

Valorisation des rejets miniers du district Pb-Zn de Touissit-Boubker (région orientale-Maroc)

ARGANE Rabei^{1,2}, BENZAAZOUA Mostafa^{2,3}, BOUAMRANE Ahmed² et HAKKOU Rachid¹

1. Laboratoire de Chimie des Matériaux et de l'Environnement, Faculté des sciences et techniques, Université Cadi Ayyad, Avenue Abdelkarim Elkhatabi, Guéliz, BP 549, Marrakech, Maroc

2. Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale, Université de Lyon, INSA- Lyon, LGCIE, 20 Avenue A. Einstein, F-69621 Villeurbanne cedex, France

3. UQAT, 445 boulevards de l'université, Rouyn-Noranda, Québec, Canada

Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : rabei.argane@gmail.com

RESUME

Au Maroc, aucun dispositif n'a été mis en place pour gérer l'abandon des anciens sites miniers. Ces derniers sont caractérisés par la persistance d'immenses tonnages de résidus miniers dont la nocivité est à l'origine, dans de nombreux cas, d'importants impacts environnementaux. L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier la faisabilité de valorisation des rejets abandonnés du district minier Pb-Zn de Touissit-Boubker (Maroc) comme granulats fins pour mortier de finition. L'étude consiste d'abord en une caractérisation des propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des rejets, suivie d'une évaluation des propriétés mécaniques des mortiers confectionnés. L'étude comporte aussi une évaluation du potentiel polluant des mortiers à base de ce type de rejets. Les résultats ont mis en évidence la présence d'une grande proportion de particules fines ($< 63\mu\text{m}$) et des concentrations élevées en As, Cu, Cd, Pb et Zn dans les rejets miniers. Il a été observé que l'utilisation des rejets miniers comme agrégats, pour la confection de mortiers, engendre une importante augmentation de la demande en eau nécessaire au gâchage ainsi qu'une diminution significative des résistances mécaniques en particulier à court terme. Toutefois, la stabilisation des rejets miniers dans la matrice cimentaire est effective puisque la dissolution du Pb et du Zn s'avère très limitée.

MOTS-CLÉS : Rejets miniers; granulats fins; métaux lourds; mortier de finition.

ABSTRACT

In Morocco, several mine sites were abandoned after closure without any rehabilitation plan. These sites are characterized by the presence of significant tailings volumes, which has produced significant environmental impacts. The objective of this research is to study the use of mine tailings, sourced from the abandoned Pb-Zn district of Touissit-Boubker (Morocco), as aggregates for surface finishing mortars. The study consist firstly of a fine physical, chemical and mineralogical characterization of mine tailings, followed by an evaluation of tailings-based mortars mechanical properties. The pollution potential of the tailings-based mortars was also assessed in this study. The results show that mine tailings are characterized by the presence of high fine content and significant concentrations of As, Cu, Cd, Pb and Zn. The use of tailings as aggregate produces a significant increase in the amount of water needed for mixing mortars as well as a decrease in mechanical strength. The dissolution of Pb and Zn in tailings-based mortars is very limited.

Valorisation des rejets miniers du district Pb-Zn de Touissit-Boubker (région orientale-Maroc)

ARGANE Rabei, BENZAAZOUA Mostafa, BOUAMRANE Ahmed et HAKKOU Rachid

Introduction

Le Maroc, pays de longue tradition minière, compte actuellement environ 200 sites miniers abandonnés (Hakkou & Benzazoua 2012). En effet, des quantités importantes de rejets miniers constitués de résidus de concentrateur et de roches stériles, ont été délaissées après l'arrêt d'activité de ces exploitations sans aucun plan de gestion effective ni de réhabilitation. Ces rejets pourraient avoir des impacts négatifs sur l'environnement : pollution des sols, de l'eau, destruction ou perturbation d'habitats naturels, impact visuel sur le paysage,...etc. (ex: Boularbah et al 2006, Goumih et al. 2012, Hakkou et al 2008, Khalil et al.2013, Lghoul et al.2012).

Le district minier de Pb-Zn de Touissit-Boubker, situé sur la frontière algéro-marocaine à une trentaine de kilomètres au sud de la ville d'Oujda en est aussi un exemple. En effet, après avoir produit plus de 2,7 Mt de plomb et 2 Mt de zinc, ce district a vu son activité cessée laissant sur les lieux des millions de tonnes de rejets de concentrateur (riche en métaux résiduels) entreposés dans des parcs à résidus (Fig.1). Ces derniers ont produit, sous l'influence de l'intense érosion hydrique et éolienne, une importante contamination des ressources en eau et des sols avoisinants (Smouni et al 2010). De plus, la restauration qui a été tentée (Fig.1) sur quelques parcs à résidus avoisinant la ville de Touissit en sont guère efficace.

