



CONTRÔLE DES INFILTRATIONS D'EAU DANS LES HALDES À STÉRILES À L'AIDE DES EFFETS DE BARRIÈRE CAPILLAIRE : DESIGN, CONSTRUCTION ET INSTRUMENTATION DE LA HALDE EXPÉRIMENTALE DE LA MINE TIO

Bruno Bussière^{1,2}, Benoît Plante^{1,2}, Stefan Broda^{1,3}, Michel Aubertin^{1,3},
Dan Chen⁴, Fernando Medina^{1,3}

¹ Institut de recherche en mines et en environnement (IRME) UQAT-Polytechnique

² Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada

³ Polytechnique Montréal, Montréal, Québec, Canada

⁴ Rio-Tinto Fer et Titane, Sorel-Tracy, Québec, Canada

RÉSUMÉ

Les stériles miniers sont constitués de roche dynamitée, extraite lors de l'exploitation, ne contenant pas (ou pas suffisamment) de minéraux ayant une valeur économique. Ils sont habituellement entreposés en surface sous forme d'empilements appelés haldes à stériles. La structure interne des haldes est complexe en raison des modes de mise en place et de la variabilité des propriétés des stériles. Les caractéristiques particulières des haldes à stériles font en sorte que leur restauration constitue un des défis importants pour l'industrie minière canadienne et mondiale. Le présent article vise à présenter une nouvelle approche de construction et de restauration des haldes ayant pour objectif de contrôler l'infiltration d'eau et la génération de drainage contaminé à l'intérieur des haldes en modifiant la méthode de mise en place. Pour ce faire, on insère des couches inclinées (couches de contrôle des écoulements, ou CCE) composées de matériaux plus fins (par exemple, de stériles non générateurs de contaminants, concassés et compactés, ou de sable) afin de dévier l'eau vers l'extérieur de la halde. Le présent article met l'accent sur les travaux réalisés à la mine Tio, exploitée par Rio Tinto Fer et Titane, où une halde expérimentale instrumentée est en cours de construction afin d'évaluer l'efficacité de l'approche pour le contrôle des infiltrations et de l'écoulement d'eau en situation réelle. De façon plus spécifique, on présente le design de la halde expérimentale, l'instrumentation utilisée pour suivre le comportement hydrogéologique et géochimique ainsi que les différentes étapes de construction.



ABSTRACT

Mine waste rocks are composed of rock blasted during exploitation which do not contain enough economic minerals to justify their processing. Waste rocks are usually stored in waste rock piles. The structure of such waste rock piles is complex because of the heterogeneous *in situ* properties of the waste rocks. Due to these particular properties, waste rock pile reclamation is one of the most significant challenges of the mining industry in Canada and throughout the world. The proposed article aims at presenting a new reclamation approach that consists in controlling water infiltration, unsaturated water flow, and the generation of contaminated drainage water within waste rock piles by modifying the waste rock pile construction method. To do so, inclined layers of unreactive, fine, and compacted materials (for example, non-reactive crushed waste rock or natural sand) are inserted to divert water towards the exterior of the pile. The emphasis of the present study is on field work performed at the Tio mine, property of Rio Tinto Iron and Titanium, where an experimental instrumented waste rock pile is presently build to assess the performance of the proposed approach to control water infiltration and flow in real conditions. More specifically, the article presents the design of the experimental pile, the instrumentation used to monitor its geochemical and hydrogeological behaviour, and the different construction steps.

1. INTRODUCTION

Un des principaux enjeux environnementaux associés à l'exploitation minière est la production de quantités importantes de rejets miniers solides, qui sont entreposés en surface. Ainsi exposés, ils peuvent entraîner la contamination des eaux de drainage. Les principaux rejets solides générés par l'exploitation minière sont les rejets de concentrateur et les stériles miniers (aussi appelés roches stériles, «*waste rock*»); le présent article porte sur ce dernier type de rejets. Les stériles miniers sont constitués de roche dynamitée extraite lors de l'exploitation, ne contenant pas de minéraux ayant une valeur économique (ou en trop faibles quantités pour en justifier le traitement). Ils sont habituellement entreposés en surface sous forme d'empilements appelés haldes à stériles. Ces haldes peuvent être construites de diverses façons, selon la topographie des lieux, la nature et la quantité de roche extraite, la taille de la mine et les équipements disponibles (Morin *et al.*, 1991; Aubertin *et al.*, 2002, 2005). Les haldes à stériles sont des structures complexes en raison de la variabilité des propriétés *in situ* des stériles (rejets hétérogènes à granulométrie étalée allant du mètre au micromètre, propriétés hydro-géotechniques très variables, porosité relativement élevée, particules à angularité marquée, etc.; Herasymuik, 1996; Aubertin *et al.*, 2002, 2005) ainsi que de la méthode de construction des haldes. En effet, la méthode de construction des haldes a un impact sur leurs structures internes (voir figure 1a); par exemple, la méthode du déversement avec épandage au butoir (*push-dumping*) génère des couches de stériles plus fins et compactés en surface en raison de la circulation de la machinerie lourde (Aubertin, 2013; Aubertin *et al.*, 2005 ; Fala *et al.*, 2005; Dawood et Aubertin, 2014).

Les divers minéraux présents dans les rejets miniers (stériles miniers ou rejets de concentrateur) sont susceptibles de réagir avec l'eau et l'air ambiant (oxygène, dioxyde de carbone, humidité). La réactivité de certains de ces minéraux est telle que les produits de réaction peuvent affecter la qualité des eaux de drainage circulant au travers des rejets miniers. C'est particulièrement le cas des minéraux sulfureux tels que la pyrite et la pyrrhotite, dont l'oxydation peut produire de



l'acide sulfurique et libérer des métaux solubles, générant ainsi des eaux de drainage contaminées à pH acide (e.g. Lefebvre *et al.*, 2001; Ritchie, 2003); dans ce cas, on parlera de drainage minier acide (DMA, aussi appelé drainage rocheux acide DRA). En présence de suffisamment de minéraux neutralisants tels les carbonates et silicates, le drainage peut se maintenir à un pH près de la neutralité, en ayant toutefois des concentrations en métaux en solution au-delà des critères applicables (Nicholson, 2004); on parlera alors de drainage neutre contaminé (DNC; Bussière *et al.* 2005). Le DNC fait actuellement l'objet d'un volume de recherche grandissant (Martin *et al.*, 2003; Nicholson, 2004; Brown *et al.*, 2006, 2009; Bussière *et al.*, 2008, 2011; Plante *et al.*, 2010; Warrender *et al.*, 2011).

La structure interne d'une halde à stériles a un impact direct sur la circulation et l'accumulation des fluides (l'eau et l'air) à travers les empilements, et donc sur leur comportement hydrogéochimique (figure 1; Aubertin *et al.* 2002; 2005; Fala *et al.* 2005; Anterrieu *et al.*, 2010 ; Broda *et al.*, 2013a ; Dawood et Aubertin, 2014). Une avenue très prometteuse pour prévenir la génération de DNC ou de DMA dans les haldes à stériles est d'y limiter l'infiltration et l'écoulement profond de l'eau en tirant profit des propriétés des matériaux compactés (Aubertin, 2013 ; Aubertin *et al.*, 2013). Théoriquement, il est possible de limiter l'infiltration d'eau dans les haldes, et donc la génération de drainage contaminé, en générant des couches inclinées de matériaux fins et compactés pendant la construction même des haldes, de façon à leur conférer les propriétés nécessaires (conductivité hydraulique saturée, rétention d'eau, bris capillaire avec les stériles plus grossiers) afin de limiter l'infiltration d'eau et de diriger l'eau infiltrée vers des lithologies non réactives ou hors de la halde (voir figures 1a et b). Grâce à l'établissement d'un effet de barrière capillaire entre la couche de matériau fin et dense et la couche de stériles plus lâche, la couche dense permet de dévier l'eau sur une certaine distance, dont la longueur dépend des propriétés des matériaux (stériles denses et lâches) et de l'épaisseur de la couche dense. Plus d'informations sur les effets de barrière capillaire entre matériaux fins et grossiers peuvent être trouvés dans Bussière (1999) et Aubertin *et al.* (2009).

