

AVIS D'EXPERT

Évaluation des impacts possibles de l'interruption des travaux de construction des barrages sur la sécurité à long terme du site de stockage souterrain de déchets (StocaMine)

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

Téléphone :
Télécopie :
Courriel :
Internet : www.ercosplan.com
Gérant : Dr Henry Rauche

Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Friederikenstraße 60
D-04279 Leipzig
Allemagne

Téléphone :
Télécopie :
Courriel :
Internet : www.ifg-leipzig.de
PDG : Dr Ralf Günther

Client : **Mines de Potasse d'Alsace (MDPA)**
Avenue Joseph-Else
68310 Wittelsheim
FRANCE

Consultant : **ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft
Geotechnik und Bergbau mbH**
Arnstaedter Strasse 28
D-99096 Erfurt
ALLEMAGNE

**Référence du pro-
jet :** 19-050

Erfurt, le jeudi 21 juillet 2022



Dr Henry Rauche
Gérant & PDG

Le présent AVIS D'EXPERT comporte
19 pages

1 Introduction

Mines de Potasse d'Alsace (MDPA) est l'exploitant d'un site de stockage souterrain de déchets, situé dans les vieux travaux de l'ancienne mine de potasse Amélie à Witelshheim, 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". Les opérations d'extraction et l'exploitation du site de stockage de déchets ultime ont cessé en 2002.

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. Mis au point sur cette base, le concept technique de sécurisation du site de stockage souterrain de déchets inclut, entre autres, le remblayage des vides miniers du site de stockage, dans le cadre de la sécurisation du site minier et des possibilités techniques, grâce au remblayage et au scellement définitif des galeries d'accès à la zone de stockage au moyen d'ouvrages de scellement comportant des éléments d'étanchéité massifs en béton (béton de saumure).

Une condition de base essentielle du présent concept de sécurité consiste dans le fait que les sites d'implantation des barrages de scellement de galeries ne seront atteints par la montée progressive de saumure dans les vieux travaux de la mine qu'au bout de plusieurs siècles, conformément aux pronostics d'inondation actualisés (CESAME, 2020, /4/). Cela signifie que les barrages de scellement des différentes galeries n'ont pas besoin d'être complètement efficaces de suite, mais, à titre de prémisse pour le confinement étanche des polluants, on peut tabler sur le fait que l'intégrité des ouvrages de scellement de galeries sera atteinte au bout d'une période de plusieurs décades après leur achèvement, grâce à la convergence du terrain adjacent (ARTELIA et al., 2016b, /2/). Du fait des propriétés de fluage avérées du terrain, le sel gemme enveloppera totalement les barrages de scellement. Cela augmentera la contrainte au niveau de la zone de contact entre le barrage de scellement et le terrain, et en même temps, dans l'élément d'étanchéité. Sur la base du retour d'expérience obtenu avec d'autres barrages de scellement de grande envergure (cf. ARTELIA et al. (2016a, /1/), la perméabilité globale de l'ouvrage diminue sensiblement dans le temps, jusqu'à $< 10^{-18} \text{ m}^2$.

Sur la base des préconisations d'étude de MDPA (2016b, /13/) et de la tierce expertise réalisée par ARTELIA et al. (2016a, /1/) et en tenant compte des conditions de base du terrain, un avant-projet pour la construction des ouvrages de scellement de galeries (ERCOSPLAN, 2019, /7/) a été réalisé. Celui-ci a formé la base du concept de construction détaillé (INGEROP, 2021, /11/). Ces documents ont constitué la base des spécifications pour la réalisation des travaux actuellement entrepris et à réaliser au cours des prochaines années par MDPA.

Initialement, les travaux débutés durant 2022 aux sites d'implantation 1 et 2 (sites d'implantation des barrages 1B et 2B) ont été stoppés suite à une injonction du Tribunal administratif de Strasbourg, le 25 mai 2022. À ce moment-là, des travaux préparatoires essentiels avaient déjà été réalisés, comme la pose de nouveaux boulons et la surexcavation du contour du terrain aux sites d'implantation mentionnés ci-dessus. D'autres travaux préparatoires pour la réalisation des premiers segments de béton (dont la livraison de coffrages, de matériaux de construction, etc.), avaient déjà été entamés, voire réalisés. Cela inclut également des travaux de mise en place d'une structure de barrage de 20 m

de long en havrils de sel gemme, et la construction d'un segment de barrage de 2,5 m en béton projeté, au niveau du site d'implantation du barrage 1B.

Tous ces travaux de construction des barrages de scellement sont actuellement suspendus.

Au vu de cette situation, MDPa a demandé à ERCOSPLAN/IfG (par courrier électronique : Regis Fischer <r.fischer@mdp.a.fr>, en date du 02 juin 2022) de fournir un avis d'expert ad hoc, avec une évaluation des impacts possibles de l'interruption de la construction des barrages de scellement sur la sécurité à long terme du site de StocaMine.

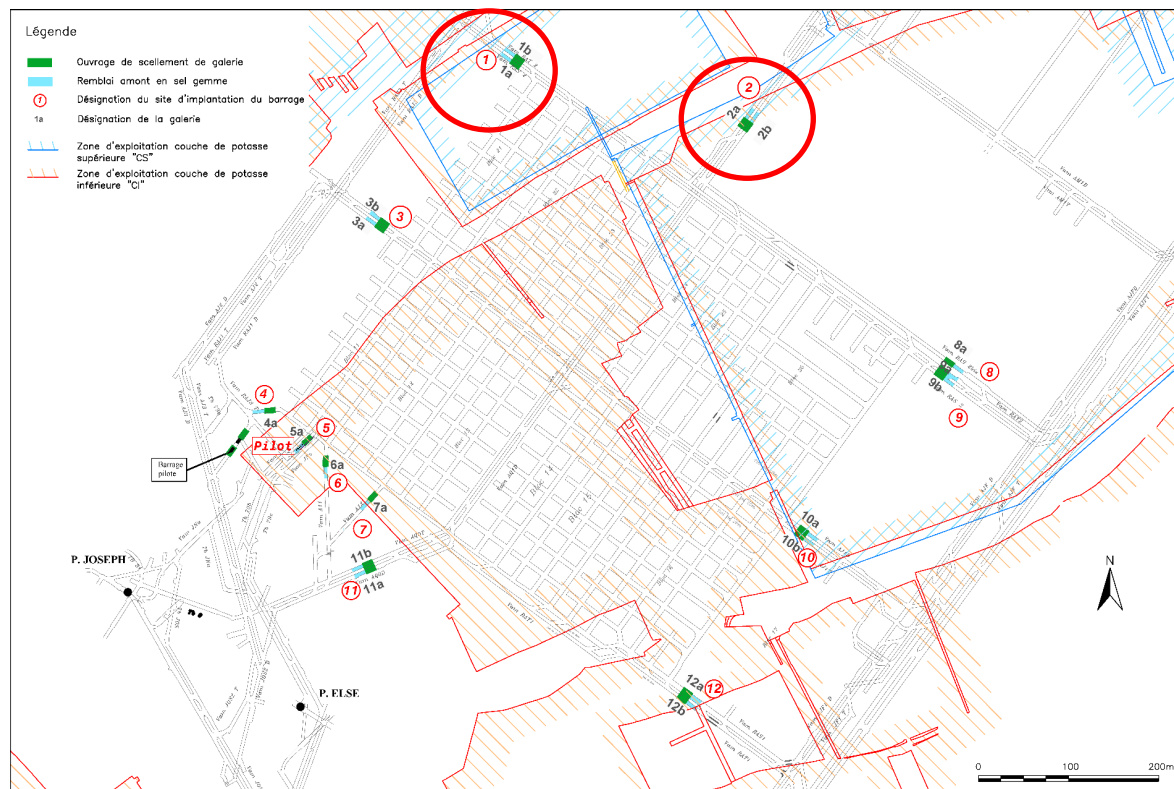


Figure 1 Aperçu des sites d'implantation prévus pour les barrages de scellement au niveau du site de StocaMine. Les cercles rouges montrent les positions des travaux de construction actuels

2 Bases de l'avis d'expert

Pour évaluer de manière fiable les conséquences de l'actuelle interruption des travaux, une évaluation qualifiée des aspects, complexes et imbriqués des conditions de base géologiques, géotechniques et géomécaniques, de la sécurité à long terme et d'un éventuel déstockage qui pourrait s'avérer nécessaire, est indispensable.

