 6 m ;
- de chaque côté de l'élément d'étanchéité, un élément de culée d'une longueur respective de 3 m, réalisé dans un matériau de construction cohésif, garantissant une reprise homogène des charges, sans transferts de charge au niveau de paliers de rigidité, ces effets étant déplacés de l'élément d'étanchéité vers la culée.

Aussi longtemps que les fonctions de l'élément d'étanchéité et des culées sont garanties, il n'est pas indispensable de procéder à la réalisation séparée des différents éléments fonctionnels.

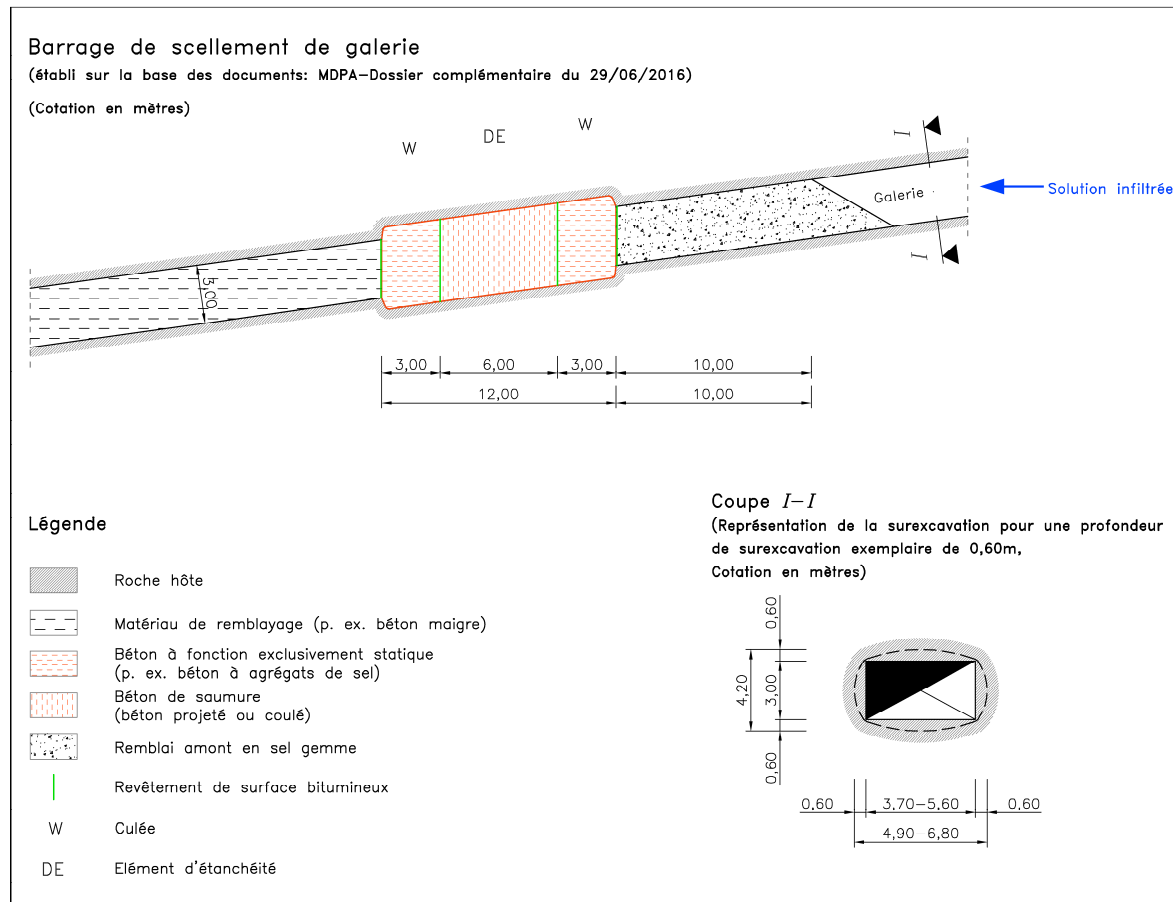


Figure 9 Conception de base des futurs ouvrages de scellement de galerie (MDPA, 2016b, /30/)

Côté solution d'infiltration, un serrement en sel gemme d'une longueur respective de 10 m/20 m (cf. Tableau 5), avec mise en place resserrée jusqu'au toit, vient se juxtaposer immédiatement à l'ouvrage de scellement de galerie, à titre d'élément fonctionnel supplémentaire, permettant de réduire la convergence totale dans les galeries d'accès, et de diminuer en outre le pouvoir de dissolution de solutions non complètement saturées en NaCl qui se présenteraient devant l'ouvrage. Considéré à long terme, ce serrement en sel gemme retrouvera des caractéristiques similaires à celui du sel gemme du terrain environnant, par suite de la compaction sous l'action de la convergence et de processus de cristallisation.

Afin de garantir la minimisation visée des gradients de contrainte au niveau des faces extérieures des éléments de culée, un remblai en granulats de sel (havrit) sera réalisé des deux côtés des sites d'implantation de barrage situés dans des galeries d'accès doubles, ainsi qu'au niveau du site d'implantation 8. Les exigences applicables aux granulats de sel et à la technique de mise en œuvre seront détaillées au chapitre 6.5.

Le matériau de remblayage jouxtant l'ouvrage côté site de stockage quant à lui sera lui stabilisé à l'aide d'un liant, permettant de réduire la convergence totale dans les galeries d'accès. Ce matériau de remblayage ne fait pas partie des éléments fonctionnels de

l'ouvrage de scellement de galerie, mais il contribuera, avec ces ouvrages de scellement, à homogénéiser l'évolution de la convergence le long de l'axe de la galerie.

En raison de la situation très complexe des sites d'implantation décrite dans les bases de l'avant-projet (chapitre 6.2.1), et en tenant compte des spécifications et des conditions de base très détaillées, énoncées dans les prémisses d'étude (chapitre 6.2.2), la bonne qualité de la mise en œuvre des éléments fonctionnels visés ci-dessus, et/ou de la construction des ouvrages de scellement de galerie, présuppose le respect d'exigences draconiennes en matière de sécurité et de technologie de mise en œuvre.

Les principes suivants sont applicables :

- utilisation de matériaux de construction capables d'assurer de manière fiable leur fonction statique ou d'étanchéité durant la période requise ou au-delà ;
- ~~surexcavation soignée de la zone perturbée (EDZ) autour des galeries dans le voisinage des éléments du barrage présentant une fonction d'étanchéité ;~~
- Au vu des résultats de la caractérisation géologique et géotechnique des sites d'implantation des barrages et de l'évolution dans le temps de l'infiltration de saumure selon l'hypothèse d'envoyage jusqu'aux sites d'implantation des ouvrages de scellement de galerie (cf. chapitre 6.2.1), nous recommandons les contours de surexcavation représentés à l'ANNEXE 5. Contrairement à l'avant-projet d'origine, l'approche consiste désormais à tabler sur l'atteinte de l'intégrité des ouvrages de scellement de galerie par l'action de la convergence du terrain adjacent sur une période de plusieurs années. La définition du contour de surexcavation s'effectue selon les hypothèses de base suivantes :
 - dans la mesure du possible, le mur du contour de surexcavation devra être rectiligne,
 - un banc de roche d'épaisseur suffisante sera respecté par rapport aux couches de marnes au niveau du toit,
 - les zones friables ou menaçant de tomber seront havées de manière à garantir la sécurité du travail et des travailleurs durant la phase de construction, en veillant notamment à la sécurisation du toit et des parements,
- utilisation de matériaux d'étanchéité présentant une conductivité hydraulique au contact de la saumure d'un degré similaire à celui de la roche hôte ;
- scellement du plan de contact entre le terrain et le matériau d'étanchéité, en vue d'éviter la formation de voies d'infiltration préférentielles ;
- ajustement des caractéristiques mécaniques de l'ouvrage de scellement conformément aux charges attendues ;
- en vue d'accroître le niveau de sécurité du système dans sa globalité, il convient de construire l'élément d'étanchéité de manière à ce qu'il supporte une partie de la charge distribuée

et

- sécurisation de la fonction des barrages d'étanchéité par la mise en œuvre de mesures techniques appropriées et par la sélection de sites d'implantation appropriés, de manière à ce que les saumures se présentant devant l'ouvrage soient saturées, et qu'aucune dissolution ne survienne.

6.3 Dimensionnement des éléments de l'ouvrage

L'avant-projet de l'ouvrage illustré par la Figure 9 a fait l'objet d'une justification par l'TASCA (2015, /23/; 2016, /24/). En cas d'écarts relevés in situ par rapport aux dimensions de galerie supposées au titre de ces calculs justificatifs, l'ouvrage sera à redimensionner.

Le dimensionnement provisoire des ouvrages de scellement de galerie se base sur l'hypothèse d'une galerie simple, ou d'une galerie double, après le havage du pilier intermédiaire ; la profondeur de surexcavation prévue en général est de 1,0 m. Si une profondeur de surexcavation excédant 1,0 m devait s'avérer nécessaire, il conviendrait de vérifier le dimensionnement des ouvrages de scellement de galerie pour le site en question, et de l'adapter en conséquence.

6.4 Exigences applicables aux matériaux de construction

6.4.1 Stabilité à long terme

Les ouvrages de scellement dans les galeries d'accès au site de stockage souterrain de déchets sont à concevoir pour une durée de vie opérationnelle de >1 000 ans. Il existe des matériaux stables à long terme, permettant de sceller les sections de galerie contre l'intrusion attendue de saumure ; il s'agit des matériaux ci-après :

- bitume / asphalte ;
- argile / bentonite / mélanges minéraux ;
- granulats ou débris de sel ;
- matériaux de construction à base de ciment (béton à agrégats de sel et béton de saumure)

et

- coulis de remblayage, comme matériaux semblables au sel.

Les groupes de matériaux bitumes / asphaltes et argile, bentonite et mélanges minéraux sont à mettre en œuvre entre les culées, dans la section à sceller/étanchéifier, en vue de garantir leur stabilité en place et en vue de réaliser la fonction d'étanchéité requise. Seuls les matériaux du groupe des matériaux de construction à base de ciment comme le béton à agrégats de sel, le béton de saumure et le coulis de remblayage sont à considérer pour la mise en œuvre dans les conditions basiques applicables ici. Les bétons normaux, à agrégats de sel et les bétons de saumure sont soumis à des processus corrosifs à des degrés variables en fonction de l'utilisation du ciment comme liant, et leurs propriétés changeront au cours de la période de référence en fonction de leur composition. Aussi, leur composition doit être adaptée aux conditions de StocaMine pour garantir la fonctionnalité des éléments de barrage dans un scénario de convergence et de compaction. Les culées maçonnées en pierres naturelles sans joints, qui possèdent une stabilité à long terme, sont théoriquement possibles, mais au vu des quantités requises ici, cette option n'est pas faisable pour des raisons économiques et techniques.

Le groupe de matériaux comprenant les granulats et les débris de sel, ainsi que les matériaux semblables au sel constitués de béton à agrégats de sel et de coulis de remblayage ne développeront leur effet d'étanchéité complet qu'après un laps de temps, quand la pression excédentaire aura renforcé le contact entre l'ouvrage et le terrain par suite d'une convergence accrue, c'est-à-dire après la phase dite "phase de prologue".

