

Restauration de site minier abandonné Le cas d'Aldermac (Québec)

Anaïs Daudet

Rapport de stage de Master 2 « Géorressources et Environnement »
Parcours Risques/Sites et Sols pollués.

UQAT / Chaire de Recherche du Canada - Restauration de Sites miniers
Abandonnés

Maître de stage : Bruno Bussière (UQAT/URSTM)
Professeur référent : Olivier Atteia (EGID)

Préambule

« Ce rapport est le résultat d'un travail effectué par un étudiant de Master STEE-Spécialité Géoressources et Environnement 2^{ème} année Parcours Risques.

Ce document est tel qu'il a été remis par l'étudiant et ne comporte aucune correction ni commentaire de l'ENSEGID. Ce rapport ne doit pas être considéré comme un exercice de formation. »

Résumé

Ce document est un rapport de stage de Master 2 Géoressources et Environnement option Risques : Sites et Sols pollués.

L'industrie minière est omniprésente dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue (Ouest de la province du Québec-Canada) notamment le long de la « Faille Cadillac » aux alentours du 49^e parallèle et passant par Rouyn-Noranda. Depuis le début du XX^e siècle, l'exploitation de gisements d'Or et de Cuivre, entre autre, connaît un succès notable mais n'est pas sans conséquence pour l'environnement. En effet les rejets miniers (résidus comme stériles) qui sont très importants, contiennent parfois des minéraux sulfurés susceptibles de réagir avec l'eau et l'oxygène pour produire de l'acide sulfurique. Ce phénomène s'appelle le drainage minier acide (DMA).

Les géomembranes sont des géosynthétiques visant à assurer l'étanchéité entre les résidus miniers et l'eau qui provient des précipitations météorologiques de façon à stopper le DMA.

Durant 6 mois, un travail de recherche au sein de l'institut de recherche en mine et en environnement (IRME) a été réalisé sur des tests in-situ d'efficacité d'une méthode active de restauration minière : le recouvrement par géomembrane (GM).

L'objectif de ce travail est de présenter les recherches bibliographiques qui ont été menées sur le sujet ainsi que les expériences de terrain qui ont par la suite été engagés.

Abstract

This document is an internship report of Master 2 Géoressources et Environnement option Risques : Sites et Sols pollués.

The mining industry is omnipresent in the Abitibi-Témiscamingue (western province of Quebec, Canada), especially along the "Cadillac Fault" next to the 49th parallel which crosses Rouyn-Noranda. Since the early twentieth century, the exploitation of gold and copper, among other minerals, meets a notable success, but not without consequences for the environment. Indeed tailings which represent very important volumes, sometimes contain sulphide minerals can react with water and oxygen to produce sulfuric acid. This is called acid mine drainage (AMD).

Geomembranes are geosynthetics which provide a seal between the tailings and meteoric water in order to prevent the DMA.

During six months, a research program within the institute of mining and environmental research was carried out on in-situ testing of the effectiveness of an active method of mining rehabilitation : geomembrane (GM) covering.

The objective of this work is to present the bibliographic research that has been led on this subject as well as the field experiments which have subsequently been realized.

Remerciements

Au terme de ces deux années de Master entre le Québec et la France, il m'est offert par ces quelques lignes la possibilité d'exprimer toute ma reconnaissance et mes remerciements. En effet grâce à toutes ces personnes, j'ai la sensation d'avoir atteint mes objectifs d'étude et de pouvoir entrer dans la vie active sur de très bonnes bases.

Mes premières pensées sont pour Bruno Bussière, mon maître de stage et directeur scientifique de l'IRME-UQAT qui m'a permis d'effectuer ce stage de recherche. Il a su m'accorder confiance, patience, disponibilité et soutien. J'ai appris énormément de choses et mon choix de poursuivre dans le domaine des Sites et Sols pollués s'est confirmé grâce à ces 6 mois d'expérience en Abitibi.

Je tiens aussi à remercier la Direction Générale de l'URSTM-IRME et à travers elle tout le personnel. Je pense particulièrement à Denis Bois, Directeur et Louise Labbé, adjointe administrative, sans qui mes démarches n'auraient pas été si simples.

De plus, je voudrais adresser un très grand merci au personnel technique des laboratoires. Je pense à Tony Grondin, Patrick Bernèche, et Yvan Poirier pour la grande aide et les conseils qu'ils m'ont apportés lors de mes différents travaux de terrain.

La participation aux travaux de terrain du Dr. Thomas Genty m'a également appris beaucoup de choses et je le remercie de m'avoir donné la possibilité de l'accompagner. Sans oublier la collaboration et les conseils du professeur Abdelkabar Maqsoud dans mes travaux de terrain. Je remercie aussi mon collègue stagiaire de la même période, Abdoulaye Sylla pour l'échange des idées autour du mon projet.

J'exprime également une pensée pour le personnel enseignant de l'EGID et de l'UQAM pour ces deux années de Master d'études très formatrices.

Je n'oublie pas bien sûr le soutien moral de ma famille, mes proches ainsi que mes colocataires et mon équipe de soccer sans qui ces 6 mois de stage n'auraient pas été aussi inoubliables.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Préambule..... | 2 |
| Résumé | 3 |
| Abstract..... | 3 |
| Remerciements..... | 4 |
| Sommaire..... | 5 |
| Table des illustrations..... | 6 |
| Introduction..... | 8 |
| I- CONCEPTS | 9 |
| <i>A/ Le drainage minier acide (DMA).....</i> | <i>9</i> |
| <i>B/ Les scénarios de restauration</i> | <i>11</i> |
| 1. Enlèvement des sulfures | 12 |
| 2. Exclusion de l'eau | 12 |
| 3. Exclusion de l'oxygène..... | 12 |
| 4. Les facteurs limitant | 13 |
| 5. Inventaire des principales méthodes de contrôle du DMA | 14 |
| II- RECOUVREMENT AVEC GEOMEMBRANE (GM)..... | 16 |
| <i>A/ Qu'est-ce qu'une géomembrane ?</i> | <i>16</i> |
| 1. Les propriétés recherchées d'une GM..... | 17 |
| 2. Comment une GM est-elle mise en place ?..... | 17 |
| <i>B/ Avantages et inconvénients des recouvrements par GM</i> | <i>20</i> |
| <i>C/ l'efficacité d'une GM.....</i> | <i>21</i> |
| 1. La durée de vie d'une GM | 21 |
| 2. Des tests in-situ | 23 |
| <i>D/ Objectifs du stage : Le cas de la restauration du site Aldermac.....</i> | <i>23</i> |
| III- CAS PARTICULIER : LE SITE ALDERMAC..... | 24 |
| <i>A/ Contexte environnemental et historique</i> | <i>24</i> |
| 1. Situation géographique | 24 |
| 2. Contexte Géologique..... | 25 |
| <i>B/ Historique du site.....</i> | <i>26</i> |
| <i>C/ Etat des lieux avant restauration.....</i> | <i>26</i> |
| <i>D/ Restauration réalisée.....</i> | <i>27</i> |
| <i>E/ Le suivi actuel.....</i> | <i>28</i> |
| IV- MATERIEL ET METHODE : TRAVAUX DE TERRAIN | 29 |
| <i>A/ Mise en contexte</i> | <i>29</i> |
| <i>B/ Présentation des équipements existants</i> | <i>31</i> |
| <i>C/ Idées directrices des travaux.....</i> | <i>33</i> |
| 1. Mesure des débits | 33 |
| 2. Injection de traceurs..... | 33 |
| 3. Excavation localisée..... | 35 |
| 4. Cartographier les marqueurs géomorphologiques de mouvement et arpenter la butte..... | 36 |
| <i>D/ Tests in situ : résultats et interprétation</i> | <i>38</i> |
| 1. Les excavations..... | 38 |
| 2. Les débits et traceurs | 43 |
| 3. L'arpentage de la butte | 47 |
| Conclusion..... | 49 |
| Bibliographie | 50 |

Table des illustrations

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Principe du DMA (source : www.rncan.gc.ca) | 9 |
| Figure 2 : Drainage minier acide sur le site Lorraine (Qc) | 10 |
| Figure 3 : Système de flottation..... | 12 |
| Figure 4 : Schéma de barrière hydraulique (Source : Rollin et al.2002) | 12 |
| Figure 5 : Implication des bactéries dans le DMA (Source : usherbrooke.ca) | 13 |
| Figure 6 : Approches de restaurations (Source : Aubertin et al.2002) | 15 |
| Figure 7 : Géomembrane (source : plastics.sabic.eu) | 16 |
| Figure 8 : Rouleau de GM | 16 |
| Figure 9 : Butte avec GM installée (source : geosyntheticsmagazine.com) | 18 |
| Figure 10 : Schéma d'une mise en place d'une GM..... | 18 |
| Figure 11 : Events au sommet de la GM (Site Aldermac) | 19 |
| Figure 12 : Coupe schématique (Source : www.groupe-ect.com)..... | 19 |
| Figure 13 : Coupe schématique d'un tombeau étanche (Source : Ingénierie No Spécial 2009) | 20 |
| Figure 14 : Tableau comparatif de l'étanchéité en fonction de différentes contraintes | 21 |
| Figure 15 : Etapes de la perte en agent antioxydant (Hsuan, 1995) | 22 |
| Figure 16 : Localisation géographique du site | 24 |
| Figure 17 : Photo aérienne du site..... | 24 |
| Figure 18 : Carte Géologique du secteur de Rouyn-Noranda (Source : jfmoyn.free.fr)..... | 25 |
| Figure 19 : Site Aldermac avant restauration (source : www.veroniquedoucet.com)..... | 28 |
| Figure 20 : Site Aldermac après restauration | 28 |
| Figure 21 : Plan de la zone sud | 30 |
| Figure 22 : Coupe schématique des travaux..... | 31 |
| Figure 23 : Schéma des installations..... | 32 |
| Figure 24 : Bassin vue du haut de la butte..... | 32 |
| Figure 25 : Bassin de récupération des eaux | 32 |
| Figure 26 : GPS différentiel et plaque de tassement | 32 |
| Figure 27 : Débit variant dans les Vnoch | 33 |
| Figure 28 : Schéma d'injection de traceurs..... | 34 |
| Figure 29 : Test de traçage en labo..... | 34 |
| Figure 30 : Cuve de 1.3m ³ | 34 |
| Figure 31 : Positions des excavations sur la butte..... | 35 |
| Figure 32 : Arrosage de l'excavation | 36 |
| Figure 33 : Traces de ruissellement sur un versant de la butte..... | 36 |
| Figure 34 : Points des prises de mesure | 37 |
| Figure 35 : Présence de crevasses sur un versant de la butte..... | 37 |
| Figure 36 : Position des excavations effectuées | 38 |
| Figure 37 : Photos des travaux d'excavation | 38 |
| Figure 38 : Excavation sur le haut de la butte | 39 |
| Figure 39 : Excavation autour d'un événement | 40 |
| Figure 40 : Excavation sur le flanc de la butte | 41 |
| Figure 41 : Excavation sur la jointure avec le cap de roche..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Figure 42 : Schématisation hypothétique des infiltrations sous la GM au niveau du cap de roche | 43 |
| Figure 43 : Recueillir des données de sonde sur le terrain..... | 43 |
| Figure 44 : Bac Vnoch pour mesurer des débits | 43 |
| Figure 45 : Traçage au sel. Conductivité en fonction du temps | 44 |
| Figure 46 : Schématisation du test de traçage | 45 |
| Figure 47 : Deuxième essai de traçage | 45 |
| Figure 48 : Troisième essai de traçage..... | 46 |
| Figure 49 : Schéma de la proposition de fossé | 47 |
| Figure 50 : Quadrillage de la butte | 47 |
| Figure 51 : Modélisation de la butte..... | 48 |
| Figure 52 : GPS différentiel | 48 |
| Figure 53 : Butte vue de haut | 48 |

Introduction

Dans le cadre du diplôme de Master Professionnel "Géoressources & Environnement" deuxième année, un stage de six mois a été réalisé dans la spécialité Risques, Sites et Sols Pollués. L'établissement d'accueil est un institut de recherches en mines et environnement, l'IRME, créé en 2012 et dépendant de l'UQAT : l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Le but de ce stage est de travailler sur un site minier abandonné du nom d'Aldermac. Il s'agit en effet de suivre les travaux de restauration engagés par le gouvernement québécois depuis 2008. Le site fait l'objet d'une intervention de restauration de type active avec l'installation d'une géomembrane (de façon à confiner les rejets miniers et ainsi éviter le contact avec l'eau pour stopper le phénomène de Drainage Minier Acide-DMA) et également l'installation de terrasses ennoyées qui visent aussi à stopper le DMA en contrôlant la migration de l'oxygène. Il s'agit d'un travail en trois étapes. La première est l'étude bibliographique qui vise à connaître l'histoire de ce site minier et contextualiser ce dernier mais aussi à comprendre les fonctionnements physico-chimiques qui sont mis en jeu dans cette restauration. Par la suite, un travail de terrain s'en suivra avec une série d'interventions pour réaliser des tests in situ sur la portion du site restauré avec un recouvrement fait de géomembrane.

Ces travaux serviront aux chercheurs afin d'avoir des bases solides pour continuer à travailler sur une restauration sûre du site Aldermac. Pour finir, une série d'interprétations seront exposées avec les résultats qui auront été obtenus sur le terrain suivie de propositions et recommandations quant aux éventuelles améliorations à apporter aux travaux déjà réalisés.

Problématique : Depuis ses débuts, l'exploitation minière a toujours engendré des quantités très importantes de stériles et résidus miniers que ce soit sur les sites d'extraction ou bien de traitement. Pour éviter la production de DMA, des techniques de plus en plus inventives sont mises en place. L'idée ici est de savoir si l'une d'elles (le tombeau étanche par géomembrane) est réellement efficace et si non, comment y remédier.

I- Concepts

A/ Le drainage minier acide (DMA)

Définition : le drainage minier acide ou DMA est un phénomène qui se produit lorsque de l'eau s'écoule au travers d'ouvrages miniers. Ces eaux de drainage ayant un pH acide contiennent souvent des concentrations élevées en métaux puisqu'elles circulent à travers des matériaux contenant des minéraux sulfurés. Ces derniers s'oxydent naturellement dès qu'ils entrent en contact avec l'air ou l'eau. Cela forme de l'acide sulfurique qui rend ainsi les eaux acides, ce qui favorise la solubilisation des métaux. Il peut aussi y avoir un drainage minier neutre dans le cas où il y a une absence de sulfure dans la roche.

Comment se forme le DMA ?

La qualité de l'eau à l'effluent est déterminée par la combinaison de trois phénomènes (Aubertin et al.2002):

- L'**oxydation** de certains minéraux (la plupart du temps des sulfures) sous certaines conditions produit de l'acide et des métaux en solution,
- La **neutralisation** de l'acide par certains minéraux (principalement les carbonates), produit d'autres éléments en solution,
- La **précipitation** de minéraux secondaires formés à partir des produits d'oxydation-neutralisation.

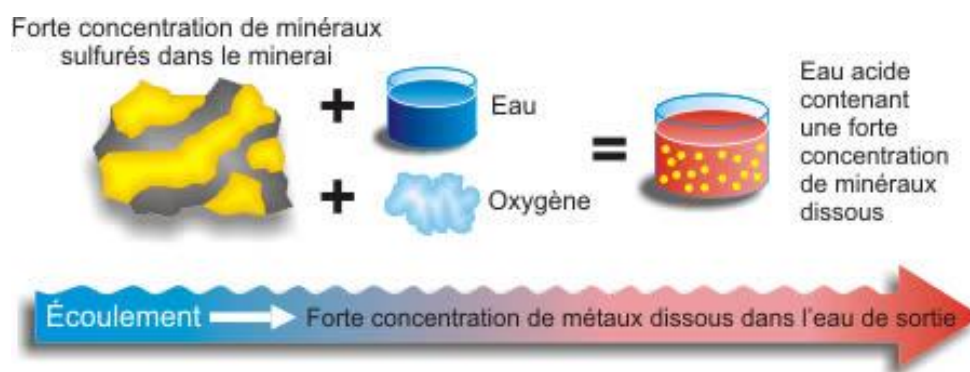
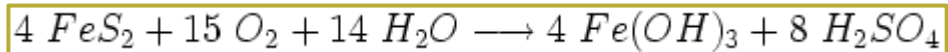


Figure 1 : Principe du DMA (source : www.rncan.gc.ca)

Les eaux contaminées par le DMA peuvent provenir de divers types d'exploitation comme par exemple des mines de métaux précieux (or, argent), de métaux de base (cuivre, nickel, zinc, plomb), de charbon et d'uranium. Le drainage minier acide se produit naturellement lorsque les minéraux sulfureux réactifs, comme la pyrite et la pyrrhotite, sont exposés à l'eau et/ou à l'air. L'oxydation qui survient libère alors des ions H^+ qui acidifient l'eau. Ce phénomène favorise la mise en solution de divers éléments qui deviennent plus solubles à bas pH. Cette acidité, combinée à la présence de contaminants potentiellement toxiques comme divers métaux lourds (par exemple, Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Cd, Hg, Pb, Co, Ni,

Ta, As, pour n'en nommer que quelques-uns), peut affecter sérieusement les écosystèmes qui reçoivent les effluents contaminés (Aubertin & Bussière 2002).

Les réactions chimiques principales qui donnent lieu à un DMA sont l'oxydation du fer et du soufre de la pyrite, le minéral sulfuré le plus commun. Cette réaction a lieu en présence ou en l'absence de bactéries selon l'équation (Aubertin et al 2002) :



Le phénomène de production d'eaux acides n'est pas exclusif à l'industrie minière puisqu'il est susceptible de survenir dès que des travaux d'excavation ont lieu dans des roches contenant des minéraux réactifs. Du DMA a par exemple été observé à proximité d'ouvrages de génie civil, tels des routes et des remblais pour pistes d'aéroport. C'est cependant par l'exploitation d'une mine que l'on risque le plus de générer de grandes quantités d'eaux acides (Touze 2002).



