

AMENDEMENT ALCALIN A BASE DE BOUES DE PATES DE SUCRERIE ET D'ARGILES: APPLICATION SUR LES RÉSIDUS DE LA MINE ABANDONNÉE DE KETTARA (MAROC)

Alkaline amendment based of sludge pulp of sweets and clays: application to the tailings of the abandoned kettara mine (morocco)

Samiha NFISSI, Saida ALIKOUSS, Youssef ZERHOUNI, Zouhir BAROUDI & Mohamed SAMIR*

Résumé. – Les rejets miniers sulfurés de la mine de Kettara (région de Marrakech) sont entreposés sur un socle schisteux très fracturé sur une superficie d'environ 16 hectares. Dans ce site, plus de 3 millions de tonnes de résidus sont stockés sur le sol sans aucune contrainte de leurs impacts sur l'environnement. Les minéraux acidogènes composant ces rejets, sous l'action de l'eau et de l'oxygène, génèrent du Drainage Minier Acide (DMA). Ce phénomène entraîne une acidité du milieu qui provoque la destruction de la flore et de la faune ainsi que la contamination des eaux souterraines.

Ces rejets solides à fortes concentrations en métaux (As, Pb, Fe, Cu...), produisent des lixiviats très acides ($\text{pH} \leq 3$) entraînant la solubilisation des sulfures et la libération des métaux toxiques qui polluent les ressources hydriques de la région.

Afin d'atténuer le DMA à Kettara, un protocole d'amendement alcalin a été testé au laboratoire en utilisant les boues de pâte de sucrerie (Sludge Pulp of Sweets : SPS) et des argiles (Clays : Clys).

Les matériaux choisis ont fait l'objet d'une caractérisation physico-chimique et minéralogique puis d'une série d'essais de lixiviation en mini-cellules d'altération. Ces essais ont montré que les pH des SPS et des Clys varient respectivement entre 6,1 et 8,5 et entre 6,7 et 9. Le potentiel neutralisant de ces matériaux, déterminé par la méthode Acid-Base Accounting, est de l'ordre de 878,5 Kg CaCO_3/t pour les SPS et de 299 Kg CaCO_3/t pour les Clys. Ces matériaux fins et alcalins ont donc un potentiel neutralisant assez élevé susceptible de réduire considérablement le DMA.

Les SPS et des Clys, au vu de leur potentiel de neutralisation et leurs propriétés physico-chimiques, constitueraient d'excellents matériaux de base pour un amendement visant l'atténuation du DMA dans la mine abandonnée de Kettara.

Abstract. – Sulphide waste from the Kettara mine (Marrakesh region) is stored on a highly fractured shale bed covering an area of about 16 hectares. In this site, more than 3 million tons of residues are stored on the ground without any concern for their impact on the environment. The acidogenic minerals contained in these residues, under the action of water and oxygen, generate Acid Mining Drainage (AMD). This phenomenon leads to an acidity of the environment that causes the destruction of flora and fauna and the contamination of groundwater. These solid wastes with high concentrations of metals (As, Pb, Fe, Cu ...), produce very acidic leachates ($\text{pH} \leq 3$) leading to the solubilization of sulphides and the release of toxic metals that pollute the water resources of the region. In order to mitigate AMD at Kettara, an alkaline amendment protocol was tested in the laboratory using Sludge Pulp of Sweets (SPS) and clays (Clays: Clys). The chosen materials were subjected to a physico-chemical and mineralogical characterization followed by a series of leaching tests in mini-cells of alteration. These tests have shown that the pH of SPS and Clys vary respectively between 6.1 and 8.5 and between 6.7 and 9. The neutralizing potential of these materials, determined by the Acid-Base Accounting method, is of the order of 878.5 Kg CaCO_3/t for SPS and 299 Kg CaCO_3/t for Clys. These fine and alkaline materials have a high enough neutralizing potential that can significantly reduce the AMD. SPS and Clys, in view of their neutralization potential and their physicochemical properties, will be excellent materials of amendment to mitigate AMD in the abandoned Kettara mine.

Mots-clés. – Drainage Minier Acide, rejets miniers, boues de sucrerie, argiles, amendement alcalin.

Key words. – Acid Mine Drainage, residues, Sludge Pulp of Sweets, Clay, alkaline amendment.

I. — INTRODUCTION

L'exploitation, l'extraction et le traitement des minerais sont à l'origine de la production des rejets acides qui auront des conséquences fatales sur l'environnement. Ces rejets miniers engendrent des problèmes majeurs pour l'environnement. Le DMA qui s'y déclenche en constitue un exemple très répandu à l'échelle de la planète au niveau des parcs à résidus miniers. Ce phénomène est provoqué naturellement dès que des sulfures acidogènes (pyrite, pyrrhotite ...) sont en contact avec l'eau et l'air (Fig. 1), générant ainsi un pH bas et d'énormes quantités de sulfates, de fer et de métaux toxiques susceptibles de déséquilibrer, voir même détruire, les écosystèmes naturels et d'infecter les ressources en eau (Aubertin *et al.*, 2002; Sracek *et al.*, 2004; Álvarez-Valero *et al.*, 2009).

