Sommaire

RÉALISATION D'UNE STATION DE TRAITEMENT PASSIF DES EAUX DE RÉSURGENCE MINIÈRE SUR LE SITE DE SIMON 5 (FORBACH)

WATER PASSIVE TREATEMENT PLANT BUILD FOR MINE DRAINAGE OF SIMON 5 SITE (FORBACH)

Gaël BELLENFANT[1], Cécile CLEMENT[2], Véronique HOANG[1], Jean-Frédéric OUVRY[2], Roger LEVICKI[3]
[1] *BRGM-DPSM-UPM, France*
[2] *ANTEA Group, France*
[3] *BRGM-DPSM-UTAM Est, France*

RÉSUMÉ – Dans le bassin houiller lorrain, afin de préserver la ressource en eau de la nappe des grès du Trias inférieur (GTi) suite à l'arrêt des travaux miniers, il est prévu la mise en service en 2013 d'une station de pompage associée à une station de traitement passif des eaux d'exhaure. Les bassins de la station de traitement sont étanchés par une géomembrane PEHD 2mm. Lors des travaux de terrassements, des fissures ouvertes liées aux affaissements miniers ont été mis en évidence en fond et flancs de bassins. Ces aléas ont nécessité un traitement des fissures et l'installation d'une géogrille de renforcement pour reconstituer une surface favorable à la mise en place de la géomembrane. Le présent article montre le dimensionnement des géosynthétiques, les choix des produits, les calepinages.
Mots-clés : exhaure minier, traitement passif des eaux, géomembrane, géogrille

ABSTRACT – In the coal mining French Lorraine area, a pumping installation with a water passive treatment plant will be operational in 2013 to protect water resources of the lower Trias sandstone aquifer (GTi) after the end of mining works. The treatment plant basins are sealed with a 2 mm HDPE geomembrane. During the earthworks, cracks 8 cm to 10 cm wide caused by the mining subsidence were revealed on the basins bottom and sides. These areas were treated to enable the implementation of the geomembrane using a concrete filling and a reinforcing geogrid. This article describes the geosynthetic design, products choice and installation.
Keywords: mine drainage, water passive treatment plant, geomembrane, geogrid

1. Introduction

1.1. Présentation du réservoir minier

1.1.1. Création du réservoir minier

Une exploitation minière se caractérise généralement par des ouvrages souterrains. Ces vides générés dans la roche exploitée sont à l'origine d'une fracturation surimposée modifiant la perméabilité originelle de l'encaissant. Les fractures qui se développent à l'aplomb des zones exploitées sont ouvertes et jouent un rôle de drain ; les eaux peuvent donc s'infiltrer vers les travaux.

L'hydrogéologie locale se trouve alors modifiée sur une emprise correspondant à la zone ayant été influencée par les travaux miniers.

Pendant l'exploitation, les eaux infiltrées sont pompées et remontées vers le jour, ou bien évacuées gravitairement par galerie basse, lorsque la topographie le permet.

Après arrêt de l'exhaure minière, les zones ayant été influencées par l'exploitation font l'objet d'un remplissage progressif par les eaux d'infiltration, aboutissant à la création d'un « réservoir ». Les limites de cet aquifère correspondent plus ou moins à l'enveloppe extérieure des travaux miniers.

À terme, le trop-plein du réservoir entraîne l'apparition d'émergences généralement situées aux points bas du système.

1.1.2. Qualité des eaux minières

Les eaux d'émergence minière se caractérisent par une charge minérale élevée avec notamment de fortes teneurs en fer et en manganèse (provenant du lessivage de la pyrite et des minéralisations secondaires associées aux formations lignifères). En effet, le fer et le manganèse, solubles dans les eaux de mine (potentiel redox et parfois un pH bas), précipitent à leur point d'émergence et entraînent l'apparition d'une turbidité élevée avec une coloration orangée typique, due aux hydroxydes de fer

précipités. Cette pollution n'a pas de caractère toxique pour l'homme mais peut détériorer les branchies des poissons et invertébrés.

C'est pendant les premières années après l'ennoyage des travaux miniers que l'eau de débordement présente la qualité la plus médiocre en ce qui concerne le fer, le manganèse et les sulfates. Il faut donc chercher à éviter les échanges d'eau de mine vers les autres aquifères dans les premières années suivant le remplissage des travaux miniers.

1.2. Bassin lorrain

1.2.1. Géologie du bassin houiller lorrain

Les travaux miniers de Lorraine ont exploité des couches de charbon situées en profondeur. Les veines de charbon sont intercalées entre des formations gréseuses, des schistes, des conglomérats, et appartiennent à l'étage du Westphalien.