Figure 2 : Drainage minier acide sur le site Lorraine (Qc)

Bien que ce phénomène soit connu depuis une centaine d'années, le DMA a été pris en considération comme problème environnemental dans les années 1920 notamment en Amérique du Nord avec les mines de charbon. C'est à cette époque qu'ont commencé les premières recherches scientifiques sur le DMA. Cette situation a été prise au sérieux au Canada, tant du point de vue des incidences environnementales et des contrôles législatifs que des divers aspects techniques reliés à la prédiction, à la prévention (réduction à la source) et au contrôle (rétention et traitement) du DMA, seulement qu'à partir des années 1970 (Bussière 2007).

Ce phénomène est une réaction chimique qui peut durer très longtemps. En effet, il est très difficile de prévoir combien de temps un ancien site va continuer à produire de

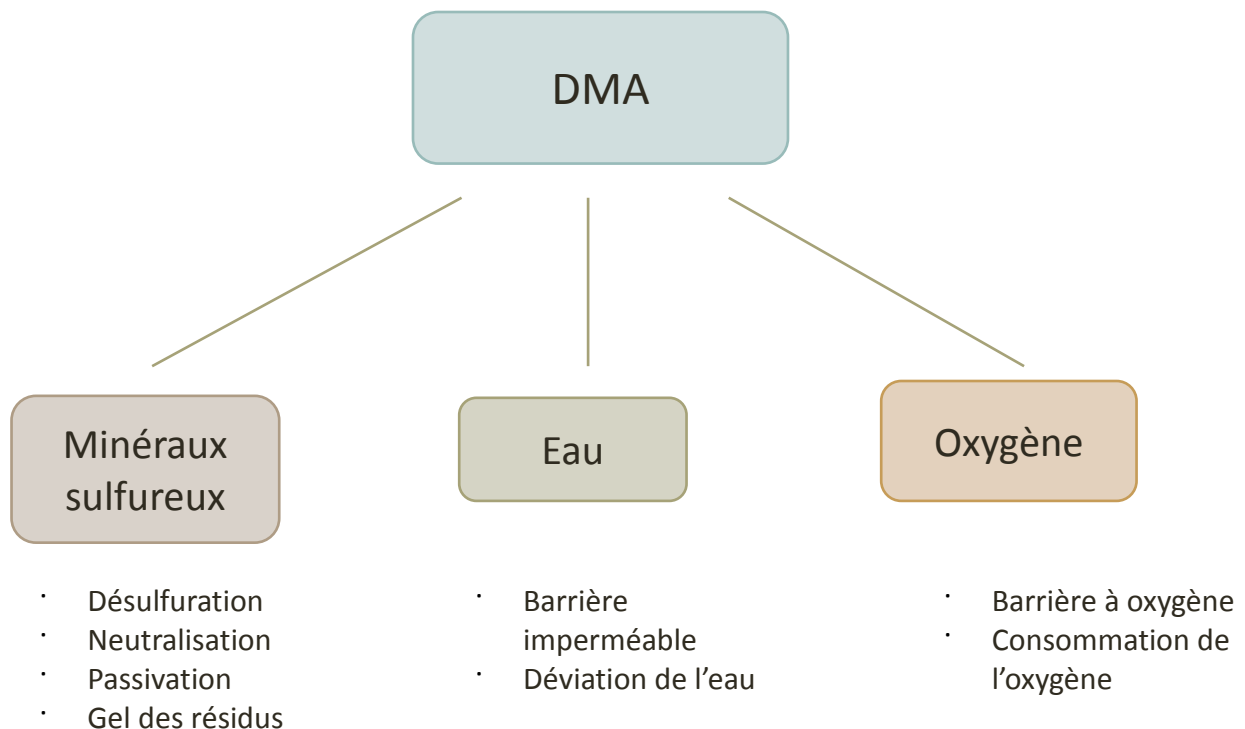
l'acide. Cependant, les recherches sur cette problématique et sur les techniques de restauration sont en plein essor et ne cessent d'évoluer (Aubertin et al 2002).

B/ Les scénarios de restauration

Tous les sites miniers même non-générateurs de DMA doivent être restaurés à la fin de leur exploitation mais les défis sont différents. Dans ce travail, on aborde un cas de restauration lorsque les rejets miniers sont générateurs de drainage minier acide. Il existe de nombreuses techniques pour restaurer des sites miniers pollués par ces rejets acides.

Etant donné que le DMA dépend de trois facteurs : l'eau, l'oxygène et bien évidemment les minéraux sulfureux, plusieurs techniques sont proposées pour bloquer la production de DMA, en coupant l'activation d'un ou de plusieurs de ces facteurs.

Voici un récapitulatif représentant les différentes options de restauration pour les sites générateurs d'acide (Aubertin et al.2002) :



Un résumé des principales techniques que l'on peut utiliser pour prévenir la production de DMA (SRK, 1991) est présenté dans ce qui suit.

1. Enlèvement des sulfures

La présence de minéraux sulfureux dans les résidus miniers est une condition à la formation de DMA. Si l'on retire suffisamment de soufre des résidus pour que le pouvoir net de neutralisation devienne plus grand que le pouvoir net de génération d'acide, il en résultera une quantité de DMA négligeable. Pour séparer les sulfures contenus dans les résidus miniers, on utilise des techniques de concentration telles la flottation et les méthodes gravimétriques (Bussière et al., 1995, 1998).



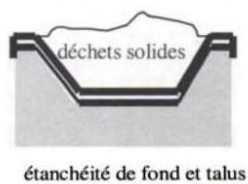
Figure 3 : Système de flottation
(Source : miningcrushing.com)

2. Exclusion de l'eau

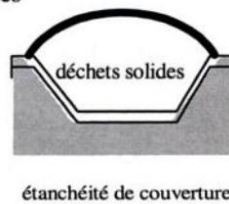
En éliminant les apports d'eau aux résidus miniers générateurs de DMA, on peut empêcher la production d'acide provenant de l'oxydation des minéraux sulfureux. Pour ce faire, on doit aménager des barrières imperméables qui empêchent toute infiltration des eaux de surface et souterraines. Ces barrières peuvent consister en des sols à faible

conductivité hydraulique ou en des matériaux synthétiques peu perméables (par exemple, de la géomembrane). Il ne faut pas oublier qu'il est difficile de maintenir l'intégrité à long terme de ce type de barrières (SRK, 1991 ; Suter et al., 1993). Parmi les principaux facteurs de la dégradation des barrières visant à limiter l'infiltration d'eau, on note les phénomènes de retrait causés par des cycles de mouillage-séchage, les effets dus aux cycles gel-dégel, l'érosion des sols, la subsidence et les intrusions biologiques (racines et animaux).

Cellules d'enfouissement des déchets solides

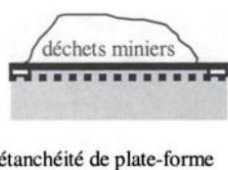


étanchéité de fond et talus

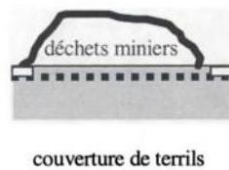


étanchéité de couverture

Gestion des déchets miniers



étanchéité de plate-forme



couverture de terrils

Figure 4 : Schéma de barrière hydraulique (Source : Rollin et al.2002)

3. Exclusion de l'oxygène

L'oxygène est un ingrédient essentiel dans le processus menant à la production de DMA. Pour limiter l'apport en oxygène au point de ramener la production d'acide à un niveau négligeable, il faut installer un recouvrement ayant une faible perméabilité au gaz. L'eau, les sols, les matériaux synthétiques et des combinaisons de ces matériaux peuvent constituer des composantes de ces couvertures. Cette technique va être abordée plus en détails dans la partie suivante.

En plus des méthodes préventives, il existe des méthodes directes qui permettent de réduire la génération de DMA en agissant sur les facteurs qui font varier le taux de production d'acide, dites méthodes de réduction (ou de mitigation). Voici les principaux facteurs sur lesquels il est possible d'agir :

4. Les facteurs limitant

La Température

Cette technique est effective dans les régions où il y a un sol gelé en permanence (permafrost), comme dans les régions du Nord du Québec. En maintenant en permanence les résidus sous le point de congélation, on réduit la migration des contaminants et on contrôle la génération d'acide. Plus d'information sur cette approche peut être trouvée dans Coulombe (2012).

Contrôle du pH

La production d'acide est fortement déterminée par les caractéristiques géochimiques de l'eau, notamment le pH. Le maintien du pH à un niveau supérieur à la valeur neutre, ou proche, ramène souvent la production d'acide à des niveaux acceptables d'un point de vue environnemental. Pour augmenter le niveau de pH, il est possible d'ajouter des matériaux alcalins aux résidus. (G. J. Zagury, 1997)

Contrôle de l'action bactérienne

Les bactéries telles que la *Thiobacillus ferrooxidans* font augmenter le taux de production du drainage minier acide par un facteur entre 20 et 1000 fois (Berthelin, 1987). En limitant leur développement, il est possible de réduire de façon significative la génération de drainage minier acide. L'industrie dispose à cette fin de différents types de bactéricides tels des surfactants anioniques, des acides organiques et des agents de conservation alimentaires. Il importe cependant de comprendre que l'ajout de bactéricide, même s'il réduit le taux de production d'acide, n'arrête pas pour autant le processus. Certaines études montrent d'ailleurs une faible amélioration de la qualité de l'eau à la suite de l'ajout de bactéricide. En outre, l'efficacité de ce traitement dépend de répétitions régulières. Le lecteur intéressé peut consulter Kleinmann et Erickson (1983),

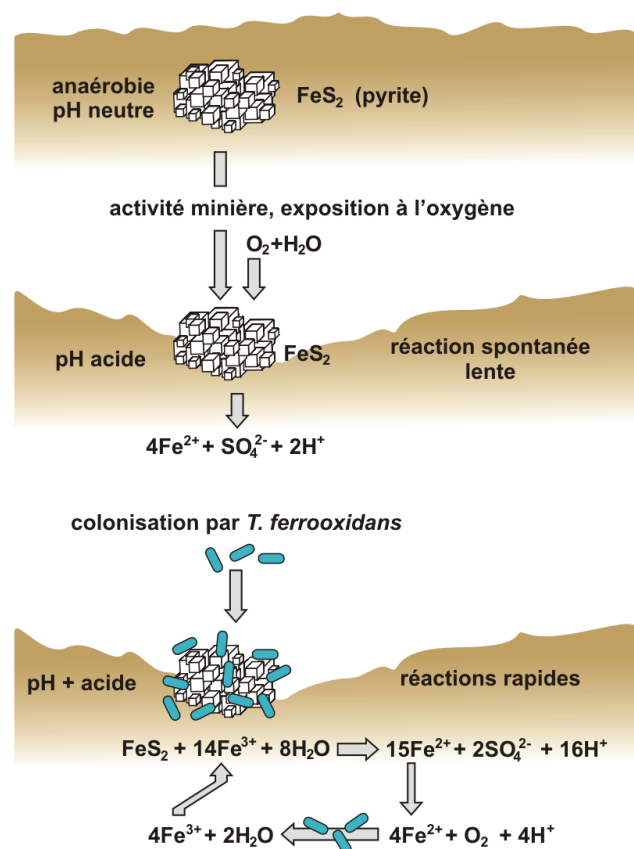


Figure 5 : Implication des bactéries dans le DMA (Source : usherbrooke.ca)

Watzlaf (1986), Sobek (1987), SRK (1991), Rastogi (1996) pour en savoir plus sur les différents bactéricides et leur degré d'efficacité.

Passivation des surfaces

L'objectif des techniques utilisant la passivation des grains de sulfures pour limiter la production de DMA est de modifier la surface afin d'empêcher tout contact avec l'oxygène (Evangelou, 1995; Fytas et al., 1996). Il est possible procéder à la passivation en incorporant dans les résidus une substance (par exemple, H_2O_2 et KH_2PO_4) qui réagit avec les sulfures de fer et qui entraîne la formation d'une couche protectrice. Les principaux problèmes liés à cette technique sont la durabilité limitée à long terme de l'enrobage, le coût des réactifs et le soin que demande leur manipulation (le H_2O_2 est une substance toxique).

5. Inventaire des principales méthodes de contrôle du DMA

Il y a plusieurs options disponibles pour limiter la production de DMA. Ultimement, le choix d'une méthode pour un cas spécifique dépendra de plusieurs facteurs, dont les plus importants sont les suivants (SRK, 1991) :

- le potentiel de génération d'acide (basé sur la quantité de minéraux sulfureux présents) et le potentiel de neutralisation d'acide des résidus miniers;
- la nature et les caractéristiques physiques des résidus;
- les conditions de terrain, y compris le climat, la topographie, ainsi que l'hydrologie des eaux de surface et souterraines;
- la durée d'efficacité requise de la mesure de contrôle;
- la sensibilité du milieu récepteur face au drainage minier acide;
- la disponibilité des matériaux géologiques ayant les propriétés appropriées;
- les couts d'implantation.

Il faut noter qu'il arrive qu'une mesure de contrôle unique ne suffise pas pour atteindre les objectifs environnementaux; dans ce cas, il faut opter pour une combinaison de méthodes.

Suite à ces descriptions et au schéma synthétique, voici les différentes approches de restaurations proposées à ce jour (Aubertin et al.2002) :

| Conditionnement des rejets | Exclusion de l'eau | Exclusion de l'oxygène | Neutralisation | Élimination de l'action des bactéries |
|---|--|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> •Séparation des sulfures •Récupération biologique •Enrobage ou passivation •Gel des Rejets | <ul style="list-style-type: none"> •Couvertures étanches (GCL, géomembrane) •Scellant et enduits (polymères, bitume...) •Sols imperméables •Mélanges (bentonite, ciment) | <ul style="list-style-type: none"> •Recouvrement aqueux (bassins naturels ou artificiels) •Recouvrement multicouche •Élévation nappe phréatique •Consommation O2 (organique) | <ul style="list-style-type: none"> •Agents chimiques (chaux, carbonates) •Agrégats alcalins (épandage, mélanges, tranchées) •Boues alcalines •Cendres | <ul style="list-style-type: none"> Bactéricides •Phosphate minéral |

Figure 6 : Approches de restaurations (Source : Aubertin et al.2002)

II- Recouvrement avec géomembrane (GM)

En Amérique du Nord, les recouvrements visant à contrôler les infiltrations d'eau dans les déchets miniers se font principalement grâce à l'utilisation de recouvrement étanche (aussi appelé « tombeau étanche ») qui intègre les géomembranes.

Cela fait peu de temps (une dizaine d'années) que les connaissances et la compréhension de ce type de matériaux synthétiques commencent à faire ses preuves (exemple du site Poirier au Québec avec un cas de recouvrement des résidus miniers par géosynthétiques (Gallinger et al.1998)). En effet, l'utilisation de géomembranes et géosynthétiques bentonitiques en tant que barrière de confinement pour la protection de l'environnement connaît un essor remarquable (Rowe 2007). Ces applications concernent l'étanchéité, au-dessous comme au-dessus, des stockages de déchets miniers mais aussi des hydrocarbures ou encore de bassins de rétentions, confinement de gaz, etc.

A/ Qu'est-ce qu'une géomembrane ?

Une géomembrane est un polymère. Elle se compose de matériaux thermoplastiques de type polyéthylène, chlorure de polyvinyle ou chlorure de polyéthylène.

Elles sont développées de façon à répondre aux exigences de conception des systèmes de barrières hydriques étanches. Plusieurs géomembranes de spécialité permettent, en plus de rendre les ouvrages étanches, de répondre à des besoins particuliers tels que : résistance chimique accrue, résistance à basse température, compatibilité avec l'eau potable, etc.



Figure 7 : Géomembrane (source : plastics.sabic.eu)

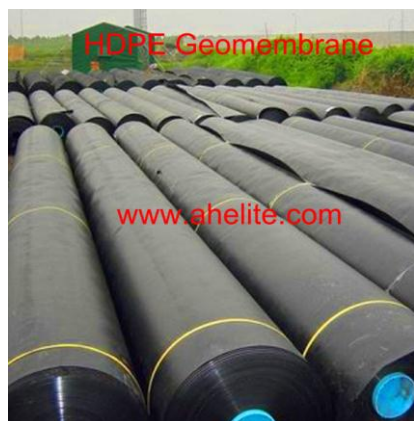


Figure 8 : Rouleau de GM

Les GM sont fabriquées en usine et stockées sous forme de rouleaux (fig 8) de plus ou moins grande largeur et longueurs. Elles sont adaptées à la demande de façon à ce que la pose soit la plus efficace et rapide possible.

1. Les propriétés recherchées d'une GM

Selon les besoins de la restauration, il existe plusieurs types de GM et elles vont être choisies selon certaines propriétés (Rowe 2004) :

- **physiques** : épaisseur, densité, masse spécifique, transmissivité de vapeur;
- **mécaniques** : résistance à la traction et déformabilité correspondante, résistance des joints, résistance au déchirement et à la perforation, résistance aux impacts, résistance frictionnelle à l'interface, résistance au fluage;
- **chimiques** : résistance aux attaques par l'eau, l'ozone, les rayons ultraviolets, les lixiviats;
- **biologiques** : altération des caractéristiques par les bactéries, les champignons, ou autres;
- **thermiques** : effets des températures extrêmes sur la résistance mécanique, coefficient d'expansion, contraction thermique.

Dans le cas de ce projet, la GM fait partie d'une sous-catégorie que l'on appelle un polyéthylène de haute densité (PEHD). Le polyéthylène est le thermoplastique le plus polyvalent pour les applications d'imperméabilisation. Il présente des propriétés optimisant le coût, la résistance mécanique, chimique et aux ultraviolets en plus de permettre une soudure de qualité entre deux feuilles de matériaux. Le PEHD est le matériel le plus résistant de la famille des polyéthylènes grâce à une densité supérieure à $0,94 \text{ g/cm}^3$ et offre un bon compromis en terme d'élongation avec une limite élastique allant jusqu'à 17%. Ces géomembranes sont disponibles en différentes épaisseurs variant de 0,5mm à 3,0mm et avec des surfaces lisses ou texturées selon l'application (Lambert 2002).

Ce qu'il faudrait retenir de ce mode de recouvrement est que c'est un polymère relativement mince et souple, qu'il est peu perméable à l'eau et aux gaz (le taux de percolation est très faible) et qu'il a une capacité d'étirement et de déformation sans présenter de signes de déchirure. De plus, les GM sont thermosoudables. C'est-à-dire que l'étanchéité est optimale lorsque la pose est réalisée correctement.

