



**HAL**  
open science

## Combinaison de techniques de bio-traitement passives ou semi-passives applicables aux drainages miniers

Jérôme Jacob, Fabienne Battaglia-Brunet, Catherine Joulian, Corinne Casiot,  
Marina Hery, Camila Diaz Vanegas, Maria Garcia-Rios, Laurent de Windt,  
Marie Lemoine, Lin Liming

### ► To cite this version:

Jérôme Jacob, Fabienne Battaglia-Brunet, Catherine Joulian, Corinne Casiot, Marina Hery, et al..  
Combinaison de techniques de bio-traitement passives ou semi-passives applicables aux drainages  
miniers. 5e RNR SSP, ADEME, Feb 2025, Paris, France. hal-04898244

**HAL Id: hal-04898244**

**<https://hal.science/hal-04898244v1>**

Submitted on 20 Jan 2025

**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.

# Combinaison de techniques de bio-traitement passives ou semi-passives applicables aux drainages miniers

Jérôme Jacob<sup>1</sup> ; Fabienne Battaglia-Brunet<sup>2</sup>, Catherine Joulian<sup>2</sup>, Corinne Casiot<sup>3</sup>, Marina Hery<sup>3</sup>, Camila Diaz-Vanegas<sup>3</sup>, Maria Garcia-Rios<sup>3</sup>, Laurent De Windt<sup>4</sup>, Marie Lemoine<sup>5</sup>, Liming Lin<sup>6</sup>

<sup>1</sup> : Unité Déchet et Matière Première, BRGM, 3 av. Claude-Guillemin 45060 ORLÉANS, [j.jacob@brgm.fr](mailto:j.jacob@brgm.fr)

<sup>2</sup> : Unité Géomicrobiologie et Monitoring Environnemental BRGM, 3 av. Claude-Guillemin 45060 ORLÉANS, [f.battaglia@brgm.fr](mailto:f.battaglia@brgm.fr), [c.joulian@brgm.fr](mailto:c.joulian@brgm.fr)

<sup>3</sup> : HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, IRD, Montpellier, France, [corinne.casiot-marouani@umontpellier.fr](mailto:corinne.casiot-marouani@umontpellier.fr); [marina.hery@umontpellier.fr](mailto:marina.hery@umontpellier.fr); [camila.diazvanegas7@gmail.com](mailto:camila.diazvanegas7@gmail.com)

<sup>4</sup> : Centre de Geosciences, MINES Paris – PSL Univ, 35 rue Saint Honoré 77305 Fontainebleau, [laurent.de\\_windt@minesparis.psl.eu](mailto:laurent.de_windt@minesparis.psl.eu)

<sup>5</sup> : Département R&D, BURGEAP, 19, rue de la Villette 69425 Lyon, [m.lemoine@groupeginger.com](mailto:m.lemoine@groupeginger.com)

<sup>6</sup> : Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel, IMT Mines d'Alès, 6 avenue de Clavières, 30319 Alès, [liming.lin@mines-ales.fr](mailto:liming.lin@mines-ales.fr)

## Résumé

Le projet COMPAS (APR-GESIPOL-2017-COMPAS) a visé à déterminer la combinaison optimale de traitements passifs ou semi-passifs pour réduire l'impact environnemental des drainages miniers acides riches en fer, métaux lourds et arsenic. Les deux principales étapes de traitement biologique testées étaient la sulfato-réduction, permettant d'éliminer les métaux sous forme de sulfures et augmenter le pH de l'eau à une valeur proche de la neutralité et la bio-oxydation induisant la coprécipitation du fer (Fe) et de l'arsenic (As). Un traitement physico-chimique complémentaire utilisant des matériaux calcaires a également été évalué. Le projet a été conduit principalement sur le site minier de Carnoulès, connu pour ses importantes contaminations en Fe, As et zinc (Zn) avec des concentrations typiques respectivement de 1000, 100 et 20 mg/L. Une modélisation biogéochimique a été réalisée pour optimiser les conditions expérimentales. Les résultats des essais en laboratoire et sur site ont montré une efficacité prometteuse, mais des ajustements sont nécessaires pour une application industrielle. En parallèle, une évaluation économique et une analyse du cycle de vie (ACV) ont été menées pour estimer les coûts et l'impact environnemental des différents procédés de traitement proposés. Les conclusions indiquent que des essais à l'échelle démonstrateur sont indispensables pour valider les performances et affiner les paramètres de traitement.

