

# FONCTION ÉTANCHÉITÉ ET GESTION DES RISQUES EN CONTEXTE MINIER

## **IMPERMEABILITY AND RISK MANAGEMENT IN THE CONTEXT OF MINING ACTIVITIES**

Dominique GUYONNET <sup>1</sup>, Nathalie TOUZE <sup>2</sup>, Francis COTTARD <sup>3</sup>, David CAZAUX <sup>4</sup>

<sup>1</sup> BRGM, Orléans, France

<sup>2</sup> Irstea, Antony, France

<sup>3</sup> EnviroFormation, Olivet, France

<sup>4</sup> Expert, Falletans, France

**RÉSUMÉ** – L'activité extractive génère des déchets qui doivent être gérés de manière à prévenir les risques pour l'environnement et la santé humaine. La fonction étanchéité est essentielle pour une bonne gestion des déchets miniers, notamment pour éviter que les parcs à résidus de traitement et autres installations de stockage de déchets ne génèrent des débits de fuite susceptibles de détériorer la qualité des eaux souterraines ou de surface, ou encore pour prévenir la formation de drainage minier acide dans le cas de déchets riches en sulfures. Cet article fait un point sur la réglementation européenne et française en matière de gestion des déchets de l'industrie extractive, passe en revue certains matériaux pouvant remplir cette fonction étanchéité et propose quelques recommandations avec une référence particulière au contexte minier guyanais.

Mots-clés : Déchets miniers, étanchéité, géomembranes, drainage minier acide.

**ABSTRACT** – The extractive industry generates waste that should be managed in such a way as to avoid generating risks for the environment and human health. Impermeability is an essential property for the efficient management of mining waste, especially for limiting the detrimental leakage to groundwater or surface water from tailings impoundments and other mining waste disposal sites, or to prevent the formation of acid mine drainage in the case of Sulfide-rich wastes. This paper presents a review of European and French legislation relative to mining waste management, of candidate materials for limiting infiltration and suggests recommendations with particular reference to the context of French Guyana.

Keywords: Mining waste, impermeability, geomembranes, acid mine drainage.

### 1. Introduction

Si certains voient la mine et l'industrie extractive en général comme une activité « du passé » (voir le débat actuel sur la « société extractiviste »), force est de constater que l'économie mondiale n'a jamais autant consommé de matières premières minérales. Dans un contexte de décarbonisation des sources de production d'énergie et d'électromobilité pour lutter contre les effets du changement climatique, cette tendance générale n'est pas prête de s'inverser. En effet, si les médias évoquent volontiers les métaux dits « stratégiques » ou « critiques » comme certaines terres rares (néodyme, dysprosium, ...) pour les aimants permanents des éoliennes, ou le cobalt des cathodes des batteries de véhicules électriques ; d'autres métaux de consommation beaucoup plus courante (cuivre, aluminium, acier, etc.) seront également très fortement mis à contribution. La consommation de cuivre par exemple n'est pas prête de faiblir, en raison notamment de son excellente conductivité électrique qui en fait un élément indispensable pour les réseaux de distribution d'électricité et pour les technologies de production d'énergie renouvelable. À titre d'exemple, une éolienne de 8 MW de puissance nominale a besoin d'environ 9 tonnes de cuivre (Vidal et al., 2013). En poursuivant au rythme de consommation observé depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle (environ 2,9% de croissance annuelle), l'humanité consommera plus de cuivre dans les 20 prochaines années qu'elle n'en a consommé depuis le début de son histoire. Or lorsque la demande en métaux est en forte croissance, les 3R (réemploi, réutilisation, recyclage) de l'économie circulaire ne permettent malheureusement pas de s'affranchir de la ressource dite « primaire » (extraite du sous-sol), en raison principalement de la durée de vie des produits dans l'économie, qui introduit un décalage entre la quantité de métal dans les produits en fin de vie, d'une part, et les besoins en métal neuf, d'autre part (Labbé, 2016 ; Guyonnet al., 2018).

Dans un tel contexte, on comprend aisément l'importance du pilier « Approvisionnement durable » de l'économie circulaire (ADEME, 2014), qui vise notamment à réduire les impacts pour l'environnement et la santé des systèmes d'approvisionnement. Pour le cas de l'industrie extractive, on parle de « *mine responsable : une mine construite comme un projet de territoire qui réduit autant que possible les impacts environnementaux, sanitaires ainsi que les nuisances et contribue alors à une meilleure acceptabilité sociale* » (Chevrel et al., 2017). Or, comme l'illustre cet article, la fonction étanchéité et les géosynthétiques en particulier ont un rôle essentiel à jouer pour la réduction des impacts environnementaux des exploitations minières.