2. Comment une GM est-elle mise en place ?

Le principe de l'installation est simple. Il s'agit de regrouper en butte tous les déchets miniers qui doivent être confinés. Il est important que la butte soit stable et que les tassements futurs soient pris en compte. Ensuite, la GM et son ou ses géotextiles sont installés par-dessus et il faut thermosouder les bandes de GM entre elles (fig9).



Figure 9 : Butte avec GM installée (source : geosyntheticsmagazine.com)

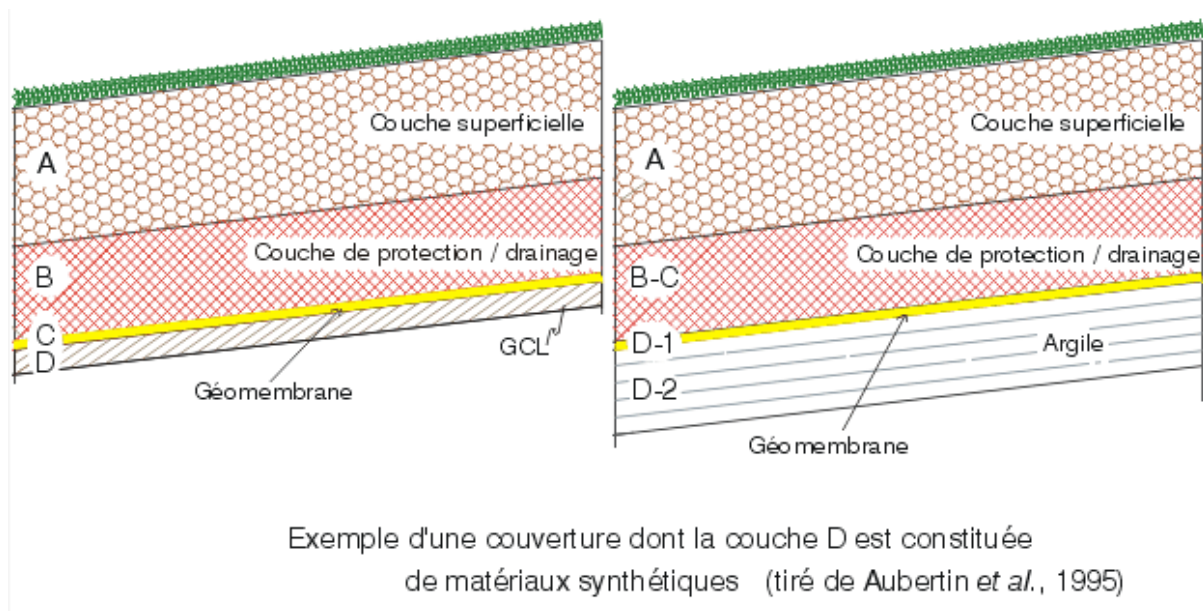


Figure 10 : Schéma d'une mise en place d'une GM

Sur le schéma ci-dessus (fig 10), il est intéressant de voir que les couches installées sur l'ouvrage n'ont pas été choisies n'importe comment. La GM n'est pas habituellement installée seule mais est comprise dans un système complexe. Elle fait partie d'une installation comprenant plusieurs couches ou chacune d'entre elles a un rôle bien

spécifique. En effet, sous la GM, on recommande la mise en place d'une couche de matériaux peu perméable (par exemple de l'argile). Cela permet une bonne adhérence au géocomposites et ainsi une bonne stabilité, tout en réduisant les flux d'infiltration (Rowe 2002). En ce qui concerne le dessus, une couche de matériaux drainants est mise en place. Cela évite les éventuels stockages d'eau de pluie ou autre qui pourraient entraîner des glissements de terrain ou encore des poches d'eau (leur poids pourrait affecter la GM). Pour finir, sur le dessus, une couche végétale est mise en place afin de maintenir la stabilité des matériaux sans affecter l'ouvrage. Il est important de noter que la restauration doit être contrôlée car l'installation par exemple de végétaux buissonnants ou même arborescents pourrait venir endommager la GM avec leur appareil racinaire (Muller 2007).

Egalement, lors de la mise en place d'une GM, des événements sont disposés de façon relativement homogène au sommet de la butte. Ce sont en fait des drains qui servent au dégazage continu des déchets miniers stockés sous la GM. On vise ici à éviter la formation de poches de gaz qui pourraient entraver l'efficacité du système. Sur le schéma ci-dessous (fig 12), on peut remarquer qu'il y a présence de puits de captage de biogaz mais cela ne se fait pas obligatoirement, ce que l'on observera sur notre site sera plutôt des événements (fig.11).



Figure 11 : Events au sommet de la GM (Site Aldermac)

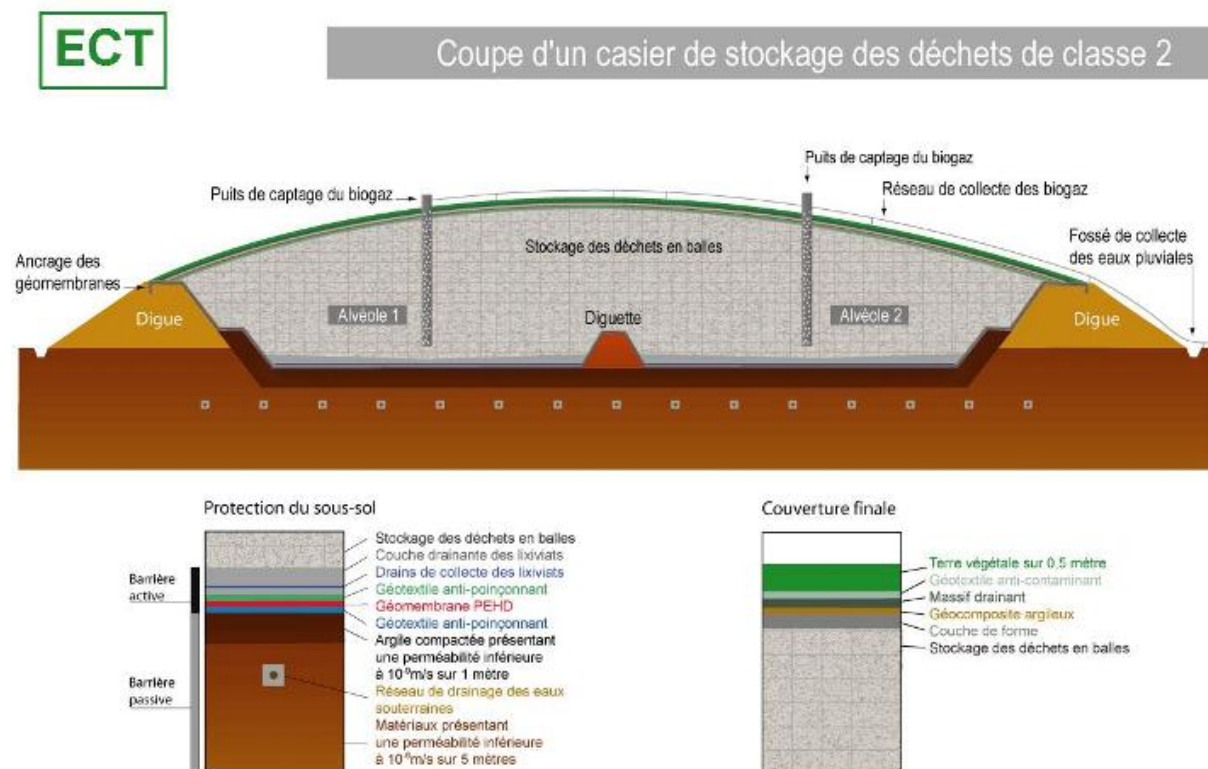


Figure 12 : Coupe schématique (Source : www. groupe-ect.com)

Comme nous l'avons vu précédemment l'installation qui va faire l'objet de l'étude est la « couverture de type tombeau étanche ». Le DMA pourrait ainsi être maîtrisé et contenu.

Comme il a été constaté que les déchets miniers du site Aldermac présentaient un sérieux danger pour l'environnement, c'est cette technique qui a été retenue. De plus, un système drainant (fig 13) à la base de l'empilement a été installé lors de la construction et ce dernier va servir à recueillir les eaux percolées dans les rejets. Ainsi, ces effluents peuvent être recueillis dans des bassins et être suivis, ce qui permettra d'évaluer la performance du système de recouvrement à limiter la percolation de l'eau.

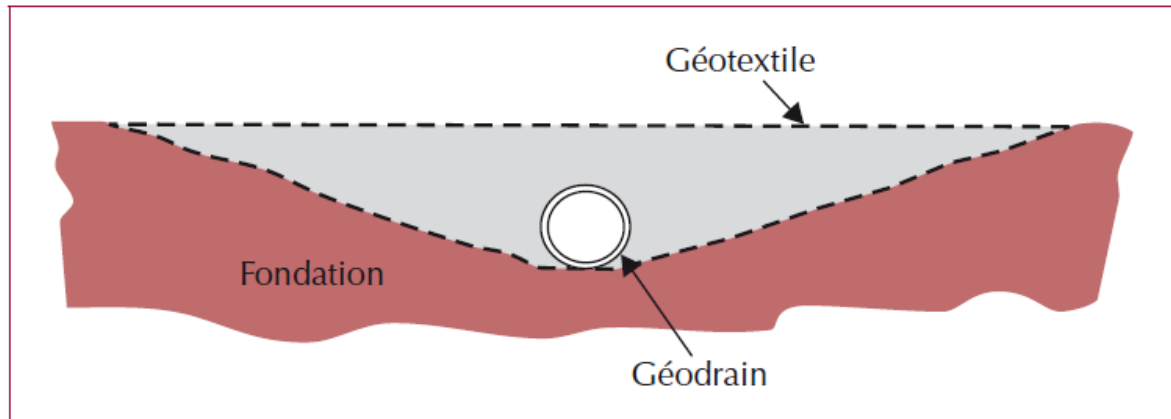


Figure 13 : Coupe schématique d'un tombeau étanche (Source : Ingénierie No Spécial 2009)

B/ Avantages et inconvénients des recouvrements par GM

Les facultés d'une GM à contrôler les infiltrations ne dépendent pas uniquement de ses propriétés intrinsèques mais aussi de deux autres aspects : leur résistance physico-chimique puis leur facilité de mise en œuvre.

Pour ce qui est de la résistance physico-chimique, elle peut être associée à plusieurs facteurs : les UV (dégradation photolytique), le contact avec l'air (oxydation), les variations de température (dégradation thermique) ou encore les contacts avec des liquides. Que ça soit eau, hydrocarbures ou encore acides en tous genre, c'est le dernier facteur qui importera le plus puisque de manière générale, une GM est et restera toujours sensible aux UV ainsi qu'aux variations de température. On résume les forces et les faiblesses des différents types de recouvrement étanches à la figure 14 ci-dessous.

En ce qui concerne la géomembrane PEHD, elle est très efficace du côté des produits chimiques. En effet, elle présente une grande stabilité chimique. Le côté négatifs de celle-ci est qu'elle n'est pas d'une grande souplesse et qu'elle est de ce fait plus difficile à mettre en place. De plus, elle est sujette à de grandes dilatations thermiques et ses raccordements demandent une grande technicité. Elle est aussi sensible au phénomène de fissuration sous contrainte. (Source : *Les Géomembranes*_ S. Lambert. Livre)

Comparaison de structures d'étanchéité en fonction de certaines contraintes
(inspiré de CFGG, 1995)

| Structure | Climat | | | Tassement | | | Risques d'érosion et de poinçonnement | | | Percolation permise | | | Pentes | | |
|-----------|--------|---------|--------|-----------|-------|--------|---------------------------------------|-------|--------|---------------------|----------|---------|--------|----------|------|
| | Aride | Tempéré | Humide | Fort | Moyen | Faible | Fort | Moyen | Faible | Presque nulle | Très peu | Moderée | <9° | 9° à 18° | >18° |
| A* | 1** | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 |
| B | 5 | 3 | 1 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 |
| C | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| D | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 3 | 3 |
| E | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 3 | 2 |
| F | 5 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | 2 |
| G | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 | 1 |
| H | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 2 |

*
Structure A : Matériau argileux compacté
Structure B : CEBC
Structure C : Géomembrane
Structure D : Géocomposite bentonitique (GCL ou GCB)
Structure E : Géomembrane / Matériau argileux compacté
Structure F : Géomembrane / GCL
Structure G : Géomembrane / Matériau argileux compacté / Géomembrane
Structure H : Géomembrane / GCL / Géomembrane

**
1 : non recommandé
2 : marginal
3 : possible à certaines conditions
4 : acceptable
5 : recommandé

Figure 14 : Tableau comparatif de l'étanchéité en fonction de différentes contraintes

Si la question du vieillissement vient à se poser, il faut se rappeler que c'est un genre de recouvrement très nouveau dans le domaine de la restauration minière et que des expériences à long terme et in-situ n'ont jamais été mises en œuvre. Les durées de vie proposées par les fournisseurs sont de l'ordre de centaine d'année (HAXO (1988), KOCH (1988), Lord et Halse (1989), Gray (1990), Rollin (1994), Hsuan et Guan (1998) Rowe (1998)). Cependant les chiffres viennent de tests de vieillissement artificiels (en laboratoire et non à échelle réelle). En réalité, ce type de matériaux n'est utilisé que depuis quelques décennies.

Comme on peut le lire dans l'article de Lambert (Ingénieries – EAT n°11 - septembre 1997) : « Les avancées de la recherche sont incontestables. Pourtant, ces matériaux dont la fonction principale est l'étanchéité, de manière durable et face à toutes sortes de sollicitations, sont encore incomplètement connus, en particulier sur le plan de l'estimation de leur durée de vie réelle. »

C/ l'efficacité d'une GM

1. La durée de vie d'une GM

Tel que mentionné précédemment, très peu de tests ont été réalisés in-situ à échelle réelle et conditions réelles et ce, autant dans le secteur des déchets domestiques que miniers. En effet, étant donné que ce type de restauration minière est relativement nouveau, nous ne pouvons encore nous prononcer formellement sur le devenir d'une GM à plus ou moins long terme. Cependant, de nombreux tests ont été réalisés en laboratoire. On

peut par exemple parler des expériences de C. Pons (thèse Paris Est) qui a mené des expériences en labo avec une étude poussée sur les effets d'oxydation sur les GM PEHD. Elle prédit une durée de vie d'environ 100 ans pour un GM avant que celle-ci commence à ne plus être efficace.

L'idée ici est que pour retarder la limite du temps d'efficacité d'une GM, on lui additionne des antioxydants lors de sa fabrication. Une fois que ces antioxydants sont épuisés, les radicaux libres vont d'attaquer à la GM et c'est à partir de ce moment-là qu'on estime que la GM n'est plus complètement efficace. Sur le graphique ci-dessous (fig 15), on remarque qu'en réalité, la durée de vie d'une GM va dépendre des mises à l'épreuve de conditions physico-chimiques variables.

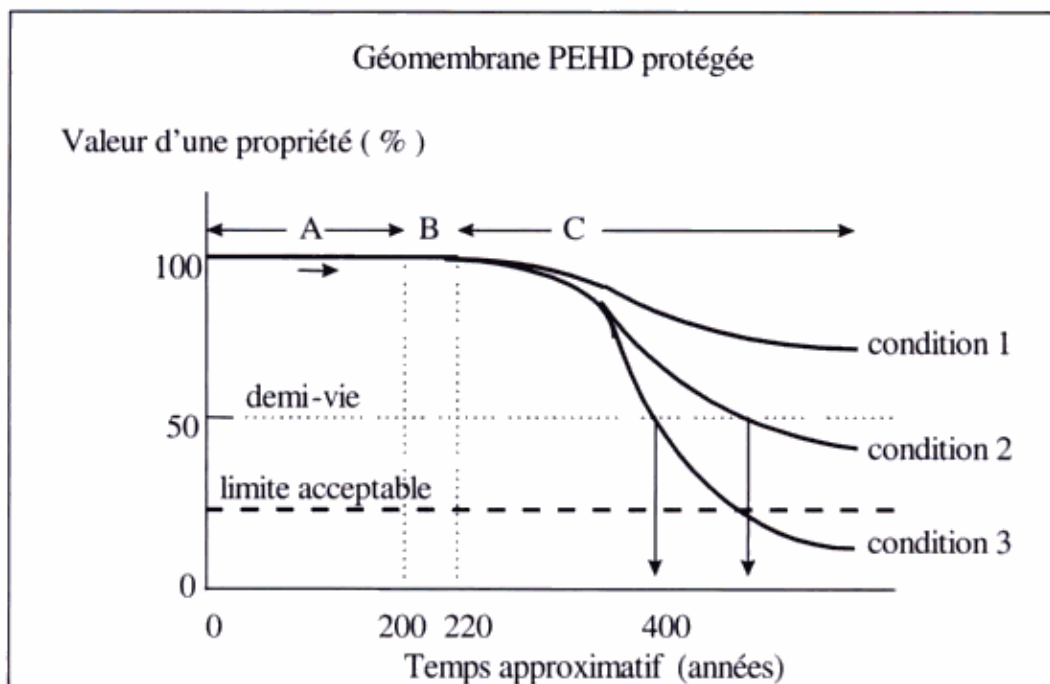


Figure 15 : Etapes de la perte en agent antioxydant (Hsuan, 1995)

Pour faire simple, Hsuan et Koerner (1995) proposent de décomposer le mécanisme de dégradation en 3 parties :

- A : temps de perte des antioxydants,
- B : temps d'induction,
- C : dégradation du polymère.

Selon Hsuan (1995), le temps t_b est estimé à 12 ans. Ensuite, c'est les conditions de températures qui vont faire la différence du temps de perte des antioxydants. En effet, à une température de 10°C, on estime le t_A à 453 ans, à 25°C, 125 ans et à 40°C, 45 ans.

Maisonneuve en 1998, précise qu'avec l'ajout d'antioxydants à la fabrication de la GM, ces temps peuvent varier.