Au vu des conditions de base du site de StocaMine, nous avons retenu la famille de matériaux de construction "bétons de saumure". Cela veut dire qu'un béton sera gâché avec de la saumure saturée en NaCl, afin d'éviter tout potentiel de dissolution du terrain adjacent dans l'horizon d'implantation, et pour assurer une bonne cohésion du matériau de construction avec ce dernier.

6.4.2 Exigences hydrauliques, géomécaniques, géochimiques et constructives

Les exigences hydrauliques, géomécaniques, géochimiques et constructives applicables au béton de saumure ont été spécifiées comme suit dans le rapport ERCOSPLAN (2016, /10/).

Exigences hydrauliques

Pour garantir la pérennité de l'ouvrage de scellement de galerie, le matériau devra présenter une perméabilité $K \leq 10^{-18} \text{ m}^2$ durant la période de justification.

Exigences géomécaniques

Conformément aux exigences statiques, un béton de saumure d'une résistance à la compression minimale de 25 N/mm^2 (mesurée sur une éprouvette cylindrique) est suffisant pour la réalisation des ouvrages de scellement de galerie, pour assurer le transfert des charges d'une pression lithostatique maximale de 12 MPa et d'une pression hydrostatique maximale de 6 MPa durant la période de justification.

Les calculs justificatifs récapitulés dans le rapport ERCOSPLAN (2016, /10/) pour l'élément d'étanchéité ont abouti aux paramètres de matériau ci-après, qui constituent donc une exigence minimale :

- Module E statique : $E \geq 32 \text{ GPa}$;
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,3$;
- Angle de frottement : $\varphi \geq 29,7^\circ$;
- Cohésion : $c \geq 14,9 \text{ MPa}$;
- Résistance à la compression mesurée sur une éprouvette cylindrique : $f_{ck} \geq 35 \text{ MPa}$.

Exigences géochimiques

Le béton de saumure doit garantir le transfert des charges durant la période de justification de $> 1\ 000$ ans (voir chapitre 6.2.2 n°IV), en résistant aux conditions

environnementales en présence. Les conditions environnementales sont réparties en classes d'exposition et d'humidité.

Durant leur période d'utilisation, les ouvrages de scellement de galerie sont exposés à des impacts chimiques. La saumure attendue présentera probablement une concentration dominante en NaCl. La concentration de sulfates dans la saumure sera d'environ 690 mg/l. Ainsi, le béton subit une attaque chimique modérée, ce qui correspond à la classe d'exposition XA2 selon la norme DIN EN 206-1. Cette classe d'exposition requiert au moins une classe de résistance à la compression correspondant à C 35/45, si bien que l'exigence géochimique applicable au béton prime sur l'exigence géomécanique et joue un rôle déterminant pour le dimensionnement. Par ailleurs, on ne devra utiliser pour ce béton de saumure que des ciments dotés d'une résistance accrue aux sulfates.

La classe d'humidité correspond à la classe WA, c'est-à-dire que le matériau sera humide pendant une période prolongée de son utilisation, et exposé pendant longtemps à un apport alcalin de l'extérieur. Ainsi, il convient d'exclure l'endommagement de l'élément d'étanchéité par la réaction alcali-silice (RAS) en sélectionnant judicieusement les composants de départ du béton (ciment, agrégats et adjuvants). Pour ce béton de saumure, on ne peut utiliser que des granulats neutres, exempts de silice réactive aux alcalins.

La composition des saumures extrudées est inconnue. L'INERIS estime qu'elle contiendra des teneurs en As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn et en cyanure, selon le rapport EVALUATION DU TERME SOURCE DANS LE SCÉNARIO DU STOCKAGE ILLIMITÉ (INERIS, 2011c, /21/). Les effets corrosifs de ces éléments chimiques sur les matériaux de construction des barrages ou sur le matériau de remblayage ne sont pas connus et devront faire l'objet d'une investigation plus détaillée. On part du principe que les composés NaCl et KCl, présents dans les saumures, seront plus déterminants que les éléments chimiques mentionnés dans l'étude du terme source au regard du stockage illimité des déchets.

Les propriétés de la saumure de gâchage, susceptibles de compromettre la résistance de l'ouvrage, sont à prendre en compte pour la sélection du liant. En cas d'attaque chimique, les formulations présentant un taux le plus faible possible en pâte de ciment présentent un avantage. Pour ce faire, et en garantissant les caractéristiques requises pour le béton durci, et les caractéristiques de mise en œuvre requises pour le béton frais, pour chacune des variantes de mise en œuvre décrites au chapitre 6.4.3 (béton projeté ou béton coulé), il convient de minimiser la teneur en solution de gâchage ou en pâte de ciment. Dans le même objectif, il faut maximiser la densité de compactage des constituants granulaires (agrégats). La distribution granulométrique des agrégats devra se rapprocher le plus possible de la courbe granulométrique idéale de Fuller. Pour une bonne mise en œuvre et une bonne structure du béton, il faut prévoir une fraction suffisante de fines.

En raison de la connaissance insuffisante des impacts éventuels sur la résistance à long terme du matériau, la teneur en adjuvants de béton devra être réduite au maximum, à savoir à 5 % maximum de la teneur en liant du matériau.

Exigences constructives

L'écartement des fissures de l'ouvrage dues à des contraintes internes³ et externes⁴ devra être limité au maximum. Les exigences en termes d'imperméabilité à l'eau applicables à

³ Impacts du dégagement de la chaleur d'hydratation

⁴ Impacts du retrait du matériau

l'élément d'étanchéité nécessitent impérativement d'éviter la formation de fissures s'étendant sur toute la longueur de l'élément d'étanchéité. En cas de formation de fissures superficielles ou proches de la surface sont à minimiser à $\leq 0,1$ mm (écartement mesuré sur les surfaces temporaires et définitives de l'ouvrage).

Pour limiter l'écartement des fissures, la mise en œuvre d'armatures en fibre pourrait s'avérer indispensable. On n'utilisera que des fibres présentant une résistance chimique suffisante, au cours du processus de prise et aux éventuels fluides susceptibles d'attaquer [le béton] à un moment ultérieur au cours de la période de justification. La mise en œuvre d'une armature en fibres nécessite l'accord de MDPA.

De plus, le matériau de construction devra au minimum présenter un faible retrait, afin de réduire au maximum la formation d'interstices ou de fissures par suite de retrait après la prise.

6.4.3 Procédés de mise en œuvre

La mise en œuvre du béton de saumure pourra s'effectuer soit sous forme de béton coulé, soit sous forme de béton projeté par voie humide. Chacune de ces technologies a été testée dans le cadre de l'essai du barrage pilote. Au vu des résultats de ces tests, MDPA a retenu le béton coulé comme variante privilégiée, au moins pour la réalisation des éléments d'étanchéité. Il sera cependant procédé à un comparatif des deux méthodes de mise en œuvre, à savoir béton projeté par voie humide et béton coulé, dans la suite du chapitre. Les spécifications des matériaux pour chacune de ces technologies de mise en œuvre sont récapitulées ci-après.

Récapitulatif des spécifications pour un béton de saumure coulé

En résumé, le béton de saumure devra présenter les caractéristiques ci-après :

- Technologie de mise en œuvre : Technologie du béton coulé sur place ;
- Spécification suivant DIN EN 206-1 : C 35/45, XA2, WA ;
- Liant : ciment résistant aux sulfates, à faible teneur en alcalins actifs, selon la norme EN 197-1, à faible dégagement de chaleur à l'hydratation (ciment de haut-fourneau, CEM III) ;
- Béton autoplaçant, présentant un étalement de $700 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$ pour un temps d'écoulement à l'entonnoir en V compris entre 13 s et 20 s, béton frais résistant à la sédimentation (sans formation de liquide surnageant ou de ségrégation) ;
- Mélange granulaire : granulats roulés naturels selon DIN EN 12620, non critiques du point de vue de la réaction alcali-silice (RAS), granulométrie 0/16 au maximum, fuseau granulométrique favorable (densité de compactage optimisée, c'est-à-dire : rapprochement optimal de la courbe granulométrique idéale (parabolique) de Fuller) ;
- Solution de gâchage : solution saturée en NaCl (à 25°C) ;
- Matériau à faible retrait ;
- Après la prise, le béton devra être imperméable à l'eau ;
- L'ouvrage devra présenter une perméabilité intégrale de $K \leq 10^{-18} \text{ m}^2$;

- Le béton devra être confectionné à l'aide d'équipements de pompage et de mélange disponibles dans le commerce ;
- Catégorie de surveillance 2 selon la norme DIN EN 14487-1, avec des exigences élevées en termes de pérennité ;
- Les adjuvants éventuellement requis doivent correspondre aux normes EN 934-2 et/ou EN 934-5 et EN 934-6 ;
- Les adjuvants éventuellement requis doivent correspondre aux exigences de la norme EN 206-1 ;
- Les fibres éventuellement requises doivent correspondre aux prénormes prEN 14889-1 et prEN 14889-2.

Récapitulatif des spécifications pour un béton de saumure projeté par voie humide

En résumé, le béton de saumure devra présenter les caractéristiques ci-après :

- Technologie de mise en œuvre : Béton projeté par voie humide ;
- Spécification suivant DIN EN 206-1 : C 35/45, XA2, WA ;
- Liant : ciment résistant aux sulfates, à faible teneur en alcalins actifs, selon la norme EN 197-1, résistance initiale élevée ;
- Mélange granulaire : granulats selon DIN EN 12620, roulés naturels ou concassés équivalents, non critiques du point de vue de la réaction alcali-silice (RAS), granulométrie maximale 0/10, fuseau granulométrique favorable (densité de compactage optimisée, c'est-à-dire : rapprochement optimal de la courbe granulométrique idéale (parabolique) de Fuller) ;
- Solution de gâchage : solution saturée en NaCl (à 25°C) ;
- Matériau à faible retrait ;
- Après la prise, le béton devra être imperméable à l'eau ;
- L'ouvrage devra présenter une perméabilité intégrale de $K \leq 10^{-18} \text{ m}^2$;
- Le béton devra être confectionné à l'aide d'équipements de pompage et de mélange disponibles dans le commerce ;
- Catégorie de surveillance 2 selon la norme DIN EN 14487-1, avec des exigences élevées en termes de pérennité ;
- Les adjuvants éventuellement requis doivent correspondre aux normes EN 934-2 et/ou EN 934-5 et EN 934-6 ;
- Les adjuvants éventuellement requis doivent correspondre aux exigences de la norme EN 206-1 ;
- Les fibres éventuellement requises doivent correspondre aux prénormes prEN 14889-1 et prEN 14889-2.

6.5 Méthode et technologie de construction

Spécifications générales d'ordre minier et relatives à la construction

Les galeries dans la zone de stockage du site de stockage StocaMine ont été creusées sous forme de galeries simples et doubles, essentiellement au niveau -23 m, c'est-à-dire 23 m en-dessous de la couche de potasse inférieure "CI". Les blocs de stockage situés à l'est du site et leurs galeries d'accès se situent à un niveau plus profond de deux mètres, à savoir au niveau -25 m.

Pour chaque site d'implantation d'ouvrage de scellement de galerie spécifique, une inspection de site devra être réalisée pour recueillir et analyser l'ensemble des informations géomécaniques et géologiques pour la galerie, requises pour la sélection de l'emplacement le mieux approprié pour la mise en place des structures de scellement.

Une exploration de sûreté du site est à réaliser, en considérant que la résistance de la roche hôte devra garantir une excellente sûreté et stabilité structurelles pour les travaux de construction (selon les caractérisations géologiques et géomécaniques). Cette évaluation a une incidence pour la détermination des surexcavations du contour et la localisation des éléments de scellement.