Cet article aborde la réglementation française et européenne sur la gestion des déchets de l'industrie extractive pour illustrer l'importance de la fonction « étanchéité » et la place de certains matériaux. Des recommandations visant à réduire les risques pour l'environnement et la santé associés à l'activité extractive, sont proposées en s'appuyant sur le contexte particulier de la Guyane française.

## 2. Activité minière et déchets

### 2.1 Les différents types de déchets

Les quantités de déchets générés durant l'exploitation d'une mine métallique sont souvent énormes en raison des relativement faibles teneurs des minerais. Dans le cas de l'or par exemple, les teneurs des grands gisements exploités aujourd'hui dans le monde sont typiquement de l'ordre de 1 à 3 grammes par tonne (ppm), ce qui signifie que pour un kg d'or produit, on génère au moins 330 000 kg de résidus miniers. La Figure 1 présente de manière schématique les 3 principales catégories de déchets générées pour le cas d'une exploitation à ciel ouvert. Dans le cas d'une exploitation par galeries souterraines, les catégories sont les mêmes si ce n'est que les stériles de découverte peuvent être de volume moindre puisqu'il s'agit de stériles issus de l'excavation de galeries ou puits d'accès à la zone minéralisée. Par ailleurs, les quantités de terre de couverture sont également moindres. Ces terres de couverture ne sont pas indiquées comme étant des déchets dans la Figure 1 car il est recommandé de les réserver pour la revégétalisation des aires de stockage de déchets durant la phase de réhabilitation du site minier. Les stériles de découverte sont constitués de tous les terrains qu'il faut excaver pour avoir accès à la zone minéralisée (le gisement). Les stériles minéralisés font partie du gisement mais les niveaux de minéralisation sont insuffisants pour que ces terrains puissent être exploités de manière économiquement rentable. Cette contrainte de rentabilité est remplie dans le cas du minerai proprement dit, qui est constitué du minéral associé au métal recherché, mais également de la gangue dont il s'agit d'extraire le métal à l'aide de divers procédés de minéralurgie (broyage, concassage, tamisage, coagulation, floculation, etc.). Les déchets issus de ces procédés sont appelés « résidus de traitement » et sont stockés dans des « parcs à résidus ». Sauf dans le cas de l'utilisation d'épaississants (par exemple du ciment) ou de techniques de séchage (filtre-pressé, ventilation, ...), ces résidus de traitement sont constitués majoritairement d'eau (teneur en eau pondérale > 80%) et des constituants de la gangue du minerai (suivant les cas ; silicates, sulfures, carbonates, mais aussi arsenic, cadmium, plomb, etc.), mais également des produits chimiques utilisés dans les procédés de traitement (par ex. agents de coagulation, de floculation, acides, cyanure, etc.).

De ce qui précède on comprend que le terme « stérile » a une signification purement économique et non environnementale : en particulier ce terme ne préjuge en rien du comportement environnemental d'un déchet et il ne faudrait pas établir un quelconque lien entre « stérile » et « déchet inerte » au sens de la Décision de la Commission du 30 avril 2009 (JOUE, 2009). Ce n'est que par une caractérisation des déchets, établie dans le cadre du Plan de Gestion des Déchets (JOUE, 2006 et JORF, 2009), que l'éventuel caractère inerte d'un déchet peut être établi, permettant ainsi d'assouplir les contraintes liées à sa gestion en termes d'aménagements destinés à maîtriser les risques pour l'environnement et la santé.