Au-dessus du Westphalien se trouve le Stéphanien, qui appartient également au Carbonifère, mais qui, dans le cas présent ne renferme pas de charbon (contrairement à de nombreuses mines du centre et du sud de la France). Ce niveau a été en grande partie érodé si bien qu'il n'est pas présent dans tout le bassin.

Le Permien est en discordance sur le houiller, il est constitué de conglomérats avec localement un niveau plus argileux à la base.

Enfin, cet ensemble permo-carbonifère est recouvert par des terrains du Trias, constitués principalement de grès (Trias inférieur) puis de terrains marno-calcaires (Trias moyen et supérieur). Dans le secteur qui nous intéresse, c'est le Trias inférieur qui est à l'affleurement.

1.2.2. Hydrogéologie du bassin houiller lorrain

Le contexte hydrogéologique du site est le suivant (de bas en haut) :

- Aquifère minier :

  Le Houiller, lorsqu'il n'est pas exploité, est considéré comme très peu perméable (environ 10^{-7} à 10^{-9} m/s). Mais ces caractéristiques hydrogéologiques ont été localement modifiées par l'exploitation minière :
  - Bien que les vides générés par l'extraction du charbon soient généralement comblés, des vides demeurent : au niveau des zones exploitées proprement dites (porosité des remblais, galeries laissées vides, etc..), autour des zones exploitées du fait de la décompression des terrains (fracturation répartie jusqu'en surface et obéissant à des notions de zone d'influence des travaux miniers).
  - Comme décrit en introduction, la fracturation permet les infiltrations d'eau depuis les niveaux supérieurs.

  En dehors de la zone influencée par les travaux miniers, les terrains gardent un caractère très peu perméable.
- Formations semi-perméables :

  Les terrains du Permien qui recouvrent le Houiller ainsi que le Stéphanien sont originellement très peu perméables car leur matrice est fine. Mais comme le Houiller, ces terrains ont été localement fracturés par l'exploitation minière notamment dans certains secteurs où les travaux miniers approchaient ces formations. Ainsi, l'ensemble Permo-Stéphanien a perdu localement son caractère imperméable, ce qui a permis des infiltrations d'eau des terrains supérieurs vers la mine.
- Aquifère des grès du Trias inférieur (GTi) :

  Le Trias présente à sa base une épaisseur de grès poreux qui constitue la ressource en eau régionale, exploitée par des industriels et pour l'alimentation en eau potable.

  La surface piézométrique de l'aquifère des GTi n'est pas horizontale ; son sens d'écoulement est globalement orienté vers le Nord-Est avec des axes de drainage préférentiels vers le réseau hydrographique (Sarre).

1.2.3. Circulation hydrogéologique

Comme vu précédemment, dans le bassin lorrain (figure 1), l'exploitation minière a créé des fissures qui ont mis en liaison la mine et la nappe des GTi : la fracturation permet les infiltrations d'eau depuis les niveaux supérieurs. Dans le cas présent, la fracturation atteint la base de la nappe des GTi et la majorité de l'eau qui s'infiltre jusqu'à la mine provient de la nappe triasique. Des échanges ont donc été rendus possibles entre l'aquifère minier et l'aquifère des GTi. Ces échanges vont évoluer de la manière suivante :