L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier la faisabilité de valorisation des rejets du district minier de Pb-Zn de Touissit-Boubker comme granulats fins pour mortiers, proposant ainsi une alternative potentiellement salvatrice à la problématique de stockage de surface des rejets et de demande accrue en matières premières dans le secteur du BTP. Il est cependant pertinent de souligner que la voie de valorisation des rejets miniers comme agrégats pour mortiers est utilisée d'une façon artisanale et non-contrôlée depuis plusieurs années au Maroc. En effet, les rejets de concentrateur sont considérés, au voisinage de quelques sites miniers abandonnés, comme un sable naturel ayant toutes les caractéristiques pour utilisation dans les formulations de mortier de finition et de surfacage des murs. Cet enduit, lissé traditionnel, présenterait à priori des propriétés mécaniques satisfaisantes et serait préféré des fois aux mortiers conventionnels à base de sable naturel éventuellement alcalins. Toutefois, ce recyclage potentiel peut engendrer des risques environnementaux et

sécuritaires liés notamment à la grande proportion de fines et à la présence significative de concentrations en métaux dans les rejets miniers.

La présente étude comporte ainsi trois principaux volets : (i) une caractérisation des propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des rejets miniers issus du district de Touissit-Boubker, (ii) une comparaison entre les propriétés mécaniques des mortiers à base de rejets miniers et des mortiers de références (à base de sables naturels fins), (iii) une évaluation du potentiel polluant des mortiers à base de rejets minier.



Figure 1. Photos des parcs à résidus du district minier Pb-Zn de Touissit-Boubker, illustrant la réhabilitation ratée par un reboisement.

I. Matériels et méthodes

I.1 Matériel

Le district de Touissit-Boubker est composé de quatre gisements voisins (Boubker, Touissit, Beddiane et Mekta). L'échantillonnage des rejets miniers a principalement eu lieu à différentes profondeurs au niveau des parcs à résidus de Boubker (Bo) et Beddiane (Be). Ces rejets ont été séchés, homogénéisés et tamisés (1 cm) avant la détermination de leurs propriétés physiques chimiques et minéralogiques. Similairement, un sable naturel conforme à la norme EN 13139 a été caractérisé en vue de son utilisation pour la confection de mortiers de référence. Un ciment portland CEM II/A (classe 32.5R) conforme à la norme marocaine NM 10.1.004 a été utilisé pour la confection d'éprouvette d'essais. Ce ciment est

largement employé au Maroc pour la confection de mortiers de finition pour le surfacage des murs.

1.2 Caractérisation des rejets

La distribution granulométrique des échantillons étudiés a été déterminée par diffraction laser grâce à un appareil Malvern Mastersizer. Le coefficient d'absorption d'eau, la masse volumique apparente et la densité réelle ont été respectivement analysés selon EN 1097-6, EN 1097-3 et par un Micromeritics pycnomètre à hélium. La détermination de la composition chimique a été réalisée par ICP-AES (Perkin Elmer Optima 3000) après digestion totale dans une solution aqueuse de $\text{HNO}_3/\text{Br}_2/\text{HF}/\text{HCl}$. La minéralogie a été analysée en combinant les deux méthodes : la diffraction par rayons X (DRX - Bruker AXS D8 Advance diffractometer) et la microscopie électronique à balayage (Hitachi S-3500N; 20 KeV ; 70 μA ; WD 15mm) couplée à une microanalyse EDS (Oxford, Inca Xmass 20 mm²). En terme d'analyse DRX, le logiciel DiffracPlus EVA a été utilisé pour identifier les espèces minérales, alors que le logiciel TOPAS employant la méthode Rietveld (Young 1995) a été employé pour quantifier leur abondance.