Plusieurs méthodes visant l'atténuation du DMA ont été développées parmi lesquelles on peut citer la désulfuration environnementale (Benzaazoua *et al.*, 2000a; Benzaazoua & Kongolo, 2003; Mermillod-Blondin *et al.*, 2005), les traitements des effluents actif et passif (Ouakibi *et al.*, 2013), les recouvrements de type couvertures à effets de barrière capillaire (Bossé, 2013) et l'amendement alcalin qui consiste à mélanger les résidus générateurs de DMA avec des matériaux alcalins pour limiter l'oxydation des sulfures et neutraliser

* Département de Géologie. Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Anciennes.

Faculté des Sciences Ben M'Sik, Université Hassan II de Casablanca, BP : 7955, Maroc.

E-mails: snfissi@gmail.com; alikouss@gmail.com; zerhouni.y@gmail.com; zbaroudi@gmail.com; samirmoha8@gmail.com

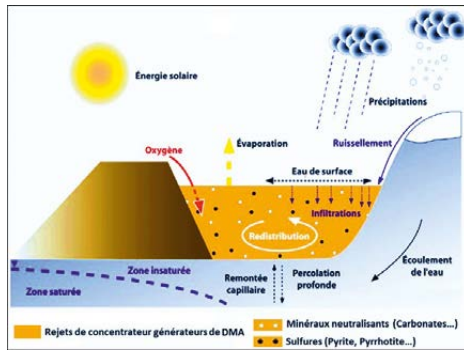


Figure 1. — Interactions rejets-atmosphère et bilan hydrique d'un parc à rejets de concentrateur générateur de DMA (Bossé, 2013).
Figure 1. — Release-atmosphere interactions and water balance of an AMD-generating concentrator release plant (Bossé, 2013).

l'acidité générée (Hakkou *et al.*, 2009; Nfissi *et al.*, 2014, 2017).

La présente étude se propose d'évaluer l'efficacité d'un amendement composé de boues de sucrerie (SPS) et d'argiles (Clys) pour le contrôle du phénomène du DMA. Elle s'intègre dans le cadre d'un projet de recherche sur la gestion et stabilisation des rejets miniers et industriels qui s'articulent autour de plusieurs axes parmi lesquels la caractérisation des déchets miniers, l'étude d'impact sur l'environnement et la santé et la proposition de scénarios de restauration.

Le site pilote choisi fait partie des mines abandonnées du Maroc et qui ont suscité une attention particulière étant donné l'étendue de son parc à résidus (16 hectares) qui renferme plus de 3 millions de tonnes de résidus sulfurés. Il s'agit de la mine de Kettara, située dans les Jebilet centrales à environ 32 Km au Nord-Ouest de la ville de Marrakech (Fig. 2). Elle a été exploitée pendant 35 ans, au début pour les ocres de 1945 à 1961, ensuite pour la pyrite et le cuivre de 1956 à 1963 essentiellement dans la zone de cimentation et enfin pour la pyrrhotine de 1965 à 1980.

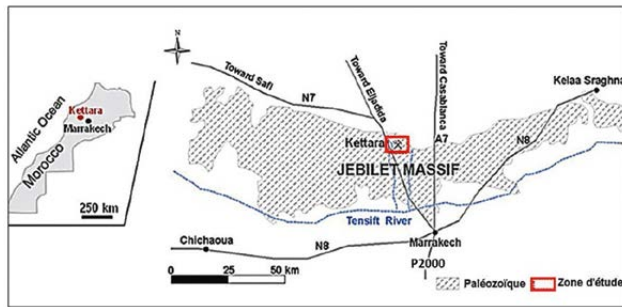


Figure 2. — Localisation géographique de la mine de Kettara (Khalil *et al.*, 2014).
Figure 2. — Geographical location of the Kettara mine (Khalil *et al.*, 2014).

La mine de Kettara correspond à un amas sulfuré datée du Viséen supérieur. Elle se situe entre deux plaines; au Nord la plaine de la Bahira et au Sud la plaine du Haouz (Fig. 3). Cet amas sulfuré est caractérisé par une minéralisation constituée principalement de pyrrhotine et de pyrite, mais appauvrie en métaux de base (Bordonaro, 1984).

Les principales caractéristiques géologiques de l'amas sulfuré de Kettara sont rattachées à sa position stratigraphique au-dessus du volcanisme acide du membre supérieur d'une série dite de Sarhlef (Jebilet centrales) et en dessous d'une autre dite de Teksim (Jebilet orientales). La minéralisation présente des

structures primaires témoignant de sa contemporanéité avec la sédimentation. Le contrôle structural joue un rôle important dans les positions du corps minéralisé avec développement d'une altération hydrothermale importante à séricite, chlorite, qui accompagne la mise en place de l'amas (Felenc *et al.*, 1986).