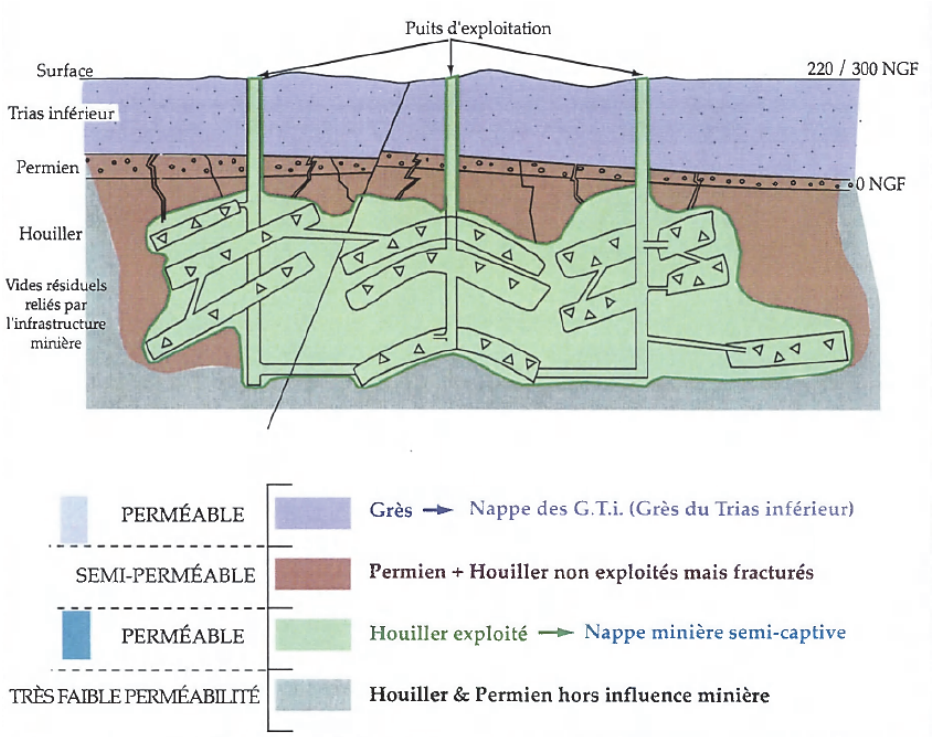


Figure 1. Schéma représentant le contexte hydrogéologique général sur le bassin houiller lorrain (source CESAME)

- Pendant l'exploitation minière, le niveau de la nappe des grès a baissé du fait de l'exhaure dans les mines sous-jacentes (débit de l'ordre de 60 à 65 m^3/min).
- Avec l'arrêt de l'exploitation et de l'exhaure minière, les eaux s'infiltrent par la fracturation liée à la mine depuis les niveaux supérieurs jusqu'à la base de la nappe des GTi : la mine s'ennoye progressivement alimentée par les pertes de la nappe triasique.
- Lorsque les niveaux d'eau de la mine et de la nappe des grès seront proches, le niveau de la nappe des grès va remonter progressivement (par diminution des pertes vers la mine).

2. Dispositifs de pompage et de traitement des eaux minières

Pour éviter que l'eau de mine, très minéralisée, ne crée de panaches minéralisés dans la nappe des GTi, il est prévu de mettre en place des pompages dans les travaux miniers afin de maintenir le niveau d'eau de l'aquifère minier en deçà du niveau d'eau de la nappe des GTi : ainsi les échanges d'eau se feront toujours de la nappe des GTi vers la mine et non l'inverse afin de préserver la nappe des GTi d'éventuelles intrusions d'eau de mine trop minéralisée.

Par ailleurs, les eaux minières très minéralisées devront être traitées après pompage et avant rejet dans le milieu naturel. C'est pourquoi, il est prévu de mettre en place des stations de traitement des eaux au niveau des stations de pompage pour protéger le milieu superficiel par rapport aux eaux de débordement de la mine.

Sur le site de Simon 5, la solution retenue consiste à commencer les pompages dans ce puits dès que le niveau d'eau dans la mine aura atteint 80 m NGF, de façon à entretenir en permanence une légère dépression piézométrique dans la mine par rapport à la nappe des GTi.

En sortie de station, le rejet devra respecter les valeurs-limites de l'arrêté préfectoral n° 2009 -DEDD 14 - 3 en date du 31 juillet 2009 suivantes:

- matières en suspension (MES) totales: 50 mg/l
- fer, aluminium et composés (Fe^+Al) : 2 mg/l
- manganèse et composés (Mn) : 1 mg/l

Les stations de traitement ont été dimensionnées pour assurer l'élimination du fer :

- lors du « début des pompages » : avec des concentrations plus fortes (jusque 100 mg/l) mais les débits traités seront alors plus faibles (1 ou 2 m^3/min) pour laisser la nappe des grès retrouver un niveau proche de celui qu'elle avait avant l'exploitation minière ;

- lors du «fonctionnement régulier» : l'équilibre piézométrique étant rétabli, il faudra pomper environ 15 m^3/min dans la mine pour éviter une pollution de la nappe des grès. Mais les teneurs en fer auront toutefois normalement nettement diminué (teneurs attendues de 4 à 10 mg/l de fer).

À terme, lorsque les débits augmenteront avec la baisse de la concentration en fer, le fonctionnement pourra se faire en utilisant uniquement la moitié du dispositif de traitement.

À plus long terme (au bout de 20 à 30 ans d'après les études), la nappe des grès aura retrouvé un équilibre, les pompages dans la mine seront toutefois maintenus pour éviter que les eaux de mine ne passent dans la nappe. Les pompages pourraient fonctionner alors pendant plusieurs dizaines d'années si la teneur en fer et la minéralisation de l'eau restaient élevées.