## Introduction

Les eaux acides issues du drainage des mines et des stériles miniers sont des effluents hétérogènes, toujours chargés en polluants inorganiques. Il est estimé que 19 300 km de cours d'eau et 72 000 hectares de lacs et de réservoirs aquatiques sont sérieusement affectés par des effluents miniers à l'échelle mondiale (Johnson and Hallberg 2005). Outre les désordres économiques engendrés, les drainages miniers acides (DMA) induisent des risques pour la santé humaine. Les effets d'une exposition de longue durée aux métaux comprennent des gastro-entérites, irritations pulmonaires, insuffisances rénales et hépatiques. L'exposition chronique à l'arsenic est à l'origine de divers cancers et d'autres pathologies. La contamination des eaux de surface et des sédiments par les sites miniers représente donc un enjeu de santé publique majeur (Li et al. 2014; Farag et al. 2015). Comme de nombreux autres pays européens, la France possède une longue tradition minière remontant au néolithique (Artignan et al. 2008). Dès les années 1980, les contraintes économiques entraînent la fin de l'extraction minière en métropole (Castello and Bouchi-Lamontagne 2006). La carte des gîtes minéraux de France inventorie 1400 sites ayant produit du minerai (Altmann et al. 1997). Certains sites miniers, fermés depuis des années, génèrent toujours de très fortes contaminations en métaux et As dans les rivières. Les rejets des anciennes mines dans le milieu naturel, en termes de caractéristiques physico-chimiques, sont soumis à des règles dictées au cas par cas par des arrêtés préfectoraux. En termes économiques, au niveau national, le département Prévention et Sécurité Minière du BRGM assure la gestion d'environ 1800 sites (incluant les mines de charbon), le coût opérationnel associé étant proche de 10 millions d'euros par an. De nouveaux sites rejoignent régulièrement cet ensemble d'ouvrages surveillés, au niveau desquels les drainages sont traités avant rejet dans l'environnement. Les flux d'eau contaminés demeurant difficiles à contrôler, voire impossibles à stopper de façon définitive, il est nécessaire de mettre en œuvre leur traitement sur une durée indéfinie. Ces dispositifs représentent un coût significatif à long terme pour la société, auquel s'ajoute le stockage des déchets solides issus de ces traitements, qui s'accumulent au cours du temps. Les procédés de remédiation des drainages miniers appartiennent à deux grandes catégories : les traitements actifs et passifs. Les traitements actifs, utilisant des réactifs tels que la chaux, sont efficaces mais coûteux, nécessitent de l'énergie et une présence humaine fréquente, et génèrent des volumes élevés de déchets riches en métaux et métalloïdes. En revanche, les traitements passifs tirent parti de la topographie du site pour faire circuler l'eau à travers des réacteurs combinant processus chimiques et biologiques pour consommer l'acidité de l'eau et précipiter les éléments toxiques (Tassé et al., 2003 ; Skousen et al., 2017).

## Matériel et méthodes

Une modélisation biogéochimique détaillée des réactions au sein des bioréacteurs a été réalisée pour optimiser les conditions expérimentales des essais pilote. Les réactions chimiques, la cinétique bactérienne d'oxydoréduction et la précipitation des solides ont été modélisées en utilisant le code de transport réactif HYTEC de MINES Paris. Les expériences en batch, où les fluides sont statiques, ont permis de calibrer les réactions en conditions contrôlées, tandis que les réacteurs à flux continu ont simulé les conditions réelles de traitement avec circulation des fluides (Garcia-Rios et al., 2021). La modélisation a intégré les principaux mécanismes d'oxydation microbienne et de précipitation des éléments fer et arsenic dans une gamme de pH acide, et a pris en compte les interactions complexes entre les différents paramètres chimiques et hydrodynamiques. Pilotes Aérobie : Deux pilotes de bio-oxydation d'une capacité de 1 m<sup>3</sup> chacun ont été installés sur le site de l'ancienne mine de Carnoulès pour traiter les eaux de drainage minier. Un des réacteurs était rempli de Biofill® plastique, tandis que l'autre contenait un mélange de bois et de pouzzolane. Les réacteurs étaient alimentés en eau par pompage pour maintenir des temps de séjour constant, et une aération active a été assurée par des diffuseurs d'air pour optimiser le transfert d'oxygène (Figure 1). Des analyses physico-chimiques régulières (température, pH, potentiel rédox, conductivité, concentration en oxygène dissous, en fer, arsenic et leurs formes spécifiques) et des prélèvements pour des analyses microbiologiques ont été effectués pour suivre l'évolution des conditions dans les réacteurs et les performances de traitement.