Des enjeux de DNC ont été observés dans les eaux de drainage des roches stériles provenant de quelques mines au Canada et à l'étranger (voir Rinker *et al.*, 2003; Nicholson, 2004; Bay *et al.*, 2009; Gallegos *et al.*, 2007). C'est le cas notamment au site de la mine Tio, où la concentration en nickel a dépassé occasionnellement les critères environnementaux (Bussière *et al.*, 2008, 2011; Plante *et al.*, 2011a,b). La mine Tio (propriété de la compagnie Rio Tinto Fer et Titane inc.) exploite le plus grand gisement d'ilménite massive au monde. Le gisement de la mine Tio offre encore un large potentiel d'exploitation, ce qui engendrera une grande quantité de stériles à gérer. C'est pourquoi un projet de recherche visant à mieux comprendre le comportement géochimique et hydrogéologique des stériles de la mine Tio a été mis sur pied.

Le présent article vise à présenter les premiers résultats d'un projet de recherche ayant pour objectif de démontrer qu'il est possible de contrôler l'infiltration et l'écoulement non saturé de l'eau, et la génération de drainage contaminé, à l'intérieur des haldes à partir de l'approche décrite par Aubertin (2013). Celle-ci vise à modifier la méthode de construction afin de générer des couches inclinées composées de matériaux plus fins et compactés (couches de contrôle des écoulements, ou CCE). En utilisant un matériau non générateur de contaminants (ex. gangue d'anorthosite presque pure sans sulfure ou matériaux d'origine naturel) ayant un bon contraste hydrogéologique avec les stériles miniers, on diminue le contact entre l'eau et les stériles générateurs de DNC. Le projet vise également à évaluer sous quelles conditions ce contrôle des



infiltrations peut être effectué, afin de pouvoir éventuellement optimiser la technique. Les résultats obtenus de la présente recherche seront exploitables par plusieurs mines produisant à la fois des stériles générateurs et non générateurs de drainage contaminé (DNC, DMA ou autre).

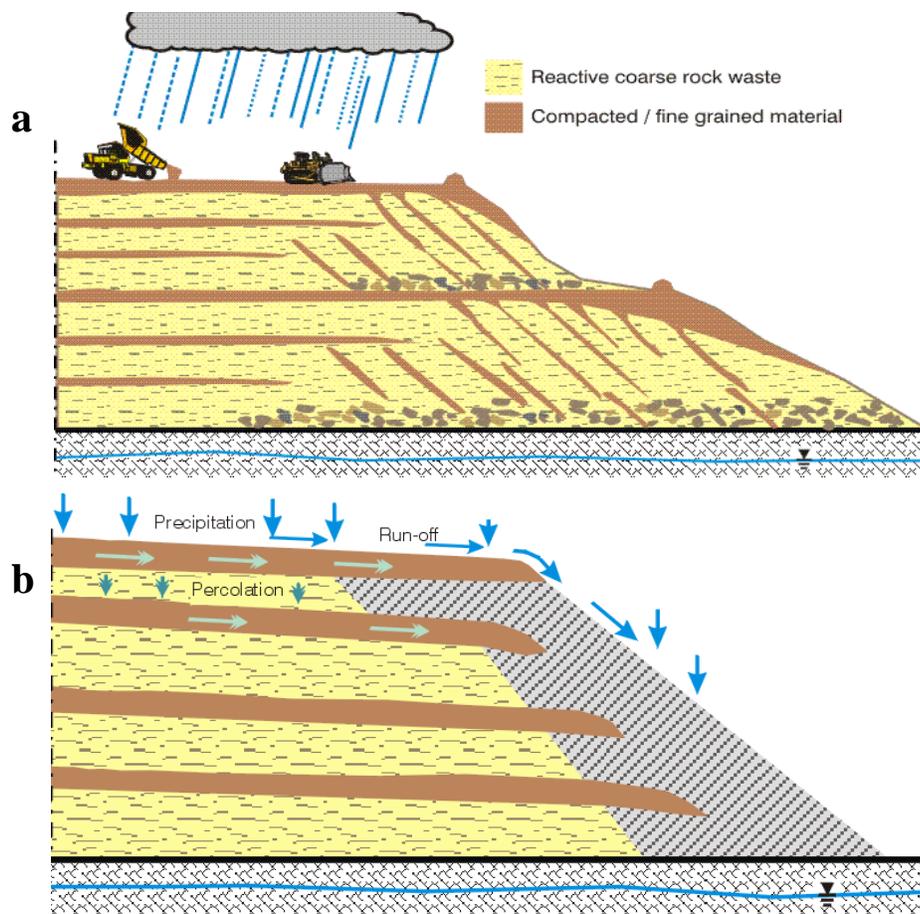


Figure 1. Configuration des bancs de halde à stériles droits (a) et inclinés (b), avec couches compactées (brun), stériles réactifs (jaune) et stériles non réactifs (gris); en (b), le stérile réactif (jaune) est protégé par les écoulements d'eau contrôlés (Aubertin et al., 2005; Aubertin, 2013)

2. ÉTUDES ANTÉRIEURES AU SITE DE LA MINE TIO

Avant de présenter les travaux en cours, il est utile de faire un rappel sur les travaux antérieurs réalisés. Le site retenu pour construire une halde expérimentale est celui de la mine Tio, propriété de Rio Tinto Fer et Titane, situé à 43 km au nord-est de Havre-Saint-Pierre, sur la Côte-Nord, au Québec. Cette mine à ciel ouvert exploite depuis 1950 le plus grand gisement d'hémo-ilménite massive (mélange d'hématite et d'ilménite) de la planète. Les principales activités sur le site de la mine sont l'extraction, le concassage primaire et secondaire (taille < 7,5 cm) et le chargement du minerai de fer et titane pour son transport par train vers Havre-Saint-Pierre. De là, le minerai est chargé sur un minéralier pour être transporté au complexe métallurgique de Sorel-Tracy, à 70 km au nord-est de Montréal.



Les stériles sont entreposés sur le site de la mine, en périphérie de la fosse. Il existe sur le site 4 principaux points de résurgence au bas des haldes, dont certaines des eaux sont caractérisées par une faible teneur en Ni à l'occasion et qui, sans traitement, pourraient être sporadiquement au-dessus du critère en vigueur. De nombreux travaux de caractérisations minéralogiques, géochimiques et hydrogéologiques ont été effectués depuis 2005, afin de comprendre les mécanismes de génération de DNC en Ni par les stériles de la mine Tio (e.g. Bussière *et al.*, 2008; 2011; Demers *et al.*, 2013; Pepin *et al.*, 2008; Plante *et al.*, 2010; 2011a,b, Peregoedova *et al.*, 2013). Les minéraux majeurs présents dans les stériles sont l'hémo-ilménite résiduelle et la gangue, cette dernière étant principalement constituée d'un plagioclase de type andésine. Les minéraux mineurs dans les stériles incluent la chlorite, la biotite, des pyroxènes, du spinelle et des sulfures (i.e. principalement la pyrite FeS_2 - en partie nickélique -, la millérite NiS et la chalcopryrite CuFeS_2). Le nickel est également présent en traces dans les silicates de la gangue et dans l'hémo-ilménite.