Ainsi, les pompages miniers et les stations de traitement associées ont pour objectifs principaux :

- préserver la qualité de la nappe des GTi vis-à-vis d'un risque de minéralisation par l'eau de l'aquifère minier en maintenant constamment le niveau de ce dernier en dessous de celui de la nappe des GTi ;
- contribuer à la prévention du risque de remontée de nappe en zone bâtie en limitant l'amplitude de sa remontée par le maintien des infiltrations de la nappe vers le réservoir minier.

Sur le site de Simon 5, les installations prévues et autorisées dans le cadre de l'article 2 du décret n° 95-696 du 9 mai 1995 modifié relatif à l'ouverture des travaux miniers et à la police des mines comportent :

- un équipement de pompage situé au puits Simon 5, permettant dans un premier temps d'accompagner la remontée de la nappe de la cote +80 m NGF jusqu'à la cote +193 m NGF et dans un second temps de stabiliser le niveau de l'eau du réservoir minier à une cote choisie (proche de la cote +193 NGF) ;
- une station de traitement passif de l'eau minière sera opérationnelle dès la mise en route du pompage au dernier trimestre 2012.

3. Présentation du site

3.1. Contexte réglementaire

Une synthèse réglementaire a été réalisée et a permis de recenser les principales contraintes réglementaires concernant le projet (Guillermin A.L., Ouvry J.F.– Études de Projet)

Les principales contraintes réglementaires concernent :

- le classement du site en ZPPAUP,
- la présence d'une espèce protégée (crapaud vert, *Bufo viridis*),
- la réalisation d'une étude de danger pour ce qui concerne la stabilité des digues des bassins, qui sera inspirée du décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques.

3.2. Occupation du sol

La zone concernée par le projet est en friche, une partie a été déboisée (arbres coupés, souches broyées, terre végétale décapée afin d'être réutilisée sur le site). Des vestiges industriels et des canalisations d'eau pluviale ont été observés. Le site est bordé au sud par une zone boisée pentée en direction du fossé d'écoulement Bruchgraben, canalisé dans cette zone.

4. Projet

4.1. Description des travaux

Le système de traitement passif dimensionné par le DPSM-UTAM Est et vérifié par Antea Group comprend les éléments suivants (figure 2):

- 2 cascades d'oxygénation.

L'oxygénation a pour but de saturer l'eau en oxygène,

- Oxydation du fer ferreux en fer ferrique $Fe^{2+} + 1/4\ 0_2 + H^+ = Fe^{3+} + 1/2\ H_20$

- 2 bassins de décantation.

L'enrichissement de l'eau en oxygène, permet la transformation du fer dissous en hydroxyde de fer, qui précipite et forme des particules qui vont ensuite se déposer dans un bassin au volume suffisant pour assurer à la fois le temps d'oxydation du fer et la décantation des hydroxydes.

- Hydrolyse de l'ion ferrique en oxyhydroxyde $Fe^{3+} + 2\ H_20 = FeOOH\ (suspension) + 3\ H^+$

- Sédimentation des oxyhydroxydes solides FeOOH (suspension) = FeOOH (sedimenté)

- 2 lagunes,

La réaction d'oxydation du fer se fait en priorité sur celle du manganèse. Ce n'est donc qu'après oxydation du fer que le manganèse pourra également s'oxyder puis précipiter. Ce phénomène sera assuré dans des lagunes de faible profondeur plantées de macrophytes, favorisant les phénomènes biochimiques, l'oxygénation de l'eau et la décantation des hydroxydes.

- > $Mn^{2+} + 1/2H_20 + 2H+ = Mn^{4+} + H_20$
- > $Mn^{4+} + 2H_20 + 2H+ = Mn0_2 + 4H^+$

- dispositif de by-pass des bassins et des lagunes,
- dispositif de contrôle permanent du débit et de la qualité des eaux avant rejet dans le milieu naturel,
- dispositif d'alerte en cas de débordement des bassins, avec coupure automatique du pompage.