Dans l'ouvrage de Rollin et al (2002), on peut lire que les recherches sur les durées de vie en ce qui concerne les confinements des déchets datent des années 1980.

Voici une liste des principales expériences menées au cours des vingt dernières années :

- Landreth (1988) – échantillons de 5 ans dans des cellules de confinement de déchets (CCD) (diminution des contraintes au seuil d'écoulement)
- Hsuan (1991) – échantillons de 7 ans dans des bassins (modifications mineures dans les propriétés macroscopiques)
- Dullmann (1993) – échantillons de 8 à 10 ans dans une cellule CCD (aucune modification mécanique et chimique)
- Brady (1994) – échantillons de 30 ans dans des cellules CCD (réduction de la déformation et rigidification)
- Rollin (1994a) – échantillons de 7 ans dans une cellule CCD (augmentation des contraintes et diminution de la déformation pour échantillons du fond)
- Surmann (1995) – contact avec essence en laboratoire (absorption des solvants et augmentation de la souplesse)
- Rowe (1998) – échantillons de 14 ans dans une cellule CCD (diminution de la contrainte à la rupture, diminution de la résistance à la fissuration par contrainte, diminution du temps d'induction d'oxydation)

De manière générale, en regroupant les avis des chercheurs mentionnés ci-dessus, les durées de vie de GM avoisinent la centaine d'année. Ces tests sont réalisés sur des échantillons intacts et ne tiennent pas compte des problèmes liés à la mise en place.

2. Des tests in-situ

Les techniques de tests in situ pour évaluer la performance des GM sont mal connues ou très peu mises en œuvre. Une publication de Touze et al. (2002) proposait des modes de détection de la localisation des défauts dans les GM. Cela consiste à détecter les éventuels défauts (plis, trous, déchirures) de la GM par le biais de différentes méthodes électriques utilisant des ultrasons. Cet article scientifique expose aussi les limites de la technique mais présente des approches encourageantes pour la recherche dans ce domaine.

D/ Objectifs du stage : Le cas de la restauration du site Aldermac

Le cas du site minier abandonné Aldermac est assez particulier. En effet, il a fait partie des sites Québécois les plus problématiques en termes de production de DMA. La restauration du site a été entreprise par le gouvernement en 2008 et le suivi de la restauration se fait par les chercheurs de l'UQAT. Le stage de recherche de cet été 2013 vise à approfondir les connaissances sur un recouvrement constitué d'une géomembrane. Très peu de publications ont été faites sur des évaluations de performance de restauration minière durable par ce type de recouvrement.

L'objectif de ce stage est donc de rassembler un maximum d'informations sur les contextes environnementaux et historiques, sur les travaux effectués dans des cas similaires, de proposer et réaliser des expériences in-situ pour valider nos hypothèses et interpréter les résultats qui auront été obtenus.

III- Cas particulier : le site Aldermac

A/ Contexte environnemental et historique

1. Situation géographique

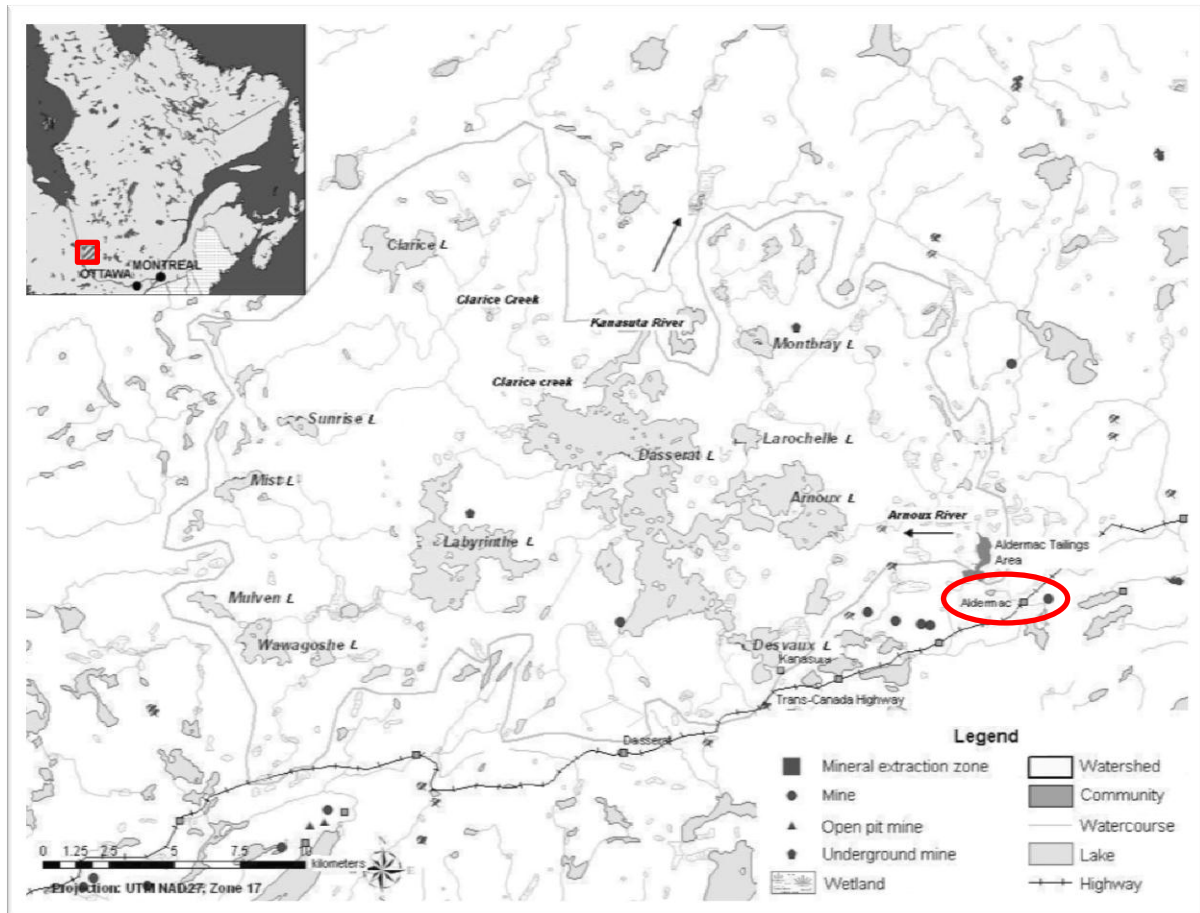


Figure 16 : Localisation géographique du site

Le site Aldermac se situe sur le territoire Canadien, dans la province du Québec et dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue. Il fait partie de la municipalité de Rouyn-Noranda. Il est situé plus précisément à 15 km à l'ouest de Rouyn-Noranda et à 3 km au nord-est d'Arntfield le long de la route Transcanadienne. Les coordonnées géographiques sont 48.13' de latitude nord et 79.13' de longitude ouest. Le site minier Aldermac est l'un des sites miniers abandonnés les plus problématiques de cette région.

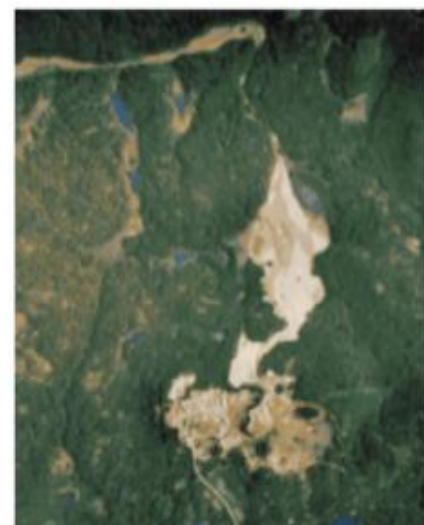


Figure 17 : Photo aérienne du site

2. Contexte Géologique

Bussière et al (2002), ont réalisé une synthèse historique du site Aldermac.

En 1927, la cartographie complète de la région entourant le gisement d'Aldermac a été effectuée. Le site Aldermac est situé au cœur du Bouclier canadien, dans la province du Supérieur. Le gisement de l'ancienne mine était composé de plusieurs lentilles de sulfures massifs, riches en Cu-Zn, encaissées dans des roches volcaniques (volcanites et volcanoclastiques) de composition felsitique à mafique du groupe de Blake River, d'âge archéen. Les lentilles de pyrite massive, de magnétite, de pyrrhotite, de chalcoppyrite et de sphalérite étaient formées. Ces masses minéralisées étaient localisées dans des couches de brèches et de tufs felsitiques, stratigraphiquement recouvertes par un dôme de rhyolite et de rhyodacite massives. Les roches volcaniques qui longeaient et recouvraient le dôme felsitique étaient des coulées dacitiques et andésitiques, des brèches et des tufs, quelques rhyolites et filon-couches de subvolcaniques de porphyre quartzo-feldspatique et de gabbro. La nouvelle masse minéralisée découverte en 1988 était insérée dans les brèches et les tufs felsitiques. La pyrite formait des cristaux porphyroblastiques dans une matrice de pyrrhotite, chalcoppyrite, sphalérite et magnétite. Les sulfures massifs de la lentille n° 8 contenaient de fortes teneurs en Ag, Cd et Hg (Barrett et al., 1991). Les unités géologiques ont été affectées par la formation de failles. La plus importante faille située près du gisement d'Aldermac est la faille du lac Mackay. Elle est localisée au sud du gisement et fait partie d'une vaste structure régionale de direction est-nord-est et de pendage abrupt vers le nord. La faille du lac Mackay est reliée à la faille de Rouyn, qui s'étend de la frontière de l'Ontario jusqu'à Rouyn-Noranda (Cattalani et al., 1995).

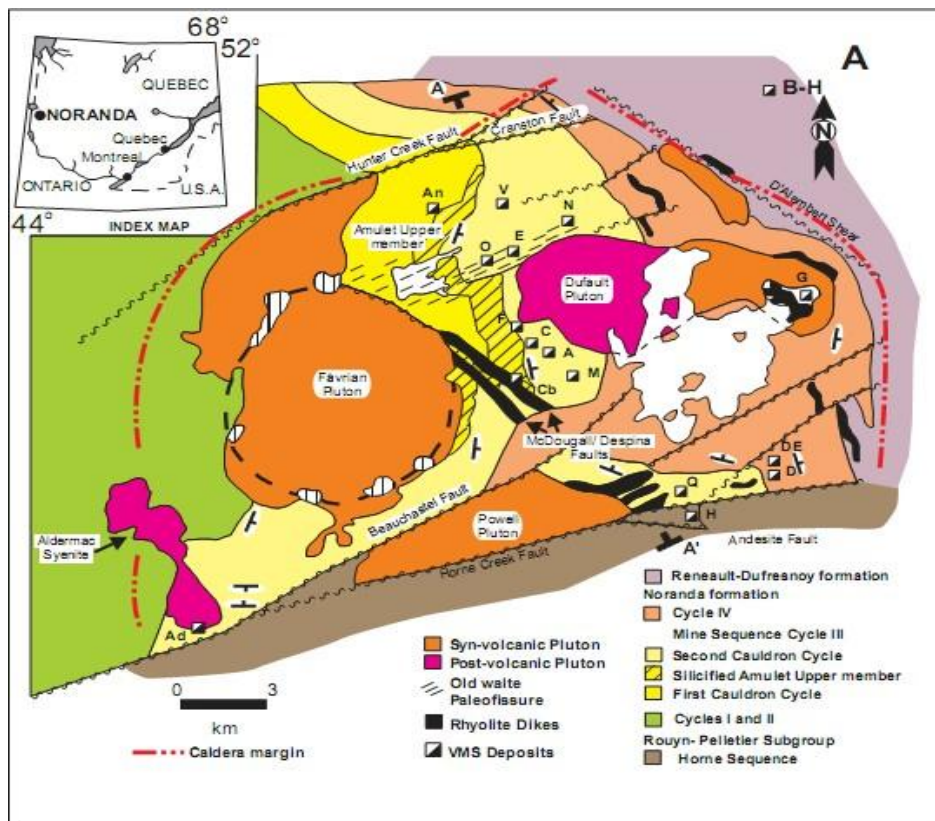


Figure 18 : Carte Géologique du secteur de Rouyn-Noranda (Source : jfmoyen.free.fr)

B/ Historique du site

L'appellation de la propriété Aldermac dérive des noms des deux prospecteurs qui ont jalonné le site pour la première fois en 1922-1923 : W. Alderson et A.A. Mackay.

Le concentrateur produisait deux types de concentré, soit un concentré à haute teneur en cuivre contenant de l'or et de l'argent et un concentré de pyrite de fer à teneur élevée en soufre (Dresser et Denis, 1949).

La période d'exploitation de la mine Aldermac s'est étendue de 1932 à 1943. Pendant cette période, la production totale fut de 1,87 Mt de minerais de Cu-Zn, avec une teneur moyenne en cuivre variant de 1,47 à 1,65 % Cu selon les différents auteurs (Douglas et Tremblay, 1970; Barrett et *al.*, 1991 ; Catallani et *al.*, 1995). La teneur moyenne en argent était de 6,47 g/t Ag et la teneur moyenne en or, de 0,17 g/t Au. Le concentrateur a produit un total de 28 041 tonnes de cuivre, 505 562 tonnes de pyrite, 10 675 onces d'or, 389 100 onces d'argent et 67 753 tonnes de silice (Avramtchev et Lebel-Drolet, 1979).

Dès la fermeture de la mine, la petite agglomération développée autour du gisement a été abandonnée par ses habitants et plusieurs programmes de forages ont été implantés par diverses compagnies ; mentionnons : Noranda, Falconbridge et Rio Tinto Zinc (Jones et Hunter, 1990). En 1975-1976, l'indice de sulfures « Archibald » a été découvert par un des propriétaires de l'époque soit New Inscos Mines Limited (maintenant Nuinsco Resources Limited). Pendant la période de 1974 à 1990, la compagnie a foré plusieurs trous, qui ont permis de regrouper des horizons minéralisés et des amas de sulfures en profondeur (Cattalani et *al.*, 1995). En 1987, une petite lentille de sulfures massifs de Cu-Zn a été repérée, ce qui mena, en 1988, à la découverte d'un nouveau gîte de sulfures massifs. Ce gîte est localisé à environ 200 m à l'est de l'ancienne mine Aldermac. La définition des limites de ces lentilles étant complétée, les compagnies Seadrift International et Nuinsco Resources Limited devaient poursuivre des campagnes de forages afin de vérifier les contacts géologiques à la proximité de la mine (Barrett et *al.*, 1991). La concession minière du site Aldermac a été acquise par Deak Resources Corporation, et en 1994, la compagnie a reçu une ordonnance en vertu de l'article 115.1 de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE) pour entreprendre des travaux de caractérisation, et de mitigation du site. Deak Resources Corporation n'a manifesté aucun intérêt et depuis ce temps, le parc à résidus miniers Aldermac est considéré comme un site orphelin appartenant à la couronne. (source : www.mrn.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines)

C/ Etat des lieux avant restauration

Les travaux de caractérisation ainsi que de nombreuses études ont permis de bien établir la problématique environnementale du site minier Aldermac. On estime à 1,5 Mt la quantité de résidus miniers générateurs de drainage minier acide qui aurait été produits sur le site Aldermac. Les résidus miniers ont été déposés sans aucune mesure de confinement et couvraient une superficie de 76 hectares avant restauration.

Ces résidus miniers sont composés à environ 50 % de minéraux sulfureux et contiennent des concentrations importantes en arsenic, cadmium, cuivre, molybdène, zinc et soufre. Les secteurs affectés par le drainage minier acide sont la rivière Arnoux et ses tributaires, les lacs Arnoux et Dasserat ainsi que les milieux adjacents aux résidus miniers. Les dommages causés par cette exploitation à l'environnement sont majeurs et nécessitent des correctifs importants. De plus, ce lieu représente un risque indirect pour la santé

publique puisqu'en raison de la pêche sportive la chaîne alimentaire est touchée. Compte tenu qu'aucun des exploitants visés par la Loi sur les mines ne peut être enjoint de restaurer ou de réaménager le site, celui-ci a un statut de site abandonné. C'est donc le MRN qui a dû en prendre la responsabilité.

Plusieurs aspects environnementaux ont été considérés par le MRN (Ministère des Ressources Naturelles du Québec) pour la restauration du site Aldermac :

- l'amélioration significative de la qualité environnementale du site;
- l'intégration du site dans son milieu;
- le retour de la faune;
- la compatibilité avec une utilisation future d'un éventuel gisement sur le site;
- l'entretien et le suivi;
- la sécurisation du site.

D/ Restauration réalisée

Voici les informations que l'on peut retrouver sur le site du gouvernement en ce qui concerne la restauration à l'aide d'un recouvrement avec GM du site abandonné Aldermac :

Le site minier Aldermac est situé dans une vallée peu profonde suivant un axe nord-sud. Cette vallée est bordée par de nombreux affleurements rocheux à l'est et par un esker de près de 2 km de long à l'ouest. Une gravière est exploitée à l'extrémité sud de cet esker. Un cours d'eau draine le parc à résidus jusqu'au Ruisseau 1, qui se jette dans la rivière Arnoux.

Le parc à résidus commence au sud à proximité des anciennes installations de la mine pour s'étendre jusqu'à 1 900 m plus loin au nord. Il présente une dénivellation de l'ordre de 25 m du sud au nord et des dénivelées importantes s'observent aux transitions entre les secteurs.

Pour chacun des quatre secteurs distincts du site Aldermac, une option de restauration a été retenue :

Secteur sud – un recouvrement étanche

Le secteur sud présente un relief accidenté avec des zones d'affleurement rocheux. Il est à la source de l'épanchement de résidus et est situé en amont du secteur intermédiaire. Ce secteur comporte une proportion importante du volume total des résidus ainsi que différents rebuts et débris associés à d'anciens bâtiments de la mine et du concentrateur. Par endroits, l'épaisseur de résidus atteint 6 m, ce qui correspond à l'ancien point de déversement.

Un recouvrement étanche sera aménagé sur une portion du secteur sud. Il sera composé d'une géomembrane, d'un géotextile de protection, d'une couche de matériaux granulaires et d'un horizon de terre végétale sur les pentes plus prononcées. L'efficacité environnementale d'un tel système a été démontrée. Ce type de recouvrement est d'une grande efficacité pour couper l'apport d'eau et d'oxygène et empêcher la production de drainage minier acide. Les rebuts et débris seront enlevés et on les éliminera selon les règles environnementales en vigueur.

