

Introduction des approches numériques pour l'étude de la biolixiviation appliquée au retraitement de résidus miniers sulfurés

Agathe HUBAU¹, Douglas PINO HERRERA¹, Céline LOUBIERE¹, Eric OLMOS², David HUDSON³,
David W DEW³, Anne-Gwénaelle GUEZENNEC¹

Affiliation 1 : Direction Eau, Environnement, Procédés et Analyses, BRGM, Orléans, France

Affiliation 2 : Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, Université de Lorraine, CNRS, LRGP, Nancy, France

Affiliation 3 : University of Exeter, Penryn Campus, Treliever Road, Penryn, Cornwall TR10 9FE, UK

Introduction

En Europe, la plupart des ressources primaires riches en métaux, facilement accessibles et faciles à traiter est épuisée. Dans le contexte actuel, les minerais complexes et peu concentrés ainsi que les déchets d'extraction reçoivent une attention croissante. En particulier, les déchets miniers peuvent être considérés comme des ressources en métaux. Si leur retraitement peut limiter les impacts environnementaux liés à leur stockage, il nécessite de développer des options de réutilisation ou de recyclage à faible coût, avec des impacts environnementaux limités. Les procédés et technologies conventionnels sont souvent peu adaptés à ces matériaux (Bodéan et al, 2018). Le projet de recherche européen NEMO (« Near-zero-waste recycling of low-grade sulfidic mining waste for critical-metal, mineral and construction raw-material production in a circular economy ») a pour but de valoriser les déchets miniers sulfurés en combinant des procédés hydrométallurgiques innovants pour la récupération des métaux de valeur et des matières premières critiques, et la transformation du résidu en une fraction minérale « propre » utilisée pour la production de ciments, bétons et produits de construction (<https://h2020-nemo.eu/>). Dans le cadre de ce projet, notre étude se focalise sur le développement de méthodes de biolixiviation (c'est-à-dire la dissolution des métaux catalysée par des micro-organismes) sur deux résidus miniers. Plusieurs outils numériques ont été utilisés pour modéliser les phénomènes et extrapoler le procédé à l'échelle industrielle, afin de déterminer le design optimal.

Matériels et méthodes

Le premier échantillon provient de Sotkamo (Terrafame, Finlande). La biolixiviation en tas y est appliquée pour traiter un minerai riche en pyrrhotite et pentlandite afin d'extraire principalement le Ni. Les résidus contiennent 15,2% de sulfures ou sulfures altérés, 1310 ppm de nickel (Ni), 1370 ppm de cuivre (Cu) et 3460 ppm de zinc (Zn) (Hubau et al., 2020). Le second cas d'étude est un résidu de flottation riche en sulfures, provenant de la mine d'Aitik (Suède). Il contient 41,6% de pyrite, 900 ppm de cobalt (Co) et 2240 ppm de Cu. La cinétique de biolixiviation de ces résidus a été d'abord évaluée en réacteurs aérés agités de 2 L, puis en pilote continu de 114 L et en réacteur aéré agité de 2 m³. Les consortia microbiens étaient principalement composés des espèces du genre *Leptospirillum*, *Acidithiobacillus*, *Sulfobacillus* et *Acidithiomicrobium*, qui oxydent le fer, le soufre ou les deux. Deux températures ont été utilisées (55 °C pour le matériau provenant de Sotkamo, 40 °C pour Aitik). Pour les simulations, les logiciels Fluent, Matlab et SysCAD ont été utilisés respectivement pour caractériser l'hydrodynamique et les écoulements dans le bioréacteur par mécanique des fluides numériques (CFD), établir un bilan de chaleur permettant de prédire la température de la pulpe de façon dynamique tout au long de l'année, et simuler les performances à l'échelle du procédé dont l'impact des conditions de recirculation des flux.