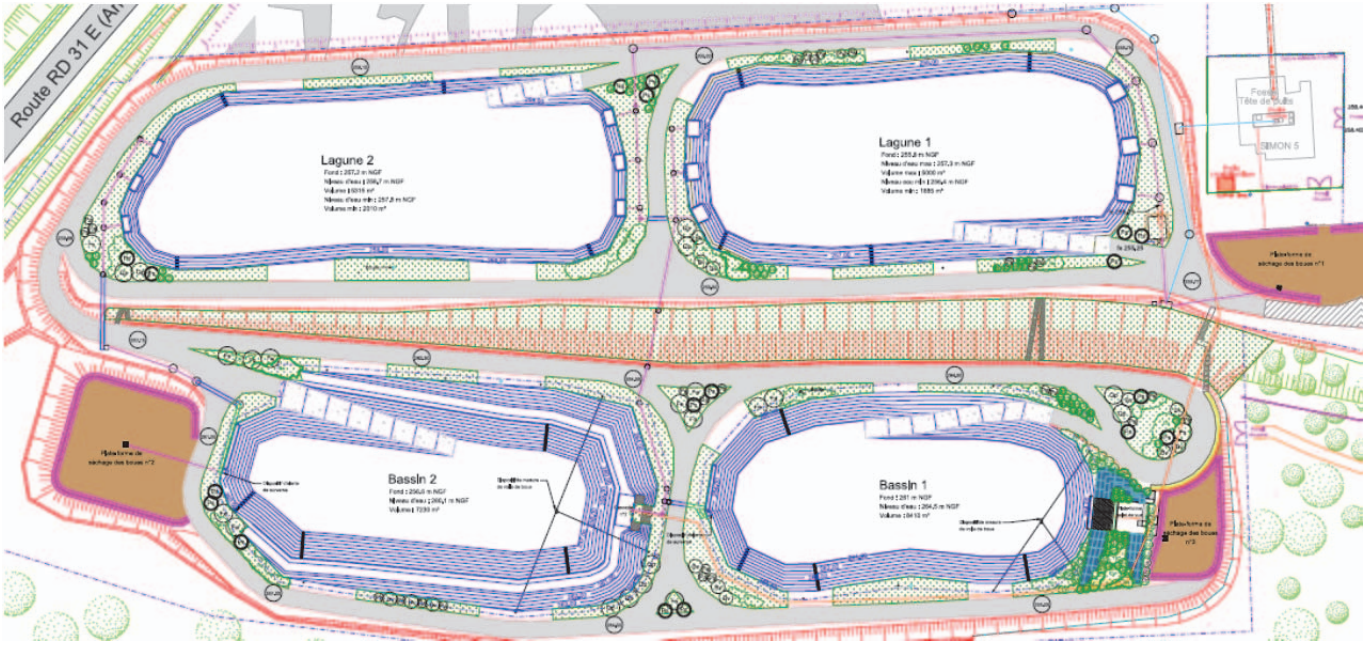


Figure 2. Plan projet des bassins et lagunes

4.2. Description du dispositif initial d'étanchéité des bassins de décantation

L'étanchéité du fond des bassins 1 et 2 est assurée par un dispositif d'étanchéité par géomembrane comprenant de bas en haut :

- des bandes drainantes associées à des évents, afin d'évacuer les éventuels gaz qui remonteraient à la surface concomitamment à la remontée de la nappe des GTi ;
- un géotextile anti-poinçonnant qui a pour rôle de protéger la géomembrane contre le risque de poinçonnement provoqué par le substratum ;
- une géomembrane en PEHD de 2 mm certifiée ASQUAL qui assure l'étanchéité (9050 m^2 pour les deux bassins)

4.3. Description du dispositif d'étanchéité des lagunes

L'étanchéité du fond des lagunes 1 et 2 est assurée par un dispositif d'étanchéité par géomembrane comprenant de bas en haut :

- des bandes drainantes associées à des évents, afin d'évacuer les éventuels gaz qui remonteraient à la surface concomitamment à la remontée de la nappe des GTi, et pour évacuer les éventuelles surpressions d'eau.
- un géotextile anti-poinçonnant qui a pour rôle de protéger la géomembrane contre le risque de poinçonnement provoqué par le substratum.
- une géomembrane en PEHD de 2 mm certifiée ASQUAL qui assure l'étanchéité. (9750 m^2 pour les deux lagunes)

- un géotextile anti-poinçonnant qui a pour rôle de protéger la géomembrane contre le risque de poinçonnement provoqué par le matériau de recouvrement supportant la végétation.

Le choix d'une étanchéité par géomembrane PEHD d'épaisseur 2mm est justifié par une mise en œuvre et un soudage aisés. Cette géomembrane présente de bonne résistance aux UV. La géomembrane posée est une Geonap 2mm de SIPLAST ICOPAL dont les caractéristiques du certificat de qualité ASQUAL sont les suivantes :

Caractéristiques	Références	Valeurs
Épaisseur	EN 1849-2	≥ 2 mm
Masse surfacique	EN 1849-2	1830 g/m^2
Résistance au poinçonnement statique	NF P 84-507	= 670 N(
Résistance au seuil d'écoulement	EN 12311-2	= 33.4 kN/m selon SP et ST(
Déformation au seuil d'écoulement	EN 12311-2	= 11.8 % selon SP et ST
Résistance à 250 % de déformation	NF P 84-501	= 24 kN/m
Niveau conventionnel d'étanchéité	NF P 84-515	≤ 10^{-4} m^3/m²/j
Masse volumique de résine	ENISO 1183-1	comprise entre 0,93 et 0,95 g/cm^3
Teneur en noir de carbone	NFT 51 140	comprise entre 2 et 3 %
Dispersion en noir de carbone	ASTM D 55 96	A1 ou A2