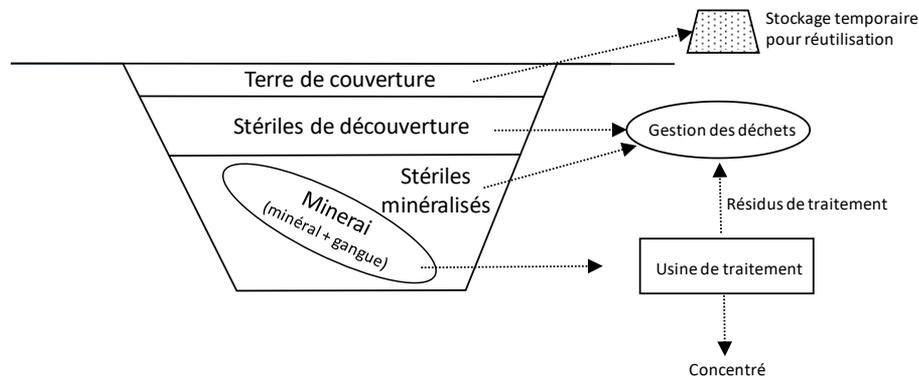
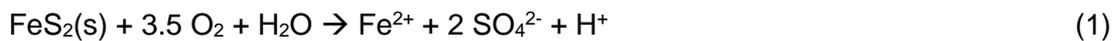


Figure 1. Schéma des différents déchets générés par une mine à ciel ouvert

## 2.2 Le phénomène de drainage minier acide

De nombreux gisements métalliques sont associés à la présence de minéraux sulfurés ( $\text{FeS}_2$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{PbS}$ , etc.). On citera également le cas de gisements dont les rejets sont fortement alcalins (par ex. les boues rouges issues de l'exploitation et traitement de la bauxite), mais cet article se concentre sur le cas du drainage minier acide, en raison du nombre important de gisements sulfurés exploités dans le monde. Lorsque les roches sulfurées sont extraites et exposées à l'air atmosphérique et au lessivage par les eaux météoriques (ou les eaux souterraines, etc.), elles génèrent des eaux acides appelées drainage minier acide (DMA). Le processus peut être décrit par la chaîne réactionnelle suivante (Zipper et al., 2011), souvent associée notamment aux exploitations d'or ou de charbon :



où (s) indique une phase solide

L'équation (1), qui constitue la première phase de l'oxydation de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), illustre pourquoi les phénomènes de DMA sont généralement associés à des panaches de sulfates dans les eaux souterraines ou les eaux de surface. L'équation (2) est la réaction d'oxydation du fer ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en fer ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ) qui fait apparaître une consommation d'ions  $\text{H}^+$ , ce qui devrait faire monter le pH. Mais comme le montre l'équation (3), ce fer ferrique a un fort pouvoir oxydant et de génération d'acidité (ions  $\text{H}^+$ ). La réaction (3) est également à l'origine de la coloration rouge des eaux, en raison de la précipitation d'hydroxydes de fer ( $\text{FeOOH}$ ). L'acidification des eaux augmente la mise en solution d'éléments traces métalliques potentiellement polluants tels que : Hg, As, Cd, Co, Ni, Cr, Th, ...

On voit dans cette chaîne réactionnelle qu'il suffit que des stériles miniers aient des teneurs significatives en sulfures pour qu'il y ait un risque d'émergence de DMA. Or la formation de DMA constitue un réacteur biogéochimique dont l'échelle temporelle d'action est extrêmement longue : une fois que le réacteur est enclenché il peut durer des siècles, en raison notamment des volumes considérables de déchets en jeu. Dans ces conditions il est essentiel de prévenir la formation de DMA, au travers notamment d'un plan de gestion des déchets qui tient compte du comportement biogéochimique des différents matériaux excavés.

## 3. Déchets miniers et contexte réglementaire

### 3.1 Classification des déchets

Cette classification s'appuie notamment sur le catalogue européen des déchets (JOUE, 2014a) et sur les propriétés qui rendent les déchets dangereux (JOUE, 2008 et JOUE, 2014b). Le catalogue comporte, en rubrique 01, les « Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi

que du traitement physique et chimie des minéraux ». Certains de ces déchets sont considérés comme étant des déchets « dangereux ». C'est le cas notamment des déchets de la rubrique « 01.06.04\* ; stériles acidogènes provenant de la transformation du sulfure ». Cette rubrique est assortie d'un astérisque qui indique que ces déchets sont considérés comme dangereux.

Une décision du 30 avril 2009 (JORF, 2009) précise les conditions selon lesquelles des déchets générés par l'industrie extractive peuvent être considérés comme « inertes » :

« - ils ne sont susceptibles de subir aucune désintégration ou dissolution significative, ni aucune autre modification significative, de nature à produire des effets néfastes sur l'environnement ou la santé humaine ;

- ils présentent une teneur maximale en soufre sous forme de sulfure de 0,1%, ... et le ratio de neutralisation ... est supérieur à 3 ;

- ...

