HAL
open science

Perspectives d'utilisation des géocomposites dans l'industrie minière

Sébastien Bourgès-Gastaud, Nathalie Touze, Yves Durkheim

To cite this version:

Sébastien Bourgès-Gastaud, Nathalie Touze, Yves Durkheim. Perspectives d'utilisation des géocomposites dans l'industrie minière. 9èmes Rencontres Géosynthétiques, Apr 2013, Dijon, France. 10 p. hal-00833635

HAL Id: hal-00833635

https://hal.science/hal-00833635v1

Submitted on 13 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sommaire

PERSPECTIVES D'UTILISATION DES GÉOCOMPOSITES DANS L'INDUSTRIE MINIÈRE

OPPORTUNITIES FOR USE OF GEOSYNTHETICS IN THE MINING INDUSTRY

Sébastien BOURGÈS-GASTAUD[1], Nathalie TOUZE-FOLTZ[2], Yves DURKHEIM[3]
[1] *Irstea, Antony & Afitex, Chartres*
[2] *Irstea Antony*
[3] *Afitex, Chartres*

RÉSUMÉ – Les géocomposites drainants sont largement utilisés en génie civil et dans les installations de stockage de déchets. À la confluence de ces deux applications, le drainage des matériaux miniers est un domaine dans lequel les géocomposites restent marginaux. Avec la chute des concentrations en métaux des roches exploitées, la quantité de déchets s'accroît considérablement et des techniques nouvelles doivent émerger pour accroître l'acceptabilité sociale des mines. Face à ces enjeux et au vu des solutions qu'apportent les géosynthétiques ailleurs, la place des géocomposites dans les mines doit être reconsidérée. Cet article présente l'industrie minière et le rôle que peuvent jouer les géocomposites à mini-drains dans le drainage des déchets miniers et des aires de lixiviations en tas.
Mots-clés : géocomposite à mini-drains, drainage, lixiviation en tas, déchet minier.

ABSTRACT – Drainage geocomposites have been increasingly used in civil and environmental applications such as leachate drainage systems of waste disposal areas. Nevertheless, the use of geocomposite in mining industry is not important. Because of the decrease of the ore grade, the quantity of tailings produced increases continually. To enhance the social acceptability of mines, new methods have to be developed. That is why the use of geosynthetics must be reconsidered. This paper presents different opportunities for drainage geocomposites in heap leach pad and tailings ponds.
Keywords: Drain tubes geocomposite, drainage, heap leach pad, and mining waste.

1. Le marché minier : un secteur en plein développement

Dans de nombreux pays en développement, l'industrie minière constitue un pilier important de l'économie. Il n'est pas rare que ce secteur représente plus de 20% du PIB. Les quarante plus grosses sociétés minières avaient, fin 2010, une capitalisation cumulée de 1600 milliards de dollars (PwC, 2011) ; par comparaison, celle du CAC 40 atteignait alors moins de 1000 milliards de dollars. Entre 2002 et 2008, le prix de l'aluminium a bondi de 100 % et celui du cuivre de 400% (Hocquart, 2011). En 2008, la crise a entraîné une chute historique des cours (-70% pour le cuivre) mais elle aura été brève pour les miniers : les cours ont regagné leurs plus hauts niveaux historiques en seulement 2 ans. On doit l'envolée de la demande aux pays émergents et en particulier à la Chine, le premier consommateur mondial de nickel, de cuivre, d'aluminium, de zinc, de charbon et d'étain. Le monde n'a jamais consommé autant de matières premières. Ainsi sur une base raisonnable d'une croissance de 3% par an, le monde va consommer dans les 20 prochaines années davantage de cuivre, d'aluminium, d'acier et de charbon qu'il n'en a consommé dans toute l'histoire de l'humanité, soit 680 millions de tonnes pour le cuivre et 1200 millions de tonnes pour l'aluminium (Hocquart, 2011).

En France, malgré notre riche passé minier, l'industrie minière est aujourd'hui moribonde. Depuis plusieurs décennies, le pouvoir politique a abandonné le secteur primaire au profit du secteur secondaire et plus récemment du secteur tertiaire. Hormis les minéraux industriels, pour lesquels la production française demeure significative, l'extraction métallique et charbonnière a disparu depuis la fermeture de Charbonnages de France et de la mine d'or de Salsigne en 2004. Aujourd'hui l'extraction minière se concentre à l'outre-mer, deux territoires étant particulièrement riches en minerai : le nickel en Nouvelle-Calédonie et l'or en Guyane. Il apparaît donc que la vision française du secteur ne reflète pas sa réalité mondiale : la mine demeure un marché d'avenir.

1.2. Effondrement des teneurs : conséquences sur les méthodes

Les mines d'exploitation aisées étant épuisées, les nouveaux gisements sont naturellement plus difficiles d'accès, plus isolés, plus difficilement exploitables, plus profonds et moins riches. En effet, l'industrie minière connaît un effondrement de la concentration en substances utiles des minerais exploités. Ainsi les mines deviennent de plus en plus difficilement exploitables. Alors que la teneur en cuivre moyenne s'élevait à 5% il y a un siècle, les nouvelles mines composent avec des teneurs de l'ordre de 0,7%. Pour l'or, la teneur de coupure est parfois de 0,5 g/t (cela signifie que le minerai est économiquement exploitable lorsque sa concentration en or est supérieure à 0,5 g/t). Cet effondrement des teneurs entraîne deux conséquences :

- les techniques de concentration, qui permettent de séparer la substance économique et la fraction stérile du minerai, doivent être de plus en plus efficientes ; la lixiviation en tas présentée dans le paragraphe 2.1 est typiquement une de ces techniques ;
- moins il y a de métal dans le minerai et plus il y a de déchet minier après l'étape de concentration ; il est désormais raisonnable de considérer que plus de 95 % des roches extraites deviennent des déchets miniers (Chernaik, 2008) ; les parcs à résidus décrits dans le paragraphe 2.2 sont donc des ouvrages présentant des emprises foncières considérables et souvent des impacts sur l'environnement.