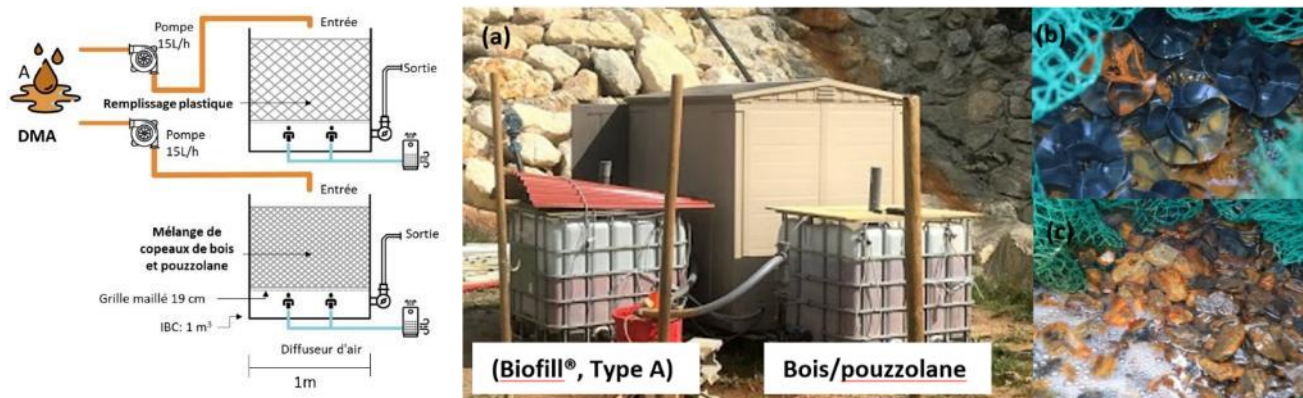


Figure 1 : A gauche, schéma simplifié du dispositif de pilotes aérobie, à droite: Dispositif d'oxydation biologique (a) constitué de deux cuves contenant un garnissage plastique Biofill®, Type A (b) ou bois/pouzzolane (c) alimentées en parallèle par le DMA de Carnoulès (Diaz-Vanegas et al. 2022).

Canal Calcaire : Un canal calcaire ouvert de 80 m de long avec une pente de 4 % a été construit et testé en aval des réacteurs aérobie pour augmenter le pH de l'eau traitée et précipiter les métaux restants. Le canal a été évalué pour sa capacité à maintenir un pH optimal et à réduire les concentrations en Fe et en As sur une durée prolongée. Des mesures de la chimie de l'eau en entrée et sortie du canal ont été réalisées pour évaluer l'efficacité du traitement. Pilote Anaérobie : Un bioréacteur anaérobie de 25 L, utilisant des bactéries sulfato-réductrices (BSR) consommant du glycérol pour réduire le sulfate en sulfures, a été installé sur site pour traiter le drainage minier. Le réacteur a fonctionné en conditions contrôlées pour évaluer sa capacité à éliminer Fe, As et Zn. Les essais ont débuté en laboratoire pour calibrer les paramètres de fonctionnement, puis le réacteur a été installé sur le site minier de Carnoulès où il a opéré pendant 376 jours. Des analyses régulières de la qualité de l'eau, des prélèvements de biofilm, et des mesures de l'activité bactérienne ont été réalisées pour suivre les performances du bioréacteur et optimiser les conditions de traitement. Ce bioréacteur a également été couplé avec un réacteur de bio-oxydation de 2 L positionné en aval (Figure 2).