Concernant le déstockage, il est rappelé d'avance qu'indépendamment du débat sur un possible déstockage de déchets stockés dans le site de StocaMine, les mesures constructives actuelles visent à confiner les polluants de la manière la plus imperméable possible au sein du sel gemme à long terme. Jusqu'ici, des travaux ont été entrepris au ni-

veau des sites d'implantation de barrage 1 et 2 à cette fin. Puisque l'accès et l'aération du site de stockage souterrain de déchets restent largement inchangés, et même si les doubles galeries sont fermées à ces emplacements, du point de vue de l'expert, les travaux actuels n'entravent pas de manière significative la possibilité de déstocker les déchets. Par conséquent, la poursuite des mesures de construction partielles déjà débutées ne signifie pas qu'une décision finale sur la gestion des déchets restants au fond ait déjà été prise.

Dans les sections qui suivent, nous présenterons les bases de l'Avis d'expert sous une forme condensée :

- Convenance du principe de conception (section 2.1)
- Conditions de base géotechniques et géologiques (section 2.2)
- Conditions de base géomécaniques (section 2.3)

2.1 Convenance du principe de conception

La convenance et la viabilité du concept ont été testées au cours d'un essai in situ ("barrage pilote"), dans le but de vérifier la fonctionnalité et de valider la construction dans les conditions de base présentes (ERCOSPLAN, 2016, /6/). Le barrage pilote a été construit, et l'instrumentation y afférente intégrée, entre août 2017 et juin 2018, et fait l'objet d'une surveillance en continu. La construction réussie du barrage pilote a apporté la preuve de la faisabilité structurelle du concept des ouvrages de scellement. Par ailleurs, les résultats de la surveillance précédemment réalisée sur le barrage pilote prouvent la validité de l'hypothèse, à savoir que l'intégrité à long terme requise de la structure, avec la faible perméabilité indispensable ($< 10^{-18} \text{ m}^2$), sera atteinte de manière fiable grâce à l'effet de la convergence (ERCOSPLAN, 2022, /8/), permettant ainsi d'obtenir la preuve de la fonctionnalité du concept de construction du barrage de scellement.

Voici le détail des objectifs réalisés avec la construction du barrage pilote :

- tester et optimiser les formules des matériaux de construction pour le béton de saumure, béton coulé et projeté in situ, dans une configuration de mise en œuvre grandeur nature
- démontrer le processus d'installation prévu, par une construction avec assurance de la qualité, d'un élément en béton coulé in situ, et un élément en béton projeté grandeur nature
- apporter la preuve du respect des exigences applicables aux matériaux de construction existants, à l'aide de mesure d'échantillons de référence confectionnés au cours de la phase de construction et des échantillons prélevés sur les différentes structures de barrage, y compris la vérification des propriétés en termes de résistance à la compression et de perméabilité
- apporter la preuve que le terrain salifère environnant in situ développe une convergence suffisante pour se refermer sur l'élément de barrage au cours de quelques décennies¹, de manière à ce que la dégradation inévitable dans le con-

¹ Grâce au développement avéré de contraintes normales élevées (pouvant aller jusqu'à $> 6 \text{ MPa}$ durant la période d'observation d'environ deux ans, et son évolution ultérieure attendue), à cœur et au niveau du contour du matériau de construction, il est assuré que la perméabilité ciblée sera intégralement atteinte (integral $\leq 10^{-18} \text{ m}^2$) sera fiablement atteinte d'ici quelques décennies. Cela confirme les évaluations exposées dans

tour de galerie dans le terrain salifère (avec formation d'une zone EDZ) soit éliminée. De cette manière, l'imperméabilité requise des structures en vue du confinement nécessaire des polluants contre l'arrivée de saumure est assurée.

D'une manière générale, du point de vue de l'expert, il n'y a aucun doute que la mise en œuvre rapide du présent concept de sécurisation, par la construction d'éléments d'étanchéité en béton de saumure et la réalisation de mesures d'accompagnement, y compris la réalisation de serrements en havrits de sel gemme², permettra le confinement sûr à long terme des polluants dans le site de stockage de déchets StocaMine.

2.2 Conditions de base géotechniques et géologiques

Les conditions de base géotechniques et géologiques formant le point de départ des études de scellement du site de stockage souterrain de déchets ont été documentées en détail dans diverses investigations, actualisées selon les besoins (INERIS, 2011, /9/ ; ITASCA, 2016, /12/; ARTELIA et al., 2016b, /2/ ; ERCOSPLAN, 2019b, /8/).

- Conditions de base géotechniques
 - Profondeur : env. 550 m
 - Température du terrain environnant : env. 30°C
 - Pression hydrostatique maxi : env. 6 MPa
 - Pression lithostatique maxi : env. 12 MPa

La surface totale de l'ensemble des sections des galeries d'accès au site de stockage de déchets est d'env. 240 m². Voici les informations disponibles sur les sections moyennes présentes au niveau des sites d'implantation de barrage n° 1 et 2. À titre de préparation pour la construction des structures de scellement des galeries, les sections de galerie vont être augmentées par élimination/surexcavation de la zone perturbée (EDZ) proche du contour. La profondeur de surexcavation requise et la section du barrage de scellement à construire sont également listées.

	Hauteur (m)	Largeur (m)	Section (m ²)	Profondeur de surexcavation (m)	Section finie
Implantation 1a	2,7	3,7	10,0	0,50 – 0,58	21,97
Implantation 1b	2,2	3,6	7,9	0,52 – 0,39	
Implantation 2a	2,9	3,7	10,7	0,60 – 0,36	21,38
Implantation 2b	2,4	3,6	8,6	0,52 – 0,26	

Le taux de convergence moyen dans les galeries est de 0,9 % par an. Suite à l'ennoyage, le taux de convergence augmente d'abord, puis décroît à une valeur d'env. 0,1 % par an.

ARTELIA et al. (2016b, /2/), basées sur notre expérience acquise dans les mines de sel en général et sur des investigations concrètes sur des projets de scellement similaires.

² Les serrements en havrits de sel gemme possèdent une perméabilité initiale élevée, selon leur degré de compactage à la mise en place, puis se compactent progressivement sous l'action de la convergence, si bien que leur perméabilité décroît jusqu'à atteindre une densité similaire à celle du terrain salifère en question. De cette manière, le havrits de sel forment une barrière efficace, géologiquement homogène, s'ajoutant aux structures de barrage en béton de saumure. Ce dispositif forme un système de scellement combinant différents types d'éléments de confinement des polluants.