Ces deux types d'ouvrages miniers, aires de lixiviation en tas et parc à résidus, sont susceptibles d'être plus performants avec l'utilisation de géosynthétiques, c'est pour cela qu'ils seront plus extensivement décrits. Ensuite nous verrons dans le paragraphe 3.1 la place qu'occupent les géosynthétiques dans les mines. Enfin pour attester de l'utilisation potentielle des géocomposites de drainage dans le marché minier, les résultats de deux expériences concernant les capacités d'un géocomposite à mini-drains en drainage et filtration seront présentées dans les paragraphes 4.1 et 4.2.

2. Ouvrages miniers

2.1. Aire de lixiviation en tas

Les techniques de concentration permettent de séparer la partie stérile du minerai de la substance économiquement valorisable. Le travail du mineur est de choisir entre des techniques onéreuses capables d'extraire la totalité du métal (efficaces) et des techniques plus simples, moins efficaces mais dont le coût est largement inférieur (efficientes). En acceptant de perdre du métal dans les déchets, la rentabilité de la mine peut être augmentée. Parmi les nombreuses solutions existantes, la lixiviation en tas (*heap leaching* en anglais) constitue une solution efficiente utilisée pour l'or, le cuivre, le nickel et l'uranium lorsque les concentrations sont faibles.

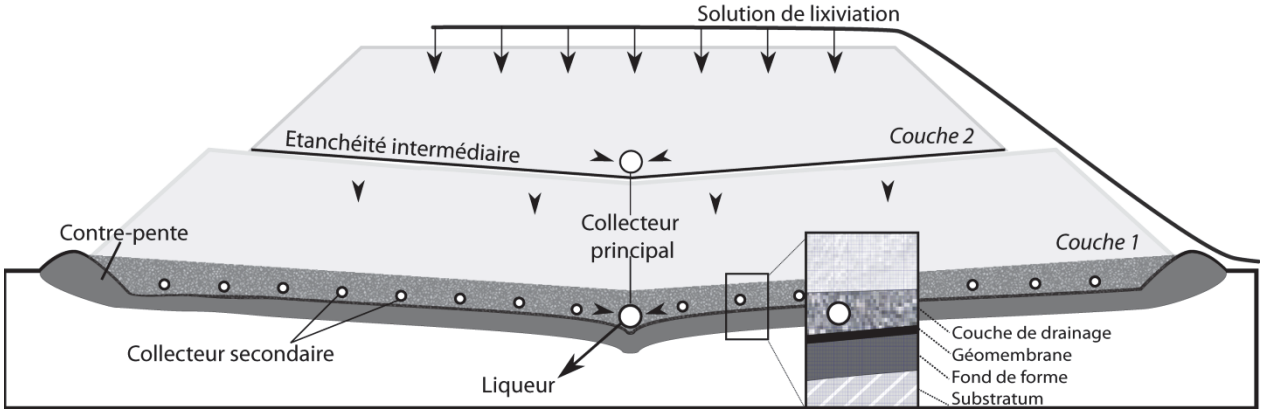

Figure 1. Aire de lixiviation en tas : exemple d'une aire comportant une étanchéité intermédiaire entre les deux couches de minerai. Cette solution permet de récupérer directement la liqueur à la base de la couche nouvellement déposée après lixiviation de la première couche.

La lixiviation en tas consiste à édifier un tas de minerai concassé, puis à irriguer goutte à goutte son sommet avec une solution de lixiviation durant une période de quelques mois à plusieurs années (Figure 1). Les solutions employées différent selon le matériau exploité; pour l'or la solution est alcaline et

contient souvent du cyanure, pour le cuivre, le nickel ou l'uranium, l'acide sulfurique dilué est usité. Lorsque la solution percole dans le tas, elle solubilise la substance économique. Il en résulte une solution enrichie (liqueur) récupérée à la base du tas par un système de drainage. L'importance de cette couche de drainage ne doit pas être sous-estimée, elle assure :

- la protection de la géomembrane contre le poinçonnement ; toute fuite dans le dispositif d'étanchéité entraîne une pollution et une perte de la substance économique (perte de rentabilité) ;
- la récupération efficace et totale de la solution enrichie à la base du tas ; les zones stagnantes doivent être évitées afin de récupérer l'intégralité du métal dissout ;
- la stabilité du tas ; la zone saturée doit être abaissée et l'angle de frottement à l'interface avec la géomembrane doit être maximal.

Les contraintes s'exerçant sur la couche de drainage sont énormes. Le minerai concassé est le plus souvent empilé en tas de 40 à 70 mètres de haut ; il existe des tas atteignant près de 150 m en Amérique du sud (Thiel et Smith, 2004). Avec une densité du minerai comprise entre 1,5 et 1,8 (Castillo et al., 2005), les contraintes normales s'exerçant sur le dispositif de drainage et d'étanchéité peuvent atteindre plusieurs méga-pascals, soit plusieurs centaines de tonnes par mètre carré.

2.2. Stockage des déchets miniers

Les déchets miniers peuvent être définis comme tout produit minéral résultant de la recherche, de l'exploitation minière ou du traitement du minerai. La chute des concentrations et l'accroissement de la profondeur des mines entrainent une hausse considérable des quantités des déchets miniers produits. À titre d'exemple, une seule mine Chilienne (Escondida, cuivre) produit près de trois fois plus de déchets que l'ensemble des ménages français, soit 80 millions de tonnes par an (INSEE, 2008 ; Fourie et al., 2010). Il est impossible de quantifier précisément la production mondiale de déchets miniers, toutefois l'unité serait le millier de milliards de tonnes. Ces résidus peuvent être bruts (stériles, francs ou morts terrains) ou traités lors des phases de concentration du minerai. Les caractéristiques des résidus dépendent à la fois de la roche mère, de la/des substance(s) recherchée(s), de la technique de concentration, et enfin de la méthode de stockage choisie en fonction de la topographie et du climat. Le lecteur aura donc compris que, sous le vocable "déchets miniers", on regroupe une incroyable diversité de matériaux. À titre d'exemple, une mine de phosphate du bassin de Khouribga (Maroc) produit deux types de déchets : un granulat calcaire 20/400 mm d'une part et des boues contenant 70 % d'eau d'autre part.