1.3 Confection des mortiers

Les proportions des matériaux dans les mélanges utilisés dans cette étude sont similaires à ceux employés conventionnellement au Maroc pour la confection de mortiers de finition :

- Le rapport ciment/agrégats est typiquement 1:3 (en volume)
- La quantité d'eau utilisée pour le gâchage est celle permettant d'obtenir une consistance ayant un étalement (EN 1015-3) de 200 mm et correspondant à l'ouvrabilité normalement souhaitée. Les mortiers ont été confectionnés selon la norme EN 1015-2. Cette dernière spécifie un mode opératoire pour fabriquer des mortiers pour essai à partir de constituants secs et d'eau. Le gâchage a été réalisé en utilisant un malaxeur conforme à l'EN 196-1.

Trois mortiers ont été confectionnés :

- Un mortier à base du rejet minier de Boubker (M-Bo)
- Un mortier à base du rejet minier de Beddiane (M-Be)
- Un mortier de référence à base de sable naturel (M-Sa)

Les mortiers fraîchement confectionnés sont placés ensuite dans des moules 4x4x16cm (rempli en deux couches, 60 chocs à chacune), puis conservés dans une armoire humide à 20°C±2°C et à 95% de taux d'humidité.

1.4 Propriétés mécaniques des mortiers

La consistance et la densité des mortiers frais ont été respectivement évaluées selon la norme EN 1015-3 et EN 1015-6. La résistance à la compression des mortiers a été déterminée selon la norme EN 1015-11, sur des demi-prismes résultant du tronçonnage à sec des éprouvettes 4x4x16cm. L'essai a été réalisé pour des échantillons de 7, 14, 28 et 90 jours d'âge de maturation.

1.5 Comportement environnemental des mortiers

La description du scénario d'utilisation des rejets miniers comme granulats pour « mortier de finition » conduit à sélectionner un essai permettant à la fois de (i) prédire l'évolution de la qualité des eaux de drainage et (ii) d'étudier le transfert de polluants à travers un bloc monolithique. Le test de lixiviation ainsi retenu est le test de lixiviation sur monolithe (TLM). Le protocole TLM a été adapté à partir d'un test néerlandais standard (EA NEN 7375). Il consiste en la lixiviation d'un bloc monolithique avec de l'eau déminéralisée dans un réacteur agité et fermé, avec un renouvellement périodique de la solution en contact avec le matériau. Des cubes de 4 cm, obtenus par tronçonnage à sec des éprouvettes de mortier (28 jours d'âge de maturation), sont introduits dans des flacons et posés sur une grille à 2 cm du fond. Le lixiviant (eau déminéralisée) est introduit dans un rapport volume de liquide/surface du bloc (L/S) de 10 cm³/cm². Au cours de la lixiviation, la solution est agitée à l'aide d'un agitateur magnétique. Le rythme de changement de la solution est de 6 heures, 1 jour, 2,25 jours, 4 jours, 9 jours, 16 jours, 36 jours et 64 jours. On obtient ainsi 8 solutions dont on mesure les paramètres physico-chimiques (pH, Eh et conductivité) avant de procéder à une filtration (0.45 μm) et une acidification (HNO_3) pour le dosage des éléments solubles (Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, S, Sb, Se, Si, Ti, Zn).

2. Résultats et discussion

2.1. Caractérisation des rejets

La figure 2 présente la distribution granulométrique des échantillons à l'étude, alors que les tableaux 1, 2 et 3 détaillent respectivement leurs propriétés physiques, chimiques et minéralogiques.

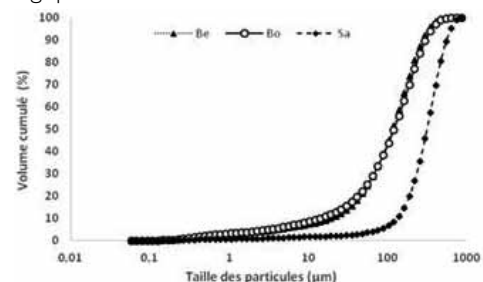


Figure 2. Distribution granulométrique du sable naturel et des rejets miniers étudiés.

Les résultats montrent que les deux échantillons de rejets présentent une distribution granulométrique similaire et plus fine que celle du sable de référence. Cette distribution, typique d'un résidu minier issu d'un procédé de broyage de minerais polymétalliques, est aussi caractérisée par la présence d'une grande teneur en fine (la proportion des particules inférieures à 63 μm est de l'ordre de 27 % en poids). La densité relative

des deux résidus miniers est aussi similaire. Elle est de 2,91 g/m³ pour le rejet de Boubker et de 2,87 g/m³ pour le rejet de Beddiane alors que le sable présente une densité de 2,69 g/m³. Le coefficient d'absorption d'eau des deux rejets miniers (\approx 0,7%) est relativement plus élevé que celui des sables naturels (0,45%) à cause de la grande teneur en fine.