Sur la base des informations actualisées fournies par MDPa de chacune des explorations de site, une étude détaillée et un plan de chaque site sont à réaliser par l'entreprise de construction adjudicatrice, prenant en compte les diverses conditions géologiques et géomécaniques, configurations de galerie, profondeurs de surexcavation de contour données, etc.

Pour tous les sites, une perméabilité intégrale de $K \leq 10^{-18} \text{ m}^2$ (cf. chapitre 6.2.2) étant exigée pour l'ouvrage de scellement de galerie, il conviendra, le cas échéant et en fonction de la situation géomécanique et des résultats d'investigation, de stabiliser les couches de marne et d'anhydrite proches du contour par voie injection. La stabilisation par injection pourra se faire à l'aide de produits d'injection chimiques ou minéraux (p. ex. résines, verre liquide, suspension de ciment et d'argile, ciments Sorel, etc.) Un concept (avant-projet) sera établi en fonction de l'état du terrain rencontré dans le cadre des études détail de la construction des ouvrages de scellement de galerie, par l'entreprise adjudicatrice.

L'injection systématique pour le gavage des vides miniers résiduels au niveau du mur et du toit n'est pas prévue. Leur fermeture s'effectuera toute seule, par l'action de la convergence (c. chapitre 6.2.4).

L'étude de chaque site d'implantation devra spécifier les galeries utilisées comme voies d'accès pour le transport du personnel, de l'équipement, des matériaux, etc. Une comparaison des voies d'accès possibles est à effectuer en vue d'optimiser les techniques, temps de transport et coûts de construction.

Selon les besoins, il conviendra également de poser des boulons pour assurer la sûreté du transport, des travaux préparatoires, annexes, et de construction. Cela ne s'applique pas à la zone retenue pour l'implantation de l'ouvrage de scellement de galerie, dans laquelle la roche hôte ne devra pas être dégradée par des travaux de forage, p. ex. pour la pose de boulons. Au niveau des sites qui requièrent la pose de boulons, il devra être procédé à la pose de boulons en résine / fibre de verre uniquement, en vue de sécuriser les conditions de travail.

Au voisinage de chaque site de construction d'un ouvrage de scellement de galerie, un espace ou une salle devra être déterminé(e) pour le stockage d'équipements et

d'installations. En raison de l'exiguïté de l'espace disponible, il est recommandé d'aménager une zone de stockage commune pour plusieurs sites de construction de barrage.

Sur la base de la demande calculée, il convient de fournir l'approvisionnement requis en aération, énergie et eau pour les travaux de surexcavation et de construction des ouvrages de scellement de galerie.

Une liste détaillée des équipements et des matériels pour l'équipement du site d'implantation, y compris les engins et le support technique, comme p. ex. pour le transport, est à établir pour chaque ouvrage de scellement de galerie.

Description des étapes fondamentales de construction des ouvrages de scellement de galerie

Les sections qui suivent décrivent les étapes fondamentales et les technologies de mise en œuvre pour la construction des ouvrages de scellement de galerie, en distinguant entre le béton coulé et le béton projeté. L'analyse se portera dans un premier temps sur le béton coulé. La technologie à mettre en œuvre sera décrite par la société minière ou de travaux souterrains spécialisée retenue pour l'exécution des travaux, dans le cadre des études de détail pour la construction des ouvrages de scellement de galerie, et fera l'objet d'une concertation avec MDPA avant tout début des travaux.

Le contour pour la construction de l'ouvrage de scellement de galerie sera inspecté et nettoyé en vue de fournir un contact idéal entre le béton et la roche hôte. Le contour sera préparé par voie de surexcavation de plaques détachées (EDZ). Nos estimations prévoient une surexcavation de 0,6 jusqu'à 1 m de zone perturbée (EDZ). Cette profondeur de surexcavation pourrait varier en fonction de la résistance de la roche hôte, et des conditions spécifiques trouvées sur chacun des sites spécifiques. Le sel gemme extrait au cours de la surexcavation (havrit) pourra être utilisé pour former les serrements de sel gemme en amont des ouvrages de scellement de galerie, et pour les travaux de remblayage en général. Si cette quantité surexcavée n'est pas suffisante pour réaliser les serrements, le sel gemme additionnel requis devra être extrait par MDPA. Un entreposage temporaire du sel gemme pourrait être requis pour éviter d'éventuelles interférences avec les travaux de construction.

Tant pour la mise en œuvre de béton coulé que de béton projeté, il conviendra de ménager des parements bien propres, exempts de particules et de poussière, dans les sections de galerie retenues pour les sites d'implantation des ouvrages de scellement de galerie avant le bétonnage. Pour ce faire, le contour des galeries peut être nettoyé par projection (vaporisation) de saumure saturée en NaCl, tout en veillant à tout prix à éviter des accumulations de saumure, ou à l'air comprimé.

[Les forages existant dans la zone d'implantation des ouvrages de scellement de galerie peuvent être bouchés à l'aide de béton de saumure ou d'une suspension de saumure.](#)

De manière analogue aux travaux de construction du barrage pilote, des échantillons de béton seront prélevés au cours du bétonnage, et des éprouvettes de béton seront réalisés. Ces éprouvettes seront soumises à des essais de résistance à la compression. En fonction des résultats obtenus, on déterminera les temps de prise des segments de bétonnage. ERCOSPLAN recommande de définir comme valeur de consigne une valeur minimale de 12 Mpa pour le décoffrage, afin que le béton, déjà partiellement durci, soit en mesure de reprendre immédiatement la pression lithostatique du terrain environnant.

L'enchaînement des travaux de construction des ouvrages de scellement est fonction du pendage au niveau des sites d'implantation des barrages. La construction des barrages s'effectuera toujours du point le plus bas vers le point le plus élevé.

Pour la **mise en œuvre de béton coulé**, il convient d'ériger des coffrages après les travaux de préparation des contours, pour chaque segment de bétonnage. Les coffrages, transversaux et longitudinaux, seront sécurisés contre les fuites (étanchéité) et munis de systèmes de soutènement solides, garantissant une stabilité suffisante pour reprendre la pression du béton frais coulé en place. **De plus le démantèlement des coffrages doit être garanti ; pour ce faire, un traitement adéquat des surfaces des éléments de coffrage est à prévoir.**

Après le coffrage des différents segments de bétonnage (culée et élément d'étanchéité), on procédera à la mise en œuvre du béton de saumure spécifié aux chapitres 6.4.2 et 6.4.3 . La mise en œuvre du béton dans les différents segments s'effectue à l'aide d'une pompe à béton, équipée d'une conduite de remplissage et d'évent, à l'arrière du coffrage, jusqu'au toit.

Afin d'assurer une mise en œuvre du béton de saumure jusqu'au toit, nous recommandons le concept éprouvé au cours de la réalisation du barrage pilote. Selon ce concept, dans les galeries horizontales ou présentant seulement une faible pente (inférieure à 5°), le toit est à configurer en pente (env. 5°) dans le sens longitudinal, afin d'assurer la désaération au sommet (cf. Figure 11).

Au besoin, la zone de contact entre le terrain et l'ouvrage devra être gavée de béton à un moment ultérieur. ~~Les conduites de remplissage et d'évent sont à escamoter après l'achèvement de chacun des segments de bétonnage.~~ **Les conduites de remplissage et de désaération sont à escamoter de la zone centrale (élément d'étanchéité) de chacun des ouvrages de scellement de galerie, après l'achèvement de chaque segment de bétonnage.** Après le décoffrage du segment de bétonnage, une cure de béton sera faite, dans une opération unique consistant à projeter (vaporiser) de la saumure saturée en NaCl, avec recouvrement consécutif de la face frontale à l'aide de film plastique, qui sera enlevé avant l'opération de bétonnage suivante. Avant la mise en œuvre du segment de bétonnage suivant (élément d'étanchéité), un enduit bitumineux sera appliqué sur l'ensemble de la section de l'ouvrage.

Le matériau de revêtement sera mis en œuvre conformément aux consignes du fabricant. L'enduit bitumineux constitue une étanchéité hydraulique superficielle, efficace de suite ; le scellement à long terme des galeries sera assuré cependant par les éléments d'étanchéité en béton de saumure, en conjonction avec l'action de la convergence. Un effet secondaire de l'enduit bitumineux consiste dans sa viscosité ; en effet, l'enduit est extrudé sur les côtés, améliorant ainsi l'étanchéité dans la zone de contact entre l'ouvrage et le terrain.

Spécifications relatives aux propriétés de l'enduit bitumineux et à la technologie de mise en œuvre de ce produit :

- nous recommandons l'utilisation d'enduits bitumineux du commerce, à base de bitume/caoutchouc, prévus pour l'application en couches épaisses ; les consignes du fabricant sont à respecter ;
- l'enduit bitumineux devra être exempt de solvants, additionné de fibres et présenter des propriétés de pontage de fissures ;
- l'application de l'enduit bitumineux s'effectue lorsque la température de surface du béton est inférieure à la température de mise en œuvre maximale préconisée par

le fabricant du bitume, et au plus tôt après un temps de prise du béton garantissant l'atteinte de la résistance à la compression suffisante pour enchaîner les travaux subséquents ;

- il convient de garantir une application de l'enduit sur toute la surface ;
- avant d'engager toute opération suivante sur la surface enduite, l'enduit bitumineux devra durcir conformément aux spécifications du fabricant.

Pour la **mise en œuvre de béton projeté**, la marche à suivre pour la préparation du contour et l'érection du premier coffrage est similaire à celles de la mise en œuvre de béton coulé. Le côté béton des coffrages successifs sera revêtu d'un enduit de mortier gâché à la saumure, pour assurer une meilleure adhérence de la première couche de béton projeté. Le bétonnage des culées s'effectue par application de couches de béton projeté successives, en tenant compte du retour d'expérience de la construction du barrage pilote. Éléments déterminants de ce retour d'expérience :

- Pour l'application du béton projeté, une épaisseur de couche d'env. 10 cm a fait ses preuves dans la pratique.
- Il conviendra de veiller à ce que les surfaces de contact entre les différentes couches de béton projeté soient préparées avant l'application de la couche suivante, de manière à nettoyer la surface des agrégats de toute trace de liant, pour obtenir un ouvrage homogène.
- Après l'application du béton projeté, chaque couche sera humidifiée à la saumure (solution de NaCl), puis recouverte de film plastique jusqu'à l'application de la couche suivante.

Indépendamment de la méthode de mise en œuvre retenue, les faces frontales accessibles des éléments fonctionnels achevés seront enduites d'enduit bitumineux (cf. consignes de mise en œuvre ci-dessus ; voir également la Figure 9 et la Figure 12). Les faces frontales seront préparées pour recevoir cet enduit bitumineux (le cas échéant, lissage des surfaces et sablage après la prise du béton.

De plus, côté saumure, un serrement de sel gemme sera mis en place en amont, directement au contact de l'ouvrage de scellement de galerie. Le sel gemme sera mis en place dans la galerie p. ex. à l'aide d'une chargeuse sur roues ou d'une remblayeuse mécanique par projection et si bien damé qu'il forme un serrement étanche, affleurant au toit, sur une longueur respective d'env. 10 m/20 m (cf. Tableau 5).