Les gigantesques volumes de déchets miniers doivent être relativisés, beaucoup sont inoffensifs pour l'environnement. Les morts-terrains, par exemple, sont les terrains excavés pour atteindre le gisement. Ces déchets n'ont pas subi d'étape d'enrichissement : ni broyage, ni lixiviation, ni criblage… Le plus souvent ils ne présentent aucun risque, le plus gros impact environnemental est alors la perte du sol arable. Les rejets de concentrateurs sont plus problématiques. Issus du procédé de concentration, ils résultent d'une multitude d'étapes chimiques (lixiviation, flottation) ou physiques (broyage, criblage, tri gravimétrique ou magnétique) visant à séparer la substance économique de la matrice. Souvent ces déchets se présentent sous la forme d'une boue riche en eau et contiennent des polluants (natifs de la roche ou ajoutés au cours de la concentration : cyanure, acide sulfurique, floculant, surfactant, agent mouillant, sels métalliques…).

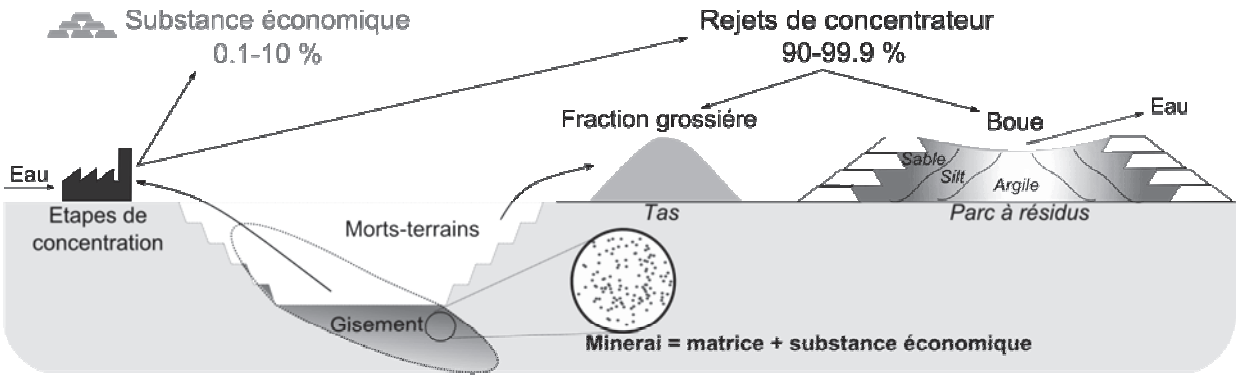

Figure 2. Flux schématique des matériaux dans une mine métallique à ciel ouvert.
Les sols ne sont pas représentés.

La figure 2 permet d'appréhender le rapport entre la quantité de déchets, la teneur des gisements et la méthode d'exploitation : la mine à ciel ouvert produit beaucoup plus de déchets que la mine souterraine car elle nécessite l'excavation totale des morts-terrains. Au vu des matériaux extraits, de leur foisonnement (broyage) et de l'ajout d'eau, les parcs à résidus ont une emprise foncière importante. Par ailleurs, nous allons voir que ces ouvrages présentent des risques d'instabilité (rupture des digues) et de contamination (drainage minier acide). Cependant, la législation encadrant le stockage des déchets miniers est l'apanage de quelques pays, les parcs à résidus miniers sont souvent ni étanchés, ni couverts, ni surveillés après leur fermeture.

2.2.1. Le drainage minier acide (DMA)

La principale problématique environnementale des déchets miniers se nomme drainage minier acide. Lorsque les travaux miniers placent brutalement de grands volumes de roche concassée en condition oxydante, les minéraux sulfurés s'oxydent et génèrent de l'acide sulfurique. Ces effluents ont un haut pouvoir de lixiviation des métaux. On obtient donc des volumes très importants (jusqu'à plusieurs m^3/s d'effluent à la fois acide (pH<3) et très riche en sels dissous (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, As, Cd, Co, Ni, Sb, Cr, Pb...). Cette nuisance est considérée par certains comme la pire atteinte de l'homme à l'environnement aquatique (Chernaik, 2008). Afin de lutter contre les DMA, il convient d'isoler le déchet d'au moins un des deux éléments suivant : l'eau ou l'oxygène. À ces fins, malgré leur coût, des géomembranes sont utilisées en couverture, par exemple sur le site orphelin réhabilité d'Aldermac (Québec, Canada).

2.2.2. Rupture des barrages

Les rejets de concentrateurs ont souvent une teneur solide comprise entre 20 et 40%, ils ont donc un comportement plus ou moins liquide et les barrages sont souvent nécessaires à leur stockage en surface. Selon la topographie, le climat et les caractéristiques des résidus (cohésion et angle de frottement interne), la construction des parcs diffère (EPA, 1995 ; Blight, 2009 ; EU, 2009). La sécurité des barrages est primordiale, on dénombre pas moins de 250 ruptures de barrage dans la littérature (Rico et al., 2008). Selon Blight (2009), les principales causes de rupture sont : débordement d'eau au dessus du barrage (16%), instabilité de pente (22%) et séisme (17%). Dans toutes ces causes, la surpression interstitielle est un facteur agravant. Par exemple en Hongrie, le 4 octobre 2010, la rupture d'une digue conduisait à la dispersion d'environ 1,1 million de mètres cubes de boue rouge issues du procédé Bayer de traitement de la bauxite (aluminium). Ces boues très basiques (pH : 9 – 12) forment un mélange hautement toxique contenant entre autre du titane, du manganèse, du vanadium, du chrome hexavalent, du plomb et du cadmium. Au lourd bilan de 7 morts s'ajoutent les champs arables rendus impropres pour des décennies.