- la teneur des déchets, ..., et particulièrement en As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, V et Zn, est suffisamment faible pour que le risque soit négligeable pour la santé humaine et pour l'environnement, tant à court terme qu'à long terme. »

Les déchets qui ne sont pas classés « dangereux » ou « inertes » sont des déchets « non-dangereux non-inertes ». La classification des déchets en dangereux ou non, inertes ou non, a des conséquences importantes sur le dimensionnement des installations de stockage.

### 3.2 Gestion des déchets issus de l'industrie extractive

La gestion des déchets issus de l'industrie extractive est régie au niveau européen par la Directive 2006/21/CE (JOUE, 2006) qui a été déclinée en droit français par l'arrêté du 19/04/2010 relatif à la gestion des déchets des industries extractives (JORF, 2010a). Depuis la parution du décret n° 210-369 du 13 avril 2010 (JORF, 2010b), les installations de stockage de déchets issus de l'industrie extractive relèvent d'une rubrique spécifique (2720) de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement et sont donc soumises à déclaration ou autorisation, suivant les cas.

La directive européenne souligne l'importance du plan de gestion des déchets et identifie des installations de gestion de déchets dites de « catégorie A ». Ce sont des installations nécessitant des aménagements spécifiques et des plans de prévention des risques, en raison de caractéristiques particulières qui sont énumérées en Annexe III de la directive. Une installation de gestion des déchets est classée dans la catégorie A lorsque :

- une défaillance ou une mauvaise exploitation, telle que l'effondrement d'un terril ou la rupture d'une digue, pourrait donner lieu à un accident majeur, sur la base d'une évaluation du risque ..., ou

- elle contient au-delà d'un certain seuil des déchets classés dangereux ..., ou

- elle contient au-delà d'un certain seuil des substances ou des préparations classés dangereuses ...

Pour les installations de catégorie A, la directive demande que les mesures appropriées soient prises au niveau de la conception, de la construction, de l'exploitation, de l'entretien et de la fermeture, pour prévenir des accidents et limiter leurs conséquences pour la santé et l'environnement. Par contre, la directive ne précise aucune mesure spécifique, notamment en termes de barrières d'étanchéité, pour prévenir les risques. C'est généralement le cas pour la plupart des textes réglementaires relatifs à la gestion des déchets de l'industrie extractive au niveau international : les textes se réfèrent à la notion de « meilleures techniques disponibles ; BAT en anglais (Best Available Technologies) ». Un document relatif aux meilleures techniques disponibles pour la gestion des déchets de l'extraction extractive, en lien avec la Directive 2006/21/CE, est actuellement en cours de rédaction (JRC, 2017). Ce document évoque l'utilisation de géosynthétiques pour différentes fonctions relatives à la gestion des déchets miniers.

L'arrêté français (JORF, 2010a) est plus précis concernant les aménagements. Dans son article 11, il précise que, pour le cas des installations de stockage de déchets dangereux, la perméabilité de la barrière isolant le stockage du sous-sol est inférieure ou égale à  $10^{-9}$  m/s. L'article fait également référence à la notion de « barrière reconstituée équivalente », dont l'épaisseur ne peut être inférieure à 0,5 m. Il convient de noter qu'une barrière en matériaux naturels de perméabilité inférieure ou égale à  $10^{-9}$  m/s s'obtient avec des matériaux argileux de très bonne qualité qui doivent être caractérisés à l'aide de méthodes adaptées (Cazaux, 2005). Or de tels matériaux ne sont pas souvent disponibles à proximité des opérations minières et par conséquent le recours à des barrières reconstituées « équivalentes » est nécessaire dans de nombreux cas.

## 4. Fonction étanchéité et déchets miniers

### 4.1 Introduction

La fonction étanchéité sera recherchée dans de nombreuses situations pertinentes en contexte minier (Fourie et al., 2010 ; Lupo, 2010, Touze-Foltz et Lupo, 2009, Touze-Foltz et al., 2008, Lupo et Morrison, 2007) :

- barrières de fond des aires de lixiviation en tas ;
- barrières de fond des parcs à résidus de traitement ;
- barrières de fond des installations de stockage de déchets dangereux ou de certains déchets non-dangereux (par ex. à potentiel acidogène) ;
- couvertures des installations de stockage de déchets dangereux ou de déchets non-dangereux ;
- bassins de retenue des eaux de process pour contrôle/traitement avant envoi dans le milieu naturel ;
- etc.