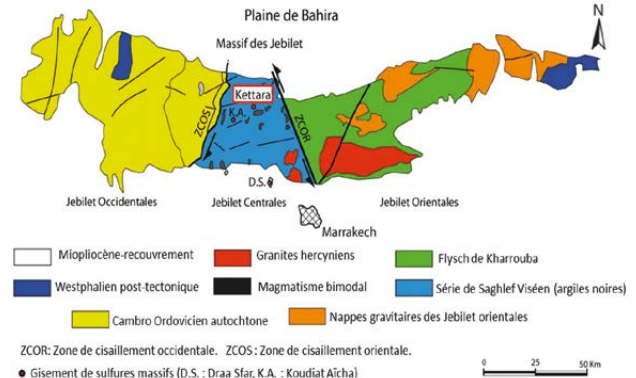


Figure 3. — Carte géologique du massif des Jebilet (modifiée d'après Huvelin, 1972).
Figure 3. — Geological map of the Jebilet massif (modified after Huvelin, 1972).

La lixiviation des résidus miniers de cette ancienne mine engendre un précipité de couleur rouge brique très acide. Les valeurs mesurées du pH varient entre 1,5 et 3 (Fig. 4) (Nfissi, 2013). Les pH acides des résidus sont similaires à ceux produit lors des tests en cellules humides effectués sur les déchets miniers de Kettara (Hakkou *et al.*, 2008b).

Ces résidus très perméables à texture grossière (Nfissi *et al.*, 2011, 2013), assurent un bon drainage et une oxydation très poussée des résidus et par ailleurs l'accentuation du processus du DMA. La paragenèse minérale à l'origine du DMA est dominée par la pyrrhotine et la pyrite, à qui sont associés, en faible quantités, la chalcopryrite, la sphalérite, la goëthite, les aluminosilicates, la chlorite-serpentine, le talc et le quartz.



Figure 4. — Eaux de ruissellement aux alentours de la mine abandonnée de Kettara (Effet DMA).
Figure 4. — Runoff water around the abandoned Kettara mine (AMD effect)

Hakkou *et al.*, (2008a) ont déterminé le potentiel de génération d'acide (PA) et le potentiel de neutralisation (PN) des résidus de Kettara par le test statique. Ce test permet d'établir la capacité d'un échantillon de produire de l'acide et de le neutraliser. Il s'agit de créer un bilan chimique entre les minéraux producteurs d'acide et les minéraux acidivores pouvant le neutraliser. Le test statique le plus couramment utilisé est la méthode standard (Acid-Base Accounting : ABA), développée par Smith *et al.* (1974) et modifiée par différents auteurs (Sobek *et al.*, 1978; Lawrence et Wang, 1997; MEND, 2009; Bouzahzah, 2013).

La comparaison entre PA (Pouvoir d'Acidité) et PN (Pouvoir de Neutralisation) obtenus par les tests statiques permet de classer les rejets miniers. Il existe deux critères de classification qui sont le Pouvoir Net de Neutralisation ($PNN = PN - PA$) et le rapport PN/PA appelé NPR ($NPR = PN/PA$).

En se basant sur le rapport NPR, les auteurs (Adam *et al.* (1997) et Price *et al.* (1997)) suggèrent des valeurs de classifications des rejets. La classification basée sur ce rapport confirme que les rejets sont générateurs d'acidité, lorsque le rapport $NPR < 1$. La figure 5 représente le résultat de la prévision statique de génération de l'acidité de Kettara, en utilisant le rapport PN/PA .

Les valeurs de $PNN < -20\text{kgCaCO}_3/\text{t}$ indiquent un matériau produisant de l'acide, tandis que les matériaux à $PNN > 20\text{kgCaCO}_3/\text{t}$ sont considérés comme consommateur d'acide (Miller *et al.*, 1991; Ferguson et Morin, 1991).

Les résidus miniers de Kettara, dotés d'un faible potentiel net de neutralisation (-453 à $-22,5\text{ kg CaCO}_3/\text{t}$), d'un potentiel net de génération d'acide élevé entre (51 à $453\text{ kg CaCO}_3/\text{t}$) et d'un potentiel de neutralisation négligeable (Fig.5), sont responsables d'une manière incontestable du déclenchement du DMA dans ce site (Hakkou *et al.*, 2008a).

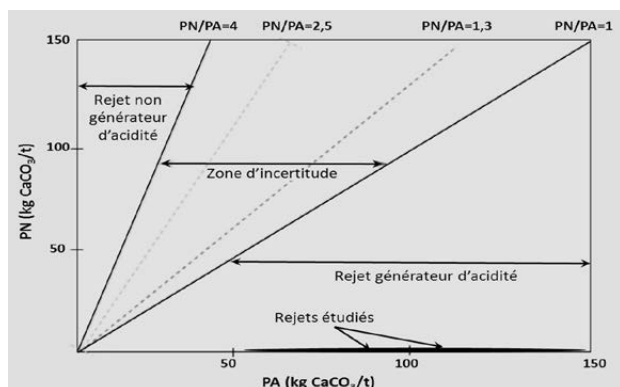


Figure 5. — Résultat de la prévision statique de génération de l'acidité de Kettara.