Tableau 1. Propriétés physiques du sable naturel et des rejets miniers étudiés.

Propriétés physiques	Sable naturel	Rejets miniers	
	Sa	Be	Bo
Taille maximale (μm)	1000	555	647
Teneur en fine (% < 63 μm)	4,6	26,3	27,2
Densité apparente (g/cm ³)	1,4	1,52	1,5
Densité réel (g/cm ³)	2,69	2,87	2,91
Coeff d'absorption d'eau (%)	0,45	0,7	0,65

Les résultats des analyses chimiques (tableau 2) montrent la présence de fortes concentrations de Ca et de Mg, liées principalement à l'abondance de la dolomite (Ca,Mg)CO₃ dans les rejets miniers (confirmé par l'analyse en DRX). Ces derniers sont aussi caractérisés par l'occurrence d'importantes teneurs d'arsenic (\approx 30 mg/kg), cadmium (\approx 30 mg/kg), cuivre (\approx 300 mg/kg) et de plomb (\approx 4000 mg/kg). Le zinc est aussi présent avec une forte teneur; particulièrement, dans le cas du rejet de Boubker (\approx 32100 mg/kg).

En termes de composition minéralogique (tableau 3) et à l'opposé du sable naturel majoritairement silicaté (\approx 95%), les rejets de Boubker et de Beddiane présentent globalement un assemblage identique essentiellement carbonaté : dolomite (Ca,Mg)CO₃ \approx 80% et ankérite (Ca,Mg,Mn,Fe)CO₃ \approx 5%. Ils contiennent aussi une proportion similaire de silicates (quartz SiO₂ \approx 8% + albite NaAlSi₃O₈ \approx 1,5%). Cependant, en termes de disparité entre les deux rejets, le résidu de Boubker est caractérisé par la présence d'une grande teneur de smithsonite (ZnCO₃ \approx 4%), alors que le rejet de Beddiane comporte approximativement 2,5% de kaolinite.

Concernant les sulfures, aucune espèce minérale n'a été détectée par DRX à cause de leur faible occurrence dans les deux rejets miniers. Cependant, l'analyse par microscopie électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés couplée à de la microanalyse X (MEB-BSE) a montré la présence de rares sulfures non oxydés (galène PbS et sphalérite (Zn,Fe)S). Ces sulfures sont généralement altérés en cérusite PbCO₃ et en smithsonite ZnCO₃ (Fig. 2a et Fig. 2b), ce qui explique leur

rareté. La présence de pyrite framboidale a aussi été observée au MEB dans le rejet de Boubker (Fig. 2c).

Tableau 2. Composition chimique des rejets miniers.

Éléments majeurs (%)	Be	Bo
Al	0,98	0,24
K	0,1	< 0,1
Ca	16,1	18,3
S	0,01	0,14
Fe	1,19	0,75
Mg	9,56	10,45
Mn	0,142	0,145
Métaux et Métalloïdes (mg/kg)		
Ag	< 5	8
As	40	30
Cd	34	28
Co	< 10	< 10
Cr	< 10	< 10
Cu	350	270
Mo	< 10	< 10
Pb	4160	3670
Ti	480	130
Zn	3800	32100

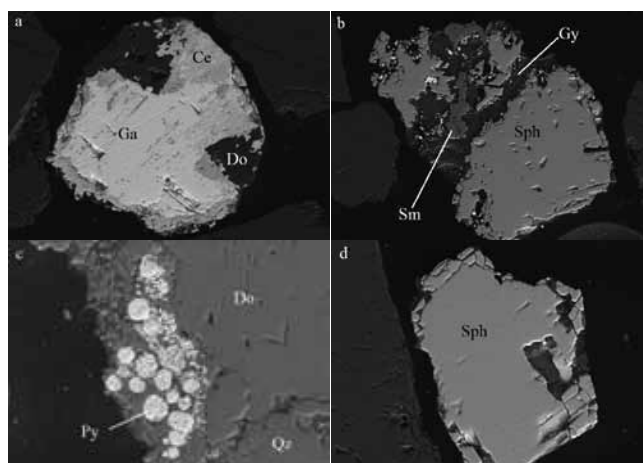


Figure 3. Images MEB-BSE des rejets miniers.

a : Altération de la galène en cérusite;
 b : Altération de la sphalérite en smithsonite;
 c : Pyrite framboidale; d: Sphalérite non-altérée.