E/ Le suivi actuel

Actuellement et ce depuis la campagne de restauration du site entreprise par le gouvernement en 2008, c'est l'équipe de chercheurs de l'UQAT qui est chargée de faire le suivi de l'évolution des modes de restauration mis en place sur le site Aldermac. Pour le moment, il n'y a eu qu'un rapport de suivi intermédiaire de la première année qui a suivi les travaux. (Mbonimpa et al., 2011-2012).



Figure 19 : Site Aldermac avant restauration (source : www.veronique-doucet.com)



Figure 20 : Site Aldermac après restauration

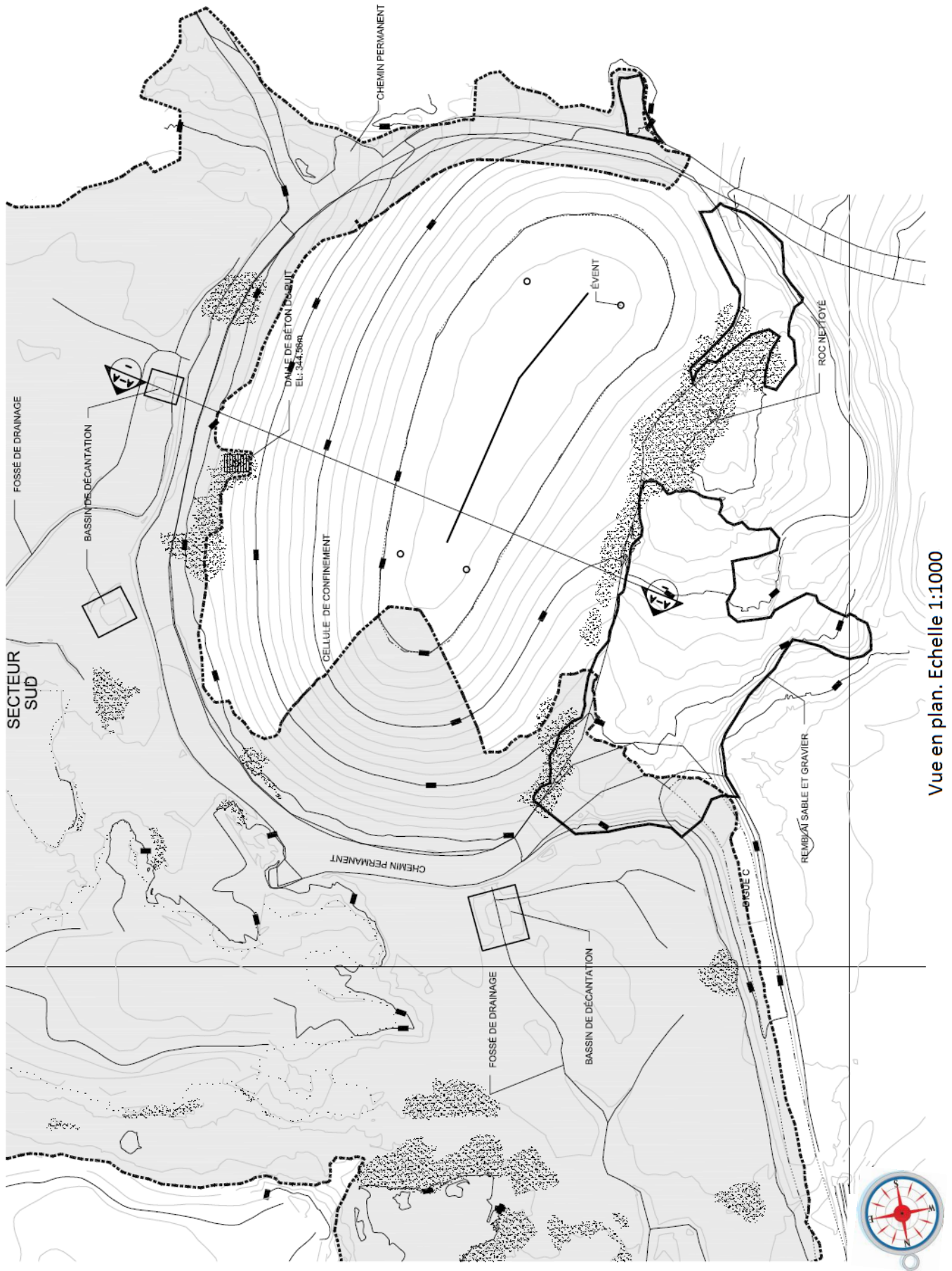
IV- Matériel et méthode : travaux de terrain

Pour réaliser les travaux sur le terrain pendant la saison estivale, il est nécessaire de réaliser un cahier des charges qui a été présenté à un représentant du Ministère des Ressources Naturelles du Québec afin d'obtenir son aval (accord obtenu le 21 juin).

A/ Mise en contexte

Les travaux de restauration du site minier Aldermac ont commencé en septembre 2008 et ont été réalisés sur une période de deux ans.

La zone qui va faire l'objet de ces travaux se situe sur le secteur sud du site (présenté sur la fig 21) qui est en fait en amont du chantier. Il s'agit d'une butte formée par l'entassement des résidus miniers et recouverts d'une géomembrane visant à stopper le drainage minier acide.



Vue en plan. Echelle 1:1000

Figure 21 : Plan de la zone sud

Depuis la fin des travaux de restauration minière orchestrés par le gouvernement, l'UQAT est chargé de faire le suivi de l'avancement de la restauration.

Voici les informations tirées du site internet du gouvernement :

« Le secteur sud présente un relief accidenté avec des zones d'affleurement rocheux. Il est à la source de l'épanchement de résidus et est situé en amont du secteur intermédiaire. Ce secteur comporte une proportion importante du volume total des résidus ainsi que différents rebuts et débris associés à d'anciens bâtiments de la mine et du concentrateur. Par endroits, l'épaisseur de résidus atteint 6 m, ce qui correspond à l'ancien point de déversement.

(Source : <http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2008-11/restauration.asp>)

On présente dans ce qui suit les différentes expériences qui ont été mises en œuvre durant la saison estivale pour tester l'efficacité du recouvrement avec GM et estimer les performances de ce dernier.

B/ Présentation des équipements existants

Sur place, les déchets miniers ont été entassés de façon à former une butte qui par la suite a été recouverte d'un mètre de matériaux meubles tels que des graviers ou sables, puis d'une géomembrane et un géotextile puis de remblais grossiers recouverts d'une fine couche de terre de façon à faciliter la repousse d'herbe. Voici une coupe schématique de cette dernière (fig22) :

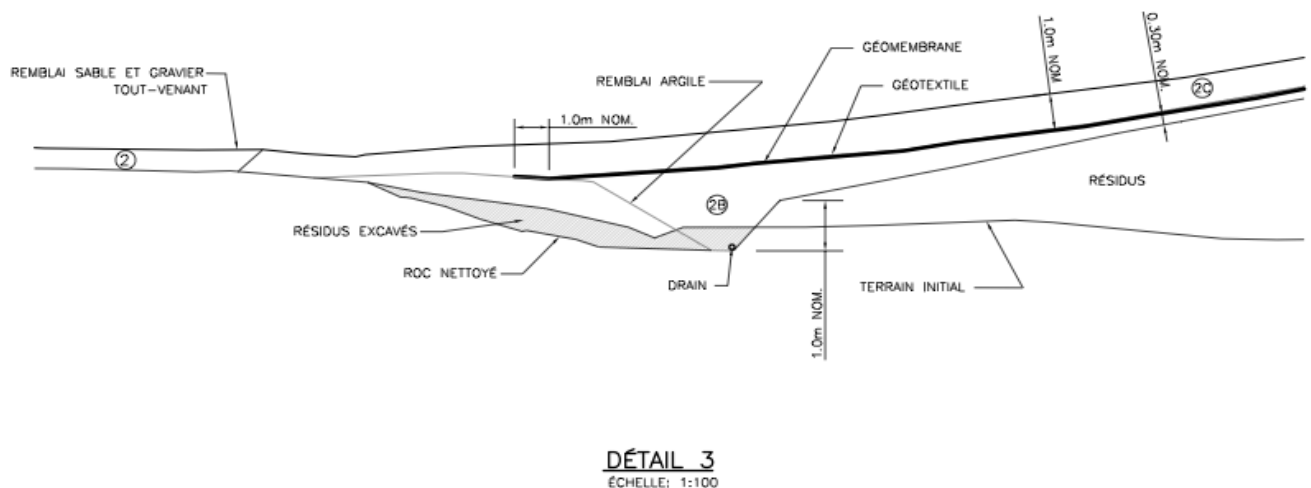


Figure 22 : Coupe schématique des travaux

Notons aussi la présence de 4 événements permettant le dégazage qui se produit en permanence par les résidus miniers.

Au pied de la butte, 3 débitmètres (bac Vnoch) accompagnés de bassin de récupération des eaux qui devraient sortir après avoir percolé dans les résidus ont été mis en place. Il n'y a pas de piézomètres dans la butte même.

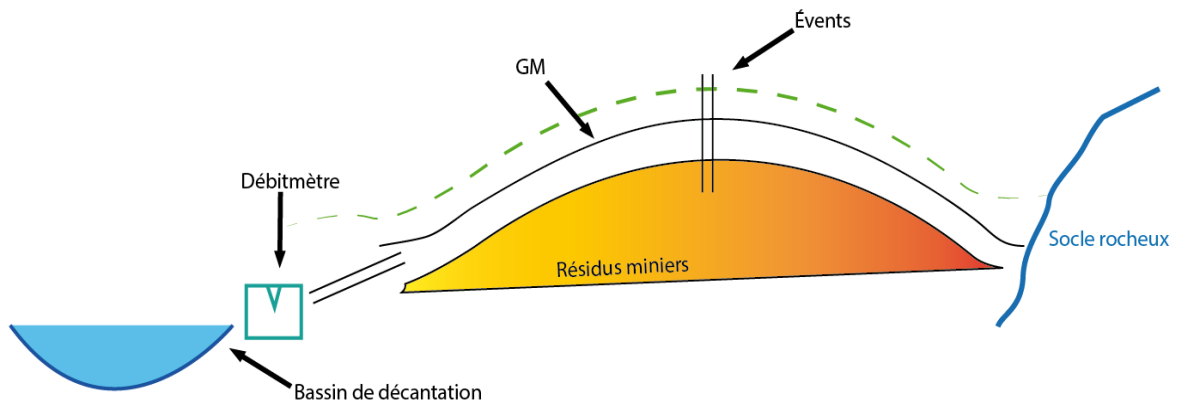


Figure 23 : Schéma des installations



Figure 25 : Bassin de récupération des eaux



Figure 24 : Bassin vue du haut de la butte

Afin d'évaluer le tassement qui serait attribuable aux déformations sous la géomembrane au niveau du plateau de la cellule de confinement, quatre plaques de tassement ont été installées au niveau de cette cellule durant l'été 2012. Ce tassement est calculé à l'aide d'un GPS différentiel de type laser (fig26).



Figure 26 : GPS différentiel et plaque de tassement

C/ Idées directrices des travaux

On vise dans ce travail à mieux comprendre le fonctionnement de ce type de restauration. En effet, au sein de la littérature, très peu d'articles scientifiques mentionnent l'existence d'évaluation in situ de l'efficacité d'un recouvrement par géomembrane sur les rejets miniers. Dans le but d'optimiser la restauration minière, comprendre mieux son fonctionnement est la base de tous travaux. Pour ce faire, on propose différentes expériences qui ont été réalisées sur le terrain cet été.

1. Mesure des débits

L'idée ici serait de savoir (par le biais de mesures des débits) s'il y a un lien entre les précipitations et les débits sortants de la géomembrane. En effet si il y en a un, on pourra en déduire que la géomembrane n'est pas étanche et que les précipitations s'infiltrent et percolent. Il a été remarqué que les jours suivants les orages, la quantité d'eau arrivant dans le Vnoch est plus importante (fig.27) selon les jours de précipitations ou non. Ceci pourrait être un indice quant à nos recherches.

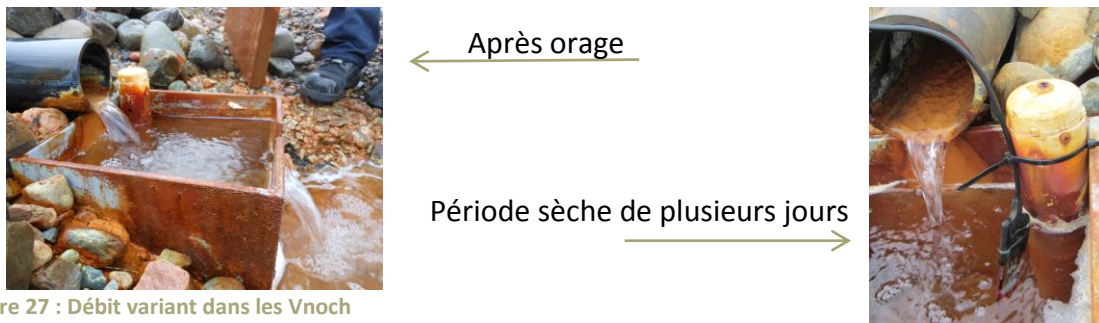


Figure 27 : Débit variant dans les Vnoch

2. Injection de traceurs

Les traceurs pourraient indiquer de façon fiable comment se comportent les fluides qui pourraient circuler au sein des remblais miniers sous la géomembrane. Sachant que nous avons très peu d'information sur le contenu exact de cette butte, la première expérience nous renseignerait sur le temps de résidence d'un fluide sous la géomembrane avant d'arriver à l'exutoire. La question ici est de savoir si les fluides qui arrivent aux exutoires par percolation sont présents depuis la restauration et mettent beaucoup de temps à atteindre l'exutoire ou si plutôt il y a des infiltrations et dans ce cas, cela voudrait dire que la géomembrane n'est plus ou pas parfaitement étanche.

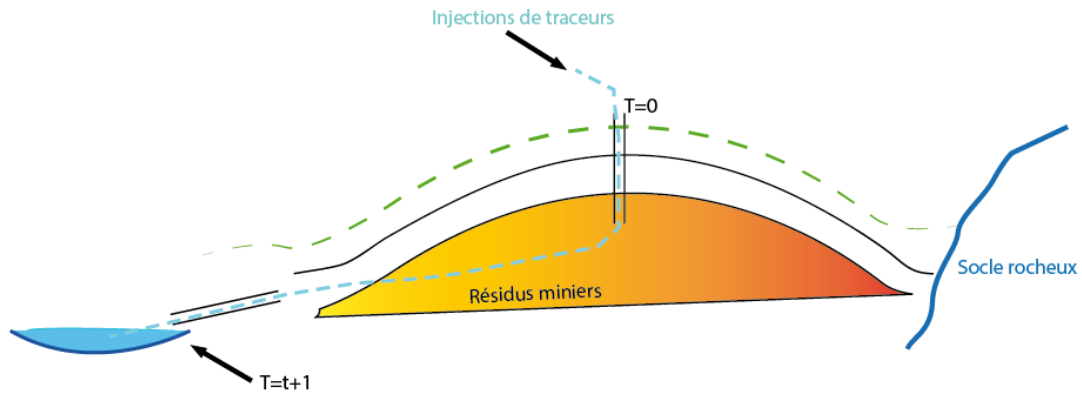


Figure 28 : Schéma d'injection de traceurs

Le choix des traceurs va dépendre de plusieurs facteurs. En effet, un traceur doit avant tout être stable chimiquement, avoir une faible tendance à l'adsorption et une bonne solubilité à l'eau. Le choix s'est porté sur un traceur au sel car ce dernier est généralement détectable à de très faibles concentrations et sa manipulation est simple. En effet, une eau fortement concentrée en sel fera monter de façon significative la conductivité de l'eau présente dans le milieu.

Pour choisir la concentration idéale de sel qu'il faudrait avoir dans l'eau de traçage, des tests en laboratoire ont été effectués avant de le réaliser à l'échelle du terrain.

Sachant que la sonde peut mesurer une conductivité allant jusqu'à 7mS, nous testons la quantité de sel à mettre pour atteindre le seuil critique.



Figure 30 : Cuve de 1.3m³



Figure 29 : Test de traçage en labo

Voici les dosages que nous avons obtenus sachant que notre cuve d'eau peut contenir 1300L d'eau.

Pour 1300L d'eau, nous avons inséré 20 kg de sel préalablement dissout. Et pour le traçage ou l'on observera une plus grande infiltration d'eau (comme pour le bac 1), nous allons doubler la dose (40kg pour 1300L) parce qu'il y aura sans doute plus de dilution sous la GM.

3. Excavation localisée

Pour tester l'étanchéité et l'imperméabilité de la géomembrane, il a été jugé intéressant d'excaver localement les matériaux qui recouvrent le système. L'idée ici est en fait de mettre à nu la géomembrane sur 2x2m environ à différents endroits du plateau. Un premier contrôle de type visuel serait ainsi fait (présence de trous, de plis, de fissures, de déchirures, etc...) Une fois cette opération réalisée, la GM serait arrosée abondamment avec de l'eau de façon à pouvoir observer ou non une éventuelle infiltration.