Figure 5. — Acidity generation static prediction result of Kettara.

II. — MATERIAUX INITIAUX

Les matériaux alcalins utilisés dans cette étude sont les boues de sucrerie et les argiles qui proviennent respectivement de la station d'épuration des eaux usées de la Compagnie Sucrière Marocaine de Casablanca (COSUMAR), considérée comme étant l'une des plus grandes raffineries d'Afrique, et d'une carrière d'argile du barrage de Sidi Abderrahmane à une dizaine de Km à l'Est de la ville de Safi (Fig. 6).

La caractérisation physico-chimique et minéralogique des matériaux étudiés (Zerhouni *et al.*, 2016) a montré qu'ils sont dotés d'un potentiel de neutralisation assez élevé. Il est de l'ordre de $878,5\text{ kg CaCO}_3/\text{t}$ pour les SPS et de $299\text{ kg CaCO}_3/\text{t}$ pour les Clys (Tabl. 1). En ce qui concerne les boues de sucrerie, la principale phase détectée par diffraction des rayons X est représentée par la calcite et des traces de quartz. Leur teneur en matière organique est de l'ordre de $8,35\%$. Pour les argiles, le spectre de diffraction des rayons X a révélé la présence de la kaolinite, de la muscovite, du quartz et de la calcite. Leur teneur moyenne en matière organique est de $0,53\%$. Ces deux matériaux peuvent donc être retenus pour la stabilisation des rejets miniers acides de Kettara.

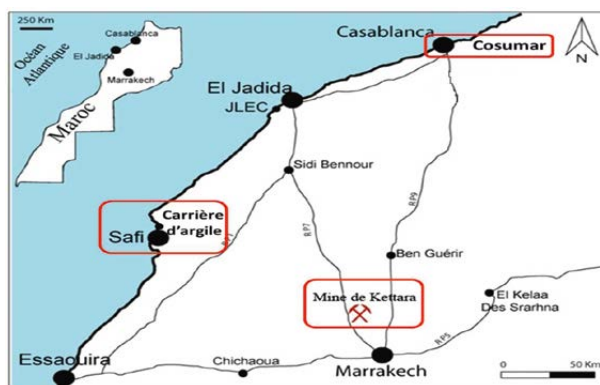


Figure 6. — Situation des différents sites de collecte de matériaux utilisés (SPS et Cly) (Nfissi *et al.*, 2014).

Figure 6. — Situation of the different material collection sites used (SPS and Cly) (Nfissi *et al.*, 2014).

Echantillons	PN (kg/t CaCO_3)	M.O. (%)	CaCO_3 (%)
SPS	878.5	8.35	80
Cly	299	0.53	10.48

Tableau 1. — Dosage de la matière organique, des carbonates et du potentiel de neutralisation dans les boues de sucrerie et les argiles (Zerhouni *et al.*, 2016).

Tableau 1. — Determination of organic matter carbonates and neutralization potential in mud pulp sweets and clays (Zerhouni *et al.*, 2016).

III. — MATERIELS ET METHODES ;

Plusieurs essais cinétiques peuvent être utilisés. Nous citons les essais en colonnes, les mini-cellules d'altération et les cellules humides (Lawrence, 1990; Price *et al.*, 1997; Villeneuve *et al.*, 2003; Villeneuve *et al.*, 2009; MEND, 2009; Sapsford *et al.*, 2009; Plante *et al.*, 2012). Les tests cinétiques adoptés dans cette étude ont été effectués en mini-cellules d'altération. Cette méthodologie est basée sur les travaux de Cruz *et al.* (2001a, 2001b) qui ont développé le protocole standardisé de l'essai en cellules humides de l'ASTM (American Society for Testing and Materials) (1998) et de Morin & Hutt (1997). Les mini-cellules d'altération ont été retenues comme test cinétique parmi plusieurs parce qu'elles nécessitent une petite quantité d'échantillon, sont faciles à mettre en place, peu coûteuses et donnent des résultats assez rapides dans le temps (Villeneuve, 2004). Ces essais ont permis de suivre le comportement des matériaux initiaux et l'effet de l'amendement sur les résidus miniers à petite échelle.

Le dispositif expérimental retenu comporte cinq essais refermant 2/3 de résidus miniers, mélangés à 1/3 des matériaux choisis. La lixiviation consiste à faire percoler 50 ml d'eau distillée à travers l'entonnoir Buchner et ce, deux fois par semaine pendant 67 jours. Les différentes configurations choisies sont décrites ci-dessous (Fig. 7):

Essai 1 : comporte exclusivement des résidus miniers fins de Kettara (TK).

Essai 2 : comporte uniquement les argiles de Safi (Clys).

Essai 3 : comporte les boues de pâte de sucrerie de la COSUMAR (SPS) seuls.