Le comportement géochimique des stériles a été étudié par des essais au laboratoire et à l'échelle intermédiaire sur des cellules expérimentales de terrain (Bussière *et al.*, 2008; 2011; Plante *et al.*, 2010, 2011; Demers *et al.*, 2013; Pepin *et al.*, 2008). Les stériles visés ont été échantillonnés afin de refléter leur hétérogénéité en termes de la teneur en ilménite (jusqu'à environ 60 %) et de degré d'altération (stériles frais et stériles ayant subi plus de 25 ans d'exposition aux conditions atmosphériques). Les échantillons ont été soumis à des essais en cellule humide et en mini-cellule d'altération au laboratoire, ainsi qu'en 10 cellules expérimentales construites sur le site de la mine et contenant chacune environ 30 m^3 de stériles. Les résultats démontrent que le nickel est généré par les sulfures présents dans les stériles (pyrite nickélique et millérite) et non par les silicates ou l'hémo-ilménite, et que les minéraux de gangue possèdent un potentiel de rétention des métaux, grâce à des mécanismes de sorption (Demers *et al.*, 2013; Plante *et al.*, 2010, 2011). Les résultats démontrent que les eaux de drainage des stériles fraîchement produits ne sont pas contaminées, alors que les eaux de drainage circulant au travers de stériles altérés sont contaminées en Ni (Plante *et al.*, 2011a; Bussière *et al.*, 2011). Ces résultats indiquent que les teneurs en Ni dans les eaux de drainage augmentent graduellement à mesure que le potentiel de sorption diminue avec l'altération des stériles (Plante *et al.*, 2011b). Les résultats démontrent également que les teneurs en sulfures et en nickel dans les stériles ont généralement tendance à être proportionnelles à celle de l'hémo-ilménite résiduelle; plus les stériles sont riches en hémo-ilménite, plus ils contiennent de sulfures et de nickel, et plus ils sont susceptibles de générer du DNC. Les essais de perméabilité et de rétention d'eau au laboratoire, à l'aide de dispositifs en colonne développés spécialement pour des matériaux grossiers tels que les stériles, ont permis d'évaluer le comportement hydrogéologique (conductivité hydraulique, pression d'entrée d'air et teneur en eau résiduelle) des stériles de la mine Tio (Bussière *et al.*, 2011; Peregoedova, 2012; Peregoedova *et al.*, 2013). Les propriétés mesurées au laboratoire se sont avérées similaires à celles mesurées sur une halde à la mine Tio par des essais d'infiltration et des mesures géophysiques (Anterrieu *et al.*, 2010; Bussière *et al.*, 2011; Dawood *et al.*, 2011; Lessard, 2011).

Ces travaux antérieurs ont donc montré que les différents types de stériles de la mine Tio ont des comportements géochimiques qui sont fonction de leur teneur en hémo-ilménite résiduelle et de leur âge. L'impact de la structure des haldes sur le mouvement de l'eau est également mieux défini grâce à ces travaux. Ces connaissances peuvent maintenant être utilisées pour tester un nouveau scénario d'entreposage des stériles visant à gérer plus efficacement les stériles et, à terme, à restaurer le site.



3. DESIGN DE LA HALDE EXPÉRIMENTALE

Afin de procéder à la conception de la halde expérimentale, des modélisations numériques préliminaires de l'écoulement de l'eau ont été réalisées à l'aide du logiciel HydroGeoSphere, un logiciel permettant la simulation simultanée de l'écoulement de l'eau en surface et souterraine pour des milieux saturé et non saturé. Le logiciel permet d'utiliser deux méthodes distinctes pour simuler l'écoulement préférentiel de l'eau dans les macropores et les fissures d'une halde conceptuelle: i) fractures distribuées aléatoirement (variant en longueur, quantité, ouverture et orientation) tel qu'on l'utilise dans le domaine de l'écoulement de l'eau dans des aquifères en milieu fracturé et ii) une distribution stochastique des faciès (de conductivités hydrauliques saturées définies) générée à l'aide d'une approche probabiliste (Broda *et al.*, 2013a). Les deux méthodes ont donné des résultats qui vont dans le même sens en terme d'écoulement préférentiel qui concordaient bien avec les résultats obtenus dans d'autres études sur le terrain en terme de temps d'arrivée de l'eau à la base de l'empilement suite à des événements de précipitations, avec des vitesses d'écoulement vertical dans les fractures supérieures de quelques ordres de grandeur comparativement à celles dans la matrice poreuse (voir aussi Peregoedova, 2012). **Les résultats ont montré qu'une CCE de 1m inclinée à 5% placée sur des stériles homogènes permet de réduire l'infiltration dans le cœur de la halde jusqu'à 88% (Broda *et al.*, 2014);** la figure 2 illustre les volumes récupérés au bas de la halde de 65m de long pour une année type. Cependant, la figure 2 montre également que la présence de macropores (fractures) ou de zones à hautes conductivités à l'interface entre la CCE et les stériles peut affecter significativement l'efficacité des effets de barrière capillaire à dévier l'eau à l'interface (plus il y a de macropores, plus il y a des infiltrations à l'intérieur de la halde). Les macropores qui ne rejoignent pas l'interface ont peu d'effet sur la percolation à travers la CCE (résultats non montrés ici). Dans la pratique, il serait donc important de minimiser la présence des macropores à l'interface avant la mise en place de la CCE afin de s'assurer d'une performance maximale pour dévier l'eau.

Ces modélisations avaient entre autre pour objectif d'évaluer la taille nécessaire de la halde pour permettre de bien évaluer le concept de déviation de l'eau par les effets de barrière capillaire entre une couche fine compactée et le stérile en place. Basés sur plusieurs résultats de simulations (non montrés ici), il a été proposé de construire une halde expérimentale constituée d'une rampe de 70 m de longueur (pente de 10 %) afin d'atteindre une hauteur de 7 m. La rampe permet le déchargement des stériles selon un mode de déversement avec épandage au boteur (*push-dumping*) tel que réalisé présentement à la mine Tio (avec la différence que la pente est vers l'extérieur de la halde au lieu de vers l'intérieur). La halde expérimentale fait environ 69 m de longueur avec une pente de 5 % (voir figure 3). Le cœur de la halde est constitué de stériles minéralisés (contenant >5 % d'hémo-ilménite) générateurs de DNC, alors que son extrémité est construite avec des stériles non-réactifs (principalement de l'anorthosite contenant moins de 5 % d'hémo-ilménite et moins de 0,1 % de soufre). Au total, la halde expérimentale couvrira une superficie de 4900 m² ou 0,49 hectares (i.e. 139 m de longueur par 35 m de largeur). La couche de CCE sera d'une épaisseur de 1m et sera constituée d'un matériau non réactif ayant des propriétés hydrogéologiques adéquates (stériles concassés et/ou sable – configuration finale à confirmer).