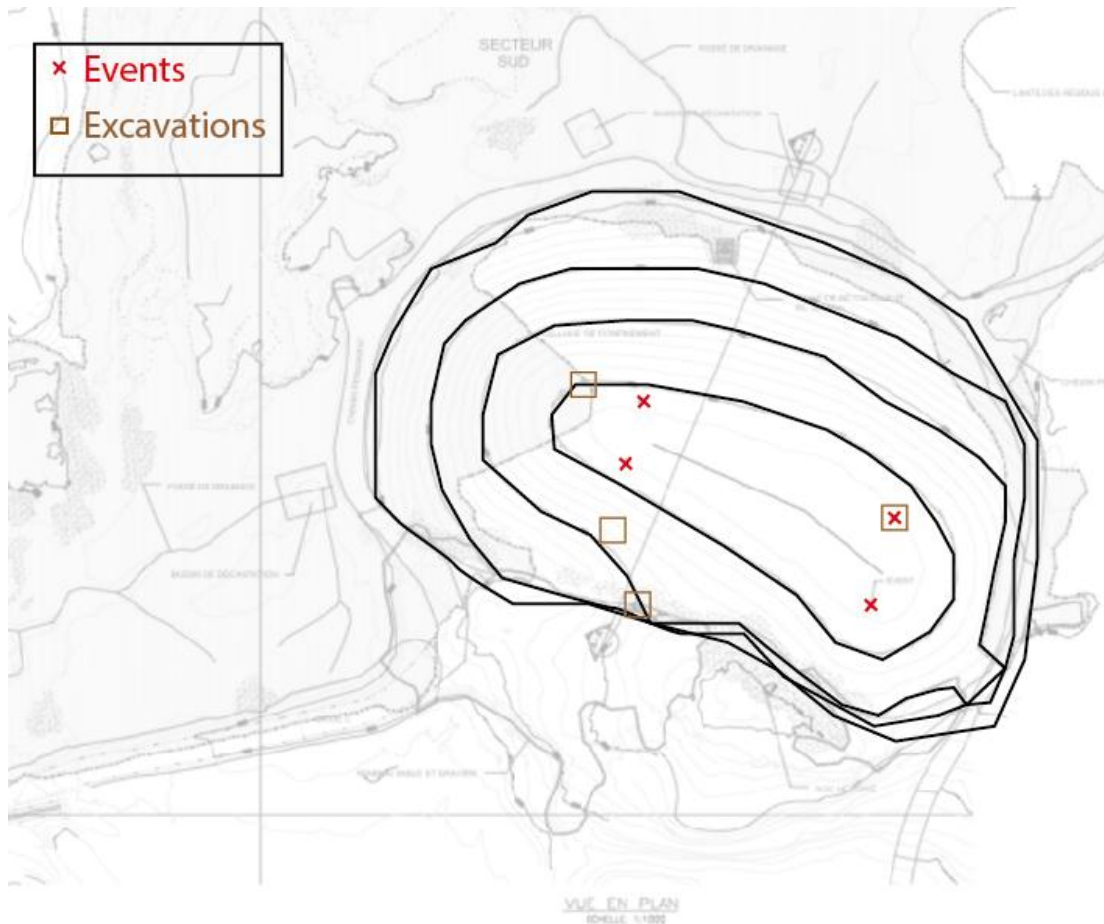


Figure 31 : Positions des excavations sur la butte

Les zones principalement visées ici sont surtout les jointures événements/géomembrane. En effet, ces jointures ont dû être soudées/thermoformées mais on sait grâce à la littérature que ces sont ces fameuses zones qui pourraient être sujettes à des éventuelles infiltrations.

Notons que ces événements sont tous situés sur le haut de la butte et donc relativement à plat (pour éviter que l'eau qui servirait à arroser la zone ne ruisselle trop rapidement).

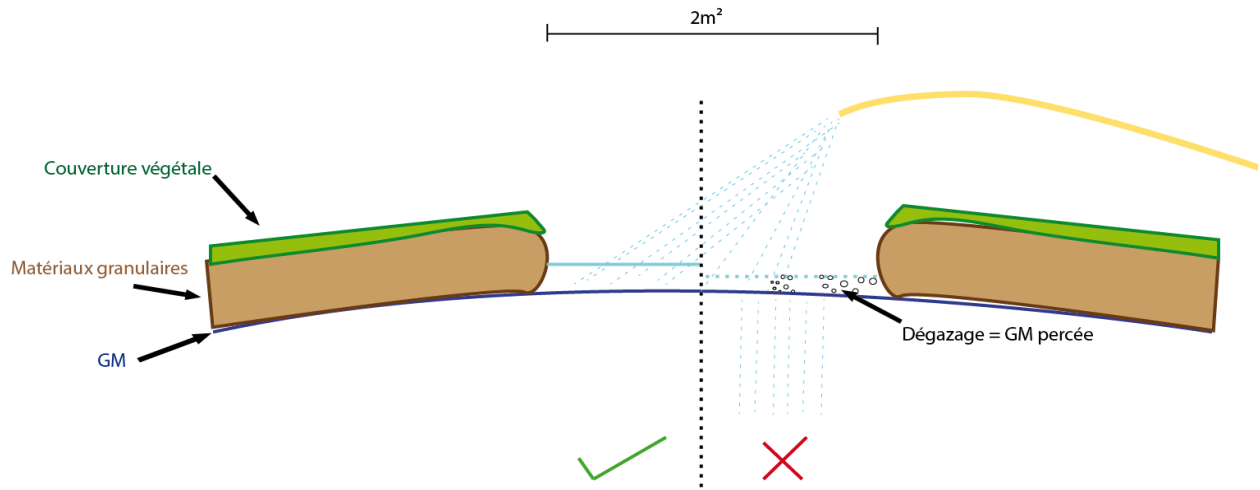


Figure 32 : Arrosage de l'excavation

4. Cartographier les marqueurs géomorphologiques de mouvement et arpenter la butte

Lors d'une inspection post-hivernale du site, plusieurs marqueurs avant-coureurs d'un léger mouvement de terrain de type glissement ont été observés. Il serait donc judicieux de cartographier précisément toutes les évidences de mouvement de terrain sur la géomembrane (ravinement, loupe de glissement, fissures, etc ...) observés sur le terrain. L'installation des plaques de tassement l'année passée servira également à évaluer les mouvements du recouvrement.

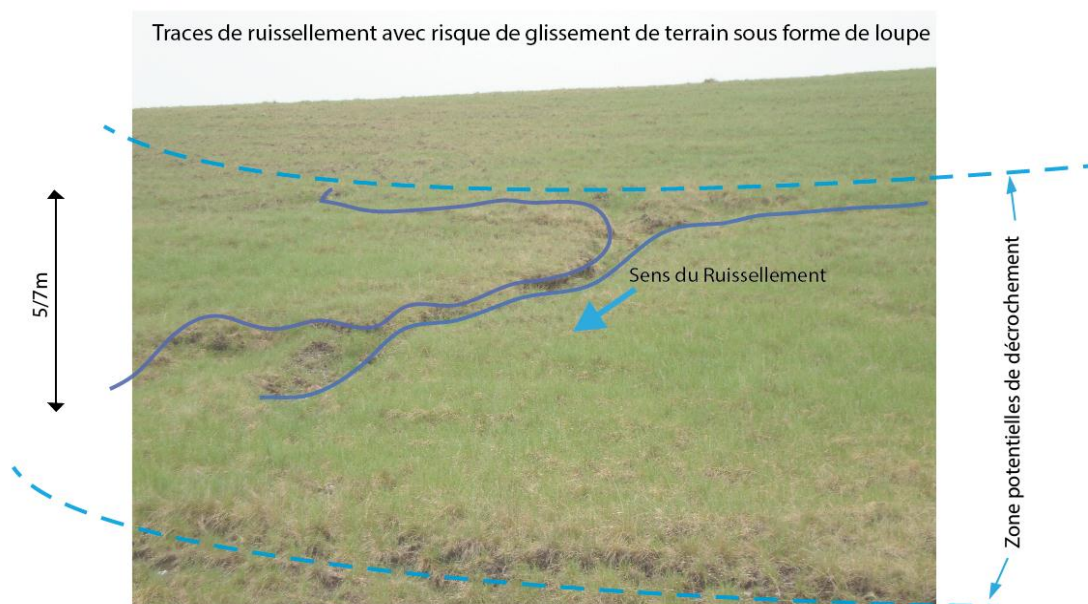


Figure 33 : Traces de ruissellement sur un versant de la butte

Des dizaines de fissures comme celle photographiée ci-contre sont observées sur les flancs de la butte. Elles peuvent mesurer jusqu'à plusieurs mètres et ont des profondeurs variables (allant de 0 à 30 cm). Ces fissures n'étaient pas là avant l'hiver et il est donc très important de les localiser (fig 34) et de suivre leur évolution dans le temps.

X Points pris lors de l'arpentage
Au début, milieu et fin de la fissure

■ Butte

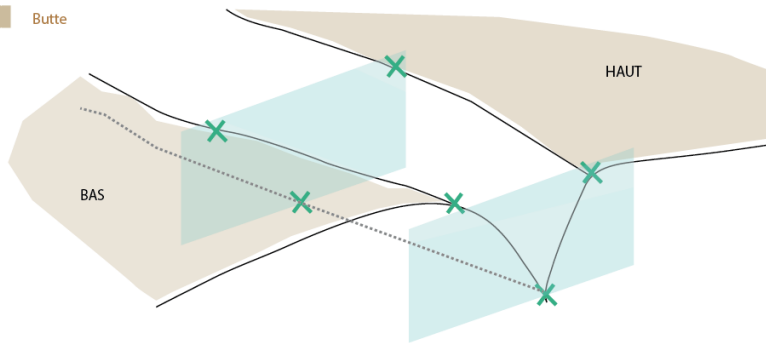
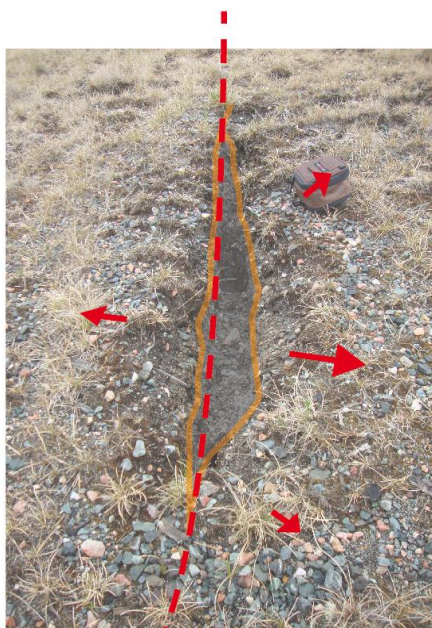


Figure 34 : Points des prises de mesure

Sur la figure ci-dessus (fig 32), on remarque une fissure récente et l'idée dans la prise de mesure est que nous ayons sa profondeur et sa largeur à l'heure actuelle. Plus tard, lorsque de nouvelles mesures seront réalisées, on pourra alors définir de manière précise les mouvements qui auront eu lieu et en tirer des conclusions.



Crevasse vue de haut

80/100 cm

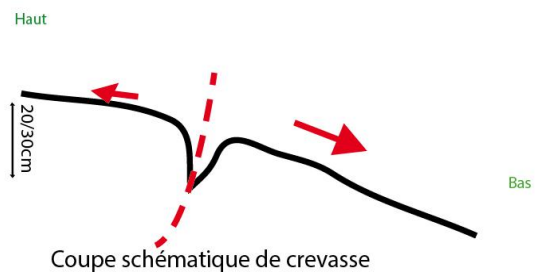


Figure 35 : Présence de crevasses sur un versant de la butte

D/ Tests in situ : résultats et interprétation

1. Les excavations

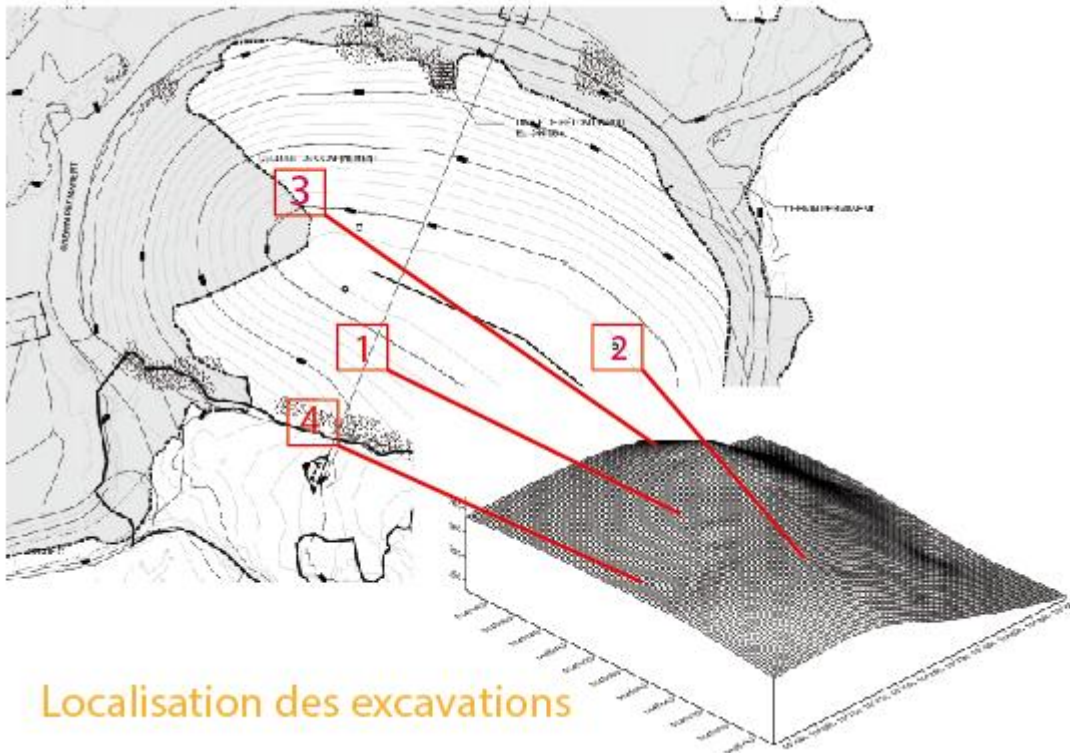


Figure 36 : Position des excavations effectuées

Ces 4 endroits n'ont pas été choisis au hasard. Il était important de comprendre où pouvaient se trouver les failles de la GM. (au niveau du cap de roche, sur les pentes ou autour des événements).



Figure 37 : Photos des travaux d'excavation



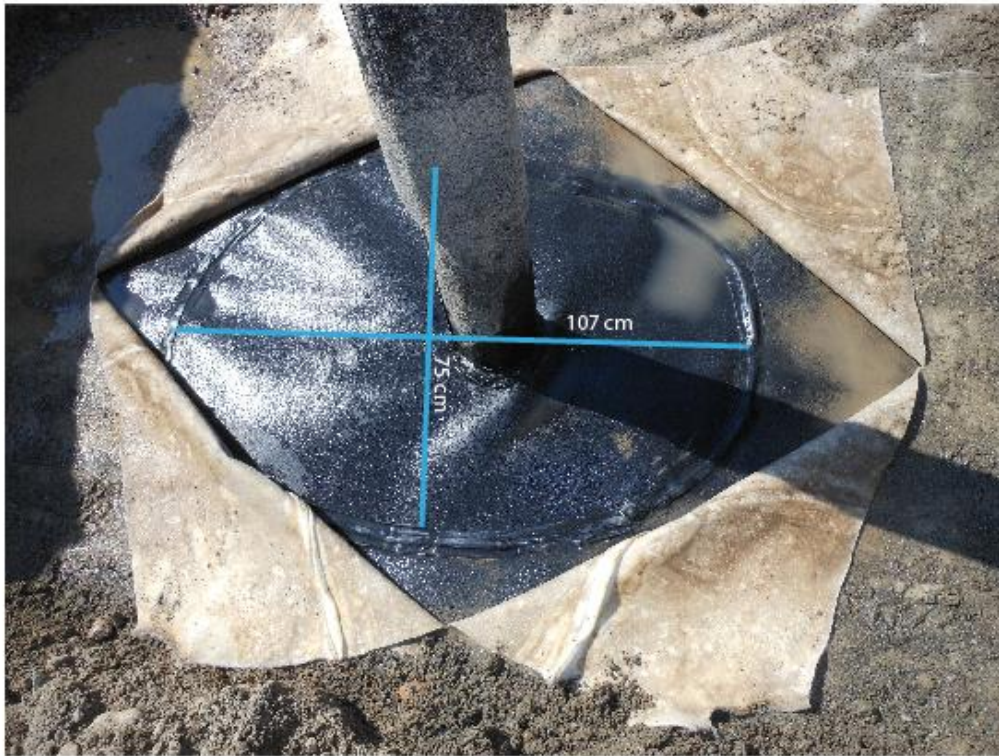
Présence de cailloux entre la GM et le géotextile.
Risques de poinçonnements de la GM



Vide sous la GM
Chemin préférentiel pour les ruissellements

Figure 38 : Excavation sur le haut de la butte

Cette première excavation permet d'avoir une bonne idée de comment ont été réalisées les soudures entre les différents rouleaux de GM. Il s'agit d'une GM texturée comme en témoigne la troisième illustration de la fig.36. Aucune trace d'altération de la GM n'est observée sur les portions du site qui ont été étudiées. La soudure a été réalisée correctement (sans doute une thermo-fusion) et l'étanchéité est conservée. On remarquera uniquement la présence de graviers grossiers (de 5 à 30 mm) entre le géotextile et la GM. Ils pourraient à la longue venir percer la GM sous l'effet du poids des matériaux présents au-dessus.



Soudures correctes
Aucunes fuites visibles
Pas d'objets (tels des cailloux) altérant
la GM



Figure 39 : Excavation autour d'un événement

Cette deuxième excavation nous informe sur la réalisation des soudures au niveau des quatre événements présents au sommet de la GM. Ici encore les travaux ont été réalisés correctement et ne témoignent d'aucune source d'altération potentielle de la GM.



Figure 40 : Excavation sur le flanc de la butte

Étant donné que ces excavations se trouvent sur un décrochement de pente, on remarque que la GM est beaucoup plus tendue et les traces d'objets en dessous tels que des cailloux pourraient à la longue poinçonner la GM et la percer. On a ici un témoignage de mouvement de la GM. Il serait important dans le futur de surveiller de plus près son évolution.



Figure 41 : Excavation sur la jointure avec le cap de roche

Les observations pour cette quatrième excavation sont les suivantes :

La GM n'est pas soudée ni même fixée au cap de roche. En effet, elle repose sur une couche d'argile grise type bentonite qui n'est cependant pas homogène. L'eau s'infiltrerait aisément sous la GM d'autant qu'il y a la présence de gravier grossiers (entre 5 et 30 mm) sous la GM. Ils favoriseraient ainsi une meilleure circulation de l'eau (ce qui n'est pas souhaité). Notons également l'absence de géotextiles comme il y avait aux autres excavations. La GM est en contact direct avec le matériau qui la recouvre. Lors de fortes précipitations, l'eau s'infiltrerait et ruissellerait le long de la GM pour atteindre cette zone critique. Sans oublier de préciser que des plis sont là encore présents et favorisent aussi la circulation de fluides.