En principe, les taux de convergence observés dans le périmètre des structures de scellement de galerie seront plus faibles que dans les autres sections de galerie, suite à l'effet de revêtement induit par la rigidité de la structure érigée.

Le sel gemme du site de StocaMine se présente sous forme de couche généralement horizontale, parsemée de couches intercalaires illustrées par la séquence de sédimentation (Figure 2).

Le sel gemme possède des granulométries de 5 à 10 mm, grains moyens jusqu'à grossiers. Il varie entre incolore, transparent, blanc, brunâtre et gris. Les différentes couches présentent une épaisseur comprise entre 10 et 30 cm et alternent avec des marqueurs (fines couches distinctives) de type argile/anhydrite et argile/marne. Les marqueurs, présents en couches horizontales, présentent une épaisseur comprise entre 3 et 10 cm.

Pour évaluer la stabilité et le développement de dégradations dans le contour du terrain salifère, en plus des propriétés de résistance et de déformation dans la matrice de sel gemme, qui se développe en fonction du temps et de la contrainte, il convient de prendre en compte les propriétés des plans de décollement et les couches de marne marquées.

La Figure 2 montre que la couche 13, une couche de marne distinctive, est présente au toit de l'ensemble des galeries d'accès creusées au niveau 23. L'épaisseur de l'horizon de sel gemme (couche 12) entre les galeries et cette couche de marne (couche 13) est très faible, d'environ 2,5 m, ce qui a conduit à des dégradations de stabilité significatives du toit par le passé, notamment dans le périmètre de galeries très larges. Pour définir le contour de surexcavation, il a fallu prendre en compte à la fois des aspects structurels et des aspects de sécurité minière :

- Le contour de surexcavation du mur doit être largement horizontal, tout en prenant en compte l'inclinaison des couches
- Le contour du toit doit être aménagé en voûte plate, c'est-à-dire en évitant les coins pointus
- Les zones friables ou menaçant de se décoller sont à éliminer de manière à garantir la sécurité des travailleurs et la sécurité d'exploitation
- Comme il existe des couches de marne au toit, une épaisseur de couche suffisante doit être ménagée au toit en vue d'éviter les décollements ou les effondrements du toit.

Au vu de ces contraintes, le contour de surexcavation du toit a été optimisé pour chacun des sites d'implantation, en prenant en compte les phénomènes de décollement déjà identifiés, et la stabilité du toit (ERCOSPLAN, 2019b, /8/).

En raison de la stratification complexe des couches lithologiques sur l'ensemble des sites d'implantation de scellement de galerie, des fissures vont se former au niveau du toit des galeries à sceller, en fonction du temps de repos et tout particulièrement du temps de repos après les travaux de surexcavation. En même temps, la surexcavation fragilise davantage encore le banc de sel au toit, déjà mince en soi.

Même dans des conditions modérées (p. ex. faible convergence, stratification lithologique simple et homogène), des temps de repos de plusieurs mois (excédant 6 mois) entraînent nécessairement des mesures supplémentaires de sécurisation du toit, à titre de prérequis de base pour le travail de construction opérationnel des structures de scellement de galeries. En raison de conditions défavorables (taux de convergence élevés, formation défavorable du sel gemme) existant sur le site de StocaMine, la période critique; à l'expiration de laquelle des mesures supplémentaires s'imposent, se trouve réduite de manière significative, si bien qu'au bout de 4 à 5 mois, les mesures supplémentaires ci-après peuvent s'avérer indispensables pour assurer la sécurité minière et la mise en place réussie du barrage :

- **Pose de boulons supplémentaires**

Les boulons peuvent affecter l'intégrité de la structure par défaut de stabilité à long terme (p. ex. corrosion des boulons d'acier, altération des boulons chimiques) et par la dégradation de l'homogénéité de la structure de terrain environnant (durcissement local) ; c'est la raison pour laquelle on les enlève dans la mesure du possible, ou on en réduit le nombre au minimum.

Indépendamment de cela, il existe un risque de formation de petites fissures entre les boulons, susceptibles de former des voies d'infiltration parallèles à la structure.

- **Surexcavation supplémentaire du contour de galerie**

En procédant à une nouvelle surexcavation du contour, notamment en agrandissant l'excavation au toit, l'épaisseur du banc de sel au toit se trouve encore plus réduite, ce qui augmente la probabilité d'une réduction de la stabilité du toit.

De plus, l'agrandissement de la section de galerie requiert une modification de la géométrie de la structure, car il faut maintenir dans la mesure la plus large possible le ratio entre largeur et longueur de l'ouvrage initialement prévu. En raison des conditions déjà considérablement exiguës du site, ce problème semble quasiment insurmontable.