Résultats

Les deux matériaux ont des teneurs en sulfures très différentes (2,6% et 22,2% de soufre sous forme de sulfures respectivement) et donc des capacités à être biolixiviés très différentes. La composition du premier résidu est extrêmement complexe, ce qui complexifie les mécanismes impliqués dans la biolixiviation et la mise au point du procédé. En effet, une partie des métaux est toujours contenue dans les minéraux sulfurés (pyrrhotite et autres sulfures solubles résiduels, consommant de l'acide et de l'oxygène) alors que d'autres ont été précipités sous forme de sulfates pendant les activités primaires de métallurgie. La dissolution des métaux se fait simultanément par des réactions chimiques et biologiques aux cinétiques variées. A l'aide de Syscad, le flowsheet du procédé a été simulé pour prendre en compte les recirculations qui ne peuvent pas être testées au laboratoire. L'utilisation d'un tel modèle basé sur les données expérimentales a permis de fournir des données pour l'évaluation économique, environnementale et sociale. Ces évaluations permettent de sélectionner les paramètres qui devront faire l'objet de futures optimisations, tels que les concentrations en nutriments.

La biolixiviation du matériau provenant de la mine d'Aitik, qui est plus favorable de par sa teneur élevée en pyrite, a révélé l'importance du bilan thermique du procédé car la dissolution de la pyrite est exothermique. Le fonctionnement du procédé à différentes températures influence la composition des communautés microbiennes, affectant les rendements et vitesses de dissolution. En particulier, la prédominance des espèces de *Leptospirillum* augmente la récupération du Co, jusqu'à plus de 90% en réacteur agité aéré. En parallèle de l'étude expérimentale, le bilan de chaleur global a été simulé sur Matlab pour quantifier les contributions des conditions opératoires et environnementales. Ce modèle a été appliqué aux réacteurs pilotes, mais aussi à une configuration de biolixiviation en bassin. Cette dernière, récemment développée, consiste en l'utilisation de plusieurs agitateurs flottants pour la mise en suspension des solides et les transferts de matières gazeuses liquides. Plusieurs scénarii ont été simulés (climats, concentration en sulfures, géométries du bassin...). A échelle industrielle, il apparaît que les conditions environnementales ont une influence limitée, contrairement à l'enthalpie de réaction. Par ailleurs, la température peut être maintenue dans une gamme adaptée (40 à 50 °C) en contrôlant la température et le débit de la pulpe entrante et l'aération (débits, pression partielle en O₂).

Le cas d'étude d'Aitik a également permis de démontrer que les transferts de matières sont prépondérants dans l'efficacité du procédé, notamment car la demande en oxygène est élevée. Le développement d'un modèle CFD (Computational Fluid Dynamics) a permis d'étudier l'hydrodynamique du système bassin et de définir le volume d'influence d'un agitateur flottant. Cela permet d'accéder au nombre d'agitateurs nécessaires, ainsi qu'à la puissance mécanique dissipée.

Conclusions

L'efficacité de la biolixiviation pour le retraitement de résidus miniers a été démontrée sur les deux cas d'études du projet H2020 NEMO. L'utilisation des outils numériques (ici Matlab, SysCAD et Fluent) a permis de compléter les résultats qui avaient été obtenus lors des opérations pilotes. Cela a permis d'accéder aux données nécessaires pour une évaluation de la faisabilité technique de telles solutions, mais aussi pour l'évaluation économique, environnementale et sociale.

Références bibliographiques

Bodéan, F., Jacob, J., Guézennec, A.G., Final Report n°BRGM/RP-67562-FR: "Revue d'expériences de retraitement de résidus miniers (Europe, Monde) Perspectives.", 2018, 50 pages.

Hubau, A., Guézennec, A.G., Joulain, C., Falagán, C., Dew, D., Hudson-Edwards, K.A., Bioleaching to reprocess sulfidic polymetallic primary mining residues: Determination of metal leaching mechanisms, *Hydrometallurgy*, 2020, 197, 105484.