Les bandes de géocomposite de drainage posées sont de type Interdrain GMG512 d'INTERMAS Geosynthetics, composé d'un géoespaceur en PEHD et d'un géotextile non tissé thermo-soudé sur chacune des deux faces, dont les principales caractéristiques sont

Caractéristiques	Références	Valeurs requises
Ouverture de filtration du géotextile	NF EN ISO 12956	≤ 170 µm
Résistance à la traction	NF EN ISO 10319	20 / 17 kN/m SP et ST
Capacité de débit du produit	NF EN ISO 12958	≥1.16 l m^{-1}.s^{-1} *(en SP pour gradient de 1 sous contrainte de 20 kPa*
Épaisseur sous 2 kPa /200 kPa	NF EN ISO 9863-1	5.8 / 5.2 SP et ST

Les géotextiles anti-poinçonnant posées sont de type P50 de TENCATE Geosynthetics en filaments continus non recyclés, non tissé aiguilleté et 100 % polypropylène. dont les caractéristiques du certificat de qualité ASQUAL sont les suivantes :

Caractéristiques	Références	Valeurs
Résistance à la traction	NF EN ISO 10319	≥ 34kN/m selon SP et ST
Résistance au poinçonnement	NF G 38019	≥ 2,5kN selon SP et ST
Masse surfacique	NF EN 965	≥ 500 g/m²

Les géotextiles anti poinçonnant ont de caractéristiques peu performantes, compte tenu du caractère peu agressif du substratum constituant la surface de pose et du matériau support de culture rapporté.

5. Réalisation des travaux

Les travaux ont été confiés aux entreprises suivantes :
- WEILER : lot terrassement,
- EUROVIA Bourgogne : lot étanchéité

Dans le cadre des travaux de terrassement, des zones des crevasses minières ont été mises en évidence au fond des bassins n° 1 et 2 (figure 3).

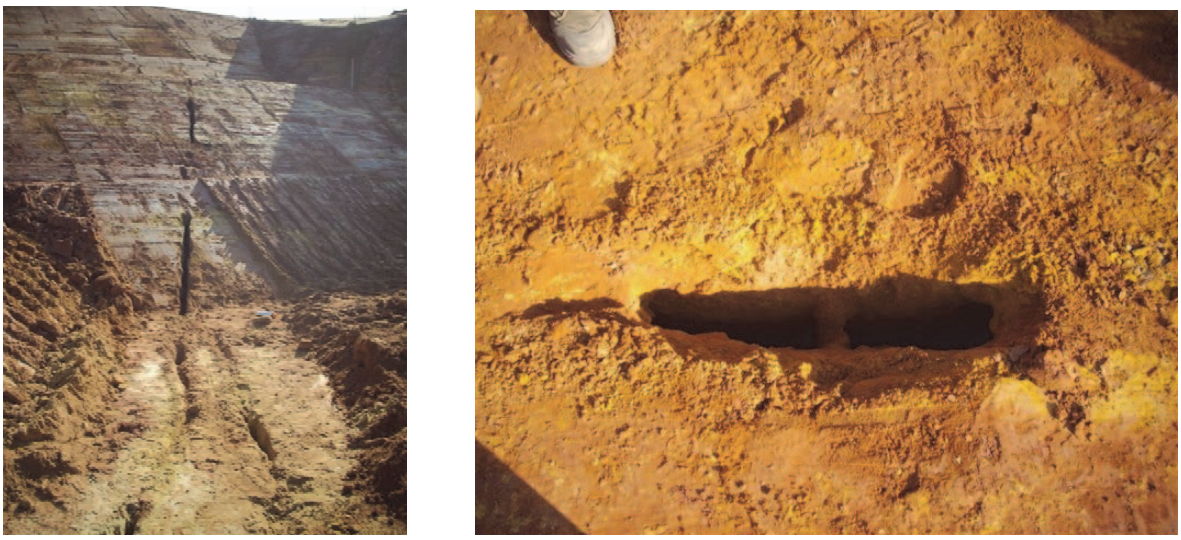


Figure 3. Photos de crevasses minières

La méthodologie suivante a été proposée et mise en œuvre pour traiter les crevasses visibles :

- le fond des bassins a été décaissé de 20 cm supplémentaires, cette épaisseur devant être reconstituée entre la géogrille et le dispositif d'étanchéité par géomembrane ;
- terrassement des lèvres des crevasses afin d'obtenir une section trapézoïdale de profondeur égale à 2 fois la largeur initiale de la crevasse (Figure 4) ;
- pose d'une planche perdue de coffrage ;
- mise en place d'une cage d'armature pour béton et coulage du béton.