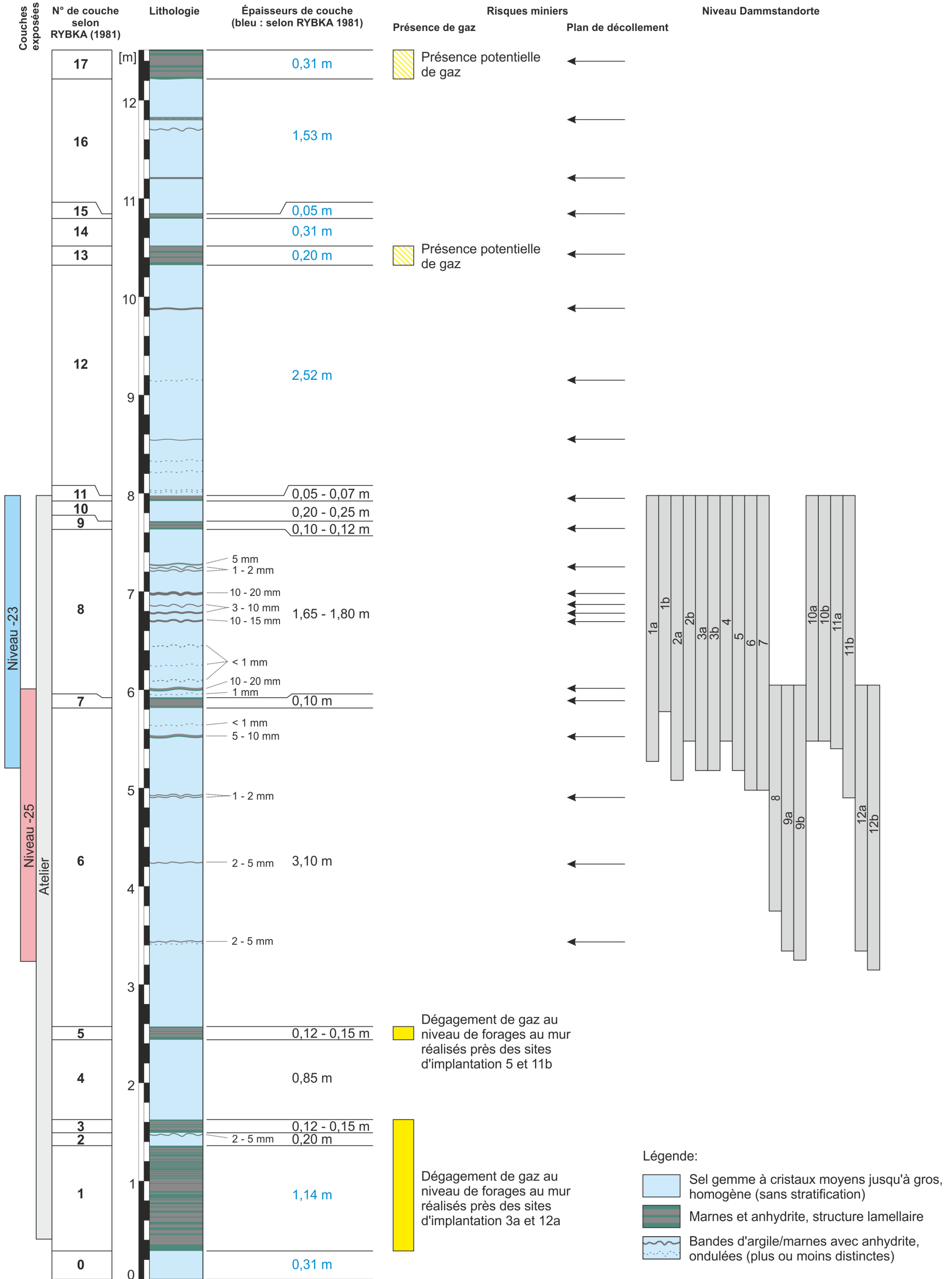


Figure 2 Résumé de la stratification lithologique du terrain salifère à proximité des sites d'implantation des structures de barrage (ER-COSPLAN 2019, /8/).

2.3 Conditions de base géomécaniques

2.3.1 Processus de développement des dégradations dans le contour du terrain salifère

Tandis que les zones de terrain salifère distantes du contour peuvent en général être caractérisées comme hydrauliquement imperméables, avec des perméabilités proches de 0 ou très faibles, de l'ordre de $<10^{-20} \text{ m}^2$, que l'on définit comme étanches (p. ex. Popp et al., 2014, /16/), le creusement de galeries dans le terrain salifère entraîne la formation d'une zone perturbée (ou zone EDZ) proche du contour. La formation de cette zone est un effet secondaire de l'évolution des galeries, résultant de détente (ou de contrainte) mécanique et de fracturation. L'amplitude de cette zone de perturbation intéressant la perméabilité hydraulique dépend entre autres des conditions de base de contraintes (profondeur), de la géométrie du vide minier, du type de creusement (taille ou creusement à l'explosif), des propriétés du terrain salifère, de la durée du temps de repos et de la présence et/ou du volume de fluides localement présents (p. ex. hydrocarbures). Le développement de la zone EDZ dans le temps, dans les conditions de contrainte et de dispersion/libération de fluides qui s'accompagne d'une réduction de la pression interstitielle est schématiquement illustrée dans la Figure 3 à l'exemple d'une galerie en forme de tunnel (cf. Salzer, 1989, /17/).

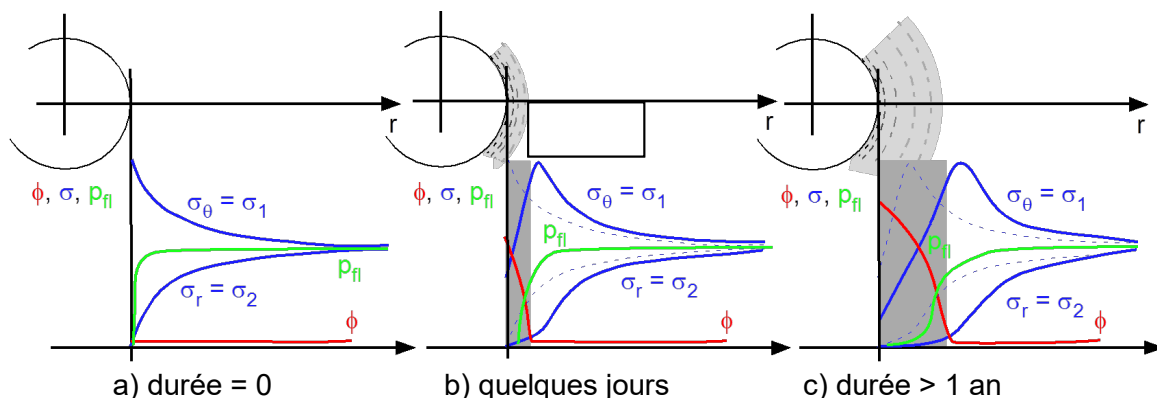


Figure 3 Comportement du contour autour d'une section circulaire avec formation d'une zone EDZ (distribution des contraintes avec σ_θ - contrainte tangentielle [= σ_1 plus grande contrainte principale] and σ_r [= σ_2 plus petite contrainte principale], porosité ϕ et variation de pression interstitielle p_{fi}) - représentation schématique (complétée selon Salzer, 1989, /17/)

Dans cette configuration, un état de contrainte quasi-élastique est présent dans le contour directement après le creusement du vide minier ($t = 0$), réduisant la contrainte radiale σ_r à 0, tandis que la contrainte tangentielle σ_θ s'accroît ($\sigma_\theta > \sigma_r$). Par conséquent, des zones proches du contour chargées de fluide peuvent dégazer immédiatement, si la pression interstitielle excède la plus petite contrainte principale (\rightarrow violation locale du critère de contrainte minimale), ce qui en revanche fait chuter immédiatement la pression interstitielle. En même temps, si la résistance du terrain est dépassée dans un délai de quelques

jours (du fait d'une violation locale du critère de dilatation), un processus de plastification se produit dans le contour proche du vide minier, qui s'accompagne de la formation d'une zone EDZ (c'est-à-dire dégradation = accroissement de la porosité), qui s'accompagne à son tour de processus de dégazage supplémentaires, ou d'une expansion de la zone dans laquelle la pression interstitielle a été détendue. Ce processus se poursuit dans le temps, et une redistribution des contraintes se produit grâce aux propriétés de fluage du sel gemme, conduisant à une expansion de la zone EDZ.

Par opposition à la roche cristalline, la dégradation des contours des vides miniers dans le terrain salifère n'est pas un processus statique, mais un processus qui progresse dans le temps, grâce à l'effet de convergence du vide minier. Cela veut dire qu'en fonction des dynamiques temporelles de ce processus, la dégradation progresse, détériorant ainsi les conditions de mise en place en termes d'intégrité hydraulique globale. Cela s'applique notamment en présence d'un taux de convergence relativement élevé d'environ 0,9 % par an.

2.3.2 Conclusions expérimentales sur l'évolution de la perméabilité de la zone EDZ dans le temps

En ligne avec les constatations ci-dessus, le creusement d'un vide minier conduit à une dégradation ou une perturbation du terrain salifère au niveau du contour en raison de contraintes et de déformations, les principaux facteurs de dégradation étant la géométrie du vide minier et le temps de repos, en plus des facteurs visés ci-dessus.

L'étendue de la zone EDZ et la magnitude de la perméabilité qui en résulte sont généralement déterminées par des mesures de perméabilité³. Cependant, ces mesures ne sauraient être que des instantanés, comme l'indique la Figure 4, illustrant des mesures de perméabilité prises dans le cadre du projet de recherche de Sondershausen, conduit entre 1997 et 2003 (Sitz, 2003, /19/).

Pour ce projet, une galerie à l'origine circulaire (« galerie tunnel ») a été élargie à une section rectangulaire, les illustrations montrant l'état (1) avant la surexcavation – temps de repos de la galerie : 30 ans, (2) 1 mois après la surexcavation et environ 2 ans après ; les mesures de perméabilité ont été réalisées dans un forage horizontal, foré à la perceuse à percussion.