Cette fonction peut être remplie à l'aide de différents matériaux dont le choix dépend des conditions spécifiques. Dans tous les cas cette fonction devra demeurer opérationnelle pour des périodes de temps très longues, en raison de l'inertie du système réactionnel décrit plus haut.

### 4.2 Barrières argileuses

Si les barrières argileuses caractérisées et installées selon les règles de l'art peuvent constituer des barrières d'étanchéité efficaces, on notera néanmoins, comme dit précédemment, que de l'argile de qualité suffisante pour atteindre le seuil haut de perméabilité de  $10^{-9}$  m/s prévu par la réglementation, n'est pas toujours disponible à proximité des sites d'exploitation. Or en raison de l'éloignement de ces sites, un approvisionnement par transport sur de longues distances peut s'avérer rédhibitoire d'un point de vue économique. Il convient également de souligner la relative ambiguïté du terme « argile » dans certains contextes : ce qui peut être considéré comme « argile » par des non-spécialistes des barrières d'étanchéité se révèle souvent être des formations d'altération riches en argiles (par exemple les saprolites, voir section suivante). Ces formations, remaniées et compactées, permettent parfois d'atteindre des perméabilités de l'ordre de  $10^{-7}$  voire  $10^{-8}$  m/s, mais plus rarement de  $10^{-9}$  m/s. Au cas par cas et de manière anticipée, lorsque la composition minéralogique des saprolites est favorable, une étude de compactage peut permettre d'atteindre les objectifs requis, mais nécessite un travail approfondi sur la teneur en eau, l'homogénéisation, la correction granulométrique et les modalités de mise en œuvre (énergie de compactage, épaisseur des couches, etc.). Un traitement additionnel de ces matériaux naturels à la bentonite, avec ou sans l'aide d'un polymère, permet souvent de réduire sensiblement les valeurs de perméabilité.

### 4.3 Géosynthétiques bentonitiques

Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) associent des géotextiles à de la bentonite, généralement sodique. Si ces matériaux vont le plus souvent être utilisés en couverture d'installation de stockage de déchets miniers, leur utilisation en barrière de fond d'installation de stockage peut poser question en raison des risques d'interaction chimique de la bentonite avec les jus issus de la percolation des eaux météoriques à travers les déchets. En effet, surtout dans le cas de déchets riches en sulfures susceptibles de générer du DMA, une mesure de prévention classique consiste à mélanger les déchets avec des matériaux carbonatés afin de neutraliser l'acidité. Dans le cas favorable de carbonates présents dans les stériles et/ou la gangue du minerai, la capacité de neutralisation peut être présente naturellement. Mais la présence de carbonates, ou de toute source de calcium divalent ( $\text{Ca}^{2+}$ ), est très défavorable pour les performances hydrauliques des GSB. Comme il a été montré par de nombreux auteurs (par ex. Guyonnet al., 2005, 2009), le remplacement du sodium interfoliaire de la bentonite sodique par du calcium modifie profondément la microstructure de la bentonite, avec comme conséquence une augmentation de sa perméabilité. Dans le cas d'une utilisation de GSB en couverture, on évitera d'utiliser des matériaux carbonatés au-dessus du GSB, en raison de ces risques d'échanges cationiques.

### 4.4 Géomembranes et barrières composites

Lorsque les opérateurs miniers veulent garantir une minimisation des débits de fuites à travers les barrières d'étanchéité, comme c'est le cas pour les aires de lixiviation en tas où il s'agit de collecter le maximum de fluide minéralisé, ils utilisent des géomembranes en polyéthylène haute densité (PEHD ; voir notamment Lupo, 2010). Mais comme illustré notamment par Touze-Foltz et al. (2008), les barrières les

plus efficaces associent géomembrane et barrière minérale faiblement perméable (barrières composites). Les altérites remaniées et compactées évoquées plus haut, peuvent constituer d'excellentes couches de pose pour les géomembranes en PEHD et améliorer grandement les performances hydrauliques de la barrière composite, même en présence de défauts dans la géomembrane.