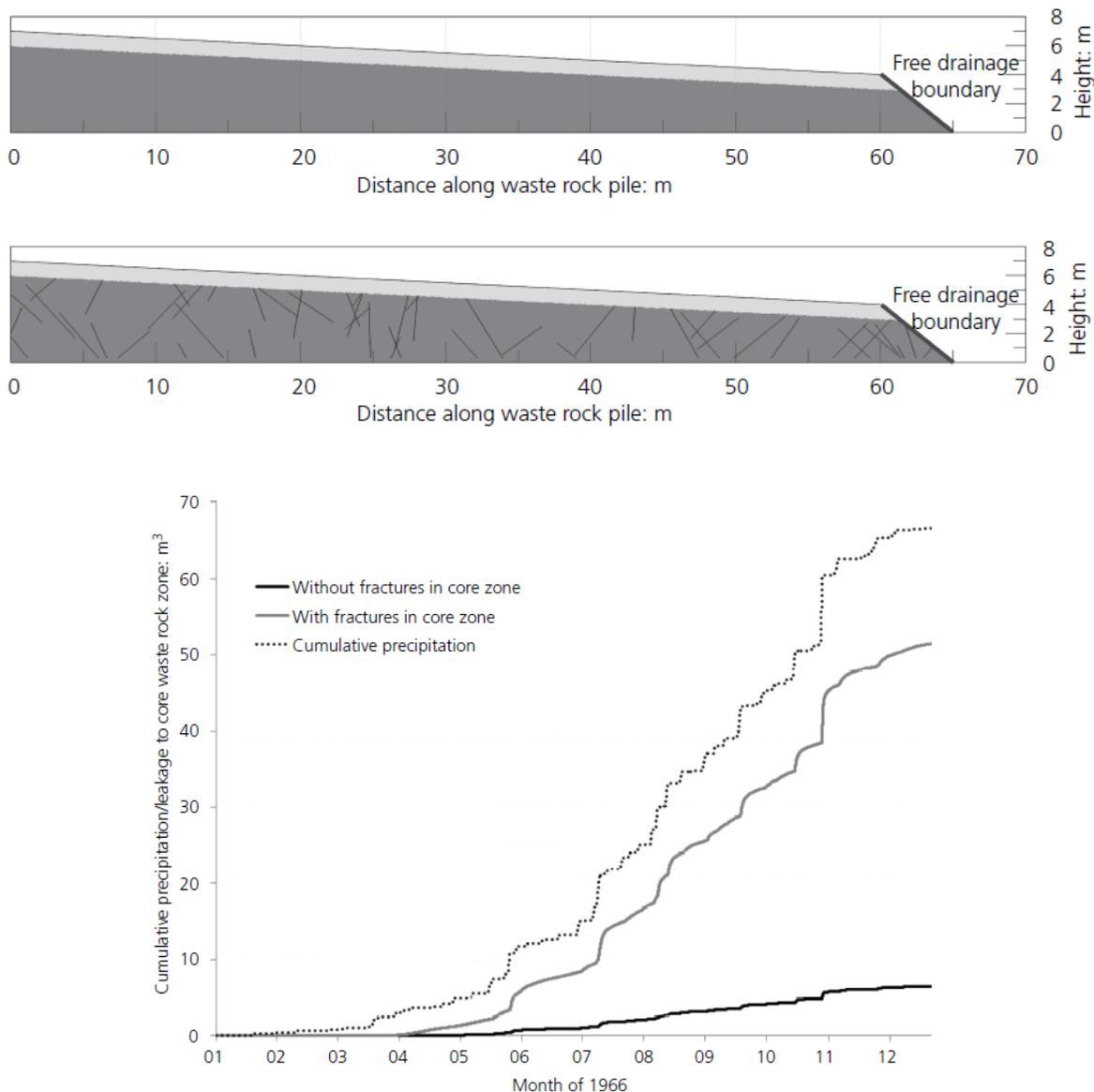


Figure 2. Modèle numérique testé (au haut de la figure); au bas, précipitation cumulative (lignes pointillées) et percolation à travers la CCE à l'interface entre le matériau fin compacté et les stériles, pour le cas sans (ligne noire pleine) et avec (ligne grise pleine) fractures (macropores) dans les stériles pour une simulation d'une année; géométrie testée : halde de 7 m de haut à l'extrémité, pente de 5%, longueur de 65 m et CCE de 1 m (tirée de Broda et al., 2014)

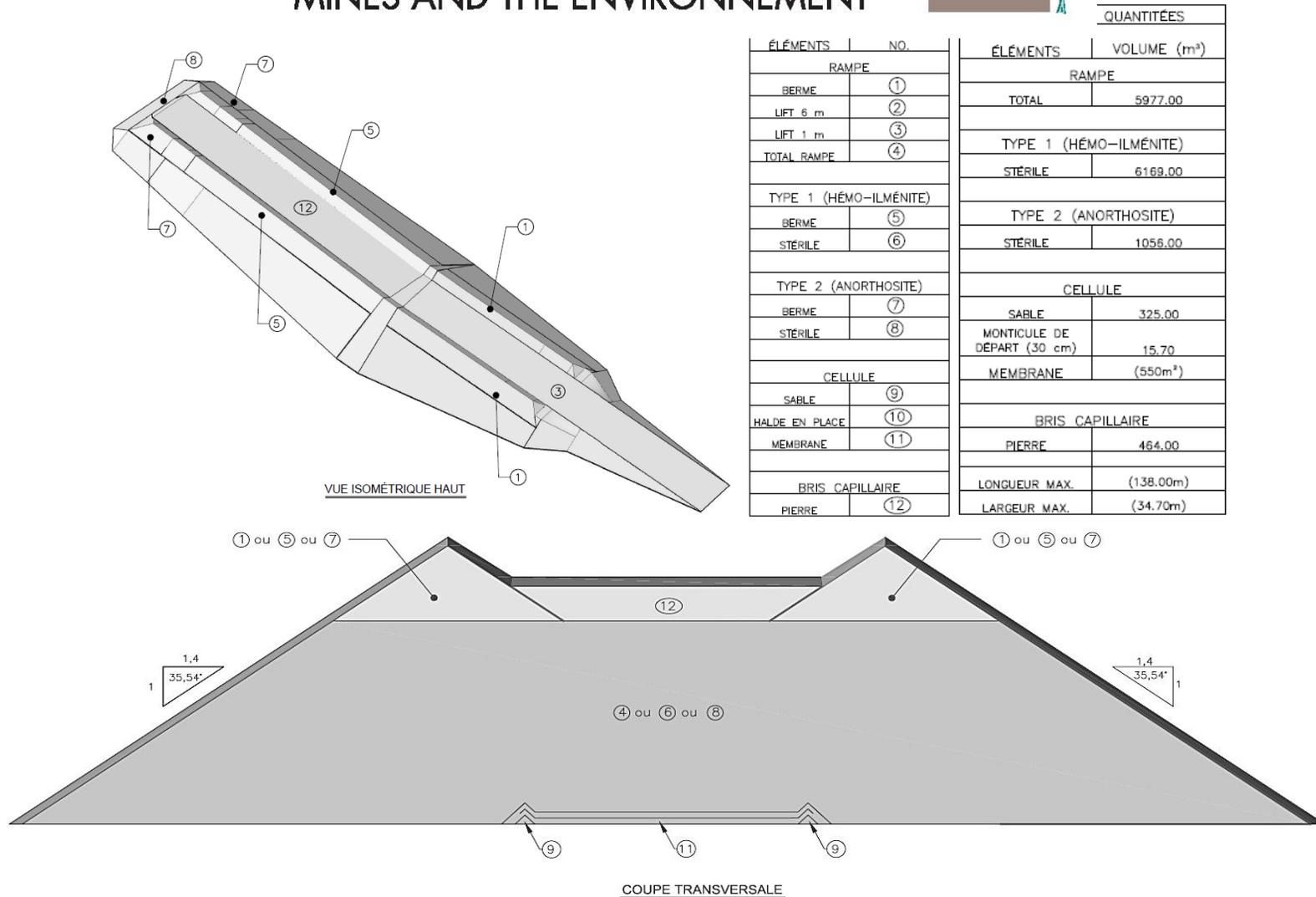


Figure 3. Plan de la halde expérimentale construite au site de la mine Tio avec une vue isométrique, une coupe transversale, une coupe longitudinale et un tableau des quantités approximatives de matériaux utilisés pour la construction