La sécurité des parcs à résidus est donc un enjeu majeur pour l'acceptabilité du secteur minier. Le stockage de rejets de concentrateur exige :

- la stabilité physique des barrages : les ruptures engendrent des catastrophes humaines et écologiques ;
- l'isolement chimique du parc à résidus : le procédé d'enrichissement pollue de grandes quantités d'eau : le recyclage doit être favorisé et les flux vers l'environnement abolis.

Ces deux exigences recoupent la nécessité de mieux gérer les flux hydriques : l'étanchéité des parcs et le drainage doivent être contrôlés et optimisés afin de réhabiliter plus rapidement les sites, stocker plus de résidus, réduire la consommation d'eau et les atteintes à l'environnement. Il est admis que les drains en base de barrage et les masques drainants (gravier et/ou géotextile ; Blight, 2009) permettent d'améliorer la stabilité des barrages en abaissant la zone saturée.

Face à ces enjeux et au vu des solutions déjà apportées par les géosynthétiques en ingénierie environnementale, leur place dans les mines doit être reconsidérée. Les fonctions de drainage, filtration et renforcement procurées par les géosynthétiques pourraient améliorer la gestion des déchets miniers.

3. Les géosynthétiques dans l'industrie minière

3.1. Situation

Les géosynthétiques ne sont pas autant utilisés dans les mines que dans les installations de stockage de déchets (ISD) ou les ouvrages de génie civil. Ce faible taux d'utilisation s'explique d'une part par la sévérité des conditions minières, tant au niveau physique (contrainte souvent supérieure à 1 MPa) que chimique (acidité, oxydation…) et d'autre part par le manque de législation internationale encadrant la

gestion des déchets miniers (Smith et Zhao, 2004). Pourtant au cours du cycle de vie d'une mine, exploration, construction, exploitation et fermeture, des quantités gigantesques de ressources sont utilisées pour extraire les substances économiques, les paysages sont transformés et en général l'environnement en pâtit. Comme dans les autres applications, les géosynthétiques pourraient permettre de limiter ces impacts (Fourie et al., 2010). En limitant les flux polluants vers les écosystèmes, en sécurisant les installations de traitement et de stockage et en favorisant l'utilisation raisonnée des ressources (eau, matériau granulaire, argile…), les géosynthétiques offrent des solutions pour accroitre l'acceptabilité sociale du secteur minier.

3.1.1. Étanchéité par géomembranes

Les géomembranes sont d'ores et déjà uniformément employées dans le monde, car il est largement admis que l'étanchéité synthétique est bien plus facile à mettre en œuvre qu'une étanchéité minérale avec des couches d'argile (Lupo, 2010), tout en étant robuste sous réserve d'une mise en place de qualité. Les principaux usages des géosynthétiques dans les mines concernent l'étanchéité par géomembranes. Elles s'utilisent dans :

- les aires de lixiviation à la base du tas ;
- les bassins de rétention des solutions de lixiviation ou des liqueurs ;
- les couvertures des déchets acidogènes (lutte contre les DMA par isolement vis-à-vis de l'oxygène).

3.1.2. Drainage par tubes annelés perforés (drains)

Les géocomposites de drainage restent marginaux, le drainage géosynthétique demeure toujours concurrencé par les solutions classiques à base de granulats. Parce que ces solutions traditionnelles ne rejoignent pas toujours les exigences de débit requises, elles sont souvent implémentées de tubes de drainage annelés et perforés. Ces produits sont très présents dans l'industrie minière mais ne peuvent être *stricto sensu* considérés comme des géosynthétiques. L'application la plus commune pour ces drains est le drainage des aires de lixiviations en tas (Joshi et al., 2001). De très nombreux outils existent pour évaluer les contraintes s'exerçant sur les tubes enfouis et leur résistance (Masada, 2000, Watkins, 2004, Goddard, 2011). Il a été prouvé que la déflection maximale d'un tube de 0,1 mètre de diamètre enfoui dans un sable largement classé atteint 10%, sous une contrainte de 3MPa (Krushelnitzky et Brachman, 2009). Il est donc largement admis que les tubes de drainage permettent de suppléer le gravier pour atteindre des performances hydrauliques suffisantes.

3.1.3. Drainage par géocomposites

Les géocomposites sont un assemblage manufacturé de matériaux dont au moins l'un des composants est un produit géosynthétique (ISO, 2006). Cette association permet aux géocomposites d'assurer des fonctions complexes dans les sols. Les géocomposites de drainage sont constitués de deux types de géosynthétiques, ils assurent deux fonctions complémentaires :

- la fonction drainage concerne la collecte et le transport des eaux, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles (ISO, 2006) ; dans les géocomposites, cette fonction est principalement assurée par l'âme située au centre ; son dimensionnement dépend de la quantité de fluide qui doit être évacuée ; cette capacité de drainage se mesure par des tests de transmissivité ;
- la fonction de filtration concerne le maintien du sol ou d'autres particules soumis(es) à des forces hydrodynamiques tout en permettant le passage de fluides à travers ou dans un géotextile ou un produit apparenté aux géotextiles (ISO, 2006) ; cette fonction est assurée par le (ou les) géotextile(s) entourant l'âme ; le dimensionnement du géotextile (porométrie) dépend de la granulométrie du sol (Giroud, 1996).