Ce principe général est illustré ci-après pour le cas d'une géomembrane ayant 20 défauts par hectare (valeur plutôt élevée des fourchettes statistiques), de dimensions comprises entre 2 et 20 mm de diamètre, avec un bon contact entre la géomembrane et une couche de 0,5 m de matériau granulaire sous-jacente compactée à une perméabilité de  $10^{-7}$  m/s. L'application de l'équation du tableau 11 de Touze-Foltz et al. (2008) donne un débit de fuite de 335 litres par jour et par hectare. A titre de comparaison, le débit de fuite en régime permanent au travers d'une couche de matériau argileux d'un mètre d'épaisseur, compactée à une perméabilité de  $10^{-9}$  m/s et en supposant une charge de lixiviat au-dessus de la barrière limitée à 0,3 m, donne un débit de fuite de 1123 litres par jour et par hectare.

## 5. Illustration de l'importance de la fonction étanchéité : le contexte Guyanais

La Guyane française est un bon exemple d'illustration de l'importance de la fonction étanchéité pour la gestion des risques en contexte minier. Le climat de la Guyane est de type équatorial, avec une pluviométrie très importante (entre 2600 et 4300 mm/an en 2017 selon Météo France). Sous ce climat, les formations géologiques du bouclier guyanais ont subi une altération importante et des altérites (appelées saprolites ; littéralement « roche pourrie ») sont présentes presque partout sur le territoire, avec des épaisseurs variant de quelques mètres à plus de cinquante mètres (Gutierrez, 2018). Le saprolite est un matériau meuble provenant de l'altération chimique de la roche saine, se traduisant par une destruction de la maille cristalline des minéraux primaires en lien avec un intense lessivage des silicates d'aluminium et de fer issus de la roche sous-jacente (Cottard et Laperche, 2012). La Figure 2 montre un profil d'altération typique dans ce contexte.

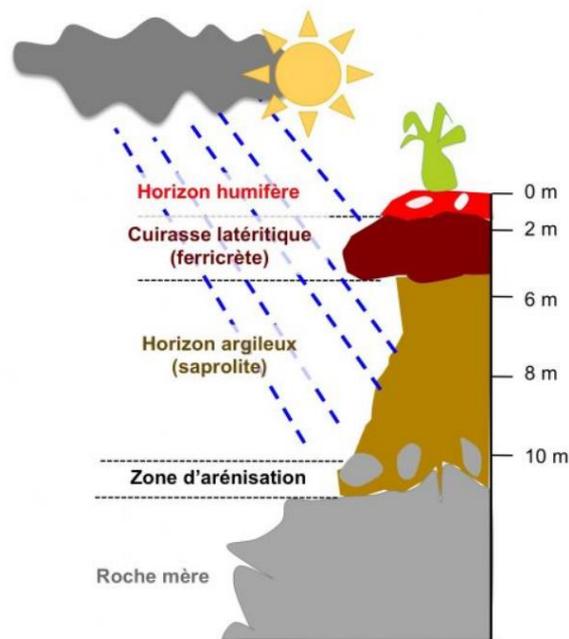


Figure 2. Coupe schématique d'un profil latéritique (Source : Université de Picardie)

En Guyane, la principale activité minière est l'exploitation aurifère, réalisée à partir de différents types de gisements :

- des gisements dits « primaires » associés à un enrichissement de l'or au sein du profil latéritique (dans les saprolites) à partir de gisements de type filoniens associés à une altération de sulfures présents dans la roche mère (pyrite, chalcopryrite, pyrrotite, arsénopyrite) ;
- des gisements dits « secondaires », se formant par érosion des gisements primaires, avec une concentration de l'or dans des alluvions du réseau hydrographique. Ce type de gisement est en général exploité par des artisans et orpailleurs (légaux et/ou clandestins) à l'aide de « barranques » (fosses d'exploitation de placers alluvionnaires). Les orpailleurs clandestins ont généralement recours au procédé d'amalgamation par le mercure pour récupérer l'or, ce qui est totalement interdit pour des raisons environnementales et sanitaires.

Aujourd'hui, il n'existe pas encore en Guyane d'exploitation de gisement « primaire » directement associé à la roche mère : amas sulfurés riches en or remobilisé à la faveur d'accidents tectoniques notamment ou filons et filonnets de quartz minéralisés en sulfures et or. Mais des projets sont actuellement à l'étude.

Comme le montrent Cottard et Laperche (2012), les impacts des exploitations de gisements primaires latéritiques en Guyane sont associés en premier lieu aux résidus de traitement et aux versées à stériles en raison de leur caractère pulvérulent et facilement dissociable. Les analyses sur contenu total et sur lixiviat effectuées dans le cadre de leur étude montrent généralement des concentrations proches ou en-deçà des fonds géochimiques naturels. Par ailleurs, les teneurs en soufre sous forme de sulfures restent généralement en-dessous du seuil de 0,1% de JORF (2009) pour la qualification des déchets inertes. Les géosynthétiques sont peu utilisés actuellement en Guyane et en général il s'agit de géotextiles destinés à favoriser le drainage, limiter l'érosion ou améliorer la stabilité mécanique des versées pour favoriser la revégétalisation.