La réalisation rapide des remblais en sel gemme sert à protéger les éléments de culée. Au niveau du site d'implantation 8 et des sites situés dans des galeries doubles, il est prévu un remblai des deux côtés de l'ouvrage. La longueur des remblais en sel gemme pour les sites d'implantation 3, 8, 9 et 12 sera doublée à 20 m (cf. chapitre 6.2.4).

Concernant les propriétés des granulats de sel et la technologie de mise en œuvre, les exigences ci-après sont applicables à l'ensemble des remblayages en sel gemme prévus sur tous les sites d'implantation des ouvrages de scellement de galerie :

- composition minéralogique et courbe granulométrique des granulats de sel, les granulats de sel seront constitués majoritairement de halite. Ils pourront contenir de faibles quantités de sels de potassium chlorurés (sylvinite, carnallite) avec une fraction d'argile et d'anhydrite n'excédant pas 5 %. La granulométrie

devra être comprise entre 0 mm et 32 mm (0/32), avec une fraction de refus (grains grossiers) ne dépassant pas 8 %. A titre d'alternative, MDPA devra justifier de l'aptitude à l'emploi du havrit par des analyses appropriées.

- Composition chimique et quantité des saumures à ajouter,
pour obtenir une bonne recristallisation du havrit, il faut habituellement compter l'ajout d'env. 2 à 3 % en poids de saumure saturée en NaCl₂.

- Technologie de mise en œuvre

Mise en œuvre en couches successives à l'aide d'un engin LTF, compactage des couches du dessus à l'aide d'un engin à bouclier, et au niveau des parements et sur la face côté barrage, compactage supplémentaire à l'aide d'une plaque vibrante. La porosité initiale des granulés de sel, préalablement compactés, devra être la plus faible possible. L'expérience a montré qu'une faible porosité est généralement obtenue moyennant une densité de mise en œuvre d'env. 1,6 t/m³. Ce faisant, il convient de viser la densité de mise en œuvre la plus élevée possible, obtenue au moyen des méthodes de mise en œuvre décrites ci-dessus. La densité de mise en œuvre devra être de 1,4 t/m³ au minimum.

En raison de la nature complexe du scellement du site de StocaMine, une supervision spécialisée en termes d'ingénierie pourrait être requise à certaines étapes critiques de la construction. Cette expertise d'ingénierie sera requise au cours des phases d'étude et de construction, et au titre de la surveillance ultérieure.

Tableau 5 Récapitulatif des spécifications techniques/constructives applicables aux remblais en sel gemme, et des méthodes de mise en œuvre pour la réalisation des ouvrages de scellement de galerie

Site d'implantation	Serrement en sel gemme		Méthode de mise en œuvre de l'ouvrage de scellement de galerie		
	Longueur [m]	Localisation	Culée 1	Élément d'étanchéité	Culée 2
1	10	Des deux côtés	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé
2	10	Côté saumure	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé
3	20	Des deux côtés	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé
4	10	Côté saumure	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé
5	10	Côté saumure	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé
6	10	Côté saumure	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé
7	10	Côté	Béton projeté/voie	Béton coulé	Béton coulé

Site d'implantation	Serrement en sel gemme		Méthode de mise en œuvre de l'ouvrage de scellement de galerie		
	Longueur [m]	Localisation	Culée 1	Élément d'étanchéité	Culée 2
		saumure	humide		
8	20	Des deux côtés	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé
9	20	Des deux côtés	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé
10	10	Des deux côtés	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé
11	10	Des deux côtés	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé
12	20	Des deux côtés	Béton projeté/voie humide	Béton coulé	Béton coulé

6.5.1 Ouvrages de scellement de galeries dans les galeries simples

Les ouvrages de scellement de galerie dans les galeries simples seront édifiés conformément au Tableau 3 sur les sites d'implantation n° 4, 5, 6, 7 (au niveau -23 m) et n°8 (au niveau -25 m).

Du fait de la différence de la situation géologique et géotechnique rencontrée respectivement aux niveaux -23 m et -25 m, il a été décidé conjointement entre MDPA et ERCOSPLAN, lors de la réunion du 05/07/2018 (ERCOSPLAN, 2018, /11/), d'analyser les caractéristiques géotechniques et géomécaniques des deux niveaux, afin d'en déduire les contraintes pour les travaux de construction concernant :

- la profondeur de la zone perturbée (EDZ) et
- le contour de surexcavation.

Par ailleurs, il a également été décidé lors de la réunion du 05/07/2018 de transposer les caractéristiques géotechniques et géomécaniques connues du site d'implantation du barrage pilote au niveau -23 m aux sites d'implantation 4 à 7 (ERCOSPLAN, 2018, /11/).

Le contour du barrage pilote, réalisé d'après les investigations géotechniques et géomécaniques, est illustré à la Figure 10. La zone marquée en rouge autour de la section de la galerie représente la surexcavation de la zone EDZ. Si, en confectionnant le contour, on tombe sur des couches de marne susceptibles de diminuer la stabilité du contour, le contour de surexcavation sera adapté en conséquence (cf. ligne rouge en pointillés de la Figure 10).

Sur le site d'implantation 8, au niveau -25 m, l'étendue et le tracé de la zone EDZ pourraient diverger par rapport au site du barrage pilote. Du fait des détentes induites par les vieux travaux d'exploitation de potasse, la zone EDZ pourrait être plus réduite.

La construction des ouvrages de scellement de galerie s'effectuera selon les méthodes de mise en œuvre testées lors de la construction du barrage pilote, à savoir béton projeté ou béton coulé, conformément à la description du chapitre 6.5.

Les spécifications établies au chapitre 6.5 concernant la perméabilité des ouvrages de scellement de galerie et concernant les mesures de stabilisation du terrain environnant s'appliquent à tous les sites d'implantation.

Une fois les travaux de surexcavation du contour achevés, la première culée sera réalisée en béton projeté selon la méthode décrite ci-dessus, puis pourvue d'une couche d'enduit bitumineux sur la totalité de sa section. À ce titre, le béton projeté pourra également être appliqué directement sur les granulés de sel, mis en place et préalablement compactés. Ensuite, un coffrage transversal est mis en place, afin de réaliser l'élément d'étanchéité et la deuxième culée en une seule opération, selon la méthode du béton coulé, telle que décrite ci-dessus. La face frontale extérieure de la deuxième culée recevra également une couche d'enduit bitumineux (cf. Figure 1). Les conduites de remplissage et de désaération sont à escamoter au moins au niveau de la zone centrale (élément d'étanchéité) de l'ouvrage de scellement de galerie, après l'achèvement du segment de bétonnage (cf. chapitre 6.5).

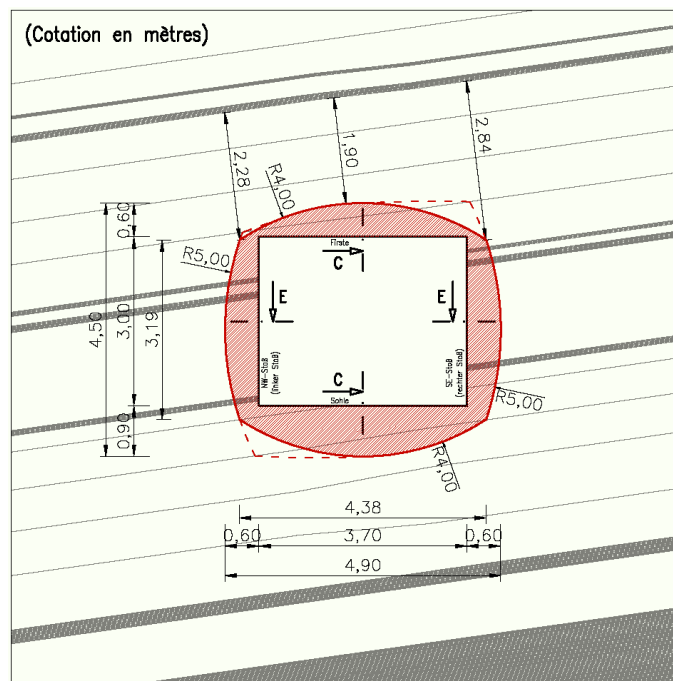


Figure 10 Représentation schématique de la zone EDZ et du contour confectionné sur le site d'implantation du barrage pilote, avant sa construction

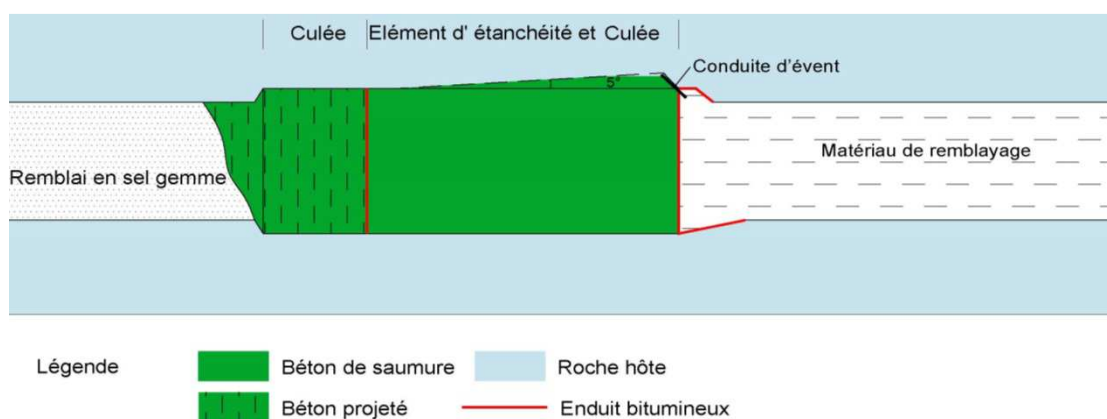


Figure 11 Représentation schématique, en coupe longitudinale, d'un ouvrage de scellement de galerie implanté dans une galerie simple (cf. MDPa, 2019a, /35/)

6.5.2 Ouvrages de scellement de galeries dans les galeries doubles

Les ouvrages de scellement de galerie dans les galeries doubles seront édifiés sur les sites d'implantation n° 1, 2, 3, 9, 10, 11 et 12 (cf. Tableau 3). À la différence des ouvrages à ériger dans les galeries simples, la construction des ouvrages de scellement de galerie dans les galeries doubles prévoit une mise en œuvre des éléments d'étanchéité en plusieurs phases, donnant lieu à des joints de bétonnage longitudinaux dans les éléments fonctionnels.

De manière analogue à la construction des ouvrages de scellement de galerie dans les galeries simples, une investigation géotechnique et géomécanique sera effectuée au niveau des sites d'implantation 3 (niveau -23 m), 9 et 12 (respectivement situés au niveau -25 m), conformément au programme d'investigation déterminé lors de la réunion du 05/07/2018 (cf. ERCOSPLAN, 2018, /11/). Lors de cette réunion, il a été décidé de transposer les résultats obtenus au niveau du site d'implantation 3, du fait de la situation géologique similaire au niveau -23 m, aux sites d'implantation 1, 2, 10 et 11. Afin de pouvoir déduire les mesures de sécurité requises, une expertise géomécanique, justifiant de la stabilité de la configuration des doubles galeries, devra être menée. Après la réalisation des programmes d'investigation et en prenant en compte les résultats d'analyse et d'expertise recueillis à cette occasion, débute la construction des ouvrages de scellement de galerie en plusieurs phases, en appliquant les méthodes de mise en œuvre de béton projeté ou de béton coulé, testées lors de la construction du barrage pilote, conformément à la description du chapitre 6.5.