On dénombre trois grandes catégories de géocomposites (liste non exhaustive) drainants selon la nature de leur âme drainante (Figure 3):

- un géo-espaceur qui souvent s'apparente à une géomembrane gaufrée ou alvéolaire ; le fluide ne peut alors circuler perpendiculairement au géocomposite et deux zones drainantes sont dissociées ; ces produits sensibles à l'intrusion du géotextile dans l'âme sous contrainte sont majoritairement utilisés en contact avec des supports rigides, typiquement les fondations des bâtiments ; toutefois il existe aussi des géo-espaceurs ayant une âme perméable constituée d'une structure tridimensionnelle (filaments par exemple), ils peuvent alors porter le nom de géo-matelas.
- un géo-filet constitué d'une superposition de deux ou trois niveaux de tiges plastiques (respectivement bi-planaire et tri-planaire) ; les tiges distantes de plusieurs fois leur largeur ménagent entre elles des pores. Smith et Zhao (2004) ont démontré que ce type de géocomposite

(tri-planaire) peut remplacer la solution de drainage conventionnelle (granulat et tube) dans une aire de lixiviation en tas sans surcout ; pour extraire 15l/h/m² depuis la base d'un tas de 10m de haut, le géocomposite recouvert de 0,3m de gravier est à même de remplacer une couche de gravier d'1m d'épaisseur implémentée de tubes de fort diamètre (0,2m) disposés tous les 7m ; ainsi lorsque le granulat adéquat n'est pas présent sur le site, la solution géosynthétique permet de s'affranchir des coûts de transport souvent prohibitifs ;

- des tubes annelés et perforés (mini-drains) incorporés dans une nappe drainante (géotextile lourd). Les géocomposites à mini-drains sont différents des deux autres catégories car leur épaisseur n'est pas homogène ; des zones textiles succèdent aux mini-drains régulièrement espacés ; la transmissivité est donc fortement anisotrope et l'intrusion du filtre inexistante ; ces géocomposites de drainage à mini-drains ont vu leur utilisation en tant que système de collecte de lixiviat dans les ISD s'accroître ces dernières années ; plusieurs études montrent une performance similaire des couches granulaires traditionnelles (Fourmont et al., 2008 ; Arab et al., 2009 ; Mandel et al., 2009).

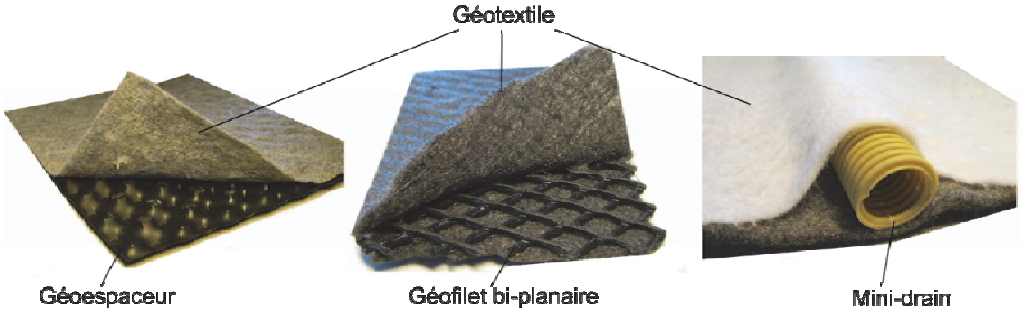

Figure 2. Photographies de trois géocomposites de drainage différant par leur âme drainante.

De la bibliographie nous avons tiré plusieurs éléments : i) les tubes drainants sont courants dans les aires de lixiviation, ii) les géocomposites à géofilet (triplainaire) sont utilisables dans les aires de lixiviation, iii) les géocomposites à mini-drains sont utilisés en drainage de lixiviat en ISD. Ces éléments suggèrent que les géocomposites à mini-drains pourraient être une solution de drainage pertinente dans les aires de lixiviation. Au lieu d'avoir des tubes de fort diamètre espacés de plusieurs mètres dans les structures à drainer, les géocomposites à mini-drains proposent de multiplier le nombre de tubes, leur faible diamètre (0,025m) étant compensé par le faible espacement (0,25m ou 0,5m). Afin d'attester de la pertinence de l'utilisation des géocomposites à mini-drains dans les mines deux expériences distinctes ont été menées :

- un test de transmissivité sous très forte contrainte montre que, malgré la densité des matériaux dans les mines associés aux hauteurs des structures, la capacité de drainage des géocomposites à mini-drain n'est pas impactée ;
- un test de filtration long terme d'un minerai a été conduit durant 3 mois ; cette étude de cas montre que la fonction de filtration peut être assurée dans une aire de lixiviation en tas.

4. Résultat

4.1. Transmissivité sous très forte contrainte

Les géocomposites installés à la base des ouvrages miniers subissent des conditions de contrainte inconnues dans d'autres applications. Afin d'attester de la capacité de drainage des géocomposites à mini-drains sous très fortes contraintes, des tests de transmissivité ont été réalisés en suivant la norme ASTM (2008) et en appliquant une contrainte normale atteignant 2,4MPa. Le géocomposite est entouré de sable afin de répartir uniformément la contrainte. Ces tests consistent à imposer une différence de charge hydraulique entre les deux extrémités d'un échantillon carré (0,3 m de côté) de géocomposite et à mesurer le débit traversant le produit dans son plan.