La question d'un recours plus important aux géosynthétiques, notamment d'étanchéité, se pose dès lors que sont envisagées en Guyane des opérations minières de taille industrielle touchant directement à la roche mère. En effet, les gisements aurifères de la roche mère sont riches en sulfures, ce qui entraîne des risques de formation de DMA dans un contexte de quasi-absence de formations carbonatées susceptibles de fournir un pouvoir tampon. Ces conditions géologiques, associées au climat tropical guyanais, mettent en exergue l'importance d'un confinement des déchets miniers efficace. Ce besoin de confinement ne concerne pas uniquement les résidus de traitement ; déchets miniers associant dangerosité et grands volumes, mais peut concerner également les stériles d'exploitation qui, malgré leur manque d'intérêt économique pour le mineur, peuvent générer des risques significatifs de genèse de DMA en raison de leurs teneurs en sulfures. Compte tenu de leurs volumes, des solutions de confinement par géomembranes peuvent se révéler rédhibitoires d'un point de vue économique. Dans tous les cas, si des barrières (géosynthétiques ou en matériaux naturels) sont installées à la base de déchets miniers, les eaux d'infiltration au sein des déchets doivent être collectées en vue de leur contrôle avant traitement ou rejet dans le milieu naturel. En effet, sans récupération de ces eaux, la charge hydraulique au-dessus des barrières de fond augmentera jusqu'à ce que s'instaure, soit un équilibre entre les débits de fuite à travers ces barrières et l'infiltration dans les déchets, soit un débordement de l'installation de stockage (cas peu probable si des saprolites compactées sont utilisées comme barrières de fond).

## 6. Conclusion

Cet article illustre l'importance d'une gestion efficace des déchets miniers pour que l'industrie extractive participe au pilier « approvisionnement durable » de l'économie circulaire. Il est rappelé que, d'après la réglementation en vigueur, cette gestion est organisée dans le cadre d'un Plan de Gestion des Déchets qui précise notamment les moyens de protection qui sont mis en œuvre en fonction de la nature des différents déchets générés par les opérations d'extraction et de traitement. Les géosynthétiques, en particulier les géomembranes PEHD en raison de leur efficacité en termes de diminution des débits de fuite, associées à des couches minérales de faible perméabilité (barrières géocomposites), sont indispensables dans des contextes tels que ceux des gisements sulfurés, comme c'est le cas notamment en Guyane. Cette utilisation ne devrait pas être limitée à l'étanchéité des parcs à résidus de traitement, comme c'est généralement le cas, mais peut également être envisagée pour le confinement des stériles d'exploitation lorsqu'ils présentent des teneurs élevées en sulfures. Il est rappelé en effet que le terme « stérile minier » n'a aucune signification environnementale mais n'a trait qu'à la rentabilité économique de l'exploitation. Pour limiter le poids économique lié à un confinement efficace des stériles miniers, il convient que des opérations de caractérisation détaillées soient mises en œuvre afin de faire la démonstration du faible potentiel polluant (notamment acidogène) de ces stériles.

## 7. Références bibliographiques

- ADEME (2014). L'économie circulaire. <https://www.ademe.fr> (consulté le 18 juillet 2018).  
 AIDA (2018). Liste de codification des déchets (Annexe II de l'article R. 541-8 du CE). <https://aida.ineris.fr> (consulté le 18 juillet 2018).  
 Cazaux D. (2005). Recommandations pour la caractérisation de la perméabilité des barrières d'étanchéité des installations de stockage de déchets. Rapport BRGM RP/53721 (rapport public, 59 pp.).