Essai 4 : renferme 2/3 de résidus miniers (TK) mélangés

avec 1/3 d'argiles (Clys).

Essai 5 : renferme 2/3 de résidus miniers (TK) mélangés

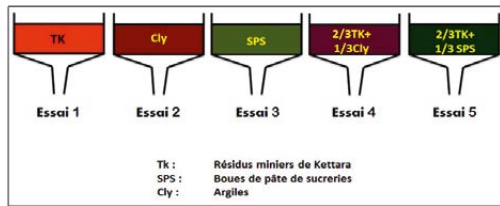


Figure 7. — Description du protocole expérimental.

Figure 7. — *Experimental protocol description.*

avec 1/3 de boues (SPS).

Les lixiviats récoltés après chaque rinçage ont fait l'objet de plusieurs mesures : volume récupéré, pH, conductivité, acidité et alcalinité. Le pH des lixiviats obtenus est mesuré à l'aide d'un pH-mètre type (pH/Ion 510, Bench pH meter); la conductivité des lixiviats récoltés est mesurée à l'aide d'un conductivimètre type (con510, Bench conductivity). L'acidité est déterminée à l'aide du titrage par l'hydroxyde de sodium (norme PE3-AC-08) et l'alcalinité des mélanges par titration à l'acide sulfurique (norme PE3-AC-07).

IV. — RESULTATS ET DISCUSSION

L'évolution du pH, de la conductivité, de l'acidité et de l'alcalinité des lixiviats des cinq colonnes a été suivie pendant 67 jours. L'essai 1 (résidus seuls) se distingue de l'ensemble des autres par le volume le plus élevé des lixiviats, alors que l'essai 2 (argiles seules) a donné le volume le plus faible qui est dû au pouvoir de rétention des argiles. Le volume recueilli dans l'essai 3 (Boues de pâte de sucrerie seule) bien qu'élevé ne dépasse guère celui de l'essai 1. Les essais 4 et 5, qui comportent un mélange des Tk avec les SPS ou les Cly, produisent un volume important probablement dû au ratio des résidus miniers (2/3) par rapport à celui des SPS et Cly (1/3).

Durant les 67 jours, le pH le plus bas (2,14) a été enregistré pour l'essai 1 (TK seuls) qui est considéré comme essai témoin (Fig. 8a). Le pH des lixiviats des boues de sucrerie (Essai 3) est compris entre 6,12 et 8,47 alors que celui des argiles seules (Es-

sai 2) est compris entre 6,68 à 9,05 (Fig. 9a). Les argiles seules ont un pouvoir de rétention très grand, d'où la difficulté de récupérer des lixiviats chaque semaine. Les argiles jouent un rôle très important pour empêcher le drainage des eaux acides étant donnée leurs propriétés d'adsorption et d'absorption (Parker & Rae, 1998). Pour les essais 4 et 5 comportant l'amendement, l'évolution du pH montre une certaine tendance vers la neutralité. Ces deux matériaux peuvent donc jouer un rôle très important pour la neutralisation des eaux acides. L'essai 4, contenant 2/3 TK et 1/3 Cly, a fourni le pH le plus élevé (pH=8) (Fig. 8a).

Au début de l'essai cinétique, la conductivité électrique pour les colonnes 1, 3, 4 et 5 augmente pour atteindre des valeurs de 8620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'essai 1; 4100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'essai 3; 5030 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'essai 4 et 7290 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'essai 5 (Fig. 8b). Puis une diminution rapide de la conductivité a été notée pour les quatre essais. A la fin de l'essai, les valeurs les plus élevées ont été enregistrées pour l'essai 1 qui comporte uniquement les résidus miniers. La courbe de la conductivité de l'essai 2 montre une augmentation de la conductivité dès le premier rinçage puis une chute remarquable de celle-ci dès le troisième rinçage (Fig. 9b). Pour l'essai 3, la conductivité est au minimum à partir du 7ème rinçage (4ème semaine) par opposition aux essais 4 et 5 qui n'atteignent le minimum de conductivité qu'à partir du 17ème rinçage (Fig. 8b). Nous constatons donc que les SPS et les Cly contribuent à la diminution de la conductivité des lixiviats qui

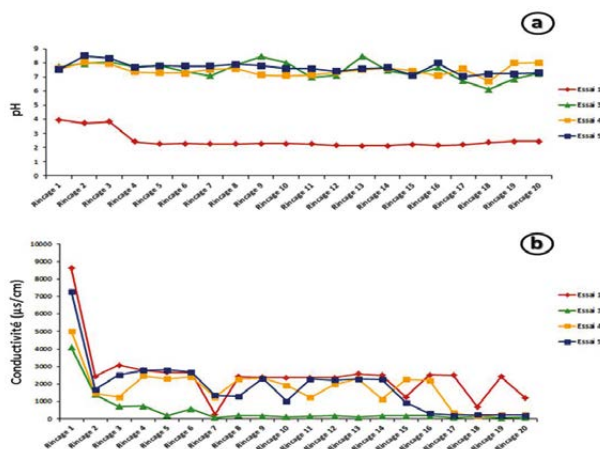


Figure 8. — Cinétique des mesures ponctuelles du pH et de conductivité électrique des lixiviats.