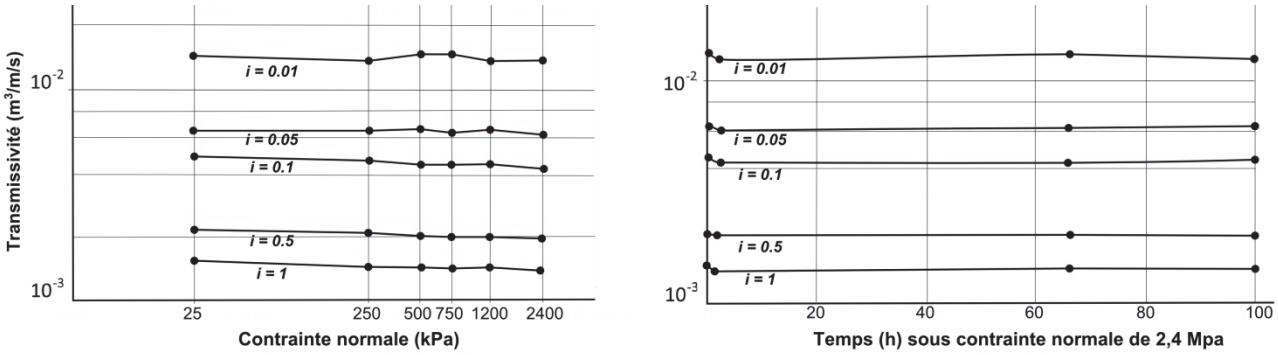

Figure 3. Transmissivité en fonction de la contrainte normale pour différents gradients i

La baisse de transmissivité est insignifiante, quel que soit le gradient hydraulique et la contrainte (de 25 kPa à 2,4 MPa) (Figure 4). De plus, le test de transmissivité mené à 2,4 MPa durant 100 h permet d'assurer que le géocomposite ne connaît pas de déformation brusque (effondrement des tubes), ni de début de fluage. L'absence de déformation s'explique par la structure même des géocomposites à mini-drains :

- un assemblage de deux géotextiles aiguilletés, agissant comme filtre et nappe drainante qui conduit une faible fraction de l'eau circulant dans le plan du géocomposite. La compression de la partie textile n'entraîne donc pas de perte de transmissivité ;
- les mini-drains perforés conduisent, pour leur part, la majorité de l'eau (Bourgès-Gastaud et al., 2013). Sous la contrainte, le comportement des mini-drains est totalement différent de celui des autres âmes drainantes (géofilet ou géoespaceur). Quand ces produits plans supportent la totalité de la contrainte sur la totalité de la surface, les mini-drains (circulaires) ne supportent qu'une faible partie de la contrainte. En effet, le sable qui confine les mini-drains induit une contrainte radiale sur le mini-drain lorsqu'une contrainte normale lui est appliquée. La déformation verticale est ainsi minimisée car une contrainte horizontale agit simultanément sur les parois latérales du mini-drain. Ce phénomène est très largement décrit dans la littérature concernant les tubes de drainage enfouis dans les structures de génie civil ou environnemental (Reeve et al., 1981, Joshi, Durkee et al., 2001). Il est aussi établi que la granularité du matériau dans lequel le tube est enfoui a un impact sur la résistance du tube. Les matériaux grossiers multiplient les points « durs » qui augmentent le risque de déformation du tube.

4.2. Test de filtration long terme

La filtration est la fonction qui permet le maintien du sol ou d'autres particules soumis(es) à des forces hydrodynamiques tout en permettant le passage de fluides à travers ou dans un géotextile ou un produit apparenté aux géotextiles (ISO, 2006). Chaque granulométrie de sol exige une porométrie du géotextile différente (Giroud, 1996). Ne pouvant généraliser sur les capacités de filtration d'un géotextile pour l'ensemble des déchets miniers, une étude de cas est présentée ici. Elle concerne la filtration d'un minerai concassé réel dans les conditions proches de celles d'une aire de lixiviation en tas. Les conditions de filtration dans les aires de lixiviation en tas sont parmi les plus sévères utilisations qu'un géocomposite puisse subir.

Le minerai concassé présente une courbe granulométrique très étalée (Dhawan et al., 2013, Ghorbani et al., 2013) or, au vu des critères de filtration, nous savons que ces matériaux sont les plus difficiles à filtrer car les particules fines ne sont pas arrêtées par les particules plus grossières ; on parle alors d'érosion interne. La migration des fines peut compromettre les capacités hydrauliques du géocomposite (Giroud, 1996 ; Faure et Fry, 2004).

Les solutions de lixiviation sont chimiquement très agressives : cyanurées pour l'extraction d'or, acides pour l'extraction du cuivre ou de l'uranium (pH = 1-2) (Kerdjoudj, 2005 ; EU, 2009).

Afin de reproduire ces conditions extrêmes, dix cellules de filtration long-terme ont été développées (Dim. : 0,1 x 0,2 m). À leurs bases un géocomposite à mini-drains sur lequel repose 1 kg de minerai concassé provenant d'une mine de cuivre (3% Cu, Lomas Bayas, Chili). Chaque jour durant 3 mois, 15 litres d'une solution d'acide sulfurique à une concentration représentative de celle de l'industrie minière sont répandus au sommet des cellules (Kappes, 2005). En percolant dans le minerai, la solution lessive le cuivre, il en résulte une liqueur enrichie en cuivre. Cette liqueur traverse le filtre et est extraite par le

mini-drain. Tous les jours la perméabilité du géocomposite est mesurée en imposant une charge hydraulique de 0,005 m, les résultats sont présentés sur la Figure 5..