Le relevé des résultats de mesure montre que la géométrie d'origine circulaire, possédant une distribution de contrainte favorable, a conduit à une plage de perméabilité très faible (env. 0,4 m) malgré le temps de repos relativement long. Cet état de perturbation initialement modéré est confirmé par la première mesure après la surexcavation réalisée pour former une section de galerie rectangulaire. Ensuite par contre, les processus de dégradation se sont manifestés avec le temps. Les mesures répétées après deux ans documentent que l'expansion du contour perturbé a quasiment triplé et va probablement continuer d'avancer.

³ À cette fin, des essais de pression (dans ce cas, de préférence au moyen d'azote) sont réalisés à l'aide d'une sonde pourvue de plusieurs packers à des sections de profondeur de forage discrètes. La perméabilité est déterminée par l'analyse des courbes de chute de pression pour le fluide d'essai qui s'infiltré dans le terrain adjacent, permettant d'obtenir une valeur de perméabilité représentative selon Darcy.

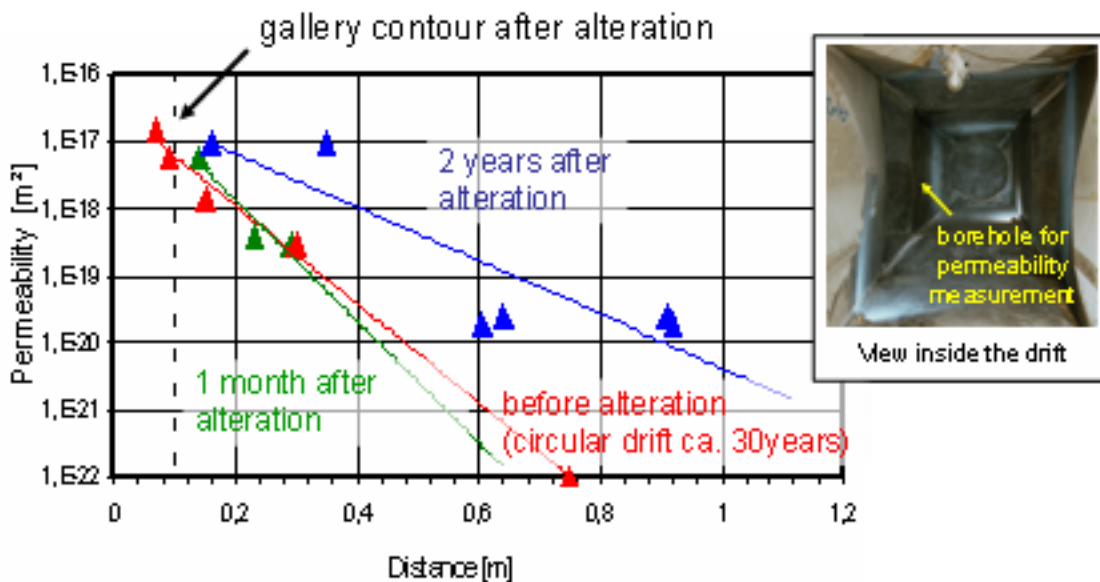
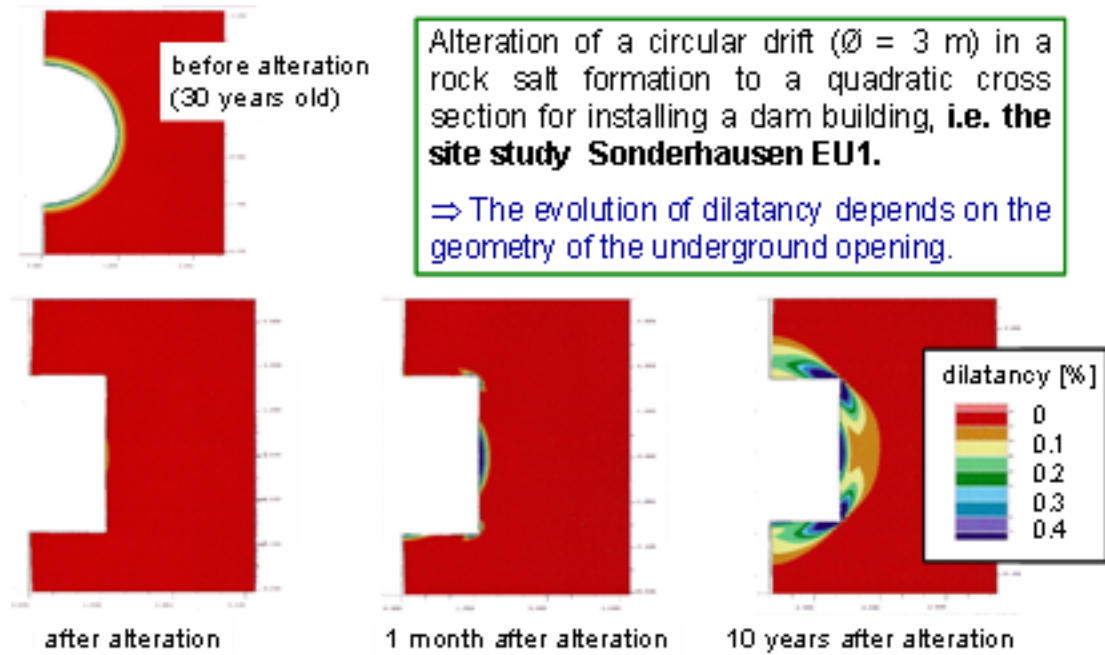


Figure 4 Synthèse de l'évolution de la perméabilité dans le temps dans le contour du terrain salifère (à différents moments, jusqu'à 3 ans) : Comparaison des mesures expérimentales sur le site de Sonderhausen avec la modélisation numérique de l'évolution de la zone perturbée (dilatation) ; (ci-dessus) Résultats de la modélisation ; (ci-dessous) Mesures réalisées par IBEWA au niveau du contour des parements : Contour avant la surexcavation (état initial), 1 mois après la surexcavation de la zone EDZ et 2 ans après la surexcavation du contour (cf. Salzer et al., 2005, /18/)

Cela correspond également aux conclusions de la modélisation, qui montre une progression significative de la dégradation (dilatation) dans le temps, surtout au niveau du milieu des parements.

Les données du relevé de mesure documentent ce qui suit :

- une surexcauation du contour n'élimine que partiellement la zone dégradée (EDZ)
- le passage d'un contour rond idéal à une section rectangulaire facilite la formation d'une zone EDZ significative, due aux concentrations de contraintes au niveau des parements et des surfaces de la galerie
- La taille de la zone EDZ s'accroît à mesure du temps de repos.

2.3.3 Simulation/modélisation technique de l'évolution de la zone perturbée

L'impact des effets de perturbation dans le temps sur le contour du vide minier est également confirmé par la modélisation numérique réalisée par l'IfG, qui démontre la mise en œuvre d'un modèle technique des processus documentés dans les chapitres précédents (IfG, 2015, /11/).

L'objectif de l'étude de modélisation consistait à prouver la fonctionnalité du concept de construction du barrage dans les conditions de base géomécaniques du site, sur la base de calculs numériques de modélisation géomécanique.