D'après tout ce que l'on peut voir sur ces différentes photos, il est clair qu'une grande majorité de l'eau qui arrive dans les exutoires est de l'eau qui s'infiltré sous la GM lors de fortes précipitations. En effet, l'installation n'a pas été réalisée de façon optimale au niveau de la jointure entre la butte et le cap de roche sur le côté ouest de l'installation.

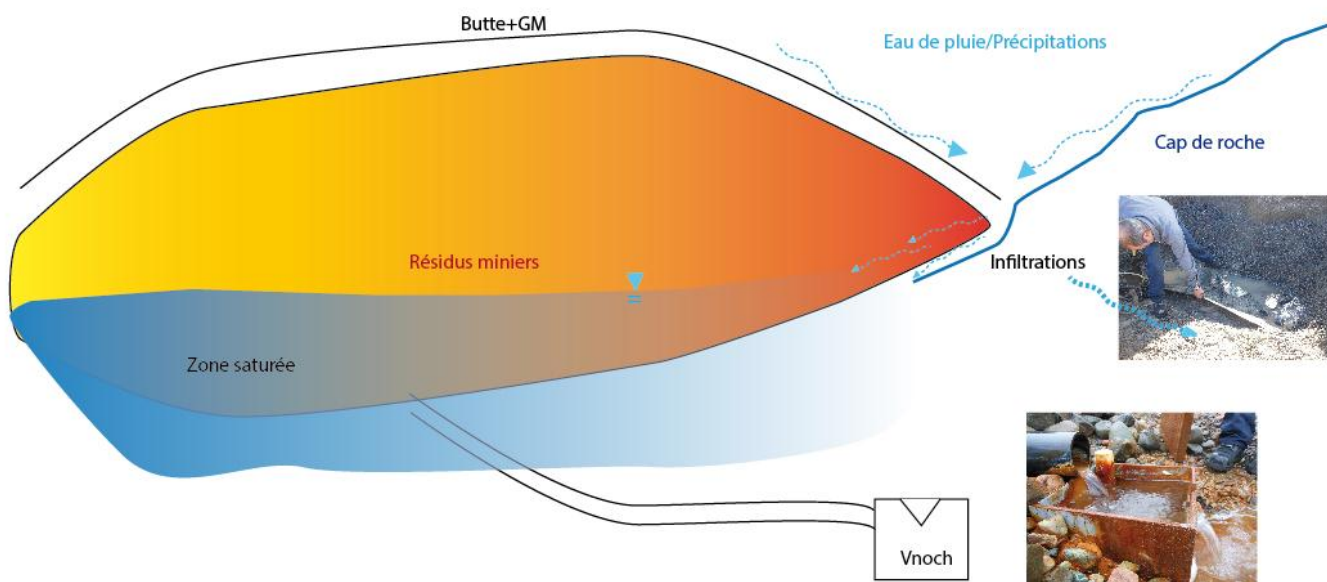


Figure 42 : Schématisation hypothétique des infiltrations sous la GM au niveau du cap de roche

Suite à cette découverte, le choix de réaliser un traçage au sel en injectant l'eau à cet endroit a été décidé. Il serait question de voir combien de temps l'eau met pour circuler du cap de roche jusqu'au Vnoch du nord de la butte.

2. Les débits et traceurs



Figure 44 : Bac Vnoch pour mesurer des débits



Figure 43 : Recueillir des données de sonde sur le terrain

Des sondes ont été installées lors de la réhabilitation du site minier de façon à faire un suivi continu de l'évolution des différents paramètres tels que : le pH, la température et la pression de l'eau. Sachant que la sonde a été placée au fond du Vnoch, et ayant la pression atmosphérique, nous pouvons réaliser un calcul qui nous permet de mesurer les débits.

Il est important de préciser que la plupart du temps, un simple constat visuel nous permet de voir que lorsque l'on a affaire à des journées de grosses précipitations, le débit à la sortie des drains est plus important que lorsqu'il y a eu une période sèche.

Par curiosité et pour être sûr de ce qui est avancé, nous pourrions comparer les débits mesurés avec un bilan des précipitations de la région de Rouyn-Noranda. Ces comparaisons vont être réalisées en fin de stage.

Lors du premier traçage, voici ce qui a été obtenu comme résultat :

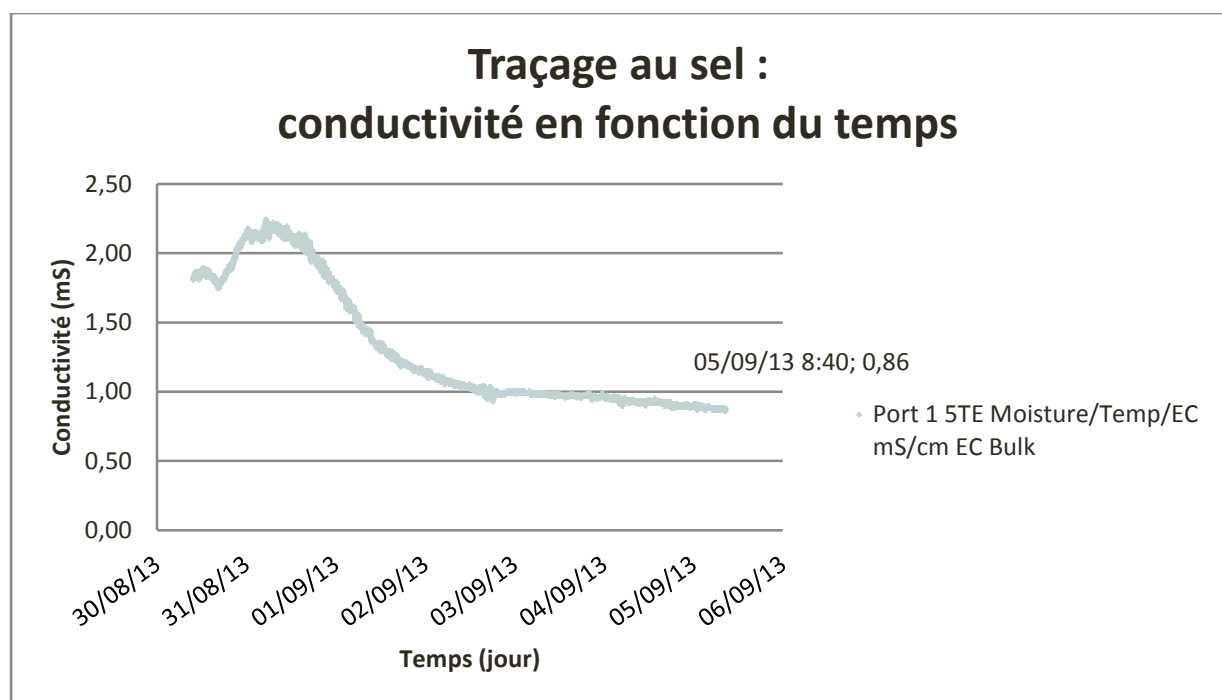


Figure 45 : Traçage au sel. Conductivité en fonction du temps

L'injection avait été faite le 30 août à 9h. La conductivité était alors de 1,82mS. On remarque qu'il y a un pic aux alentours de 4h30 le lendemain matin. De plus, le début de la montée de la conductivité se fait seulement quelques heures à arriver (au bout de 5h environ). On peut donc en déduire que l'eau qui sort des drains est bien passée par les résidus en moins de 24h. L'hypothèse que l'on peut formuler est que cette eau a un temps de résidence relativement court. Il reste à savoir par où l'eau s'infiltrait-elle.

Il faut se rappeler que lors de nos excavations, la GM n'était pas soudée au cap de roche et que de ce fait, l'eau s'infiltrait au-dessous. Dans la fig.46 ci-dessous, voici un schéma de l'essai de traçage.

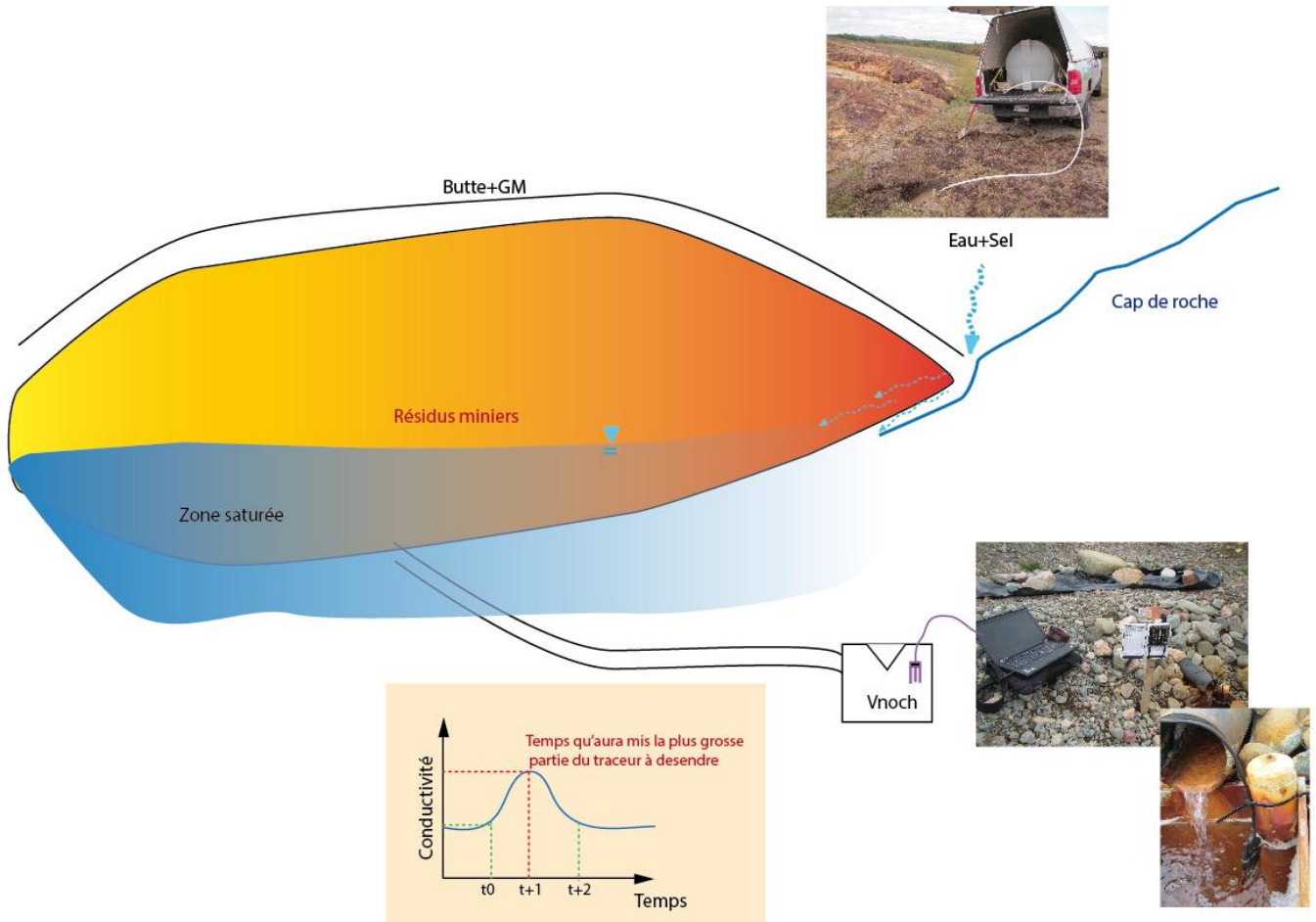


Figure 46 : Schématisation du test de traçage

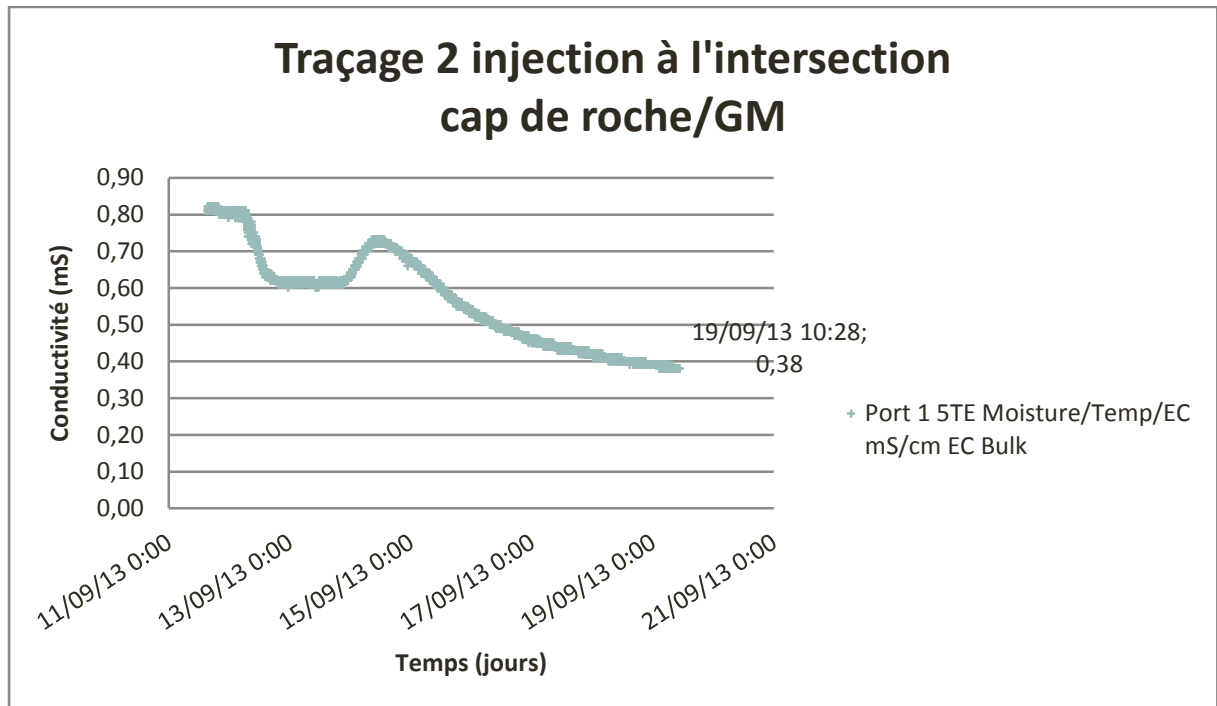


Figure 47 : Deuxième essai de traçage

Sur ce deuxième traçage, l'injection a été faite à l'interface entre le cap de roche et la géomembrane là où avait lieu la quatrième excavation. Nous avons trouvé judicieux de faire cet essai là pour mieux comprendre l'importance de l'arrivée d'eau dans le troisième bac installé pour recueillir les eaux de pluie. Ici encore on observe un pic de conductivité au bout de moins de trois jours et une arrivée du traceur plus de deux jours après l'injection. On peut ici encore émettre l'hypothèse que l'eau qui ruisselle sur le cap de roche arrive en bas de la pente seulement 3 jours après injection et que de ce fait, l'eau qui en sort continuellement est de l'eau liée aux précipitations météorologiques.

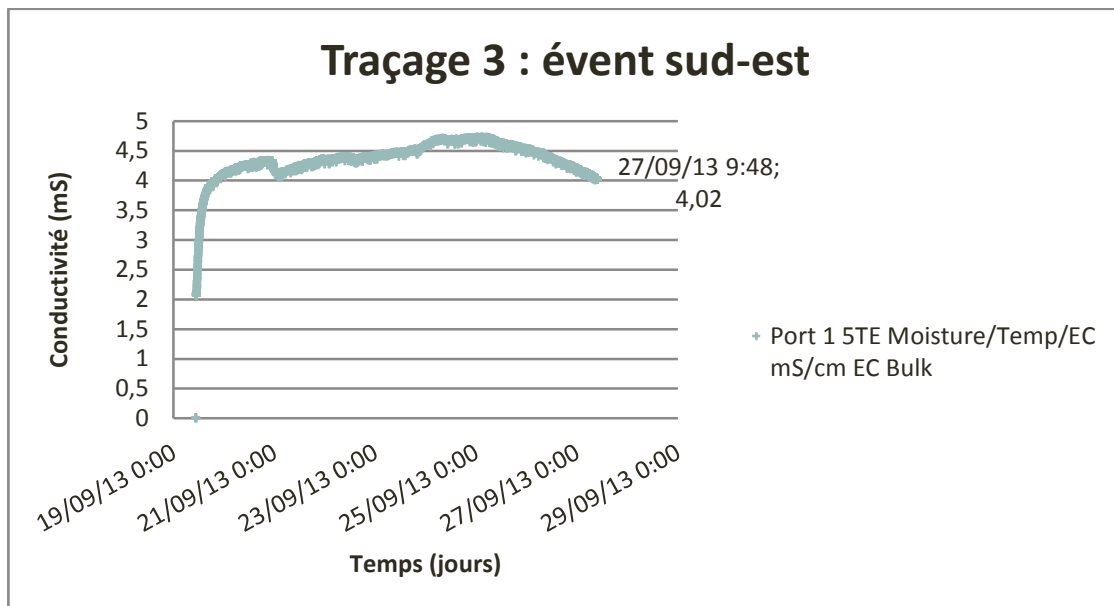


Figure 48 : Troisième essai de traçage

Pour le troisième traçage, l'injection a été effectuée dans l'événement qui se trouve sur le côté sud-est. Ici, le débit dans les Vnoch est très faible comparé aux 2 autres bacs. On observe néanmoins une trace claire et nette de l'arrivée du traceur ici. En effet, en moins de 4h, les premières traces de sel sont déjà arrivées en bas et le fait que la conductivité stagne légèrement tout au long de la prise de mesure pourrait nous indiquer que nous sommes en zone saturée.