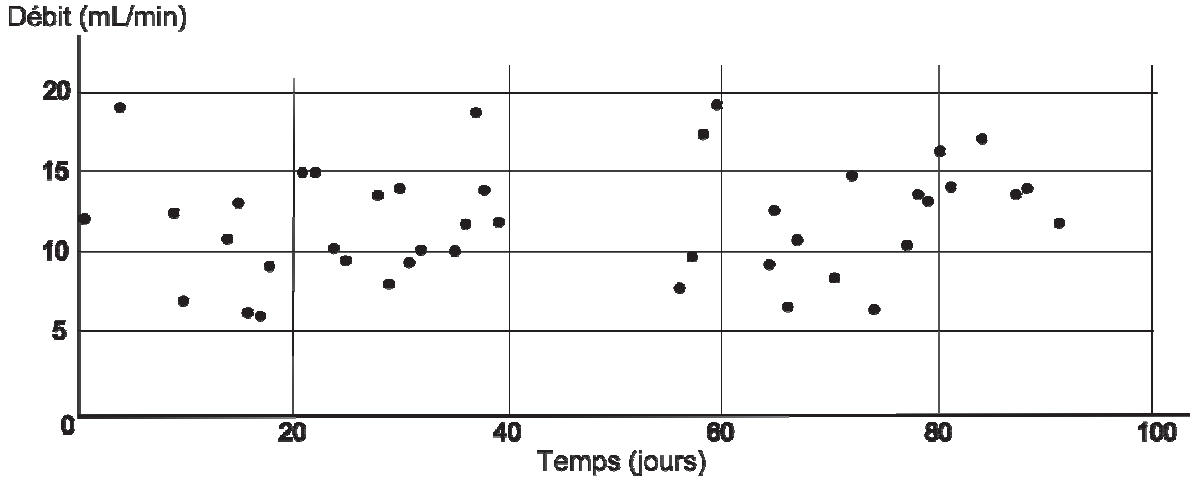

Figure 5. Débit de liqueur à la sortie du mini-drain sous une charge hydraulique de 0,005m.

Nous n'observons pas de baisse significative du débit au cours du temps malgré la sévérité des conditions ; 650 litres de solution acide (pH : 1,4) ont traversé la cellule. Ce test de filtration représentatif des conditions minières montre un bon comportement du géocomposite, il n'y a aucun signe de colmatage. Ainsi la perméabilité (passage du fluide au travers du géotextile) et la transmissivité (écoulement de la liqueur dans le mini-drain) n'ont pas diminué.

À la fin des tests de filtration les dix cellules sont démontées afin d'évaluer la migration des particules au sein du géocomposite.

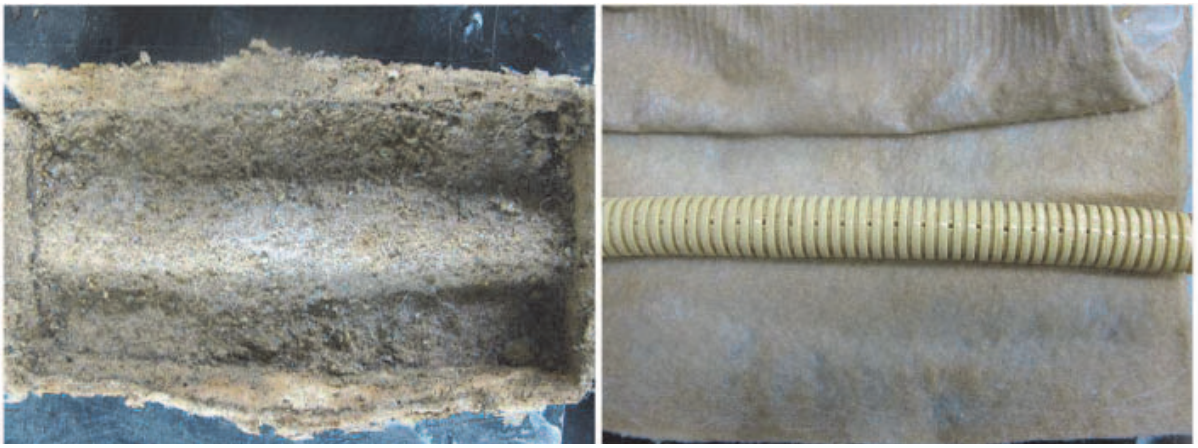

Figure 6. Vue externe et interne du géocomposite après trois mois de filtration du minerai

Sur la figure 6, on observe une couche de particules fines déposées sur le géotextile. Ce "*filter* cake" n'a pas entraîné de baisse de perméabilité, et on observe qu'à l'intérieur du géocomposite les fines n'ont pas migré, la nappe et le drain demeurent propres. Le taux d'imprégnation total atteint 80 g/m², avec seulement 10 g/m² dans la nappe (géotextile inférieur).

Enfin, dans le but d'évaluer la dégradation chimique du polypropylène constituant le géocomposite, le temps d'induction de l'oxydation a été évaluée avant et après les tests selon la norme ASTM D3895 (2007). Les valeurs initiales sont de 126 et 188 min respectivement pour les tubes D20 et D25. Après les tests, les durées connaissent un raccourcissement, de 8 % en moyenne. Cela signifie que la quantité initiale d'antioxydant dans le polypropylène a été peu réduite. Malgré l'agressivité de la liqueur, le géocomposite n'est pas sensiblement altéré.

Pour conclure sur ces tests de filtration, la circulation d'une solution acide à travers un minerai cuprifère concassé réel reposant sur un géocomposite à mini-drains n'entraine aucune diminution des performances du géocomposite après 3 mois d'exposition. Le débit est maintenu malgré la migration des fines, elles se déposent sur le filtre sans entraver le passage du fluide.

5. Conclusion.

L'industrie minière est florissante, l'extraction de matières premières demeure une base essentielle à l'économie mondiale. Seulement après avoir exploité l'ensemble des gisements les plus aisés, le mineur est aujourd'hui confronté à des situations de plus en plus complexes. Les mines s'isolent des axes de communication, elles composent avec des teneurs de plus en plus faibles et des gisements de plus en plus profonds. Face à ces enjeux et considérant les solutions qu'apportent les géosynthétiques en génie civil et environnemental, la place des géocomposites dans les mines doit être reconsidérée. Deux types d'ouvrages ont été identifiés par leur besoin de drainage : les aires de lixiviation en tas pour récupérer la liqueur à la base du tas et les parcs à résidus pour favoriser la consolidation des résidus. Deux expériences permettent de confirmer ces applications. La fonction de filtration semble pouvoir être assumée par les géocomposites à mini-drains dans les aires de lixiviation en tas : le test de filtration de 3 mois en atteste. Au niveau du drainage sous très fortes contraintes, les tests de transmissivité à 2,45MPa confirment que la géométrie unique des géocomposites à mini-drains les rend très peu sensibles à l'intrusion du filtre ou à la compression de l'âme. Ces deux expériences sont encourageantes. Au laboratoire les tests laissent penser que les géocomposites à tubes sont adaptés au secteur minier. Il est maintenant nécessaire de confirmer ces résultats à une échelle supérieure, plus représentative de la réalité. Ces deux expériences étaient nécessaires ; elles demeurent insuffisantes; une extrême diversité de sujets reste à aborder pour l'industrie minière : le renforcement par géogrilles, l'assèchement par géotubes ou encore la réhabilitation des sites à l'aide de géonaturels. Ainsi le domaine minier peut susciter de nombreux efforts de recherche, les géosynthétiques pourront alors contribuer à l'acceptabilité sociale des mines.