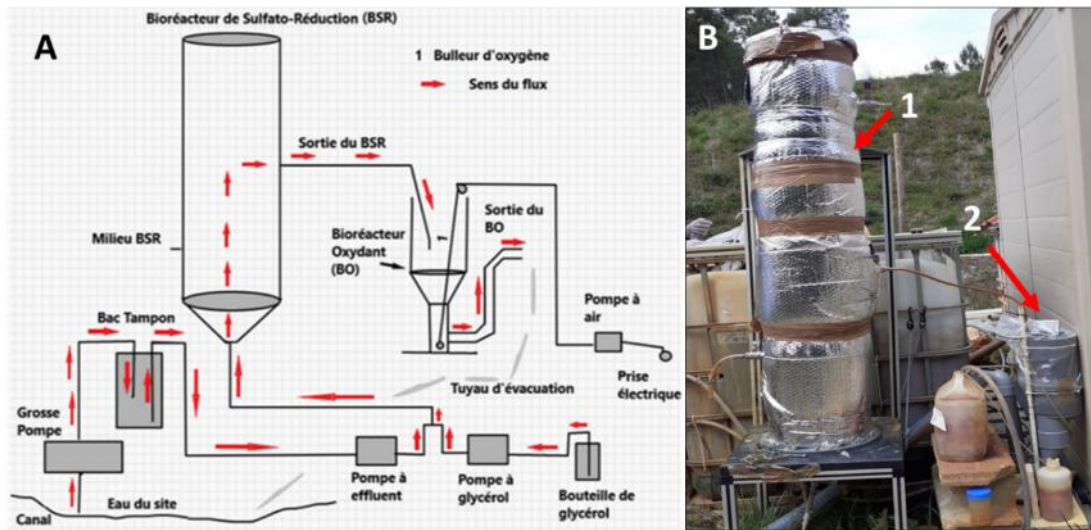


Figure 2 : Traitement couplé BSR-oxydation. A : schéma du dispositif ; B : photographie du dispositif (1) bioréacteur BSR, (2) bioréacteur d'oxydation.

L'ensemble des dispositifs et méthodologies utilisés dans le projet COMPAS ont permis d'évaluer de manière exhaustive les différents processus de traitement, en intégrant des approches expérimentales et modélisations théoriques pour comprendre les mécanismes sous-jacents et optimiser les performances des systèmes de traitement des drainages miniers acides.

## Résultats et discussion

Performances des Pilotes Aérobie : Les deux pilotes de bio-oxydation ont montré une capacité élevée à oxyder le Fe et à précipiter l'As. En moyenne, les systèmes ont réussi à oxyder 92 % du Fe(II) présent dans l'eau d'alimentation. De plus, les pilotes ont permis de précipiter 43 % du Fe total et 67 % de l'As (Figure 3). Cependant, les résultats ont également révélé des limitations importantes. Les analyses physico-chimiques ont montré que le pH de l'eau diminuait systématiquement entre l'entrée et la sortie des réacteurs, passant de  $4,1 \pm 0,4$  à  $2,8 \pm 0,3$ , en raison de la précipitation du Fe(III) qui acidifie le milieu. Le pH de l'eau en sortie des réacteurs restant acide, les concentrations résiduelles en Fe et As étaient encore élevées, nécessitant un traitement complémentaire pour atteindre les objectifs de qualité de l'eau. Les boues produites contenaient environ 8 % d'As, principalement sous forme d'As(V), ce qui pose des défis pour la gestion des déchets.