*Ce: Cérusite; Do: Dolomite; Ga: Galène; Gy: Gypse; Py: Pyrite; Qz: Quartz; Sm: Smithsonite; Sph: Sphalérite;

Tableau 3. Phases minérales déterminées par DRX, % massique.

Phases minérales	Formules	Sable naturel		
		Sa	Bo	Be
Σ Silicates (%)		97,95	7,08	10,23
Quartz	Si O ₂	45,64	5,64	8,25
Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	6,78	-	-
Labradorite	(Ca Na)(Si Al) ₄ O ₈	23,72	-	-
Chlorite	(Mg Fe) ₅ Al(Si ₃ Al) O ₁₀ (OH) ₈	8,46	-	-
Muscovite	KAl ₂ (Si ₃ Al) O ₁₀ (OH F) ₂	13,35	-	-
Albite	NaAlSi ₃ O ₈		1,44	1,98
Σ Carbonates (%)		2,05	92,92	86,91
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	-	84,06	77,34
Ankérite	Ca(Fe,Mg,Mn)(CO ₃) ₂	-	4,63	9,57
Smithsonite	ZnCO ₃	-	4,23	-
Calcite	Ca CO ₃	2,05	-	-
Minéraux argileux				
Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-	-	2,86

2.2 Propriétés mécaniques des mortiers

Le tableau 4 présente les propriétés mécaniques des mortiers étudiés. Concernant la demande en eau, l'utilisation des deux rejets miniers comme agrégats engendre une augmentation importante de la quantité d'eau nécessaire au gâchage comparé au sable de référence. En effet, pour atteindre la consistance souhaitée, les mortiers à base de rejets miniers sollicitent une augmentation de 17% par rapport au mortier de référence. Ceci est principalement dû à la grande teneur en fines ($\approx 25\%$) des rejets. Des résultats similaires liés à la présence de fines dans des sables naturels ont été observés par plusieurs auteurs (Gonçalves et al 2007, Haach et al 2011, Reddy and Gupta 2008).

La différence de densité entre les mortiers à base de rejets miniers ($\approx 2100 \text{ Kg/m}^3$) et les mortiers de référence (1979 Kg/m^3) est principalement due aux disparités en termes de densité solide des granulats (2900 Kg/m^3 pour les rejets et 2700 Kg/m^3 pour les sables).

En termes de résistances mécaniques, le comportement des trois mortiers étudiés lors de l'essai en compression uni-axiale (UCS) est totalement différent. Les mortiers à base du rejet minier de Boubker ne présentent aucune résistance pendant les deux premières semaines. Ce n'est qu'à partir du 28ème jour que la prise de ce mortier se produit avec une résistance atteignant $5,77 \text{ MPa}$. La réduction des résistances mécaniques et le retard de prise des mortiers à base du rejet de Boubker

sont principalement dus à la présence de zinc et de plomb dans la solution de mélange. Ceci a été vérifié après lixiviation des rejets miniers par une solution simulant l'eau des pores de matrice ciment/sable (pH 13). En effet dans ces conditions de pH, le Pb (80 mg/l) et le Zn (5 mg/l) sont présents à de fortes concentrations dans la solution de mélange, retardant ainsi l'hydratation des grains et inhibant la formation des principales phases cimentaires (ex : CSH et portlandite) (Cocke 1990, Hills and pollard 1997). De plus, la présence du Pb et du Zn détourne les réactions d'hydratation du ciment vers la production de plus d'ettringite, ce qui diminue les résistances mécaniques des mortiers.

L'effet néfaste des métaux est moins marqué dans le cas du mortier à base du rejet de Beddiane (teneur en Zn du rejet inférieure). On note néanmoins pendant les deux premières semaines une certaine réduction des résistances UCS ($7,3 \text{ MPa}$) par rapport au mortier de référence ($11,09 \text{ MPa}$). A partir du 28ème jour les résistances du mortier M-Be ($14,12 \text{ MPa}$) dépassent ceux du mortier de référence (13 MPa). Cette allure d'augmentation des résistances mécaniques pourrait être due simultanément aux réactions pozzoloniques ayant lieu entre les phases argileuses et la chaux ainsi que la poursuite de formation de gypse et d'ettringite.

Tableau 4. Propriétés mécaniques des mortiers étudiées.