Les spécifications établies au chapitre 6.5 concernant la perméabilité des ouvrages de scellement de galerie et concernant les mesures de stabilisation du terrain environnant s'appliquent à tous les sites d'implantation.

La section qui suit décrit schématiquement le déroulement de la construction en plusieurs étapes des ouvrages de scellement de galerie dans les galeries doubles, illustré à la Figure 11. Un descriptif précis de la méthodologie sera établi par la société minière ou de travaux souterrains spécialisée retenue pour l'exécution des travaux.

Phases 1 et 2 de construction des ouvrages de scellement de galerie dans les galeries doubles :

La phase 1 comprend les opérations ci-après :

- Réalisation du façonnage du contour/surexcavation de la zone EDZ suivant les résultats des programmes d'investigation (ERCOSPLAN, 2018, /11/) dans une galerie du système de galeries doubles.
- Le pilier intermédiaire ne sera pas touché par les travaux de façonnage du contour. A cet endroit, il convient de réaliser des travaux de sécurisation temporaire du toit et des parements.
- **Application d'une couche de béton projeté, adaptée aux contraintes du site, sur le parement du pilier, en vue d'obtenir une stabilisation temporaire, et pour créer une surface plane pour les travaux de coffrage.**
- Les travaux de coffrage (dans le sens transversal et longitudinal) et le bétonnage en plusieurs segments des culées et de l'élément d'étanchéité dans une galerie du système de galeries doubles s'effectueront de manière analogue à la méthodologie décrite au chapitre 6.5.
- **Le premier élément culée sera construit de manière analogue à ceux des galeries simples, selon la méthode du béton projeté, et recevra une couche d'enduit bitumineux sur l'ensemble de sa section (face frontale).**
- **Ensuite, un coffrage transversal est mis en place, afin de réaliser l'élément d'étanchéité et le deuxième élément de culée en une seule opération, selon la méthode du béton coulé, telle que décrite ci-dessus (cf. MDPa, 2019a, /35/ et 2019b, /36/).**
- **Les coffrages longitudinaux seront profilés de manière à former des joints de bétonnage parallèles à l'axe longitudinal de l'ouvrage, avec plusieurs portions décalées (en saillie ou en retrait). (Cf. Figure 13 et le chapitre dédié plus loin : Configuration des joints de bétonnage longitudinaux)**

A la différence de la construction du barrage pilote, le bétonnage ne sera pas affleurant aux parements des deux galeries adjacentes. Du côté du pilier intermédiaire, il est prévu d'ériger un coffrage longitudinal (cf. Figure 12).

Les coffrages longitudinaux seront sécurisés contre les fuites (étanchéité) et munis de systèmes de soutènement solides, garantissant une stabilité suffisante pour reprendre la pression du béton frais coulé en place.

La phase 2 comprend la **réitération des opérations visées ci-dessus dans la deuxième galerie** du système de galeries doubles. L'exécution des phases 1 et 2 peut s'effectuer en parallèle. La réalisation des phases 1 et 2 peut s'effectuer parallèlement au même moment, si la stabilité des piliers intermédiaires est jugée suffisante par l'entreprise adjudicatrice ou par la direction des travaux (maîtrise d'œuvre/supervision) et par des experts.

Phase 3 de construction des ouvrages de scellement de galerie dans les galeries doubles :

- Havage du pilier intermédiaire et travaux de façonnage des contours (cf. Figure 11) ;
- [Havage de la couche de béton projeté appliquée pour stabiliser le contour ;](#)
- Démolition des coffrages longitudinaux réalisés au cours des phases 1 et 2 ;
- Traitement des surfaces de béton des deux ouvrages de scellement extérieurs déjà mis en place, par sablage et élimination de la poussière ;
- [Application d'un enduit bitumineux sur les surfaces des ouvrages de scellement de galerie extérieurs \(joint longitudinal situé à l'intérieur de l'ouvrage, cf. Figure 13\) ;](#)
- Travaux de coffrage (coffrage transversal) et bétonnage en plusieurs segments des culées et de l'élément d'étanchéité dans le périmètre du pilier intermédiaire foudroyé (cf. Figure 12) selon la méthodologie décrite au chapitre 6.5.
- [Le premier élément culée sera construit de manière analogue à ceux des galeries simples, selon la méthode du béton projeté, et recevra une couche d'enduit bitumineux sur l'ensemble de sa section \(face frontale\).](#)
- [Ensuite, un coffrage transversal est mis en place, afin de réaliser l'élément d'étanchéité et le deuxième élément de culée en une seule opération, selon la méthode du béton coulé, telle que décrite ci-dessus \(cf. MDPa, 2019, /35/ et 2019b, /36/\).](#)
- [La face frontale extérieure accessible des éléments de culée recevra également une couche d'enduit bitumineux, avant la mise en place du remblai en granulés de sel conforme aux spécifications.](#)

Il est recommandé de ne pas ménager de phase de repos inutiles entre les phases 1 à 3 de construction des ouvrages de scellement de galerie dans les galeries doubles, pour éviter la dégradation des surfaces du béton des segments achevés sous l'action de la convergence. Les durées de prise du béton spécifiées au chapitre 6.5 ne sont pas des temps de repos/d'interruption du chantier et sont à prendre en compte par l'entreprise adjudicatrice dans le déroulement des travaux.

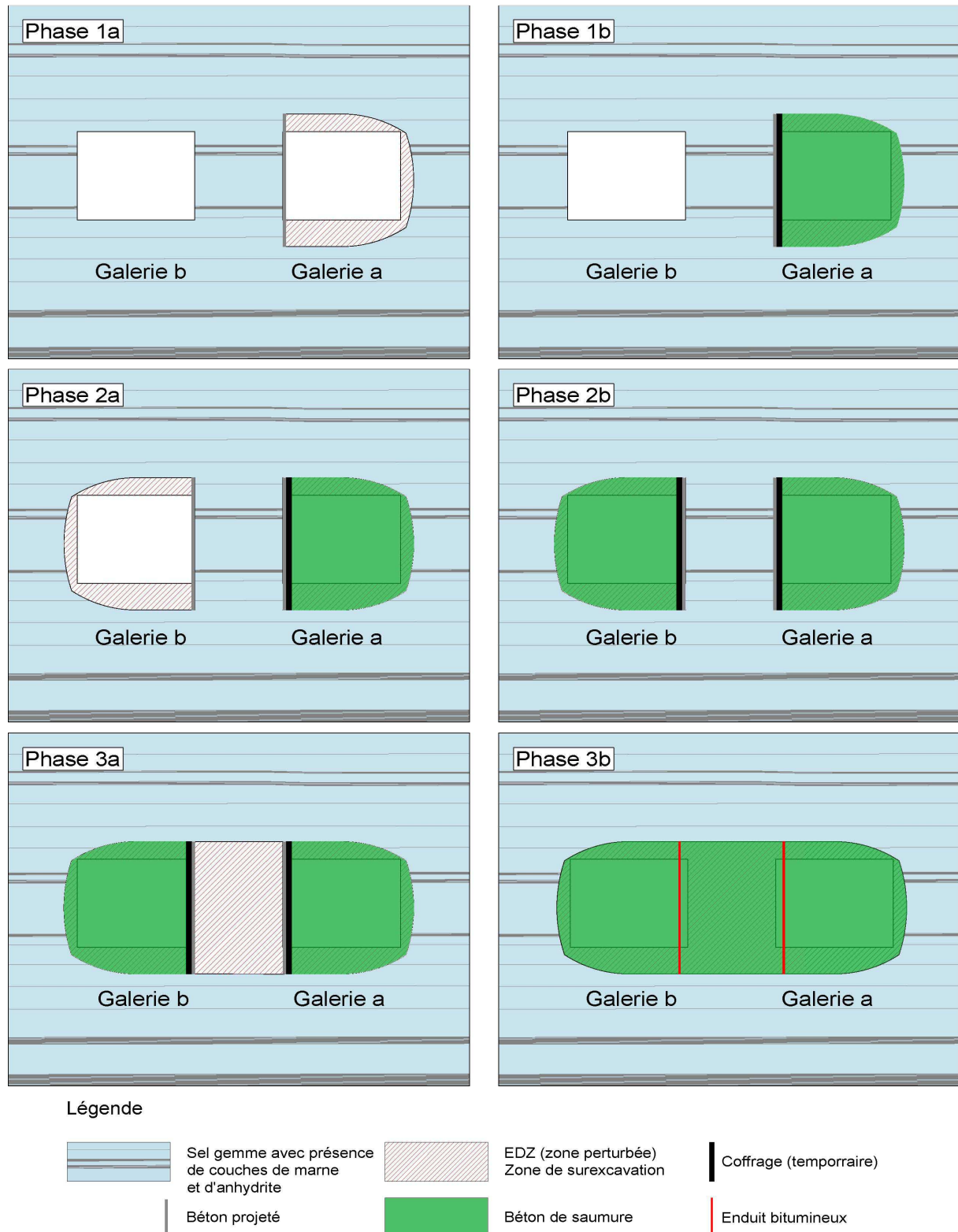


Figure 12 Vue en coupe schématique de la construction en plusieurs phases d'ouvrages de scellement de galerie dans les galeries doubles

Configuration des joints de bétonnage longitudinaux :

Le joint de bétonnage longitudinal de l'ouvrage devra également être en mesure de transférer des efforts de cisaillement. Aussi, un joint longitudinal, même en additionnant des bandes de joint, ne suffira pas à absorber ces efforts. En vue de transférer les efforts de cisaillement, il est prévu de profiler les joints de bétonnage longitudinaux au niveau des culées. De plus, il convient également de profiler le joint longitudinal situé à l'intérieur de l'élément d'étanchéité, afin de minimiser le risque d'infiltration de saumure. Le profilage du joint longitudinal servira à allonger le chemin d'infiltration de la saumure attaquant l'ouvrage de scellement. Le profilage peut s'obtenir p. ex. en clouant des tôles profilées sur le coffrage, ou en utilisant un coffrage configuré en palplanches. Les joints de bétonnage dans le périmètre des éléments de culée et de l'élément d'étanchéité seront munis de plusieurs portions en saillie/retrait afin d'exclure la formation de joints rectilignes (cf. Figure 13). De plus, les surfaces du béton devront recevoir un traitement préalable, au minimum au niveau de l'élément d'étanchéité, par sablage ou dépoussiérage (cf. Figure 13). Sur les surfaces des joints de bétonnage ainsi configurés, il convient d'appliquer une couche d'enduit bitumineux.