Figure 8. — *Kinetics of point measurements of pH and electrical conductivity of leachates.*

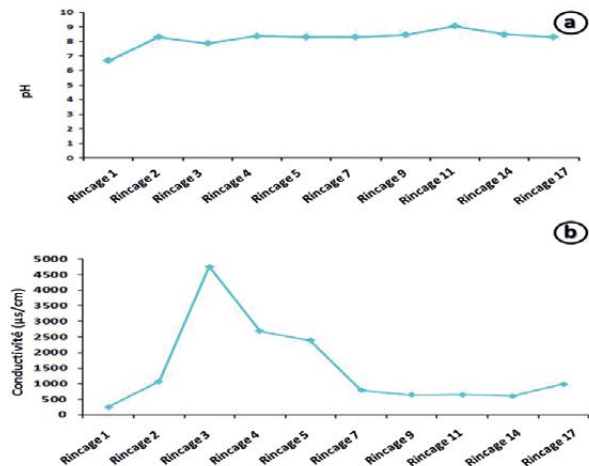


Figure 9. — Cinétique des mesures ponctuelles de pH et de la conductivité électrique des lixiviats d'argile.

Figure 9. — *Kinetics of point measurements of pH and electrical conductivity of clay leachates.*

atteint son minimum à partir de la 8ème semaine.

L'acidité la plus élevée est enregistrée dans l'essai 1 qui comporte uniquement les résidus miniers de Kettara. Par contre, les essais renfermant l'amendement à base des SPS ou des argiles ne génèrent aucune acidité (Fig. 10a), celle-ci reste faible jusqu'à la fin de l'essai cinétique.

Les lixiviats de l'essai 4 présentent des niveaux élevés d'alcalinité, compris entre 16,4 et 677,42 mg de CaCO_3/l , alors que celui des boues de pâte de sucrerie (essai 5) sont compris entre 9,9 et 878,472 mg de CaCO_3/l (Fig. 10b). On en conclut donc que l'amendement par les SPS ou les Cly (essais 4 et 5) a permis une diminution progressive de l'alcalinité et l'activation des processus de neutralisation et ce jusqu'à épuisement des carbonates.

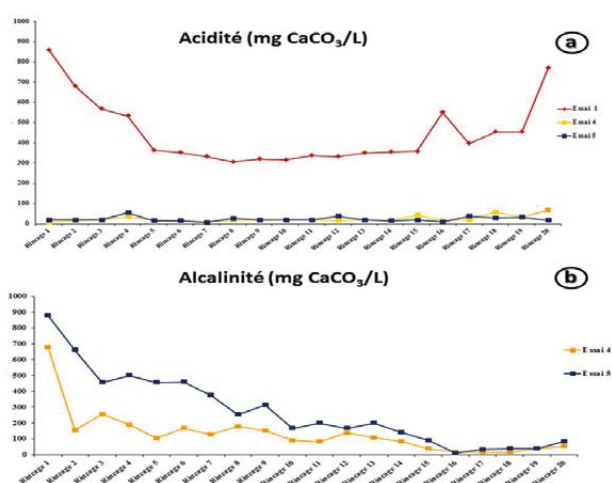


Figure 10. — Cinétique des mesures ponctuelles de l'acidité et de l'alcalinité des lixiviats.

Figure 10. — Kinetics of point measurements of leachate acidity and alkalinity.

V. — CONCLUSION

Les essais en mini cellules d'altération, ont permis de suivre sur une durée de dix semaines l'effet d'un amendement alcalin à

base de boues de sucrerie (SPS) et d'argiles (Clys) sur la neutralisation du drainage minier acide produit par les résidus miniers de la mine abandonnée de Kettara. L'ensemble des analyses effectuées ont montré que ces deux matériaux (SPS et Clys) sont tout à fait appropriés et aptes pour la stabilisation des rejets miniers acides. En se basant sur le pH et l'alcalinité, il semblerait que l'amendement à base des SPS et des Clys seuls s'avère actif et capital pour la neutralisation des lixiviats acides. Ces matériaux peuvent être utilisés seules ou mélangées avec d'autres matériaux. A l'issue des résultats obtenus, des tests cinétiques seront conduits au laboratoire pour déterminer les proportions relative de SPS et des Clys propices pour atténuer le drainage minier acide dans ce site minier. Cette étude vise l'atténuation de l'impact du drainage minier acide dans le site minier de Kettara, qui pourrait s'étendre sur d'autres régions à climat semi-aride présentant une problématique similaire.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier les organismes subventionnaires de cette étude; en particulier la Compagnie Sucrière Marocaine (COSUMAR, Casablanca), le Centre National de la Recherche Scientifique et Technique (CNRS, Rabat) et le laboratoire de Géodynamique des chaînes anciennes de la Faculté des Sciences Ben M'Sik (FSBM, Casablanca). Nos remerciements vont aussi au Directeur de la publication ainsi qu'aux membres de la revue des Annales de la Société Géologique du Nord et aux relecteurs qui ont bien voulu lire et critiquer la présente note.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAM K., KOURTIS A., GAZEA B., KONTOPOULOS A. (1997) — Evaluation of static tests used to predict the potential for acid drainage generation at sulfide mine sites. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, section A, mining industry, 106p.