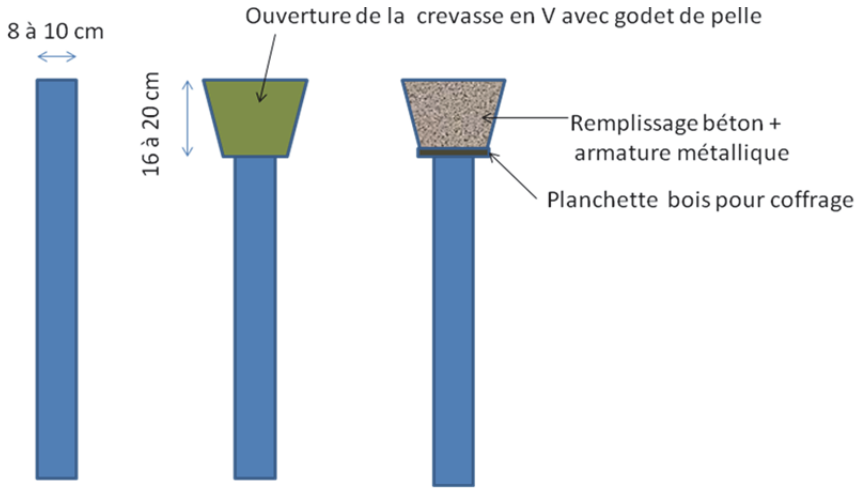


Figure 4. Schéma du traitement des crevasses minières

6. Dimensionnement de la géogrille de renforcement

Les documents généraux applicables sont ceux cités en bibliographie.

La crevasse minière est susceptible d'induire un tassement de la couche de matériau reconstituée sur la géogrille et ce sur une largeur D.

Ce tassement est susceptible de solliciter en traction la géomembrane au-delà du seuil d'écoulement et induisant un risque de défaut d'étanchéité.

Le dimensionnement a pour objet de définir les caractéristiques mécaniques d'un géosynthétique de renforcement permettant de limiter l'allongement de la géomembrane et donc les efforts dans celle-ci.

De manière sécuritaire, la fissure est considérée juste en dessous de la couche reconstituée.

Il est proposé de limiter l'allongement de la géomembrane à 2,25%, soit 5 fois moins que l'allongement à la valeur nominale du seuil d'écoulement (10%).

Le dimensionnement est réalisé suivant la norme BS 8006 (figure 5).

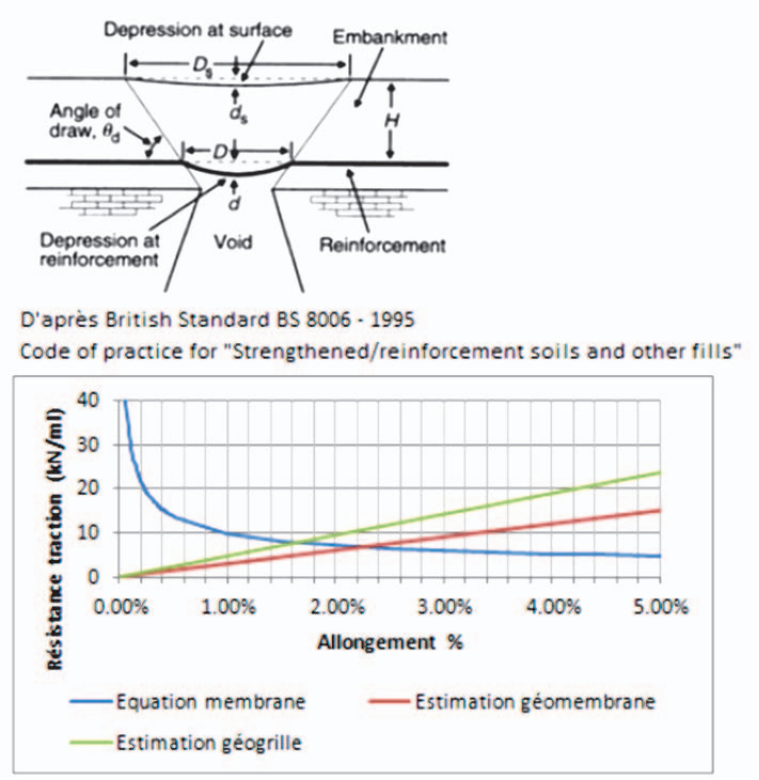


Figure 5. Extrait note de calcul, schéma de principe du calcul et courbe de résultats effort-déformation

L'équation de l'effet membrane est donnée par la formule ci-dessous

$$\varepsilon_{max} = \frac{8\left(\frac{ds}{Ds}\right)^2 \left(D + \frac{2H}{\tan\theta_d}\right)^4}{3D^4}$$

avec

ε_{max} **:** allongement maximal dans le renforcement
ds/Ds : ratio de tassement admissible en surface
D : largeur du vide
H : hauteur du remblai
θ_d : angle de subsidence

L'effort maximal généré dans la géogrille pour un allongement de 2,25% est de 6,8 kN/m.