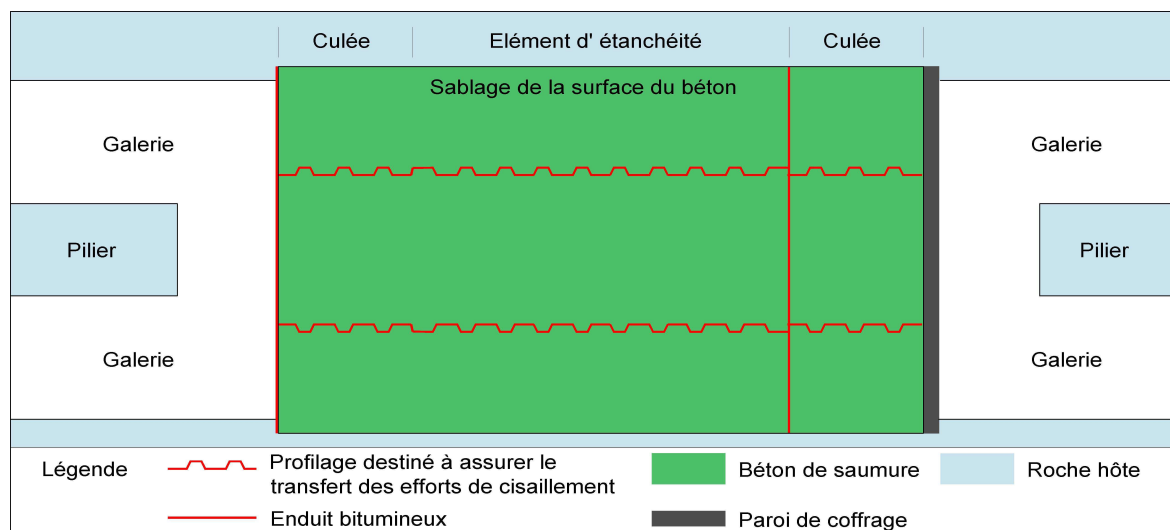


Figure 13 Représentation schématique d'une projection horizontale de l'ouvrage de scellement de galerie avec joints longitudinaux entre les segments de béton dans le cadre de la construction en plusieurs phases d'un ouvrage dans une galerie du système de galeries doubles (cf. MDPa, 2019b, /36/)

7 Concept technique de mise en œuvre de remblai dans certaines zones du site de stockage

Outre le scellement à long terme de la galerie d'accès vers la zone de stockage de déchets par l'implantation d'ouvrages de scellement de galerie, il est également prévu de remblayer une grande partie des vides miniers encore présents au sein de la zone de stockage. Cette mesure devra permettre de stabiliser les éléments portants de la zone de

stockage de déchets, afin de prévenir les processus de déformation à long terme susceptibles de dégrader l'intégrité des barrières géologiques du complexe de barrières intérieur.

7.1 Bases de l'avant-projet

En plus des conditions environnementales des sites décrites au chapitre 3 et des données de base visées au chapitre 7.2, la mise au point du concept de remblayage s'effectuera sur la base des conditions de base ci-après :

- a) la localisation des vides miniers à remblayer dans la zone de stockage à confiner (blocs de stockage de déchets et galeries principales) est illustrée à la Figure 13.

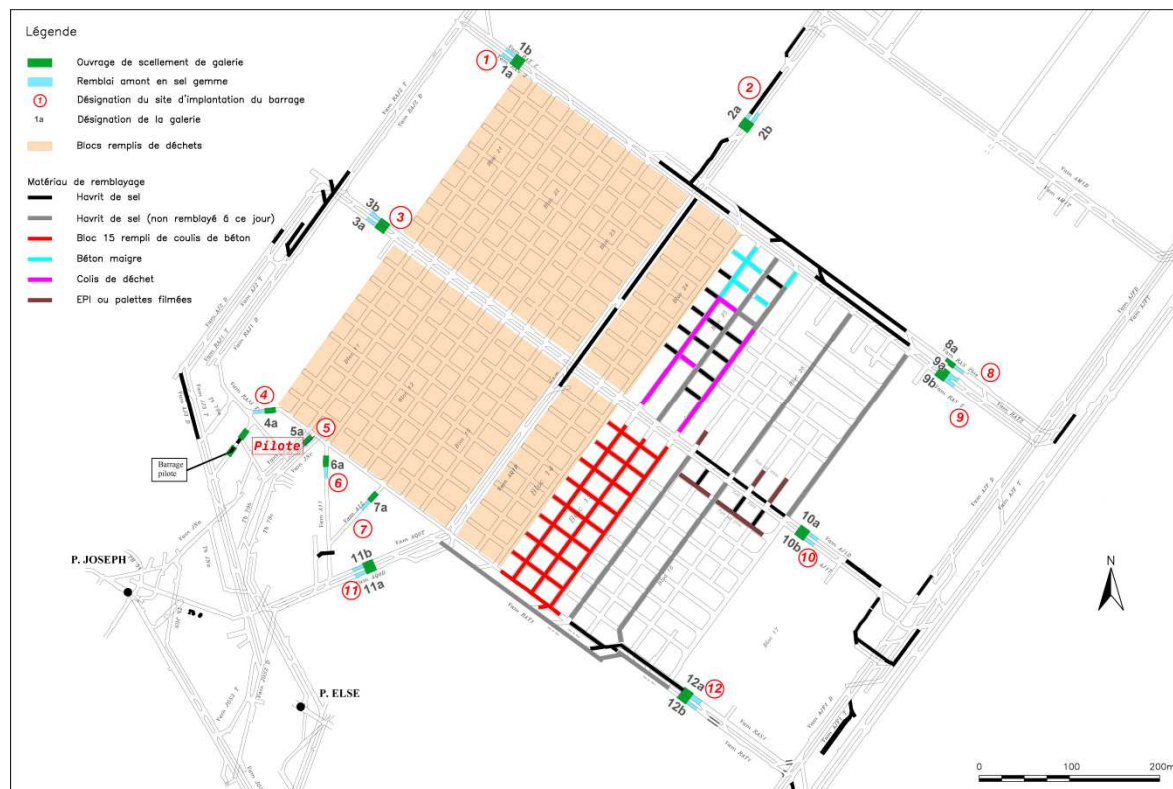


Figure 14 Plan de mine du site de stockage de déchets, avec les blocs de stockage et les galeries principales à remblayer dans la zone de stockage à confiner

- b) Les longueurs et les largeurs des galeries principales à remblayer ont été reprises des plans de mine existants du site de stockage souterrain de déchets. La hauteur a été estimée de manière homogène pour toutes les galeries à entre 2,5 et 3 m. Sur la base de ces données initiales, une fourchette pour le volume de vides miniers initial comprise entre env. 32 000 m³ (seuil mini) et 55 000 m³ (seuil maxi) a été déterminé pour le système de galeries principales.

- c) Les dimensions des blocs de stockage de déchets ont été reprises des plans de mine existants du site de stockage souterrain de déchets. La hauteur des blocs a été estimée à une fourchette comprise entre 2 m et 3 m. Comme le volume de déchets restant dans le bloc de stockage 15 (suite à l'incendie) n'est pas connu, il a fallu estimer le volume de vides miniers résiduels pour ce bloc. Pour les blocs de stockage de déchets libres n° 16 et 26, le volume résiduel a été calculé de manière directe. Sur la base de ces données initiales, une fourchette pour le volume de vides miniers initial comprise entre env. 55 000 m³ (seuil mini) et 75 000 m³ (seuil maxi) a été déterminée pour les blocs de stockage à remblayer.

Le volume de vides miniers à combler dans les galeries principales et les blocs de stockage s'élève ainsi à une fourchette comprise entre env. 87 000 m³ et 123 000 m³. Pour remblayer ce volume de vides miniers, MDPa table sur l'utilisation d'env. 15 000 m³ de sel gemme, et sur une fourchette comprise entre 72 000 m³ (seuil mini) et 108 000 m³ (seuil maxi) de coulis de ciment (2018b, /34/). La suite des calculs tablera donc sur ces volumes.

7.2 Matériaux de remblayage

Voici une liste de matériaux utilisables par défaut pour remblayer les vides miniers dans les galeries principales et les blocs de stockage :

- granulés de sel gemme (havrit) ;
- béton à agrégats de sel ;
- coulis de ciment (gâché à la saumure).

Les granulés de sel gemme sont le matériau prédestiné, du fait de ses propriétés identiques à la roche hôte une fois la compaction atteinte sous l'action de la convergence ; ce matériau est apte à restaurer à longue échéance la stabilité initiale du terrain. Le havrit sera mis en œuvre à sec. Pour des raisons liées à la technologie de mise en œuvre, le taux de remplissage obtenu avec ce matériau sera inférieur à celui de matériaux de remblayage hydrauliques.

Le béton à agrégats de sel et le coulis de ciment sont des matériaux fluides et aptes au pompage, permettant, sous réserve de l'utilisation d'installations et d'un système de tuyauteries adéquats, un approvisionnement continu du matériau de remblayage au fond. Le débit est fonction de la capacité de l'installation de malaxage, du dimensionnement des tuyaux d'amenée, et de la puissance des pompes.

Par défaut, le matériau de remblayage retenu devra remplir les critères visés ci-après :

- disponibilité au moment opportun, moyennant des quantités suffisantes, et qualité homogène ;
- bonne aptitude à la mise en œuvre ;
- fort taux de réduction du volume des vides miniers réactifs ;

- résistance aux saumures susceptibles de s'infiltrer ;
- pas ou peu de ressuage (matériau le plus sec possible, ou liaison complète des composants liquides) ;
- remblayage des vides miniers résiduels dans le bloc de stockage de déchets n°15, ainsi que ;
- matériau de remblayage faiblement poreux offrant en même temps un effet supplémentaire de frein hydraulique

ou

- matériau de remblayage fortement poreux, offrant un effet supplémentaire de retenue, étant précisé que dans l'un ou l'autre cas, le matériau devra présenter une forte résistance à la compaction.

Exigences applicables au matériau de remblayage (MDPA, 2018a, /33/) :

- résistance à la compression monoaxiale comprise entre 0,5 MPa et 1 MPa ou 2 Mpa ;
- porosité comprise entre 15 % et 25 % ;
- matériau de remblayage non ressuant.

Pour MDPa, les matériaux de remblayage envisageables (du fait de leur disponibilité) sont les suivants, leur aptitude respective à remplir les exigences énoncées ci-dessus étant actuellement en cours d'examen (MDPA, 2018a, /33/) :

- havrit de sel (recueilli au cours des travaux de surexcavation et de creusement de nouveaux vides miniers dans le cadre du confinement du site de stockage de déchets) ;
- matériaux à base de béton recyclé, d'une granulométrie comprise entre 0 mm et 8 mm ;
- les matériaux stockés sur le terril de MDPa, formés pour 80 % de restes de transformation non solubles, granulés, et pour 20 % de sel gemme granulé ;
- des schistes calcinés et du coulis de ciment.

De plus, MDPa étudie actuellement, avec l'autorisation des autorités compétentes, la possibilité d'utiliser des résidus de la combustion de biomasse comme matériau de remblai. Ce matériau ne pourra être pris en compte comme matériau de remblayage qu'une fois que les résultats d'étude seront obtenus, et que l'aptitude du matériau à l'utilisation prévue sera validée.

Parmi les matériaux énumérés ci-dessus, le coulis de ciment est le plus apte, du fait de ses propriétés spécifiques (aptitude au pompage, liaison complète de l'eau, sans ressuage) à obtenir un remplissage ~~quasi-complet~~ de vides résiduels et zones difficilement ou non accessibles (blocs 16 et 26). ~~Dans l'objectif d'un remplissage le plus complet possible des vides miniers, l'utilisation de coulis de ciment est recommandée.~~ **Suivant la prémisse d'un remblayage optimal prévu par MDPa selon l'état de la technique, le coulis de ciment convient comme matériau de remblayage. A ce titre, le**

volume de remblais devra combler au minimum 80 % des vides miniers existants. Le cas échéant ; l'adjonction des matériaux visés ci-dessus (agrégats) permettrait d'obtenir les paramètres de matériau recherchés. Cet aspect devra être vérifié avant le début des travaux de remblayage, En utilisant une solution saturée en NaCl pour gâcher le coulis de ciment, aucun phénomène de dissolution n'est à craindre au contact de la roche hôte ; **dans le cas contraire, le coulis doit présenter un ressuage nul ou très faible.**

Si les études actuellement en cours devaient démontrer l'aptitude d'autres matériaux de remblayage potentiels à remplir les exigences imposées, il conviendrait d'assurer que les formulations mises au point présentent des avantages similaires au coulis de ciment quant à la mise en œuvre (aptitude au pompage, fluidité) et quant au comportement de prise.