Mortiers	E/C ratio	Étalement (mm)	Densité (Kg/m ³)	Compression UCS (MPa)			
				7j	14j	28j	56j
M-Bo	1,35	200	2105	0	0	5,77	11
M-Be	1,35	200	2083	7,3	7,3	14,12	23,9
M-Sa	1.1	200	1979	11,09	12,7	13	14,1

2.3. Comportement environnemental des mortiers

Les résultats des analyses TLM en termes de pH, conductivité, sulfates, Ca, Pb et Zn sont présentés sur la figure 3. L'allure de l'évolution du pH est similaire pour les trois mortiers étudiés. Néanmoins, le mortier M-Be présente de plus faibles valeurs de pH variant entre 11 et 11,64, alors que le pH des mortiers M-Bo et M-Sa varie similairement entre 11 et 12,24. La diminution du pH des M-Be corrobore la précédente affirmation concernant la consommation de chaux (baisse de pH) lors des réactions pozzolaniques et sulfatiques.

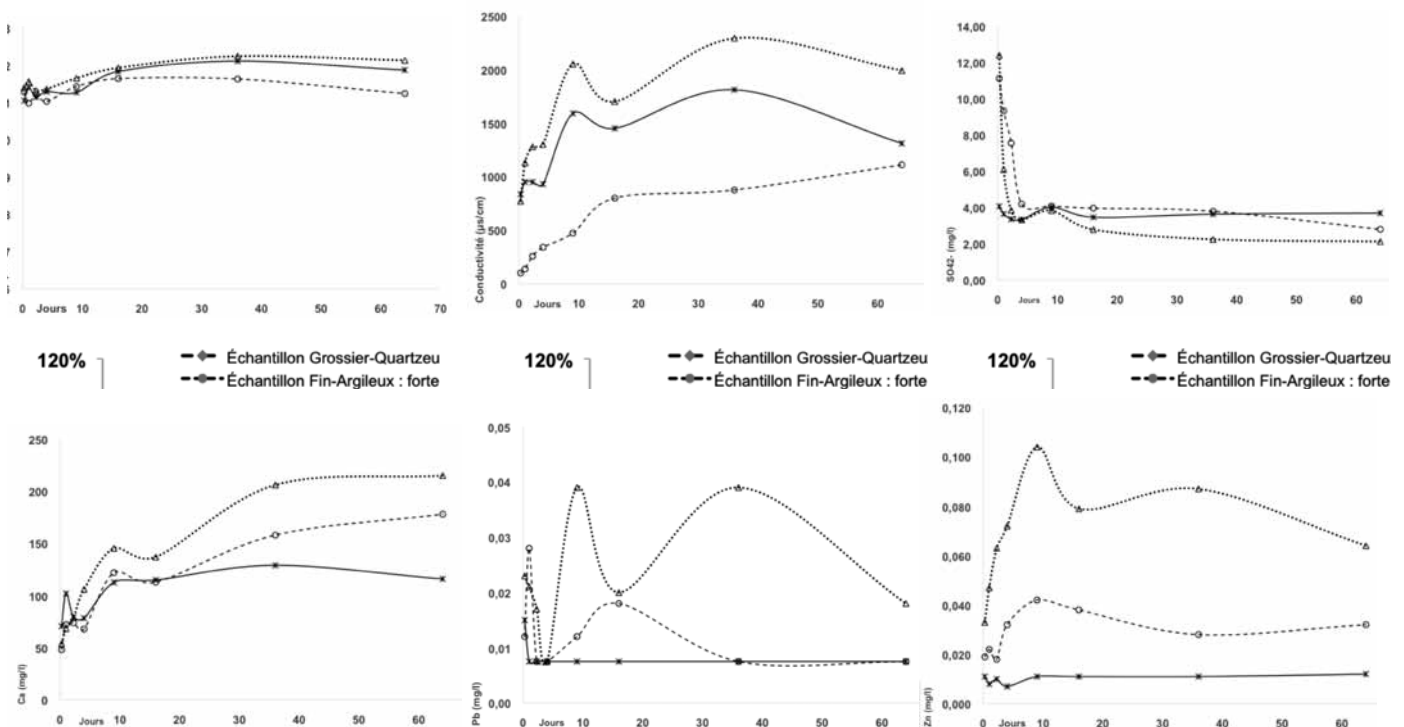
Concernant la conductivité, le M-Bo et le M-Sa présentent une évolution identique avec des valeurs plus élevées pour le M-Bo. Les deux mortiers se caractérisent aussi par l'occurrence d'un pic au niveau de la cinquième extraction (9^{ème} jour), coïncidant avec une dissolution marquée du Ca, Pb et Zn. L'allure de la conductivité du M-Be (varie entre 102 μ S/cm et 1110 μ S/cm) évolue identiquement à l'allure de

dissolution du calcium. Cette simultanéité entre conductivité et Ca informerait sur l'importante dissolution des ions Ca^{2+} en provenance des phases cimentaires.