- Chevrel S., Charles N., Christmann P., Lamouille B., Blanchard F., Guillaneau J.-C., Kister P. (2017). Le concept de « mine responsable ». Parangonnage des initiatives mondiales. Tome 9. Collection “La mine en France”. <http://www.mineralinfo.fr> (consulté le 18 juillet 2018).
- Cottard F., Laperche V. (2012). Caractérisation des déchets miniers de quatre mines d’or de Guyane. Rapport BRGM/RP-61027-FR, avril 2012 (rapport public, 117 pp.).
- ECS (2008). prEN 15875, Characterization of waste – Static test for the determination of acid potential and neutralization potential of sulfidic waste. European Committee for standardization.
- Fourie A., Bouazza A., Lupo J., Abrao P. (2010). Improving the performance of mining infrastructures through the judicious use of geosynthetic. Keynote Lecture of the 9<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Guarujá, Brazil, May 23-27, 2010.
- Gutierrez A. (2018). Expertise hydrogéologique des documents portés au débat public sur le Projet Montagne d’or en Guyane. Rapport BRGM/RC-68061-FR. Rapport Public.
- Guyonnet D., Lefebvre G., Menad N. (2018). Rare earth elements and high tech products. Dans : Circular Economy Coalition for Europe. <http://www.cec4europe.eu> (consulté le 18 juillet 2018).
- Guyonnet D., Touze-Foltz N., Norotte V., Pothier C., Didier G., Gailhanou H., Blanc P., Warmont F. (2009). Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications. *Geotextiles & Geomembranes*, 27(5): 321-331.
- Guyonnet D., Gaucher E., Gaboriau H., Pons C.-H. Clinard C., Norotte V., Didier G. (2005). Geosynthetic clay liner interaction with leachate: correlation between permeability, microstructure, and surface chemistry. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 131(6), 740-749.
- JORF (2010a). Arrêté du 19 avril 2010 relatif à la gestion des déchets des industries extractives. *Journal Officiel de la République Française*, 6 août 2010.
- JORF (2010b). Décret n° 2010-369 du 13 avril 2010 modifiant la nomenclature des installations classées. *Journal Officiel de la République Française*, 14 avril 2010.
- JOUE (2014a). Décision de la Commission du 18 décembre 2014 modifiant la décision 2000/532/CE établissant la liste des déchets, conformément à la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil. *Journal officiel de l’Union européenne*, 30 décembre 2014.
- JOUE (2014b). Règlement No 1357/2014 de la Commission du 18 décembre 2014 remplaçant l’annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux déchets et abrogeant certaines directives. *Journal officiel de l’Union européenne*, 19 décembre 2014.
- JOUE (2009). Décision de la Commission du 30 avril 2009 complétant la définition du terme « déchets inertes » en application de l’article 22, paragraphe 1, point f), de la directive 2006/21/CE du parlement européen et du Conseil concernant la gestion des déchets de l’industrie extractive. *Journal officiel de l’Union européenne*, 2009.
- JOUE (2008). Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives. *Journal officiel de l’Union européenne*, 22 nov. 2008.
- JOUE (2006). Directive 2006/21/CE du Parlement Européen et du Conseil du 15 mars 2006 concernant la gestion des déchets de l’industrie extractive et modifiant la directive 2004/35/CE. *Journal officiel de l’Union européenne*, 11 avril 2006.
- JRC (2017). Best available techniques reference document for the management of waste from the extractive industries in accordance with Directive 2006/21/EC. Joint Research Centre Draft Document. Directorate B – Growth and Innovation, 661 pp.
- Labbé V. (2016). Les limites physiques de la contribution du recyclage à l’approvisionnement en métaux. Dans : *Les métaux stratégiques, un enjeu mondial ?*. Responsabilité & Environnement (Une série des Annales des Mines), N°82, Avril 2016.
- Lupo J. (2010). Liner system design for heap leach pads. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 163-173.
- Lupo J., Morrison K. (2007). Geosynthetic design and construction approaches in the mining industry. *Geotextiles & Geomembranes*, 25, 96-108.
- Touze-Foltz N., Lupo J. (2009). Utilisation des géosynthétiques dans les applications minières. *Rencontres Géosynthétiques 2009*, 1-3 avril 2009, Nantes.
- Touze-Foltz N., Lupo J., Barroso M. (2008). Geoenvironmental applications of geosynthetics. Keynote Lecture of EuroGeo 4; the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference, Edinburgh, United Kingdom, 7 - 10 September 2008.
- Vidal O., Goffé B., Arndt N. (2013). Metals for a low carbon society. *Nature Geoscience Vol 6*, 894-896.
- Zipper C., Skousen J., Jage C. (2011). Passive treatment of acid-mine drainage. Virginia Cooperative Extension Publication 460-133, VirginiaTech, USA, 14 pp.