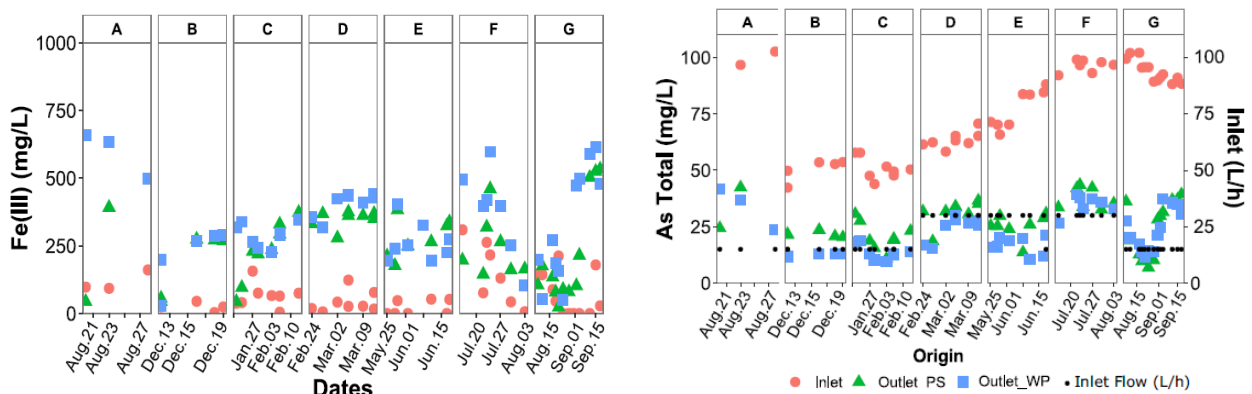


Figure 3 : A gauche, concentration en Fe(III) dans la phase dissoute dans l'eau d'alimentation (inlet) et en sortie des pilotes avec garnissage plastique (PS outlet) ou garnissage bois/pouzsolane (WP outlet) au cours des différentes périodes de fonctionnement. A droite, concentration en As total dissous aux mêmes pointes (Diaz-Vanegas et al. 2022).

Efficacité du Canal Calcaire : Le canal calcaire de 80 m a montré une capacité limitée à maintenir une efficacité de traitement à long terme. Initialement, le canal a permis d'augmenter le pH de l'eau traitée et de diminuer les concentrations en Fe et As. Cependant, cette efficacité a rapidement diminué en raison du colmatage par les précipités de Fe, limitant la durée de fonctionnement efficace à moins d'un mois. Les essais ont démontré que l'eau traitée par les réacteurs aérobies seuls contenait encore une teneur en Fe trop importante pour que le canal calcaire puisse être durablement efficace. Une étape supplémentaire de traitement du Fe en amont du canal calcaire serait nécessaire pour améliorer ses performances à long terme.

Résultats du Pilote Anaérobie : Le bioréacteur anaérobie, utilisant la capacité des BSR, à réduire le sulfate du DMA en sulfures a montré des résultats prometteurs pour l'élimination de Fe, As et Zn qui précipitent sous forme de sulfures métalliques. Le réacteur a fonctionné seul pendant 273 jours, puis en combinaison avec un réacteur aérobie pendant 103 jours supplémentaires. Les essais ont révélé que le bioréacteur seul pouvait réduire les concentrations de Fe, As et Zn à des niveaux inférieurs à 1 mg/L, et amener le pH



de l'eau à une valeur proche de la neutralité. Au cours de la dernière phase de l'expérience, en couplage avec le réacteur aérobique, le temps de séjour dans le bioréacteur a pu être abaissé à 5 jours tout en maintenant des performances similaires. Cependant, des défis subsistent, notamment la consommation élevée de glycérol comme source de carbone pour les BSR et la gestion des déchets sous forme de sulfures produits par le réacteur. La gestion et la disposition de ces déchets nécessitent une attention particulière pour éviter toute recontamination des eaux traitées.

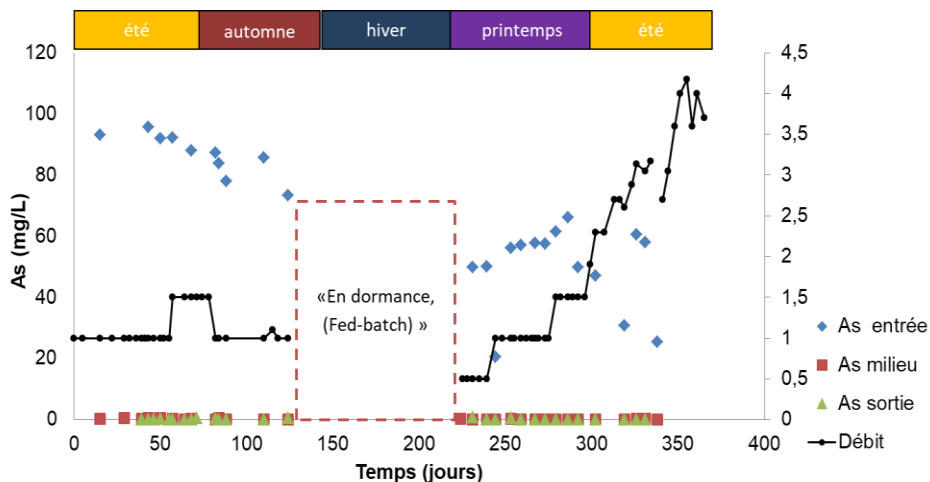


Figure 4 : Bioréacteur BSR, évolution des concentrations en arsenic et du débit d'alimentation.