4. INSTRUMENTATION DE LA HALDE EXPÉRIMENTALE

Au fond de la halde expérimentale, 6 lysimètres adjacents de 10 m de longueur et 10 m de largeur permettent de récolter les eaux ayant percolé jusqu'au fond de la halde. Ces lysimètres sont constitués d'une géomembrane protégée par une couche de sable compacté de part et d'autre de la membrane et environ 1 m de stériles déposés avec précaution sur la couche supérieure de sable, afin d'en assurer l'intégrité durant la construction de la halde. Les eaux de drainage sont récoltées par un drain agricole de 10 cm de diamètre et acheminées hors de la halde expérimentale. Des récepteurs à auget (couverts et à l'abri des intempéries) seront utilisés afin d'enregistrer en continu les volumes d'eau recueillis par chaque lysimètre, qui peuvent être convertis en débits. Les eaux de drainage récoltées par chaque lysimètre pourront être analysées pour leurs propriétés géochimiques (pH, conductivité, métaux). Une station météorologique est déjà installée à proximité de la halde expérimentale afin de mesurer les précipitations, l'humidité relative, la température et la vitesse/direction des vents.

La halde expérimentale contient des sondes de mesure de la teneur en eau volumique par réflectométrie au domaine de la fréquence (modèles GS3 de Decagon Devices) et de succion matricielle (senseurs MPS-2 de Decagon Devices et tensiomètres). Les senseurs ont été installés à différentes profondeurs dans 6 stations d'instrumentation distancées de 10 m dans la halde expérimentale, afin de suivre les écoulements d'eau (voir figure 4 pour un exemple de station d'instrumentation). Les instruments sont reliés à des enregistreurs de données Em50 de Decagon Devices. Chaque station a son propre enregistreur afin de minimiser le risque de pertes de données en cas de mauvais fonctionnement. Des sondes géophysiques permettant les mesures de résistivité (Intissar, 2009; Anterrieu *et al.*, 2010) seront également installées au bas et au haut de la halde, afin de suivre les écoulements d'eau et compléter les résultats des mesures de teneur en eau volumique. Ces sondes sont constituées de rondelles d'acier inoxydable de 10 cm de diamètre et 0,75 cm d'épaisseur, munies d'un fil de cuivre fixé à l'aide d'un écrou et d'un boulon au centre des rondelles. De plus, des câbles DTS (*distributed temperature sensing*) sont installés dans la halde expérimentale (voir figure 5 pour leur emplacement) afin de suivre l'écoulement de l'eau (flux et teneurs en eau volumiques) à travers la halde expérimentale (Broda *et al.*, 2013b). La méthode DTS est basée sur l'utilisation d'une source laser pulsée émise dans un câble de fibre optique installé dans la halde. La lumière rétrodiffusée (*backscattered*) peut être utilisée pour obtenir des informations sur la répartition des températures le long de la fibre, qui est modifiée par la teneur en eau (et son écoulement) dans le milieu. On peut ainsi évaluer l'emplacement de l'eau, le moment d'arrivée du front de mouillage et la quantité de drainage. La méthode DTS offre plusieurs avantages, incluant un petit intervalle d'échantillonnage (0,125 m) et l'enregistrement des données spatialement et temporellement (jusqu'à 1 s) presque continu plutôt que des mesures ponctuelles obtenues avec des méthodes classiques (Broda *et al.*, 2013b).

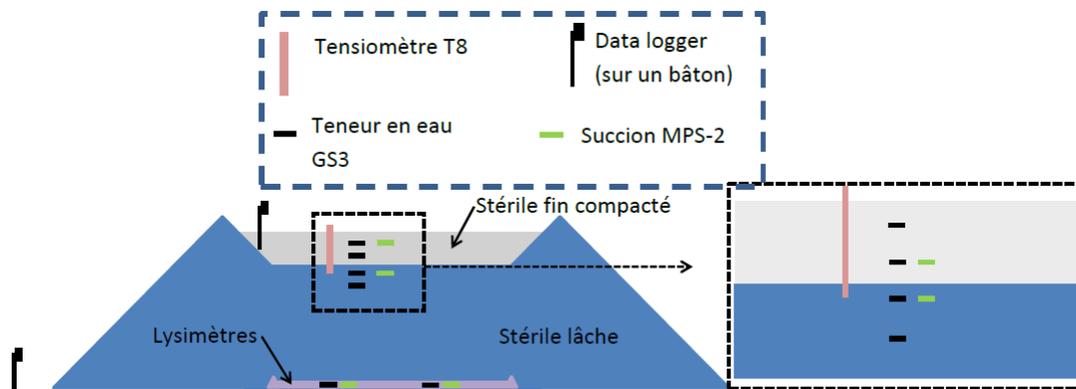


Figure 4. Schéma de localisation des sondes de mesure de la teneur en eau volumique GS3 et des tensiomètres TS1 et MPS-2. Gris pâle: matériaux fins qui pourraient être des stériles anorthositiques concassés et compactés ou un sable; bleu : autres stériles (minéralisés ou non)