Ces calculs débutent au moment $t = 0$, supposé correspondre à l'année de creusement de la galerie, à savoir 1998. Les distributions des contraintes principales minimales (σ_{\min}) et maximales (σ_{\max}) à l'état initial avant la mise en place du barrage sont montrés à la Figure 5.

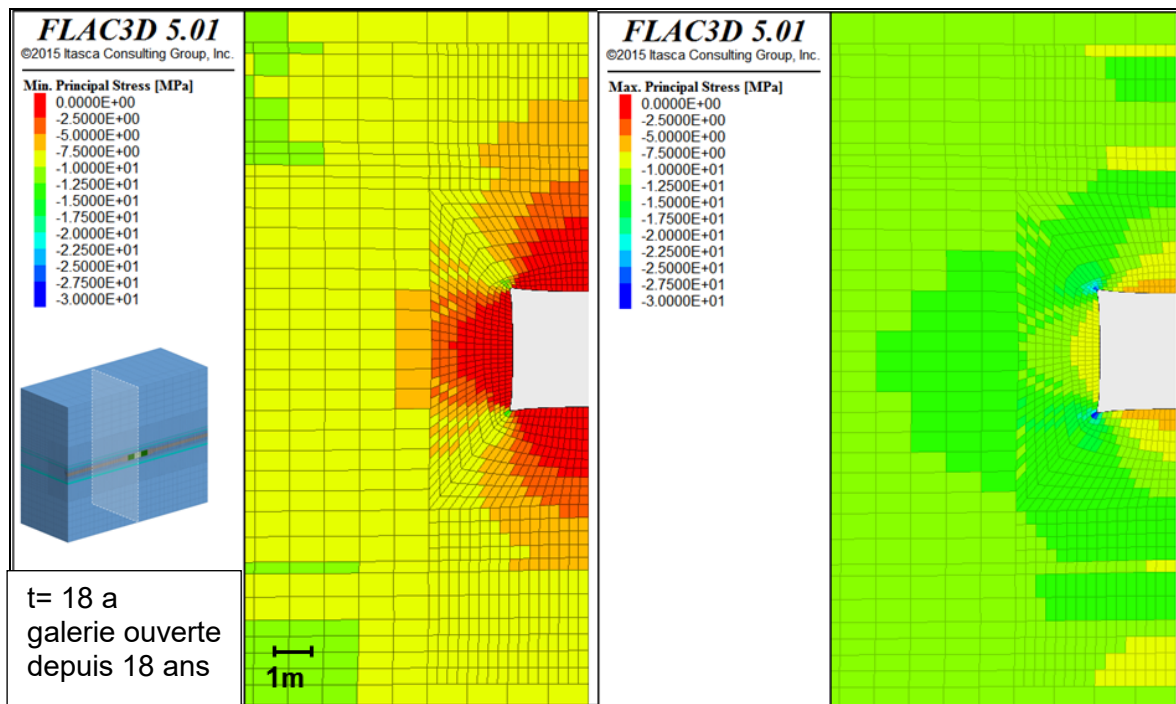


Figure 5 La distribution des contraintes principales minimales (σ_{\min} : à gauche) et maximales (σ_{\max} : à droite) Après un temps de repos de 18 ans de la galerie ouverte, Avant la surexcauation de la zone EDZ - Section verticale au milieu du modèle $x = 0$ m

La détente des contraintes principales en forme de voûte est clairement visible, les charges se concentrant dans les angles du profil de galerie rectangulaire. La zone d'influence de la galerie ouverte est plus prononcée dans la direction verticale que dans la direction horizontale (direction y dans le modèle) au regard des contraintes principales minimales, ce qui résulte du rapport hauteur de galerie/largeur de galerie.

Les couches d'argile/marne, caractérisées à la fois par les contraintes principales minimales et maximales, influencent l'égalisation isotrope des contraintes à long terme. En revanche, en fonction de la valeur de résistance appliquée, la dégradation résultant de la détente des contraintes est ici très faible, avec une dilatation d'env. $< 0.3\%$; cependant, la dépendance directionnelle de la perturbation et d'un risque de détachement de bancs au toit n'est pas adéquatement représenté ici.

Comme il a été décrit ci-dessus, les processus de convergence continus, qui s'accompagnent d'une redistribution des contraintes dans la zone proche du contour, conduisent à la perturbation du terrain salifère, qui se traduit par des dégradations mécaniques dues à la transgression de la limite de dilatation (Figure 6).

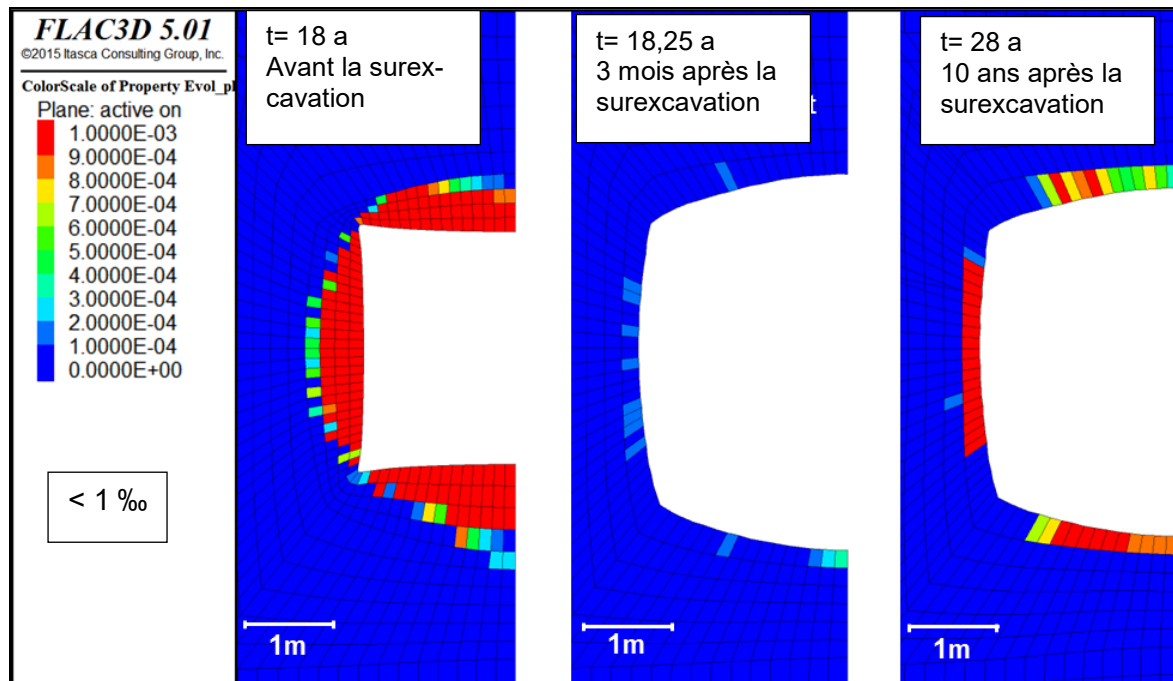


Figure 6 Zones de dilatation au niveau du contour de galerie avant la surexcavation de la zone EDZ (à gauche), État 3 mois après la surexcavation (milieu) et État 10 ans après la surexcavation, galerie maintenue ouverte, à droite) – Section verticale au milieu du modèle $x = 0 \text{ m}$

Dans l'illustration sur le côté gauche de la Figure 6, ces zones perturbées (augmentation du volume résultant des contraintes de cisaillement = dilatation) sont montrées à divers états de progression de dilatations. La représentation des zones de dilatation se rapporte à la valeur de $\varepsilon_{\text{vol,pl}} < 1 \text{ ‰}$, c'est-à-dire que les zones matérialisées en rouge excèdent cette valeur. L'illustration montre que, par analogie à la Figure 4, l'étendue de la zone EDZ est significativement plus faible que le contour du terrain détendu. Selon la Figure 6 ($\varepsilon_{\text{vol,pl}} \leq 0.1 \text{ ‰}$), l'étendue de la zone EDZ au niveau du toit ou des parements est inférieure à 1 m et d'environ 1 m au niveau du mur.