AUBERTIN M., BUSSIÈRE B., BERNIER L., CHAPUIS R., JULIEN M., BELEM T., SIMON R., MBONIMPA M., BENZAAZOUA M. & LI L. (2002) — La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement. Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil. Montréal, Québec, Canada. Paper No.GE-045 /Article No. GE-045. 33p.

ÁLVAREZ-VALERO A.M., PÉREZ-LÓPEZ R. & NIETO J.M. (2009) — 'Prediction of the environmental impact of modern slags: A petrological and chemical comparative study with Roman age slags'. American Mineralogist, **94** (10):1417-1427p.

BENZAAZOUA M., BUSSIÈRE B., KONGOLO M., MCLAUGHLIN J. & MARION P. (2000a) — Environmental desulphurization of four canadian mine tailings using froth flotation, International Journal of Mineral Processing, **6**: 57-74 p.

BENZAAZOUA M. & KONGOLO M. (2003) —Physico-chemical properties of tailing slurries during environmental desulphurization by froth flotation. International Journal of Mineral Processing, **69** : 221-234p.

Bordonaro M. (1984) - La ceinture ibéro-marocaine. Géologie structurale du district de Kettara, thèse de 3ème cycle, Strasbourg.

BOUZAHAH H. (2013) —Modification et amélioration des tests statiques et cinétiques pour une prédiction fiable et sécuritaire du drainage minier acide. Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT). Août 2013, 11-130 et 288p.

BOSSE B. (2013) — Évaluation du comportement hydrogéologique d'un recouvrement alternatif constitué de rejets calcaires phosphatés en climat semi-aride à aride'. UQAT, Rouyn-Noranda, Canada. Ph.D, Doctorat en sciences de l'environnement : 301p.

CRUZ R., MÉNDEZ B.A., MONROY M. & GONZÁLEZ I. (2001a) — cyclic voltammetry applied to evaluate reactivity in sulfide mining residue. Applied Geochemistry, **16**: 1631-1640p.

CRUZ R., BERTRAND V., MONROY M. & GONZÁLEZ I. (2001b) — Effect of sulfide impurities on the reactivity of pyrite and pyritic concentrates: a multi-tool approach. Applied Geochemistry, **16**: 803-819p.

FELENC J., FOURNIER M., HMEURAS M. (1986) — Contrôles géologiques des amas à pyrrhotine des Jebilet et Gue-massa. Définition des guides de recherche. Rapport du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 86 MAR 131, 54 p.