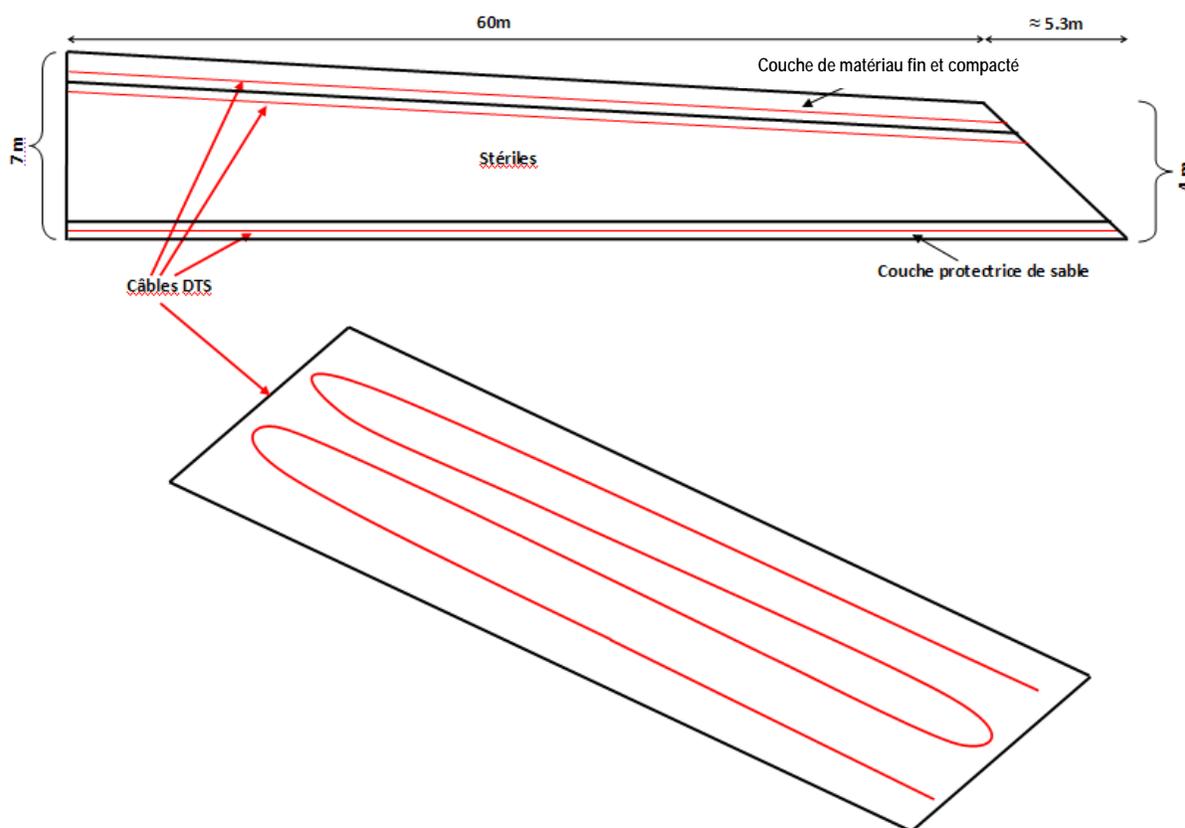


Figure 5. Schéma d'installation des câbles DTS (lignes pointillées), vue transversale (en haut) et vue de l'agencement en serpentin de chacun des câbles DTS (en bas)



5. CONSTRUCTION DE LA HALDE EXPÉRIMENTALE

La construction de la halde expérimentale a débuté à l'été 2014 et on prévoit finaliser la mise en place de la couche CCE en 2015. Les principales étapes de la construction de la halde expérimentale (sans la CCE) sont détaillées dans ce qui suit.

5.1 Mise en place des lysimètres

Avant de construire les lysimètres, le terrain a été arpenté pour définir l'emplacement exact des lysimètres au sol. Le terrain a été nivelé avant de déposer la couche inférieure de sable. Des bermes ont été formées en périphérie de chacun des lysimètres et une pente de 1 à 2 % a été donnée aux lysimètres, de l'extérieur vers le centre, afin d'y acheminer les eaux récoltées vers le drain de collecte (figure 6a). Les pentes ont été méticuleusement contrôlées (formées à la pelle et au râteau) et le sable a été compacté à la plaque vibrante de 15 kN (figure 6b).



Figure 6. Aménagement du drain de collecte (a) et compaction de la couche de sable inférieure des lysimètres (b)

Par la suite, une géomembrane a été déployée sur chacun des lysimètres (figure 7a). Elles sont percées au centre afin d'y faire passer le drain de collecte. L'étanchéisation du lien géomembrane-drain a été assurée par un passe-paroi (figure 7b). L'étanchéité des lysimètres a été vérifiée lors d'un épisode de pluie, combiné à un arrosage.



Figure 7 : Géomembrane déployée sur un lysimètre (a) et passe-paroi pour le drain après installation (b)



Enfin, la couche supérieure de sable a été installée avec précaution par-dessus la géomembrane avec une chargeuse et méticuleusement étalée à la pelle et au râteau, en prenant soin de ne pas percer la membrane (figure 8a et b). Cette couche de sable a également été compactée à la plaque vibrante.



Figure 8. Installation du sable par-dessus la membrane des lysimètres (a) et aperçu des lysimètres après compactage de la couche de sable de protection par-dessus la géomembrane (b)

5.2 Installation de l'instrumentation au bas de la halde

Différents instruments ont été installés dans les six lysimètres, dans la couche de sable au-dessus de la membrane. La figure 8a montre le déploiement des électrodes de géophysique, alors que la figure 9b et c montrent respectivement les sondes de teneur en eau volumique GS3 et de succion MPS-2. Enfin, la figure 8d montre un débitmètre à auget (type pluviomètre) après installation. Les données des sondes de teneur en eau volumique et de succion, de même que les débitmètres à auget, sont stockées dans des enregistreurs de données Em50 de Decagon (dont le boîtier de protection, en rouge, est visible sur la figure 9d).



Figure 9. Électrodes de géophysique (a), sondes de teneur en eau GS3 (b) et de succion MPS-2 (c) dans les lysimètres, et vue d'un débitmètre à auget et d'un enregistreur de données Em50 (d)

Enfin, la figure 10a et b montrent respectivement l'installation du câble DTS dans la tranchée manuellement excavée et son remblayage. Afin d'obtenir une haute résolution in situ de la conductivité thermique et de la capacité calorifique spécifique dans les matériaux testés, deux câbles DTS ont été installés en parallèle avec une distance constante entre eux (10 mm) à l'aide d'attaches autobloquantes. Une attention particulière a été apportée à l'installation des câbles, en évitant de tordre les câbles et en évitant également d'avoir des sections suspendues, de façon à minimiser les tensions sur les câbles (et minimiser les risques de bris). Pendant qu'un des câbles est chauffé par un courant électrique se propageant dans les fils de protection (Joule heating), l'autre câble demeure non chauffé permettant d'obtenir des températures de références pour les calculs de flux et de teneur en eau volumique (voir Broda *et al.*, 2013b). Après l'installation du câble DTS, la tranchée a été manuellement remblayée (à la pelle) et compactée à la plaque vibrante. L'emplacement du câble DTS et des autres instruments a ensuite été défini par arpentage et l'intégrité du câble DTS a été vérifiée par analyse du signal.

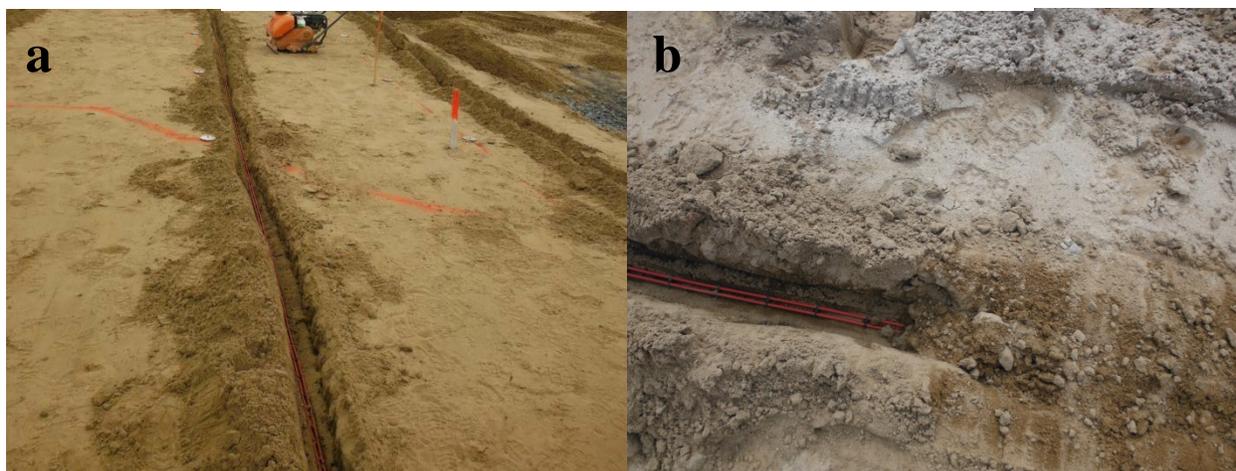


Figure 10. Installation du câble DTS des lysimètres (a) et remblayage de la tranchée (b)

5.3 Installation de la couche protectrice de fond

Afin de protéger les lysimètres et l'instrumentation au bas de la halde (du déversement qui se fera à partir du haut de la rampe de 7 m), une couche de stériles d'environ 1 m d'épaisseur a été délicatement déposée sur la couche de sable de protection supérieure à l'aide d'une pelle mécanique (figure 11). Des stériles minéralisés ont été déposés sur les premiers 5 lysimètres (les premiers 50 m), alors que des stériles non réactifs (anorthosite) ont été déposés sur le lysimètre du bout de la halde (dernier 10 m; voir figure 3).