L'illustration du milieu de la Figure 6 montre le moment situé 3 mois après la surexcavation de la zone EDZ avec des valeurs de déformation très faibles (en bas : $\varepsilon_{vol,pl} = 0,4 \text{ ‰}$). On peut par conséquent s'attendre à ce qu'une zone EDZ va se former immédiatement après l'intervention.

Pour l'évaluation de la progression de la zone EDZ dans le temps, la galerie surexcavée est maintenue ouverte dans les calculs pour une période de 10 ans, à titre de scénario possible. L'illustration à droite de la Figure 6 montre la distribution des zones de dilatation. Il apparaît clairement que la dégradation continue de progresser, particulièrement au niveau des parements et du mur.

Les présents résultats de modélisation de la progression de la dégradation des galeries prévues pour les travaux de scellement confirment ce qui suit :

- Les processus postulés en général ou pour d'autres sites d'implantation dans les sections qui précèdent s'appliquent également au site de StocaMine
- Du fait de la géométrie rectangulaire relativement défavorable des galeries, des dégâts significatifs peuvent survenir, tout particulièrement au niveau du milieu des zones de contour actuelles, qui forment une zone EDZ et peuvent devenir des zones d'infiltration hydrauliques efficaces
- Avec la surexcavation du contour mise en œuvre ici, la zone EDZ n'a été éliminée qu'en partie, tout en créant instantanément une nouvelle zone de dégradation, indépendamment de cela, qui progresse à mesure du temps de repos.

Selon l'expérience de l'expert, une période de repos de plusieurs mois jusqu'à six mois n'est pas critique pour la construction des structures de scellement dans des conditions favorables au niveau du site d'implantation. Dans le cas d'une interruption prolongée, l'état du contour doit être réévalué avant de débiter les travaux de construction de l'élément d'étanchéité. Une nouvelle surexcavation pourrait alors s'imposer pour préparer le contour de mise en œuvre de l'élément. En raison des conditions défavorables présentes au sein du site de Stocamine, une réduction significative du temps de repos critique doit être attendue, nécessitant des mesures techniques supplémentaires à partir d'une période de repos de 4 mois.

3 Avis d'expert

Au regard du niveau de connaissances spécifiques du site des experts, impliqués dans le processus d'étude du projet depuis 2010, et compte tenu du retour d'expérience obtenu sur d'autres sites (dont la mine Asse II, un site de stockage ultime géré par la société fédérale allemande Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), l'installation de revalorisation/sécurisation de vides miniers par le traitement de déchets Grube Teutschenthal de la société GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG (GTS)), les experts ont élaboré l'avis ci-après quant à l'interruption forcée des travaux :

- Du point de vue des experts, il n'y a aucun doute que la mise en œuvre rapide du présent concept de sécurisation, par la construction d'éléments d'étanchéité en béton de saumure et la réalisation de mesures d'accompagnement, y compris la réalisation de serrements en havrils de sel gemme, permettra le confinement sûr à long terme des contaminants dans le site de stockage de déchets StocaMine.
- Selon l'évaluation des experts, la construction des barrages de scellement aux sites d'implantation 1 et 2 ne restreint pas la possibilité de déstockage des déchets présents dans la zone de stockage, car celle-ci reste accessible par d'autres gale-

ries. Il est à noter que la construction des barrages n° 3, 4, 5 et 8, telle que prévue à l'origine, ne fait plus obstacle à un déstockage éventuel. De ce fait, le déstockage pourra en principe être entrepris.

La poursuite des travaux qui ont d'ores et déjà été entamés sur les sites visés ci-dessus, avec des méthodes techniques appropriées, ne dépend donc pas de la décision finale concernant la gestion définitive des déchets présents au fond. Bien au contraire, la mise en place du barrage de scellement contribue à stabiliser la zone environnante.

- En ce qui concerne la faisabilité générale et le planning de l'ensemble des travaux miniers dans la zone du site de stockage de déchets, il faut savoir que le système de soutien des piliers dans la zone de stockage et dans le périmètre des galeries d'accès présente d'ores et déjà des dégradations significatives et visibles (décollement de blocs du mur et du toit, fissures visibles au niveau des parements). Puisque ces structures représentent des chemins d'infiltration hydrauliques, le contour endommagé doit être surexcavé aussi loin que possible avant la mise en place des barrages de scellement. Pour cela, des exigences minimales avaient été déduites au titre de la planification du calendrier des travaux.

Au niveau des sites d'implantation de barrage 1B et 2B, les travaux miniers de surexcavation ont d'ores et déjà été réalisés conformément à ces exigences minimales. Cependant, l'état constructif n'est pas un état de construction statique, mais un état sujet à des dynamiques qui évoluent dans le temps, liées aux propriétés spécifiques du sel gemme du terrain environnant, malgré les mesures de sécurité prises (p. ex. pose de boulons).

Par opposition à la roche solide (cristalline) et/ou à des mesures de construction au jour avec des matériaux de construction conventionnels, l'évolution des dommages dans le sel gemme au niveau du contour des vides miniers n'est pas constante, mais progresse dans le temps sous l'effet de la convergence. Cela signifie qu'en fonction des dynamiques de ce processus dans le temps, et en présence d'un taux de convergence très élevé d'environ 0,9 % par an, la dégradation continue de progresser. Cela signifie qu'au regard de l'intégrité hydraulique globale, les conditions d'installation vont se dégrader avec le temps, à force de laisser la galerie ouverte.

- Des mesures in situ réalisées à d'autres positions montrent que d'une part, la surexcavation du contour n'élimine qu'une partie de la zone endommagée (EDZ) et de l'autre, que la géométrie de section rectangulaire, comme c'est également le cas du site de stockage de Stocamine, facilite la formation de zones endommagées au niveau des parements et du toit en raison de la présence de fortes concentrations de contraintes.

Ces résultats de mesure ont été confirmés par une modélisation géomécanique de l'intégrité du barrage pilote réalisée pour StocaMine (IfG, 2015, /10/).

- Selon les retours d'expérience disponibles, une interruption des travaux pouvant aller jusqu'à six mois, dans des conditions favorables, n'est pas critique pour la construction d'ouvrages/de barrages de scellement. Cependant, au vu des conditions géologiques et géomécaniques défavorables du site de StocaMine, des dommages significatifs sont à craindre même avant l'expiration d'une période de six mois.

Par conséquent, dans l'éventualité d'interruptions allant au-delà de ce délai, l'état du contour devra être réévalué individuellement pour chaque site, avant de débiter, ou de continuer, les travaux de construction des barrages de scellement.