L'application des coefficients réducteurs à prendre en compte pour les géosynthétiques de renforcement font qu'il est nécessaire de poser une géogrille de renforcement de 32 kN/m.

Le géosynthétique de renforcement choisi et posé est une géogrille de type FORTRAC 40/40 35 T en PET ayant les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques	normes	valeurs
Résistance à la traction SP / ST	EN ISO 10 319	40 kN/ m
Résistance à la traction SP / ST à 3% d'allongement	EN ISO 10 319	12 kN/ m
Allongement à la rupture SP/ ST	EN ISO 10 319	≤ 10%

Les rouleaux ont pour dimensions 5 m de large et 200 m de long.

7. Pose des renforcements et de la géogrille

Les crevasses ont été traitées selon la méthode décrite précédemment (figure 6). La géogrille a été posée selon un plan de calepinage qui orientait la longueur du lé perpendiculairement à la direction de la crevasse (figure 7). Elle a été posée en trois semaines



Figure 6. Terrassement des crevasses – Bassin 2 – 05/04/12



Figure 7. Pose de la géogrille avec ancrage, mise en place des 0.20 m de limon et des bandes de dégazage

8. Conclusion

La découverte fortuite de crevasses minières lors du chantier a imposé de définir une méthodologie permettant de préserver l'intégrité de la géomembrane à l'aplomb des vides.
Pour cela la solution suivante a été retenue :

- obturation de la partie supérieure des crevasses par la coulée en place de longrines béton trapézoïdales,
- pose d'une géogrille de renforcement directement sur le fond de forme,
- mise en place de 20 cm de limon entre la géogrille et la géomembrane

Cette solution technique limite l'allongement de la géomembrane en cas de tassement des longrines ou d'apparition de vides similaires aux crevasses découvertes.

Cet aléa de chantier a été traité avec réactivité tant par le maître d'œuvre pour émettre une proposition méthodologique de reprise de ces crevasses et les notes de calcul associées que par le maître d'ouvrage pour la mise en place d'un avenant de travaux. Le coût total des travaux s'élève à 2,5 M€ dont l'étanchéité représente 10% (250 k€). Le surcoût des travaux supplémentaires pour le traitement des crevasses minières s'est élevé à 150 k€ se répartissant 100 k€ pour l'étancheur et 50 k€ pour le terrassier. Ce dynamisme, complété par la disponibilité d'un stock de géogrille chez un fournisseur correspondant aux spécifications recherchées et aux surfaces à traiter, a permis d'éviter un arrêt de chantier coûteux.

Les figures 8 et 9 montrent deux vues du chantier.



Figure 8. Ouvrages bassins 1 et 2 en phase d'essais hydrauliques



Figure 9. Vue générale

8. Références bibliographiques

CESAME pour Charbonnages de France (2004) Dossiers techniques des installations hydrauliques au sens de l'article 92 du code minier - Annexe 2 - Scénario de gestion de l'eau après l'arrêt de l'exhaure minière des secteurs CENTRE et EST (en cas de morcellement de l'aquifère minier) - Bassin minier de LORRAINE.

Préfecture de la Moselle (2009), Arrêté Préfectoral n° 2009-DEDD 14-3 prescrivant des mesures de police des mines portant sur les modalités d'exploitation de la station de pompage et de traitement des eaux minières de LA HOUVE, sise à Creutzwald, relevant de l'article 92, 2ème alinéa du Code minier.

Guillermin A.L., Ouvry J.F. Maîtrise d'œuvre pour la réalisation d'une station de traitement passif des eaux de résurgence minière sur le site de Simon 5 (57600 Forbach) – Études de Projet Rapport Antea Group A 62878/C (2011).

Norme britannique BS8006 (1995). Code of practice for "Strengthened/reinforcement soils and other fills".

Guide de recommendations allemandes « Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGEO ».

Méthode RAFAEL initialement développée pour dimensionner les renforcements des couches techniques des voies ferrées construites sur des vides potentiels.

Sommaire