On pourrait préconiser de refaire des essais de traçage à l'avenir en utilisant des fluo-traceurs. En effet ici, étant en présence d'eau contaminée par des métaux, cela peut certainement influencer la conductivité alors qu'un fluo-traceur ne serait absolument pas modifié par les conditions physico-chimiques de l'eau.

De manière à prévenir une infiltration non voulue sous la GM et ainsi fausser tout l'efficacité de la GM, on pourrait préconiser la mise en place d'un fossé drainant et prévu pour recueillir uniquement l'eau qui ruisselle sur le cap de roche et surtout la GM (schéma présenté fig 47). En effet elle représente une grande surface pour recevoir des eaux de pluie mais aucune infrastructure n'est prévue pour recueillir et drainer cette dernière.

On pourrait aussi prévoir d'épandre une seconde couche de terre noire de façon à ce que des végétaux puissent vraiment s'enraciner et ainsi mieux maintenir les matériaux

présents sur la butte. Cela préviendrait des glissements de terrain, d'un trop grand ruissellent et garderait plus longtemps l'efficacité et la protection de la GM.

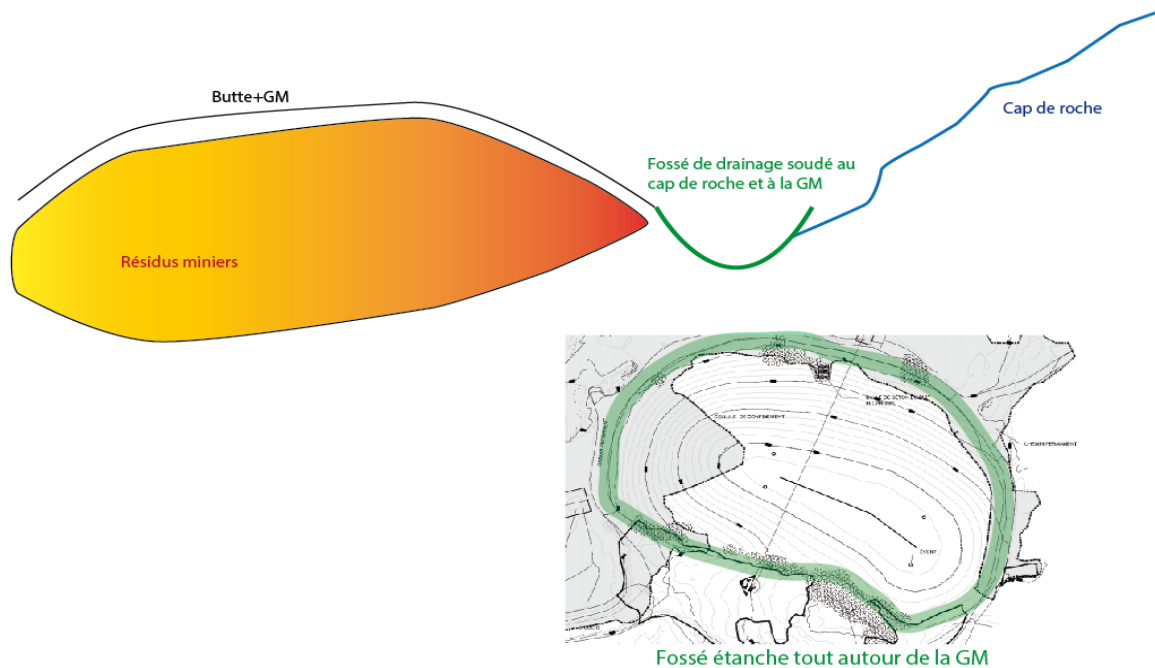


Figure 49 : Schéma de la proposition de fossé

3. L'arpentage de la butte

Pour un premier travail d'arpentage, il a finalement été décidé de réaliser l'arpentage de toute la butte car cela n'avait encore été jamais fait. En effet, ces documents serviront de base pour le suivi des mouvements dans les années à venir. L'arpentage a été réalisé avec un GPS différentiel en mode « stop-n-go ». Le maillage (quadrillé) dépendait des anomalies. En effet lorsque nous avons un plat relativement continu, nous prenions moins de points que lorsqu'il y avait des accidents type gonflements.

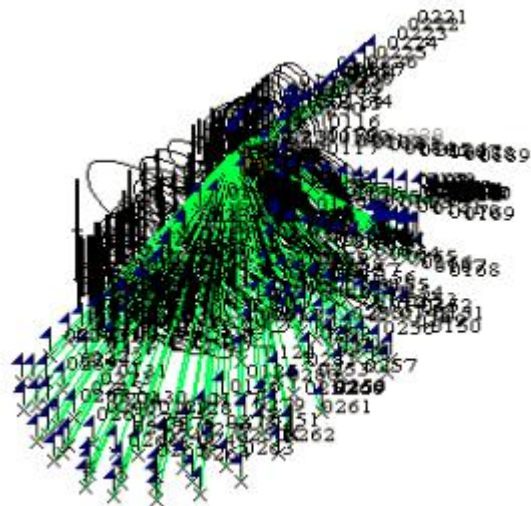


Figure 50 : Quadrillage de la butte

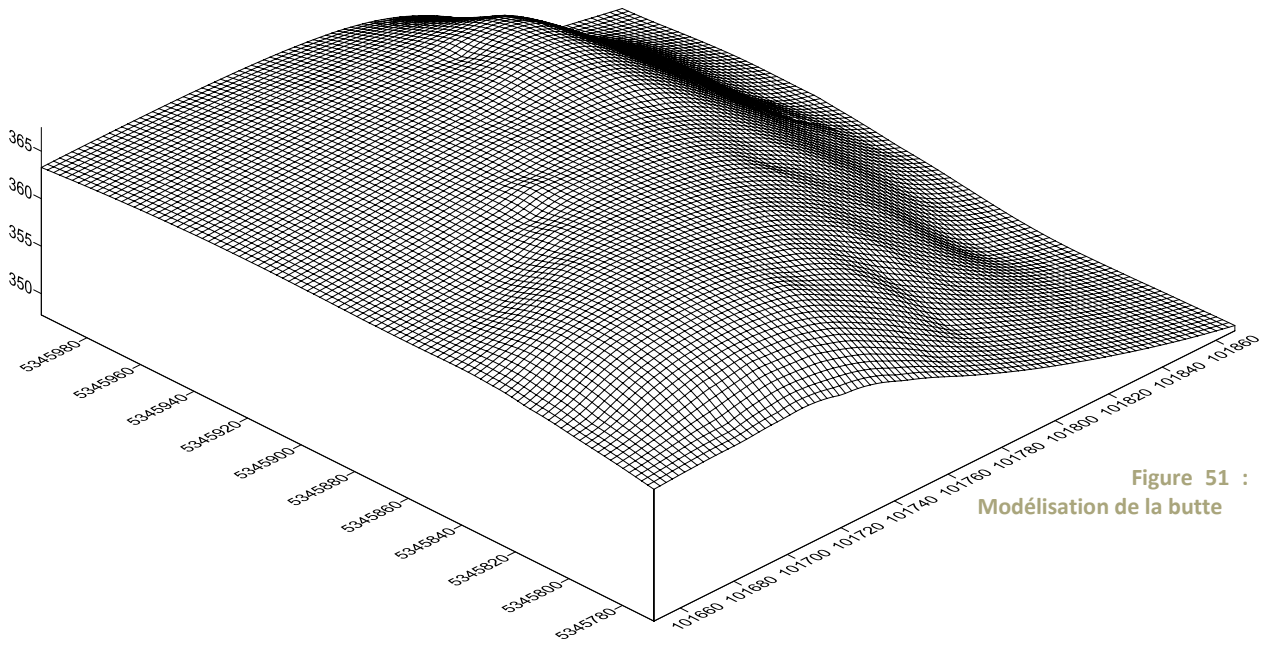
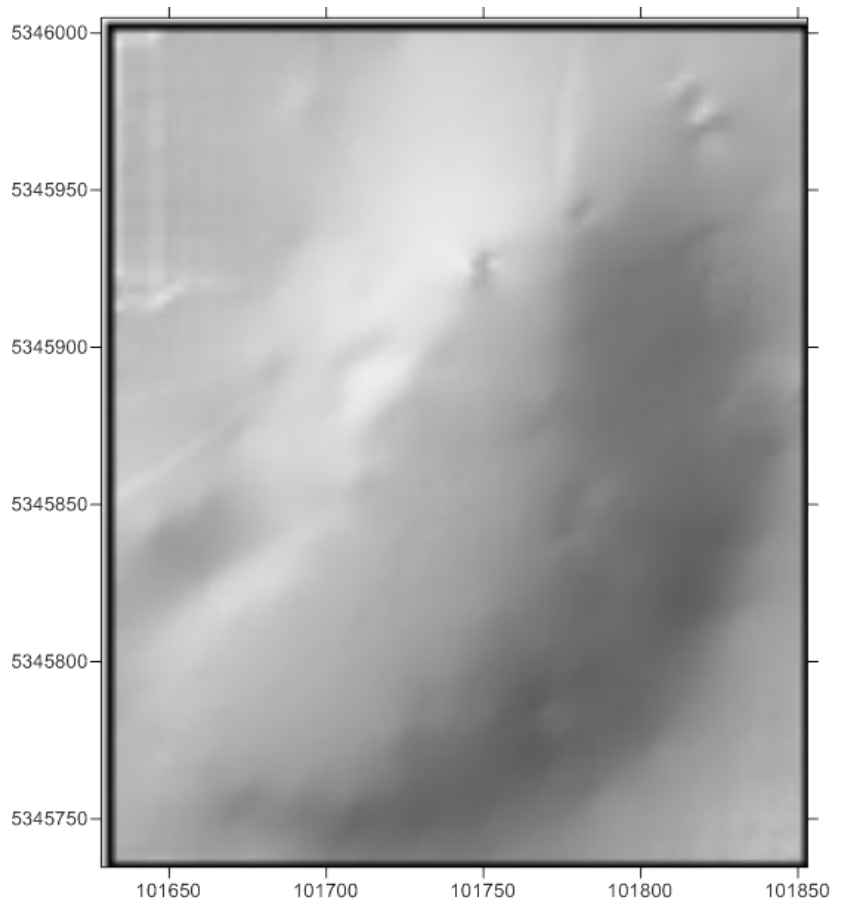


Figure 52 : GPS différentiel



Conclusion

Au cours de ces six mois de stage, la réalisation d'une étude bibliographique approfondie a été bénéfique pour une meilleure et plus complète connaissance du sujet et des enjeux de ce stage. En effet, les problématiques abordées ici sont nouvelles notamment avec l'approche différente de celle abordée en France. Les défis de la restauration minière sont en pleine expansion au Québec. Le fait de travailler dans une Chaire de recherche est très bénéfique dans la mesure où les travaux peuvent se compléter. Certains chercheurs et étudiants donnent leurs avis et leurs idées et une décision est ensuite prise.

Les études qui ont été réalisées pendant cette période ont permis d'affirmer ce qui était supposé depuis longtemps. La GM laisse passer des fluides sur les côtés qui ne sont en fait pas soudés au cap de roche. De nombreuses expériences nous permettent d'affirmer cela. En effet, en plus des débits variant en fonctions des précipitations, on sait que l'eau de traçage ne reste pas plus de 24 heures sous la GM et en plus, des manques de soudure ont tout simplement été observés le long du cap de roche. Des alternatives visant à optimiser cette installation ont été proposées succinctement en fin de rapport.

Ce stage avait pour but de faire évoluer les connaissances sur l'efficacité d'un recouvrement étanche de type géomembrane par le biais de tests in-situ. Les résultats permettront d'engager des recherches plus poussées sur ce type d'installations. Les démarches pour faire avancer le projet passent par un côté administratif et c'est aussi un côté que l'on découvre au cours de cette expérience.

D'un point de vue personnel, cette expérience est extrêmement enrichissante tant du côté découverte que scientifique. Le milieu de la recherche comme telle dans lequel j'ai été accueillie m'était peu familier. Le fait que les recherches menées ici soient totalement axées sur l'environnement me motive énormément sachant que la nature est omniprésente dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue, la région aux 100 000 lacs. Les enjeux environnementaux sont différents de ceux que je connaissais en France et l'apprentissage sur le terrain me paraît indispensable pour réaliser un stage formateur et engageant pour la suite dans ma vie professionnelle.

Bibliographie

Livres :

- A.L.Rollin, P. Pierson et S. Lambert (2002). *Géomembranes : Guide de choix*. Ecole Polytechnique de Montréal
- R. K. Rowe (2004). *Barrier systems for waste disposal facilities 2nd edition*. Spon Press
- Gerard P. T. M. van Santvoort (1994). *Geotextiles and geomembranes in civil engineering*. Balkema A.A. Publishers
- Werner M. Müller(2007).*HDPE Geomembranes in geotechnics*.Springer
- Rollin (1996). Cours intensifs “Les géosynthétiques et l’environnement” Polytechnique
- Van Zyl Hutchison Kiel (1998). Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects.ety of mining engineers inc.

Articles:

- Bussière (2007). “*Colloquium 2004 : Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches* » UQAT
- Nathalie Touze-Foltz. (2002) « Mode de détection de la localisation des défauts dans les géomembranes ».
- Utilisation des géosynthétiques dans les applications minières : synthèse bibliographique et état des connaissances (Touze Foltz & Lupo)
- J.Cyr et al. (2011). *Restauration du site minier Aldermac*. Ministère des Ressources naturelles et de la faune SNC-Lavalin Inc.
- T. Hadara et al. “*DURABILITY EVALUATION OF GEOMEMBRANE LINERS BY OUTDOOR EXPOSURE TEST FOR 10 YEARS*” Marine/Civil Engineering Products Development Dept. Bridgestone Corporation Energy and Environmental Science Graduate School of Engineering, Utsunomiya University Materials & Geotechnical Engineering Research Group, Public Works Research Institute
- J.F. Lupo¹ A.M. ASCE and K.F. Morrison . *Innovative Geosynthetic Liner Design Approaches and Construction in the Mining Industry* A.M. ASCE
- A.B. Fourie et al. “*Improving the performance of mining infrastructure through the judicious use of geosynthetics*”. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010
- Breitenbach, A. J. et al. “*Overview of geomembrane history in the mining industry*” Vector Engineering, Golden, Colorado, USA

- Mariam Ouangrawa & Michel Aubertin & John W. Molson & Bruno Bussière & Gérald J. Zagury. (2010) *“Preventing Acid Mine Drainage with an Elevated Water Table : Long-Term Column Experiments and Parameter Analysis”*. Polytechnique Montréal
- M. Aubertin et al. (2005) « *ÉVALUATION DU COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE ET GÉOCHIMIQUE DES HALDES A STÉRILES* » Polytechnique Montréal
- T. DESCHAMPS et al (2006) « *Mécanismes de rétention des métaux lourds en phase solide : cas de la stabilisation des sols contaminés et des déchets industriels* » Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement. Volume 7 Numéro 2
- P. Crouse et al. (1999), “Geomembrane and GCL mining usage tests Remote mountainous sites in Chile and Colorado supply test pad locations to evaluate geomembrane and GCL field performance for mining applications” Geotechnical Fabrics Report ■ October/November 1999
- Rowe, R. K. (2005). *Geotechnique* 55, No. 9, 631–678 631 “Long-term performance of contaminant barrier systems”
- Nathalie Touze-Foltz (2011). *“Mines : les géosynthétiques dans l’attente d’une réglementation pour la protection de l’environnement”*. Revue T&C
- S. Lambert. (1997) « *Les géomembranes* »
- W.P. Hornsey, D.M. Wishaw. 2012. *“Development of a methodology for the evaluation of geomembrane strain and relative performance of cushion geotextiles”* Revue Geotextiles and Geomembranes N° 35 (2012) 87-99
- S. Gudina, R.W.I. Brachman. 2010. « *Geomembrane strains from wrinkle deformations”* Revue Geotextiles and Geomembranes N° 29 (2011) 181-189
- B. Zhu, D. Gao, Y.M. Chen. (2008) *“Geomembrane tensions and strains resulting from differential settlement around rigid circular structures”* Revue Geotextiles and Geomembranes N° 27 (2009) 53–62
- S. Seeger, H. Böhm, G. Söhring & W. Müller *“Long term testing of geomembranes and geotextiles under shear stress”* Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM), Berlin, Germany

Thèses/Rapports:

- Rapport Final « Développement d’un outil d’optimisation pour la restauration des sites miniers générateurs de DMA : application au site Aldermac » (Bussière et al. 2000)
- Rapport d’avancement « Zone d’épanchement du parc à résidus miniers Aldermac : Etude des techniques de réhabilitation (Bedard. 1997). Ecole Polytechnique
- Ministère des ressources naturelles (1997) Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec
- Thèse de C. Pons « *DURABILITE DES GEOMEMBRANES EN POLYETHYLENE HAUTE DENSITE UTILISEES DANS LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DECHETS NON DANGEREUX* ». Université Paris-Est

- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune Rouyn-Noranda, Québec « Restauration du site minier Aldermac » Rapport tel que construit des travaux effectués en 2008-2009
- COULOMBE V. (2012) « PERFORMANCE DE RECOUVREMENTS ISOLANTS PARTIELS POUR CONTRÔLER L'OXYDATION DE RÉSIDUS MINIERES SULFUREUX » Rapport de Maitrise Polytechnique Montréal.
- Sam Alpay. « *Outils d'évaluation des impacts environnementaux en aval des sites miniers contaminés : l'étude du lac Dasserat* », Commission géologique du Canada, présentation au colloque du 80e Congrès de l'ACFAS : Principaux défis associés à la restauration des sites miniers le 9 mai 2012, Montréal
- Bussière et al. (2011) « *RESTAURATION DU SITE MINIER ALDERMAC : RAPPORT DE FIN D'ANNÉE 2012 (AN 1)* »
- J. Cyr. (2011) « Restauration des sites Miniers » Ministère des Ressources Naturelles du Québec

Supports informatiques:

- « Environnement et gestion des rejets miniers ». (Aubertin, Bussiere et Bernier.2002) Presses internationales Polytechnique
- CD ROM de la conférence « Geosynthetics » 2013. Californie
- Symposium 2011 Rouyn-Noranda sur l'environnement et les mines

Sites internet :

- <http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/>
- <http://www.uqat.ca/programmes/irme/>