- HAKKOU R., BENZAAZOUA M. & BUSSIÈRE B. (2009) — Laboratory evaluation of the use of alkaline phosphate wastes for the control of acidic mine drainage. *Mine Water Environ*, **28**: 206–218. 3-11p.
- HAKKOU R., BENZAAZOUA M. & BUSSIÈRE B. (2008a) — Acid Mine Drainage at the Abandoned Kettara Mine (Morocco): 1. Environmental Characterization, *Mine Water Environ*, **27**: 145–159. 5-8 p.
- HAKKOU R., BENZAAZOUA M. & BUSSIÈRE B. (2008b) — Acid Mine Drainage at the Abandoned Kettara Mine (Morocco): 2. Mine Waste Geochemical Behavior, *Mine Water Environ*, **27**: 160–170. 3-10 p.
- KHALIL A., HANICH L., HAKKOU R. & LEPAGE M. (2014) — GIS-based environmental database for assessing the mine pollution: A case study of an abandoned mine site in Morocco. *Journal of Geochemical Exploration*, **144**: 468–477. 2p.
- LAWRENCE R.W. & WANG Y. (1997) — Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. In: *Proceedings of 4th international conf on acid rock drainage*, vol 1, Vancouver, Canada, 451–464p.
- LAWRENCE R.E. (1990) — Laboratory procedures for the prediction of long term Weathering characteristics of mining wastes. Conférence présentée au Symposium on Acid Mine Drainage; Annual Meeting Geological Assoc. Canada and Mineralogical Assoc., VCH, Canada. In BOUZAHZAH H. (2013), *Modification et amélioration des tests statiques et cinétiques pour une prédiction fiable et sécuritaire du drainage minier acide*. Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) 187p.
- MEND. (2009) — Report 1.20.1. Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials. By Price, W.A. CANMET, Natural resources Canada.
- MERMILLOD-BLONDIN R., KONGOLO M., DE DONATO P., BENZAAZOUA M., BARRÈS O., BUSSIÈRE B. & AUBERTIN M. (2005) — Pyrite flotation with xanthate under alkaline conditions- application to environmental desulfurization. Centenary of Flotation Symposium, Brisbane, QLD, 6-9 June. 683-692p.
- MORIN K.A. & HUTT N.M. (1997) — Environmental geology of mine site drainage: practical theory and case studies. MDAG Publishing, Vancouver (Canada). 333p.
- NFISSI S., ALIKOUSS S., ZERHOUNI Y., HAKKOU R., BENZAAZOUA M. & BOUZAHZAH H. (2017) — Control of acid mine drainage from an abandoned mine in Morocco by using cement kiln dust and fly ash as amendments. *Journal of materials and Environmental Sciences*. **8** : 4457-4466p.
- NFISSI S., ALIKOUSS S., ZERHOUNI Y., HAKKOU R., BENZAAZOUA M., SAMIR M. & BAROUDI Z. (2014) — Evaluation of the capacity of cement kiln dust and fly ash for the neutralization of acidic mine tailings*. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*. **4** : 2277-2081. 51-61 p.
- NFISSI S. (2013) — Evaluation de la capacité de matériaux industriels alcalins à neutraliser les rejets miniers acides de la mine de Kettara (Jebilet Centrales, Maroc). Université Hassan II Mohammedia- Casablanca, FSBM, Maroc. Doctorat en Géologie Appliquée : 74-122p.
- NFISSI S., ZERHOUNI Y., BENZAAZOUA M., ALIKOUSS S., CHTAINI A., HAKKOU R. & SAMIR M. (2011) — Caractérisation des résidus miniers des mines abandonnées de Kettara et de Roc Blanc (Jebilet centrales, Maroc)*. *Annales de la Société géologique du Nord Tome 18 (2ème série)*, 43-53p.
- OUAKIBI O., LOQMAN S., HAKKOU R. & BENZAAZOUA M. (2013) — The Potential Use of Phosphatic Limestone Wastes in the Passive Treatment of AMD: A Laboratory Study, *Mine Water and the Environment (Journal of the International Mine Water Association (IMWA))*. **32**: 266–277. 5-10 p.
- PARKER A. & RAE J.E. (1998) — Environmental interactions of Clays. Berlin: Springer. 271 p.
- PLANTE B., BUSSIÈRE B. & BENZAAZOUA M. (2012) — Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials. *Journal of Geochemical Exploration*, **114**: 57-69p.
- PRICE W. A., MORIN K. & HUTT N. (1997) — Guide lines for the Prediction of Acid Rock Drainage and Metal Leaching for Mines in British-Columbia: Part II- Recommended Procedures for Static and Kinetic Testing. *Proceedings Fourth International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, B.C. Canada may 31 – June 6, **1** : 15–30p.
- SAPSFORD D.J., BOWELL R.J., DEY M. & WILLIAMS K.P. (2009) — Humidity cell tests for the prediction of acid rock drainage. *Minerals Engineering*, **22 (1)**: 25-36p.
- SMITH R.M., GRUBE W.E., ARKLE T. & SOBEK A. (1974)—Mine Spoil Potentials for Soil and Water Quality. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, EPA-670/2-74-070, 303p.
- SRACEK O., CHOQUETTE M., GÉLINAS P., LEFEBVRE R. & NICHOLSON R.V. (2004) — Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Québec, Canada. *Journal of Contaminant Hydrology*. **69**: 45-71p.
- SOBEK A.A., SCHULLER W.A., FREEMAN J.R. & SMITH R.M. (1978) — Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesols. EPA-600/2-78-054. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

VILLENEUVE M., BUSSIÈRE B., BENZAAZOUA M. & AUBERTIN M. (2009) — Assessment of interpretation methods for kinetic tests performed on tailings having a low acid generating potential. Conférence présentée à la 8ème International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), June 23-26, Skelleftea, Sweden. In BOUZAHZAH H. (2013), Modification et amélioration des tests statiques et cinétiques pour une prédiction fiable et sécuritaire du drainage minier acide. Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), 190p.

VILLENEUVE M., BUSSIÈRE B., BENZAAZOUA M., AUBERTIN M., & MONROY M. (2003) — The influence of kinetic test type on the geochemical response of low acid generating potential tailings. Conférence présentée au Tailings and mine waste '03. Sweets & Zeitlinger, Vail, CO., USA. 269-279 p.

VILLENEUVE M. (2004) — Évaluation du comportement géochimique à long terme de rejets miniers à faible potentiel de génération d'acide à l'aide d'essais cinétiques. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, 576p.

ZERHOUNI Y., ALIKOUSS S., SABER N., NFISSI S., ZAHOUR G., BAROUDI Z. & SAMIR M. (2016) — Caractérisation des boues de sucrerie et des argiles pour la neutralisation des résidus miniers de la mine de Kettara (Jebilet centrales, Maroc). European Scientific Journal May 2016 edition, **12 (15)**: 1857 – 7881. 326-328 p.