Figure 11. Installation de la couche de stériles de protection des lysimètres à la pelle mécanique



5.4 Construction de la rampe

La rampe a été construite en parallèle avec la construction des lysimètres (figure 12), en utilisant du stérile tout-venant issu de la production, avec une pente de 10 %. Aucune précaution particulière n'a été apportée au contenu de ces stériles puisqu'aucun suivi particulier n'y sera associé. La rampe a pour seule fonction de permettre la construction de la halde à partir d'une hauteur de départ de 7m (voir figure 3).



Figure 12. Construction de la rampe de la halde expérimentale

5.5 Mise en place des stériles

La mise en place des stériles a débuté immédiatement après la construction de la rampe. Les stériles ont été déposés selon la méthode d'épandage au bouteur («push-dumping»). La surface des stériles suit une pente descendante de 5 %. Des stériles minéralisés sont déversés sur les 50 premiers mètres, alors que des stériles anorthositiques sont déversés sur le dernier 10 m. La figure 12 montre les stériles durant la mise en place.

Tout au long de la construction de la halde expérimentale, des échantillons de stériles d'environ 3 kg ont été prélevés à la pelle et ensachés, à un rythme d'environ 1 échantillon tous les 7 à 10 chargements de camions (de 100 t), pour un total de 30 échantillons. Les échantillons sont prélevés en haut de la halde ou à mi-pente, puisqu'au bas de la pente les particules sont trop grossières (>30 cm, jusqu'à 1 m). La mise en place des stériles a également été documentée à l'aide de photographies de l'avancée de la halde à stériles, de face (figure 14a) et du dessus (figure 14b). Les images ont été géolocalisées et seront interprétées pour déduire la structure interne de la halde, en évaluant la distribution granulométrique des stériles par analyse d'image.



Figure 13. Mise en place des stériles sur la halde expérimentale; on aperçoit le bouteur en arrière-plan qui attend pour pousser les stériles et régaler la pente



Figure 14. Construction de la rampe de la halde expérimentale

5.6 Mise en place de l'instrumentation au haut de la halde

Après la mise en place des stériles, une tranchée a été creusée au haut de la halde afin d'y installer un câble DTS en prenant exactement les mêmes précautions décrites précédemment pour le bas de la halde expérimentale. La tranchée dans les stériles a été faite à l'aide d'une excavatrice; la taille des particules empêchait l'excavation manuelle. Cette étape a posé un défi important pour le maintien de l'intégrité du câble : il a été nécessaire de remblayer la tranchée manuellement, en sélectionnant la partie fine (environ < 5cm) des stériles excavés pour délicatement recouvrir le câble, avant de remblayer la tranchée mécaniquement. Le matériel a ensuite été compacté par la machinerie. La figure 15 montre le câble DTS en cours d'installation



dans sa tranchée et illustre la taille des blocs rencontrés. Les instruments supplémentaires (électrodes de géophysique, dernier câble DTS, sondes de teneur en eau volumique et de succion, tensiomètres) seront installés dans la couche de contrôle des écoulements (CCE) par-dessus les stériles au cours de l'année 2015.



Figure 15 : Installation du câble DTS dans les stériles minéralisés et exemple de bloc à enlever pour protéger le câble DTS

6. TRAVAUX À VENIR

Au cours des prochaines semaines, des mesures seront réalisées afin d'évaluer le comportement hydrogéologique de la halde expérimentale, sans la présence de la CCE. Par la suite, la CCE sera mise en place et instrumentée de différents équipements : électrodes de géophysique, sondes de teneur en eau volumique et de succion, câble DTS et tensiomètres. Une attention particulière devra être apportée à l'obtention d'une interface la plus régulière possible entre les stériles de la halde et la CCE. Les matériaux échantillonnés durant la construction de la halde seront caractérisés en détails. Le comportement hydrogéologique et géochimique de la halde expérimentale sera suivi au site de la mine Tio pour une exposition aux conditions naturelles. Des essais d'infiltration seront également réalisés en ajoutant à la surface des volumes d'eau connus. Les mesures réalisées durant ces essais seront ensuite comparées à celles prédites à l'aide d'outils numériques et une extrapolation des résultats obtenus à l'échelle de la halde expérimentale sera réalisée pour des échelles de plus grandes dimensions. L'objectif ultime est d'évaluer s'il est possible de contrôler les infiltrations d'eau dans une halde à stériles à l'aide de couches de contrôle des écoulements (CCE) placées de façons stratégique et ainsi éviter les problèmes de contamination des eaux par le DMA ou le DNC.

REMERCIEMENTS



Les auteurs remercient le CRSNG, via son Programme de subventions de recherche et développement coopérative, ainsi que Rio Tinto Fer et Titane, IAMGOLD et Canadian Malartic qui financent ce projet. Nos remerciements vont également au personnel de Rio Tinto Fer et Titane, en particulier Roger Leblanc et Jacinthe Légaré, ainsi que tous les opérateurs et superviseurs de la mine Tio qui ont contribué à la construction de la halde expérimentale. Enfin, merci au personnel de l'URSTM pour leur participation et leur dévouement aux travaux de terrain : Patrick Bernèche, Pierre-Alain Jacques, Alain Perreault, Yvan Poirier et Olivier Peyronnard. Merci également aux stagiaires Antoine Laporte et Guillaume Clouette-Gauthier. Merci aussi aux étudiants gradués et stagiaires qui participent à ce projet.

RÉFÉRENCES

- ANTERRIEU, O., CHOUREAU, M., AUBERTIN, M. (2010) Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 69: 533-548.
- AUBERTIN, M. (2013). Waste rock disposal to improve the geotechnical and geochemical stability of piles. 23rd World Mining Congress, held in conjunction with ISARC 2013, Montreal, Qc, August 11-15, 8p.
- AUBERTIN, M., JAMES, M., MAKNOON, M., BUSSIÈRE, B. (2013). Recommandations pour améliorer le comportement hydrogéotechnique des haldes à stériles. 66th Canadian Geotechnical Conference and the 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, GeoMontreal 2013, Geoscience for Sustainability 8p.
- AUBERTIN, M., FALA O., BUSSIÈRE, B., MARTIN, V., CAMPOS, D., GAMACHE-ROCHETTE, A., CHOUREAU, M. and CHAPUIS, R. (2002). Analyse des écoulements de l'eau en conditions non saturées dans les haldes à stériles. *Symposium 2002 sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda, CD-ROM*.
- AUBERTIN, M., FALA, O., MOLSON, J., GAMACHE-ROCHETTE, A., LAHMIRA, B., MARTIN, V., LEFEBVRE, R., BUSSIÈRE, B., CHAPUIS, R.P., CHOUREAU, M. WILSON, G.W. (2005). Évaluation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles. *Symposium Rouyn-Noranda: L'Environnement et les Mines, mai 2005, Rouyn-Noranda, CD-ROM*.
- BAY, D.S., PETERSON, H.E., SINGURINDY, O., ARANDA, C., DOCKREY, J.W., SIFUENTES, V.F., MAYER, K.U., SMITH, L., KLEIN, B., BECKIE, R.D. (2009). Assessment of neutral pH drainage from three experimental waste-rock piles at the Antamina Mine, Peru, 8th ICARD, Skelleftea, Sweden.
- BRODA, S., AUBERTIN, M., BLESSENT, D., HIRTHE, E., GRAF, T. (2015). Improving control of emissions from waste rock piles. *Environmental Geotechnics* (available online, DOI: 10.1680/envgeo.14.00023).
- BRODA, S., HIRTHE, E., BLESSENT, D., AUBERTIN, M., GRAF, T. (2013a). Using random discrete fractures for representing preferential flow in waste rock piles with compacted