6. Références bibliographiques

Arab R., Cherifi F., Loudjani F. (2009). Landfill drainage with geocomposites. Colloque international Sols non saturés et environnement, Tiemcem, Algeria.

ASTM (2007) D3895-07 Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of polyolefins by differential scanning calorimetry. West Conshohocken, PA, USA, ASTM International.

ASTM (2008) D4716-08 Standard Test Method for Determining the In-plane Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic Using a Constant Head. West Conshohocken, PA, USA, ASTM International.

Blight G. (2009). Geotechnical engineering of mine waste storage facilities. London.

Bourgès-Gastaud S., Touze-Foltz N., Blond E. (2013). Multi-scale transmissivity study of drain tube planar geocomposites: effect of experimental device on test representativeness. Geotextiles and Geomembranes Submitted.

Castillo J., Hallman D., Byrne P., Parra D. (2005). Dynamic analysis of heap leach pad under high phreatic levels. Proceedings of 27th Mining convention, Arequipa, Peru.

Chernaik M. (2008). Guidebook for evaluating mining project EIAs, Environnemental Law Alliance Worldwide.

Dhawan N., Safarzadeh M.S., Miller J.D., Moats M.S., Rajamani R.K. (2013). Crushed ore agglomeration and its control for heap leach operations. Minerals Engineering 41(0): 53-70.

Epa (1995). Tailings containment. Best Practice Environmental Management in the Mining Industry Environment Protection Agency.

EU (2009). Management of Tailings and waste-rock in mining activities. Reference document on Best available techniques, European commission.

Faure Y.H., Fry J.-J. (2004). Rétention et colmatage des géotextiles. 5e Rencontres Géosynthétiques Francophones 2003 / 2004. Lille, CFG: 41.

Fourie A.B., Bouazza A., Lupo J., Abrão P. (2010). Improving the performance of mining infrastructure through the judicious use of geosynthetics. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil.

Fourmont S., Bouquet C., Haddani Y. (2008). Partial replacement of the granular layer at the bottom of a landfill : short and long term monitoring of drainage geosynthetics. EuroGeo4, Edinburgh, UK.

Giroud J.P. (1996). Granular filters and geotextile filters. Geofilters'96. Montréal, Québec, Ecole polytechnique de Montréal. 1: 565-680.

Goddard J.B. (2011). A brief history of the development and growth of the corrugated polyethylene pipe industry in North America.

Ghorbani Y., Mainza A.N., Petersen J., Becker M., Franzidis J.P., Kalala J.T. (2013). Investigation of particles with high crack density produced by HPGR and its effect on the redistribution of the particle size fraction in heaps. Minerals Engineering(0).

Hocquard C. (2011). Le secteur minier : situation et évolutions. Missions économiques. Ubifrance.

Insee (2008). Évolution de la production de déchets en France par émetteur. Retrieved 20/09/2012, from http://www.insee.fr/fr/publications-et-services/default.asp?age=dossiers_web/dev_durable/prod_dechets.htm.

ISO (2006) NF EN ISO 10318 Géosynthétiques : Termes et définitions. Association française de normalisation, France.

Joshi B., Durkee D.B., Wythes T.J. (2001). Finite element modeling of a PE pipe heap leachate collection system. Finite Elements in Analysis and Design 37(12): 979-996.

Kappes D.W. (2005). Heap leaching of gold and silver ores. Developments in Mineral Processing 15: 456-478.

Kerdjoudj H. (2005). Le traitement des minerais d'Uranium. Commissariat à l'Energie Atomique Algérien. Alger.

Krushelnitzky R.P., Brachman R.W.I. (2009). Measured deformations and calculated stresses of high-density polyethylene pipes under very deep burial. Canadian Geotechnical Journal 46(6): 650-664.

Lupo J.F. (2010). Liner system design for heap leach pads. Geotextiles and Geomembranes 28(2): 163-173.

Masada T. (2000). Modified Iowa formula for vertical deflection of buried flexible pipe. Reston, VA, États-Unis, American Society of Civil Engineers.

Mandel J., Gisbert T., Oberti O. (2009). Utilisation de géosynthétiques en équivalence de drainage de lixiviats dans les installations de stockage de déchets. 7e Rencontres Géosynthétiques Francophones 2009. Nantes, CFG: 485-490.

Pwc (2011) Mine : the growing disconnect.

Reeve R.C., Slicker R.E., Lang T.J. (1981). Corrugated plastic tubing. AGARD Report: 227-242.

Rico M., Benito G., Díez-Herrero A. (2008). Floods from tailings dam failures. Journal of Hazardous Materials 154(1-3): 79-87.

Smith M.E., Zhao A. (2004). Drainage net for improved service and cost reduction in heap leaching. GFR Engineering Solutions magazine.

Thiel R., Smith M.E. (2004). State of the practice review of heap leach pad design issues. Geotextiles and Geomembranes 22(6): 555-568.

Watkins R.K. (2004). Pipe and soil mechanics for buried corrugated HDPE pipe.