7.3 Technologies de mise en œuvre envisageables du remblai

Remblayage aux granulés de sel gemme :

L'utilisation de granulés de sel gemme pour le remblayage peut soit se limiter aux quantités de havrit recueillies au cours des travaux de confinement (granulométrie des granulés de sel ≤ 10 mm), soit il faut en extraire ailleurs, à un endroit situé sensiblement à l'extérieur de la zone de stockage de déchets, le réduire en granulés, et le transporter dans la zone du site de stockage, à l'aide de tapis roulants ou d'autres moyens de transport à disposition. En cas de mise en œuvre de sel gemme pour le remblayage, on obtient un taux de remplissage compris entre 75 % et 80 % des vides miniers. La technologie de mise en œuvre recommandée est la projection de granulés de sel gemme, pour obtenir un taux de remplissage et une densité du remblai les plus élevés possibles. A titre d'alternative, il convient de compacter les granulés de sel gemme à l'aide des équipements techniques disponibles sur le site minier, cf. chapitre 3.7.

Remblayage au coulis de ciment :

L'utilisation de coulis de ciment (ou d'un autre matériau de remblayage présentant des caractéristiques similaires) requiert des capacités de réception de marchandises et de stockage, un transport hydraulique après le gâchage, l'infrastructure de tuyauteries y afférente et la construction de coffrages pour segmenter les zones à remblayer. Du fait de l'insuffisance de l'espace disponible pour la mise en place d'une installation de production de matériau de remblayage au fond, il est proposé de mettre en place les installations de malaxage, de dosage et la station de pompage, y compris tous les silos de stockage et réservoirs pour les matériaux et la solution de gâchage (solution NaCl) en surface. Cette solution semble en outre avantageuse, car en dehors des tuyauteries et des équipements de surveillance, elle ne requiert aucune autre installation au fond. Le matériau de construction conditionné, pompable et fluide, sera pompé en profitant du dénivelé géodésique vers les vides miniers préalablement préparés, via une descente dans le puits, et ensuite, via des tuyauteries courantes dans les galeries. Pour les longs trajets dans la mine, l'installation d'une station de pompage intermédiaire (cf. Figure 14) est requise. Pour assurer la sécurité d'exploitation, il conviendra d'installer tous les équipements de commande et de surveillance et généralement tous les équipements requis.

La mise en place du matériau devra s'effectuer par segments consécutifs, chaque segment devant être délimité par des murs de coffrage. La pose des conduites (montage et démontage) s'effectuera en fonction de l'avancement des travaux de remblayage. A titre d'entretien du système de tuyauteries, celui-ci sera rincé à intervalles réguliers. Les solutions de rinçage ne devront pas rester au fond, dans la zone de stockage de déchets.

Pour obtenir un taux de remplissage le plus élevé possible, le matériau devra être mis en œuvre au point géodésique le plus élevé. **Sur la base de l'hypothèse retenue en termes de volume de vides miniers, l'utilisation d'un coulis de ciment ou d'un autre matériau de remblayage présentant des caractéristiques similaires devrait permettre d'atteindre un taux de remplissage très élevé, garantissant ainsi le taux de remplissage des vides miniers d'env. 80 % prévu par MDP.**

Pour l'utilisation de béton à agrégats de sel, les mêmes conditions de base techniques s'appliquent que pour le coulis de ciment.

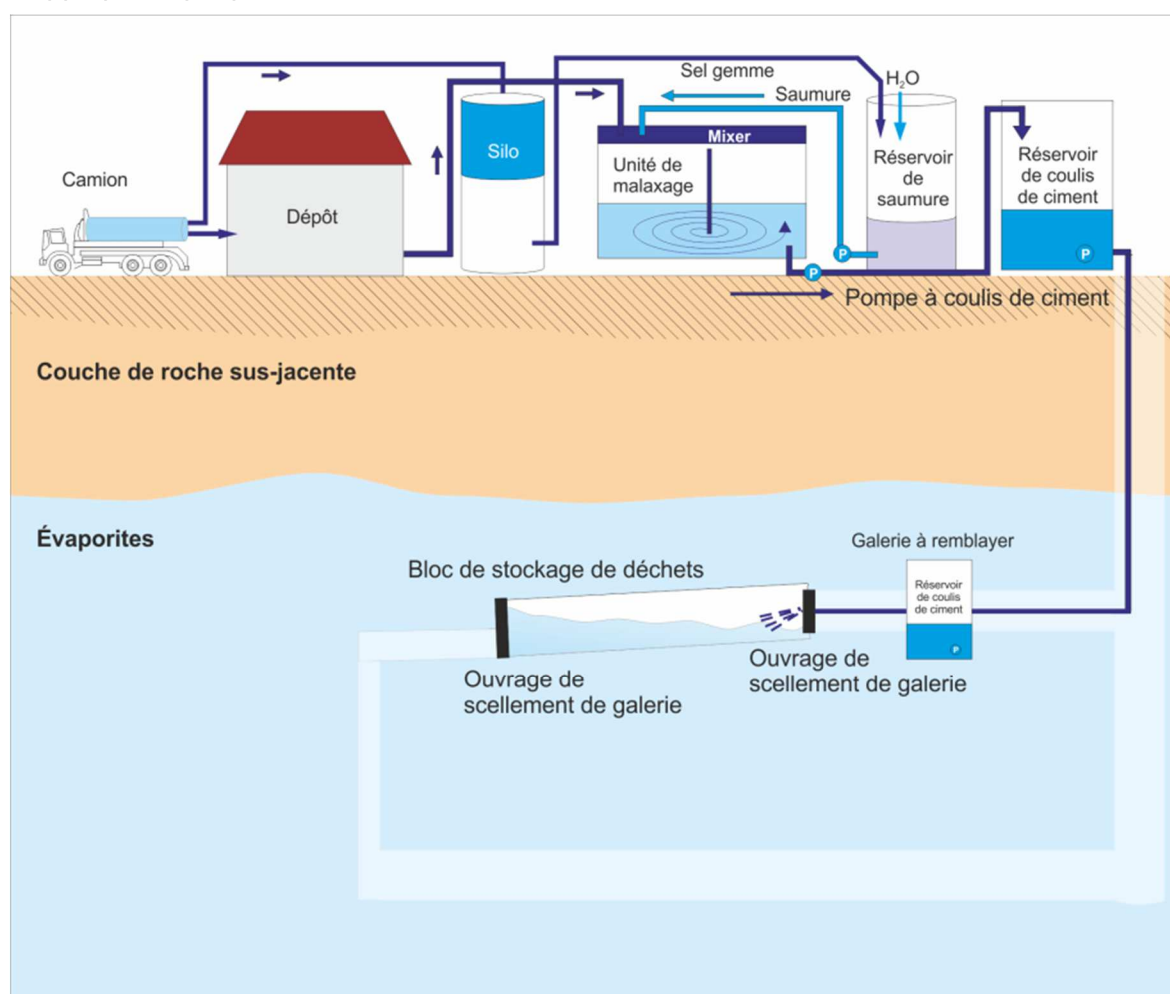


Figure 15 Technologie de remblayage au coulis de ciment, avec l'installation de préparation du matériau en surface

Technologies de remblayage alternatives :

Si MDPA devait prévoir l'utilisation de béton de recyclage ou de matériaux de terril, la mise en œuvre peut être choisie soit par analogie au remblayage au sel gemme (voie sèche), soit par analogie au remblayage au coulis de ciment (voie humide).

Une autre technologie de remblayage envisageable consiste à remblayer avec des big-bags. Pour ce faire, les matériaux de remblayage seraient conditionnés dans des big-bags spéciaux, puis empilés dans les vides miniers à remblayer. [Les interstices pourront être comblés, en cas de besoin, par la projection de granulés de sel, afin d'atteindre le taux de remplissage prévu par MDPA.](#) L'application de cette méthode de remblayage ne convient pas pour le traitement des galeries et vides miniers effondrés (p. ex. blocs 16 et 26).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- /1/ Aland, H.-J.M. u. a. (1999) : Langzeitfunktionstüchtiger Streckenverschluß aus kompaktiertem Bentonit im Bergwerk Sondershausen.- Glückauf 135 (1999) 3, Seiten 134 - 139. [Ouvrage de scellement de galerie stable à long terme en bentonite compactée dans la mine de Sondershausen, périodique Glückauf 135 (1999) 3, pages 134 à 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/ ARTELIA, K-UTEC, IfG (2016a) : Dossier de prolongation pour une durée illimitée de l'autorisation du 03 février 1997 relative au stockage souterrain de produits dangereux non radioactifs - RAPPORT PRINCIPAL. – ARTELIA Eau et environnement (ARTELIA), K-UTEC AG Salt Technologies (K-UTEC), IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), Echirolles, avril 2016, 106 pages.
- /4/ ARTELIA, K-UTEC, IfG (2016b) : Dossier de prolongation pour une durée illimitée de l'autorisation du 03 février 1997 relative au stockage souterrain de produits dangereux non radioactifs - RAPPORT GEOMECHANIQUE. – ARTELIA Eau et environnement (ARTELIA), K-UTEC AG Salt Technologies (K-UTEC), IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), Echirolles, mai 2016, 87 pages.
- /5/ ARTELIA, K-UTEC, IfG (2016c) : Dossier de prolongation pour une durée illimitée de l'autorisation du 03 février 1997 relative au stockage souterrain de produits dangereux non radioactifs - RAPPORT HYDRAULIQUE. – ARTELIA Eau et environnement (ARTELIA), K-UTEC AG Salt Technologies (K-UTEC), IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), Echirolles, mai 2016, 75 pages.
- /6/ Article L-515-7 du Code Français de l'Environnement du 29 Juin 2006, sur la base d'ancienne loi n°76-663 du 16 Juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (modifié par la loi n°92-646 du 13 Juillet 1992, art6 JORF 14/07/92).
- /7/ ASGA – GEORESSOURCES (2015) : Analyses chimiques d'une saumure préparée. - Université de Lorraine, 2015, 26 pages.
- /8/ ERCOSPLAN (2008) : Backfilling of the Underground Waste Disposal StocaMine, Wittelsheim/France.
[Remblayage du site de stockage souterrain de déchets StocaMine, Wittelsheim/France] - Rapport, ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, Erfurt, 2008.
- /9/ ERCOSPLAN (2013) : Conceptual Design for Dam Constructions and Partial Backfill for the Isolation of the StocaMine Underground Waste Disposal Site.
[Design d'un concept de construction de barrages et de remblayage partiel pour le scellement du site de stockage souterrain de déchets de StocaMine] - Rapport, ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, Erfurt, 2013.
- /10/ ERCOSPLAN (2016) : Konzeptplanung für einen In-situ Versuch zur Erprobung von Dichtelementen in der Untertagedeponie StocaMine der MDPA.
[Etude du concept d'un essai "in situ" d'éléments d'étanchéité dans le site de stockage souterrain de déchets StocaMine de MDPA] – Rapport, ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, Erfurt, 2013.
- /11/ ERCOSPLAN (2018) : Kick-Off zwischen Mines de Potasse d'Alsace (MDPA) und ERCOSPLAN zur geologischen Charakterisierung der Dammstandorte.- Protokoll zum Meeting vom 05.07.2018 in Wittelsheim.
[Rapport de la réunion de lancement entre MDPA et ERCOSPLAN pour la