- layers. 66th Canadian Geotechnical Conference and the 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, GeoMontreal 2013, Geoscience for Sustainability 8p.
- BRODA, S., SAYDE, C., SELKER, J., AUBERTIN, M., BLESSENT, D. (2013b) Using temperature as a tracer for analyzing the response of a capillary barrier in waste rock. 66th Canadian Geotechnical Conference and the 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, GeoMontreal 2013, Geoscience for Sustainability, 7p.
- BROWN, D., SALZSAULER, K., VERBURG, R., SIFUENTES, F., ARANDA, C. (2009). Geochemical characterization of waste rock using field kinetic testing at the Antamina mine, 8th ICARD, Skelleftea, Sweden. June 22-26, USB key.
- BROWN, D., VERBURG, R., LETIENT, H., ARANDA, C. (2006). Geochemical characterization and water quality prediction at the Antamina mine. Proc. 7th ICARD, St-Louis, MO, USA, March 26-30, 291-305. CD-Rom.
- BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., ZAGURY, G. J., POTVIN, R. et BENZAAZOUA, M. (2005). Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnés. Symposium 2005 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, 15-18 mai 2005, Institut canadien des mines, de la métallurgie et du pétrole (ICM) [sur CD Rom].
- BUSSIÈRE, B., BENZAAZOUA, M., PLANTE, B., PÉPIN, G., AUBERTIN, M., LAFLAMME, D. (2008). Évaluation du comportement géochimique des stériles miniers de la mine Tio, Havre-St-Pierre, Québec. Symposium Rouyn-Noranda sur l'environnement et les mines, 02-05 Novembre 2008. CIM.
- BUSSIÈRE, B., DEMERS, I., DAWOOD, I., PLANTE, B., AUBERTIN, M., PEREGOEDOVA, A., PEPIN, G., LESSARD, G., InTissar, R., BENZAAZOUA, M., MOLSON, J.W., CHOUTEAU, M., ZAGURY, G.J., MONZON, M., LAFLAMME, D. (2011). Comportement géochimique et hydrogéologique des stériles de la mine Lac Tio, Symposium sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Canada, CD-Rom.
- DAWOOD, I., AUBERTIN, M. (2014), Effect of dense material layers on the unsaturated water flow inside a large waste rock pile: A numerical investigation. *Mine Water and the Environment*, doi 10.1007/s10230-013-0251-7.
- DAWOOD I, AUBERTIN M, INTISSAR R, CHOUTEAU M (2011). A combined hydrogeological–geophysical approach to evaluate unsaturated flow in a large waste rock pile. 14th Pan-American conference on soil mechanics and geotechnical engineering (PCSMGE), 64th Canadian geotechnical conference (CGC), and 5th Pan-American conference on teaching and learning of geotechnical engineering (PCTLGE), Toronto, ON, Canada, 8p.
- DEMERS, I., MOLSON, J.W., BUSSIÈRE, B., LAFLAMME, D. (2013). Numerical modelling of contaminated neutral drainage from a waste-rock field test cell. *Applied Geochemistry*, 33: 346-356.



- FALA, O., MOLSON, J., AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B. et CHAPUIS, R.P. (2005). Numerical modelling of flow and capillary barrier effects in unsaturated waste rock piles. *Mine Water and the Environment*, 24:172-185.
- GALLEGOS, J.C.C., BAY, D.S., BECKIE, R., KLEIN, B., MAYER, U., SMITH, L., WILSON, W.G., BRIENNE, S., LETIENT, H. (2007). Design and construction of field-scale waste rock test piles at the Antamina Mine, Peru. *Geotechnical News* 25, 49-53.
- HERASYMUIK, G.M. (1996). Hydrogeology of a sulfide waste rock dump. Masters' Thesis, Civil Engineering Department, University of Saskatchewan, Saskatchewan, Canada.
- INTISSAR, R. (2009). Apport des méthodes électriques à la détermination de la structure interne d'une halde à stériles. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.
- LEFEBVRE, R., HOCKLEY, D., SMOLENSKY, J., LAMONTAGNE, A. (2001). Multiphase transfer processes in waste rock pile producing acid mine drainage, 2: applications of numerical simulations. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52:165-186.
- LESSARD, G. (2011). Essais d'infiltration sur la halde à stériles petit-pas de la mine Tio, Havre-Saint-Pierre. Rapport de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.
- MARTIN, A.J., PEDERSEN, T.F., CRUSIUS, J., MCNEE, J.J. YANFUL, E.K. (2003). Mechanisms of metal release from subaqueous mine waste at circum-neutral pH – examples from four case studies. Proc. 6th ICARD, Cairns, Queensland, 12-18 July 2003, 297-306.
- MORIN, K.A., GERENCHER, E., JONES, C.E., KONASEWICH D.E. (1991). Critical literature review of acid drainage from waste rock. MEND Report 1.11.1, Secrétariat CANMET, Ottawa.
- NICHOLSON, R.V. (2004). Review of water quality issue in neutral pH drainage: Examples and emerging priorities for the mining industry in Canada. MEND Report 10.1. Secrétariat CANMET, Ottawa.
- PEPIN, G., BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., BENZAAZOUA, M., PLANTE, B., LAFLAMME, D., ZAGURY, G. (2008). Field experimental cells to evaluate the potential of contaminated neutral drainage generation at the Tio mine, Quebec, Canada. 10th International Mine Water Association Congress Mine Water and the Environment, Karlovy Vary, Republic Czech, pp. 309-312.
- PEREGOEDOVA, A. (2012). Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.
- PEREGOEDOVA, A., AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B. (2013). Laboratory measurement and prediction of the saturated hydraulic conductivity of mine waste rock. 66th Canadian



Geotechnical Conference and the 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, GeoMontreal 2013, Geoscience for Sustainability, 8p.

PLANTE, B., BENZAAZOUA, M., BUSSIÈRE, B. (2011). Kinetic testing and sorption studies by modified weathering cells to characterize the potential to generate contaminated neutral drainage. *Mine Water and the Environment* 30, 22-37.

PLANTE, B., BENZAAZOUA, M., BUSSIÈRE, B., BIESINGER, M.C., PRATT, A.R. (2010). Study of Ni sorption onto Tio mine waste rock surfaces. *Applied Geochemistry* 25, 1830-1844.

RINKER, M., NICHOLSON, R.V., VENHUIS, M.A., SWABRICK, B. (2003). Implication of non-acid metal leaching on mine rock management at a nickel mine in permafrost terrain: 1- mine rock evaluation. *Sudbury 2003, Mining and the Environment III*, CD-Rom.

RITCHIE, A.I.M. (2003) Oxidation and gas transport in pile of sulfidic material. In: Jambor J, Blows D, Ritchie A (eds) Short course series, vol 31, *Environmental Aspects of Mine Wastes*, Mineralogical Association of Canada, Vancouver, BC, Canada, pp 73–94.

WARRENDER, R., PEARCE, N.J.G., PERKINS, W.T., FLORENCE, K.M., BROWN, A.R., SAPSFORD, D.J., BOWELL, R.J., DEY, M. (2011). Field trials of low-cost reactive media for the passive treatment of circum-neutral metal mine drainage in Mid-Wales, UK. *Mine Water and the Environment* 30: 82-89.