- En même temps, les experts estiment qu'après des interruptions prolongées, la probabilité d'avoir à effectuer des travaux de surexcavation des contours présentant des décollements avant toute construction des barrages de scellement sera très forte. Cela entraîne inévitablement des sections de barrages de scellement plus grandes, avec une grande probabilité de survenance des effets suivants :
 - a. dégradation de la stabilité du toit par l'agrandissement des portées et la réduction des épaisseurs de la couche de sel gemme par rapport aux couches de marne critiques, ayant une tendance à la fissuration (au décollement) ; il s'ensuit :
 - i. la nécessité d'un nouveau boulonnage, ce qui affecte l'intégrité structurelle par manque de stabilité à long terme de ces installations techniques ; on veille donc soit à les enlever dans la mesure du possible, ou à en réduire le nombre au minimum
 - ii. la nécessité de nouvelles surexcavations du contour, pour assurer l'atteinte des exigences minimales applicables aux contours des parements, ce qui entraîne notamment une nouvelle réduction des couches de sel, importantes au regard de la sécurisation du toit, par la surexcavation de ce dernier
 - b. un agrandissement des dimensions du barrage de scellement, et par conséquent, un surcroît de mesures techniques et de dépenses, de même qu'un allongement significatif de la période permettant l'atteinte de l'objectif de sécurisation
 - c. la nécessité d'obtenir un nouvel avis d'expert pour les sites d'implantation de barrage 1 et 2 et adaptation des plans

Puisque la mise en œuvre technique du déstockage de l'ensemble des déchets semble discutable au vu des difficultés soulevées par la technologie et la sécurité minières, la première prémisses pour une évaluation des effets possibles devra être que la suspension actuelle des travaux de construction ne devra ni affecter, ni compromettre la sécurité opérationnelle et à long terme ; cela signifie qu'en définitive, le confinement sûr à long terme, qui sera probablement requis, serait rendu plus difficile.

Le processus géomécanique essentiel à prendre en compte pour l'évaluation est le processus de dégradation inévitable dans le sel gemme, qui débute dès l'excavation des vides miniers, et qui, en fonction de la période d'interruption, entraîne l'effondrement des vides miniers et leur fermeture possible.

Cette convergence du sel gemme peut donc être considérée comme un effet positif, d'une part, avec la cicatrisation des chemins d'infiltration hydrauliques (par la convergence des terrains adjacents sur les structures de barrage, avec la fermeture de la zone EDZ), et de l'autre, elle peut entraîner une détérioration progressive, avec un élargissement de la zone EDZ dans les vides miniers toujours ouverts, qui, par l'agrandissement de la section transversale endommagée, agrandit le défi technique de fermeture des vides miniers.

La survenance des processus de convergence et la dégradation progressive des contours des vides miniers sont des faits géomécaniques avérés, qui aggravent en permanence la situation présente dans le site de stockage souterrain de déchets StocaMine. Dans le contexte des sites d'implantation de barrage 1 et 2, cela signifie qu'une interruption des travaux de construction des barrages de scellement pendant une période excédant 4 mois entraînera des réactions géomécaniques qui exigeront impérativement des mesures techniques supplémentaires (p. ex. pose de boulons pour la stabilisation du toit, surexcavation de la zone de contour perturbée (EDZ)). Toute modification des sections de galerie

à sceller qui en résulterait nécessiterait une actualisation des études existantes. Dans l'optique de conserver au minimum les rapports actuels entre section de galerie et longueur d'ouvrage, un allongement des barrages de scellement serait indispensable. Or cela semble quasiment exclu au vu de la géométrie des galeries existantes. Pour résumer, une interruption prolongée des travaux dans le périmètre des sites d'implantation de barrage n° 1 et 2 ne fera qu'accroître les défis techniques d'ores et déjà considérables. **La réduction du niveau de sécurité au niveau des éléments de soutien et des sections de scellement dans le sel gemme est telle qu'il ne reste qu'une seule option possible à l'expert : recommander la reprise la plus rapide possible des travaux interrompus.**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES PERTINENTES

- /1/ 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.
- /2/ 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.
- /3/ 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.
- /4/ CESAME (2020) : Mines de Potasses d'Alsace – Secteur Ouest : Rapport d'analyse des données du suivi des niveaux de surface et des niveaux d'ennoyage ; ANNEE 2020 (en réponse à l'article 10-2-2 de l'AP du 23 Mars 2017), 141 pages.
- /5/ 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.
- /6/ 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.
- /7/ ERCOSPLAN (2019a) : 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.
- /8/ ERCOSPLAN (2019b) : Rapport de caractérisation géologique et géotechnique des sites d'implantation des ouvrages de barrage prévus dans le site de stockage souterrain de déchets StocaMine. -ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, Erfurt, 2019.
- /9/ ERCOSPLAN (2022) : Évaluation de la réalisation constructive de l'ouvrage et des résultats du monitoring du barrage pilote (StocaMine).- Institut für Gebirgsmechanik Leipzig (IfG) et ERCOSPLAN, 31/01/2022.
- /10/ INERIS (2011) : 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.

- /11/ IfG (2015) : Integritätsnachweis für Widerlager - Streckenverschluss StocaMine. [Justification de l'intégrité mécanique - culée / ouvrage de scellement de galerie Stocamine] - Institut für Gebirgsmechanik Leipzig GmbH, 46 p., Leipzig, 12/11/2015.
- /12/ INGEROP (2021) : Confinement définitif du site de stockage souterrain Stocamine.
- /13/ ITASCA (2016) : Stockage de Wittelsheim. Évaluation des flux potentiels de saumure contaminée en considérant le remplissage des blocs vides du stockage avec des harvris de sel et des barrages en béton spécial. - Technical Report (Rapport technique) 16R-006A1, ITASCA Consultants, S.A.S., Ecully Cedex, 03/2015, 06/2016, 40 pages.
- /14/ MDPA (2016) : Projet de conception d'ouvrages de scellement de galerie. – Courrier électronique de MDPA du 27/05/2016, Wittelsheim, 2016.
- /15/ 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.
- /16/ Popp, T., Minkley, W., Wiedemann, M. & Salzer K. (2014). Gas-pressure induced integrity of salt formations. [Intégrité de formations salines induite par la pression de gaz] Publié dans : R. Shaw (éd.). Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Repositories. [Génération et migration de gaz dans les sites de stockage de déchets radioactifs souterrains] Geological Society. London, Special Publications, 415, p. 107-122.
- /17/ Salzer, K. : Theorie und Berechnungsmodelle zur Untersuchung der Auslösungsvorgänge von Gas-Salz-Ausbrüchen im Kalibergbau. [Théorie et modèles de calcul pour l'étude des processus de déclenchement de coups de gaz dans les exploitations de potasse] Périodique "Freiburger Forschungshefte", vol. A 787, 1989.
- /18/ Salzer, K., Schreiner, W. et Günther, R. M. (2005). Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) – calculations and measurements for galleries in rock salt. [Excavation de la zone perturbée ou endommagée (EDC) - calculs et mesures pour les galeries creusées dans le sel gemme] Publié dans : Davies, C. et Bernier, F. (éd. ; 2005), "Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories – Proceedings of a European Commission Cluster Conference and Workshop" [Impact de l'excavation de la zone EDZ sur la performance de sites de stockage géologiques de déchets radioactifs, Actes de la conférence et de l'atelier de la Commission Européenne"], tenu à Luxembourg du 3 au 5 novembre 2003. Rapport de la Commission Européenne n° EUR 21028.
- /19/ Sitz, P. et al. : 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] Rapport final du projet de recherche cofinancé par le BMBF réf. 02C05472 et 02C0902, 2003