Des études de pré-faisabilité réalisées dans le cadre du projet ont permis d'estimer les coûts d'investissement et d'exploitation de différents scénarii de traitement. Bien que les résultats du projet COMPAS soient prometteurs, le procédé de traitement développé n'est pas encore prêt pour une mise à l'échelle industrielle et nécessiterait des tests à l'échelle démonstrateur pour valider les performances et optimiser les coûts, notamment en raison du volume très important d'un bioréacteur BSR à pleine échelle.

## Conclusions et perspectives

Le projet COMPAS a démontré l'efficacité potentielle des traitements passifs et semi-passifs pour réduire l'impact des drainages miniers acides, notamment via la sulfato-réduction et la bio-oxydation. Toutefois, des optimisations sont nécessaires avant une application industrielle. Les défis incluent la gestion du pH, la réduction des coûts d'exploitation, et la gestion des déchets. Des essais à une échelle démonstrateur sont indispensables pour valider les performances. Ces étapes sont cruciales pour développer des solutions durables et économiquement viables pour la gestion des sites miniers contaminés.

## Références

- Altmann, S., P. Conil, M. Bornuat, J.L. Marroncle, I. Salpeteur, and J. Feraud. 1997. 'Les Résidus Miniers Français, Typologie et Principaux Impacts Environnementaux Potentiels.' BRGM/RR-39503-FR. Orléans: BRGM. [http://pmb.brgm.fr/brgm/brgm\\_broogle\\_notice.php?id=43520](http://pmb.brgm.fr/brgm/brgm_broogle_notice.php?id=43520).
- Artignan, D., Ph. Baranger, P. Billaud, M. Lansart, and B. Mazenc. 2008. 'L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide méthodologique - Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa "pollution des sols et des eaux"'. BRGM/RP-55143-FR. Orléans: BRGM.
- Castello, M., and M. Bouchi-Lamontagne. 2006. *L'après-mine en France*. Rueil-Malmaison Orléans Paris: Editions BRGM.
- Diaz-Vanegas, C., C. Casiot, L. Lin, L. De Windt, M. Héry, A. Desoeuvre, O. Bruneel, F. Battaglia-Brunet, and J. Jacob. 2022. 'Performance of Semi-Passive Systems for the Biological Treatment of High-As Acid Mine Drainage: Results from a Year of Monitoring at the Carnoulès Mine (Southern France)'. *Mine Water and the Environment* 41 (3): 679–94. <https://doi.org/10.1007/s10230-022-00885-4>.
- F., S., Riva Das, W. H. J. Strosnider, and R. Taylor Wilson. 2015. 'Possible Health Effects of Living in Proximity to Mining Sites Near Potosí, Bolivia'. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 57 (5): 543–51.
- Garcia-Rios, M., De Windt, L., Luquot, L., Casiot, C. (2021). Modeling of microbial kinetics and mass transfer in bioreactors simulating the natural attenuation of arsenic and iron in acid mine drainage, *Journal of Hazardous Materials* 405: 124133.
- Johnson, D. B, and K. B. Hallberg. 2005. 'Acid Mine Drainage Remediation Options: A Review'. *Science of The Total Environment, Bioremediation of Acid Mine Drainage: The Wheal Jane Mine Wetlands Project*, 338 (1–2): 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>.
- L., Zhiyuan, Z. Ma, T. Jan van der Kuijp, Z. Yuan, and L. Huang. 2014. 'A Review of Soil Heavy Metal Pollution from Mines in China: Pollution and Health Risk Assessment'. *Science of The Total Environment* 468–469 (January):843–53. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090>.
- Skousen, J., C. E. Zipper, A. Rose, P. F. Ziemkiewicz, R. Nairn, L. M. McDonald, and R. L. Kleinmann. 2017. 'Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment'. *Mine Water and the Environment* 36 (1): 133–53. <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>.
- Tassé, N., D. Isabel, and R. Fontaine., 2003. 'Wood Cadillac Tailings: Designing a Biofilter for Arsenic Control.' *In Proceedings of the Sudbury Mining and the Environment Conference*, Sudbury, ON, Canada., May 2003.

## **Remerciements**

Nous remercions l'ADEME pour son soutien financier, ainsi que tous les partenaires du projet pour leur collaboration et leurs contributions précieuses