- caractérisation géologique des sites d'implantation des barrages du 05/07/2018 à Wittelsheim]
- /12/ ERCOSPLAN (2019) : Réunion de concertation sur l'avant-projet de scellement des galeries d'accès au site de stockage souterrain de déchets Stoca Mine entre Mines de Potasse d'Alsace (MDPA), Institut für Gebirgsmechanik Leipzig (IfG) et ERCOSPLAN.- Récapitulatif des résultats, Wittelsheim, 28.02.2019.
- /13/ GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG (2004): Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV.- BMBF - Förderkennzeichen 02C0942.
[Mise au point d'un concept de base pour la construction d'ouvrages de scellement de galeries stables à long terme dans des sites de stockage de déchets souterrains dans des terrains salifères, construction et essai d'un ouvrage de scellement d'essai en conditions réelles]
Ministère Allemand de l'Education et de la Recherche (BMBF), référence de cofinancement 02C05472.
- /14/ IBeWa (2013) : In situ permeability investigations in layered saliniferous formation of StocaMine.
[Mesures de perméabilité in situ dans le terrain salifère stratifié de StocaMine] – IBeWa Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser- und Deponietechnik, Freiberg, 2013, 64 pages.
- /15/ IBeWa (2015a): Ausgewählte ingenieurtechnische Bausteine zum Pilot-Dichtbauwerk für StocaMine - Monitoring der Permeabilität des Gebirges um ein Widerlager eines Streckenverschlusses.
[Modules choisis d'ingénierie pour le barrage pilote de scellement de StocaMine - Surveillance de la perméabilité du terrain autour de la culée d'un ouvrage de scellement de galerie] – IBeWa Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser- und Deponietechnik, Freiberg, 2015, 26 pages.
- /16/ IBeWa (2015b) : Ausgewählte ingenieurtechnische Bausteine zum Pilot-Dichtbauwerk für StocaMine - Dichtmaterial der Verschlussbauwerke.
[Modules choisis d'ingénierie pour le barrage pilote de scellement de StocaMine - Matériau d'étanchéité des ouvrages de scellement] – IBeWa Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser- und Deponietechnik, Freiberg, 2015, 23 pages.
- /17/ IfG Leipzig (2014a) : In-Situ Stress Measurement Planned Pilot Dam Location, Field Test Report No. 1
[Mesures de contraintes in situ sur l'emplacement du barrage pilote prévu, Rapport d'essai sur le terrain n° 1] - Institut für Gebirgsmechanik Leipzig GmbH, Leipzig, 2014, 42 pages.
- /18/ IfG Leipzig (2014b) : Geomechanical In-situ Measuring Concept.
[Concept de mesures géomécaniques in situ] - Institut für Gebirgsmechanik Leipzig GmbH, Leipzig, 2014, 17 pages.
- /19/ INERIS (2010) : Rapport d'Etude DRS-10-108-130-14273A du 23/12/2010, « Etude Géomécanique du stockage de StocaMine », INERIS, 2010, 116 pages.
- /20/ INERIS (2011a) : Rapport d'Etude DRS-10-108-130-12810B du 09/03/11, « Stockage Souterrain de STOCAMINE (68), Etude Hydrogéologique de l'Ennoyage du Site », INERIS, 2011, 190 pages.
- /21/ INERIS (2011b) : Rappel des précédents résultats de l'étude d'impact sur la nappe. - présentation PowerPoint, INERIS, 23.05.2011.
- /22/ INERIS (2011c) : Evaluation du terme source dans le scénario du stockage illimité : calculs des quantités de contaminants stockés et des concentrations potentielles en

- solution et en phase gazeuse en cas d'ennoyage. - Rapport d'Etude DRC-10-108130-12610B, INERIS 03/11/2011, 113 pages.
- /23/ ITASCA (2015) : Wittelsheim waste repository [Site de stockage souterrain de déchets de Wittelsheim]. Performance comparison between bentonite and Sorel concrete drift sealing dams. [Comparatif des performances de barrages de scellement de galerie en bentonite et en béton Sorel] - Technical Report 14R-028A3E, ITASCA Consultants, S.A.S., Ecully Cedex, 03/2015, version anglaise du 17/04/2015, 118 pages.
- /24/ ITASCA (2016) : Stockage de Wittelsheim. Evaluation des flux potentiels de saumure contaminée en considérant le remplissage des blocs vides du stockage avec des havrils de sel et des barrages en béton special. - Technical Report (Rapport technique) 16R-006A1, ITASCA Consultants, S.A.S., Ecully Cedex, 03/2015, 06/2016, 40 pages.
- /25/ K-UTEC (2014) : Chemisch-physikalische Analytik, Salzuntersuchung.
[Analyses physico-chimiques, analyses de sel] – K-UTEC AG Salt Technologies, Sondershausen, 2014, 7 pages.
- /26/ MDPA (1995) : Carreau Joseph - Stockage de dechets industriels ; Repertoire des couches de halite et d'insolubles en dessous des couches potassiques banks Cl (partiel), MI, S, S1 et S2 (partiel).
- /27/ MDPA (2014) : Schacht Joseph – Schachtscheibe.
[Puits Joseph - coupe du puits] – Rissliche Darstellung [Plan de mine], MDPA, Wittelsheim, 2014.
- /28/ MDPA (2015) : Dossier de demande d'autorisation, stockage illimité, StocaMine. – MDPA, Wittelsheim, 2015.
- /29/ MDPA (2016a) : Indications relatives à l'exploitation du site minier, – Courrier électronique de MDPA, Wittelsheim, 2016.
- /30/ MDPA (2016b) : Projet de conception d'ouvrages de scellement de galerie. – Courrier électronique de MDPA du 27/05/2016, Wittelsheim, 2016.
- /31/ MDPA (2016c) : Dossier de demande d'autorisation pour la prolongation, pour une durée illimitée, de l'autorisation de stockage souterrain en couches géologiques profondes de produits dangereux non radioactifs – Mémoire complémentaire. – MDPA, Wittelsheim, June 2016, 49 pages, 7 appendices.
- /32/ MDPA (2016d) : Résumé non technique du mémoire complémentaire MDPA / StocaMine – Wittelsheim, Septembre 2016, 6 pages.
- /33/ MDPA (2018a) : Anforderungen an das Versatzmaterial.- E-Mail vom 15.03.2018, MDPA, Wittelsheim, 2018. [Exigences applicables au matériau de remblayage, courriel du 15/03/2018, MDPA, Wittelsheim, 2018]
- /34/ MDPA (2018b) : Hohraumbilanzierung zum Versatz.- E-Mail vom 26.04.2018, MDPA, Wittelsheim, 2018. [Bilan des volumes miniers à remblayer - courriel du 26/04/2018, MDPA, Wittelsheim, 2018]
- /35/ MDPA (2019a) : Scheme "Solution de base".- courriel du 19/03/2019, MDPA, Wittelsheim, 2019.
- /36/ MDPA (2019b) : "MDPA method" of construction.- E-Mail vom 05.04.2019, MDPA, Wittelsheim, 2019.
- /37/ Patrimoine Industriel Minier (2015) : Le puits Joseph (en ligne). - http://www.patrimoine-minier.fr/mines_carrieres_souterraines/potasse_amelie.html. Visite du site internet en date du 15/04/2015.
- /38/ Prefet du Haut-Rhin (2017) : ARRETE du 23 Mars 2017 pris en application du titre Ier livre V du code de l'environnement autorisant la prolongation, pour une duree illimitée, de l'autorisation a la société des Mines de Potasse d'Alsace (anciennement

- Stocamine) de stockage souterrain en couches géologiques profondes, de produits dangereux, non radioactifs, sur le territoire de la commune de Wittelsheim.
- /39/ Sitz, P. et al. (2003) : Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für UTD im Salinar, Bau und Test eines Versuchsverschlussbauwerkes unter realen Bedingungen.
[Mise au point d'un concept de base pour la construction d'ouvrages de fermeture de galeries stables à long terme dans des sites de stockage de déchets souterrains dans des terrains salifères, construction et essai d'un ouvrage de fermeture d'essai en conditions réelles]
- Abschlussbericht zum mit Mitteln des BMBF unter 02C05472 und 02C0902 geförderten Forschungsvorhaben, 302 Seiten, Freiberg, 2003.
[Rapport final d'un projet de recherche subventionné par le ministère allemand de l'éducation et de la recherche BMBF (réf. de subvention 02C05472 et 02C0902), 302 pages, Freiberg, 2003]
- /40/ SOLDATA Geophysic (2014) : Prospection Géophysique. Reconnaissances par radar de sol et méthodes sismiques en ondes P et S, France. – SOLDATA Geophysic, Nivolas-Vermelle, 2014, 81 pages.
- /41/ StocaMine (2011) : New Assessment Criteria confirmed by INERIS. - Email of 06 October 2011.[Nouveaux critères d'évaluation confirmés par l'INERIS – courriel du 06 octobre 2011]
- /42/ Handke, N. (2002) : Dammbau- und Abdichtungstechniken im Kali- und Steinsalzbergbau.- Thyssen Schachtbau Report 2002; Seiten 30 - 35.
[Techniques de construction de barrages et de scellement dans l'exploitaton de potasse et de sel gemme, Thyssen Schachtbau Report 2002 ; pages 30 à 35.]
- /43/ K+S Aktiengesellschaft (2002) : Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II.- BMBF - Förderkennzeichen 02C0516.
[Projet de recherché de scellement de puits à Salzdetfurth, puits n° II.- BMBF - référence de cofinancement 02C0516.]
- /44/ 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. [Sandia National Laboratories (1995) : Études de cas de methodes et de matériaux de scellement utilisés dans l'industrie extractive de sel et de potasse.- SAND95-1120, UC-721, novembre 1995.]
- /45/ Sitz, P. (1982) : Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen. – Freiburger Forschungsheft A 643, 151 Seiten, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982.
[Sitz, P. (1982) : Scellements transversaux (de puits) de vides miniers à l'aide de barrages et de bouchons (plugs). – Périodique Freiburger Forschungsheft A 643, 151 pages, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982]
- /46/ TU Bergakademie Freiberg (2003) : Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für UTD im Salinar, Bau und Test eines Versuchsverschlussbauwerkes unter realen Bedingungen.- BMBF - Förderkennzeichen 02C05472.
[Université technique minière de Freiberg (Allemagne) (2003) Mise au point d'un concept de base pour la construction d'ouvrages de fermeture de galeries stables à long terme dans des sites de stockage de déchets souterrains dans des terrains salifères, construction et essai d'un ouvrage de fermeture d'essai en conditions réelles", BMBF – réf. de cofinancement 02C05472]
- /47/ TU Bergakademie Freiberg (2009) : Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. - Abschlussbericht zum mit Mitteln des BMBF unter 02C1124 geförderten Forschungsvorhaben, 307 Seiten, Freiberg, 2009.

[Université technique minière de Freiberg (Allemagne) (2009) : éléments d'étanchéité diversifiés et redondants pour des ouvrages de scellement stables à long terme – Rapport final du projet de recherche cofinancé par le BMBF, réf. 02C1124, 307 pages, Freiberg, 2009.]