La courbe d'évolution des sulfates pour les deux mortiers à base de rejets miniers est caractérisée par une diminution importante pendant les quatre premières extractions suivie d'une stabilisation aux alentours de 3 mg/l durant la suite de l'essai. Ce comportement des SO_4^{2-} pourrait être dû à la dissolution du gypse et/ou ettringite.

La dissolution du Pb et du Zn dans les deux mortiers à base de rejets miniers est très limitée.

Pour M-Bo, la teneur maximale de lixiviation du Pb est de 0,04 mg/l alors qu'elle est pour le Zn de l'ordre de 0,1 mg/l. Le M-Be présente de plus faibles valeurs (Pb = 0,028 mg/l et Zn = 0,04 mg/l). Cette stabilisation du Pb et du Zn est essentiellement due à leur adsorption aux CSH et/ou leurs précipitations sous forme de phases stables tels que $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Asavapit et al 1997, Cocke 1990, Park 2000, Rose et al 2000).

Figure 4. Variations du pH, conductivité, SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Pb^{2+} et Zn^{2+} dans les lixiviats issus du test TLM.

Conclusion

Le but du présent travail de recherche est d'étudier la faisabilité de valorisation des rejets miniers Pb-Zn de Touissit-Boubker (Maroc) comme granulats pour mortier de finition. Ce type de valorisation se fait déjà dans le domaine de construction au Maroc, malheureusement sans aucun contrôle. Les principaux résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- Les rejets miniers issus du district de Touissit-Boubker sont caractérisés par la présence d'une grande teneur en fines (la proportion des particules inférieures à 63µm est de l'ordre de 27 % en poids).
- Les rejets miniers sont riches en carbonates et présentent de fortes concentrations de Zn (3800-32100 mg/kg), Pb (3670-4160 mg/kg) et Cu (270-350).
- L'utilisation des deux rejets miniers comme agrégats engendre une augmentation importante de la quantité d'eau nécessaire au gâchage à cause de l'importante fraction de fines.
- Le Pb et le Zn présents dans les rejets miniers ont un effet néfaste d'inhibition de la prise et de réduction des résistances mécaniques des mortiers. Néanmoins, le mortier à base de rejet de Bediane présente des résistances conformes aux normes marocaines en vigueur.
- L'utilisation des rejets miniers comme agrégats et leur incorporation dans la matrice cimentaire à tendance à stabiliser ces matériaux et à limiter le relargage du Pb et du Zn.

Références bibliographiques

ASAVAPISIT, S., FOWLER, G., CHEESEMAN, C.R. (1997). Solution chemistry during cement hydration in the presence of metal hydroxide waste", *Cement and Concrete Research*, 27, pp : 1249-1260.

BOULARBAH, A., SCHWARTZ, C., BITTON, G., MOREL, J. L. (2006). Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: I. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils. *Chemosphere*, 63(5), pp : 802-810.

COCKE, D. L. (1990). The binding chemistry and leaching mechanisms of hazardous substances in cementitious solidification/stabilization systems. *Journal of Hazardous materials*, 24(2), pp : 231-253.

EA NEN 7375. (2004). Leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials. Determination of leaching of inorganic components with the diffusion test 'the tank test'. Netherlands normalization institute standard

GONÇALVES, J. P., TAVARES, L. M., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R., CUNHA, E. R. (2007). Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 37(6), pp : 924-932.

GOUMIH, A., EL ADNANI, M., HAKKOU, R., BENZAAZOUA, M. (2013) Geochemical Behavior of the Mine Tailings and Waste Rock at the Abandoned Cu-Mo-W Azegour Mine (Occidental High Atlas, Morocco), *Mine Water and Environment*, Volume 32, Issue 2, pp : 121-132

HAACH, V. G., VASCONCELOS, G., LOURENÇO, P. B. (2011). Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25(6), pp : 2980-2987.

HAKKOU, R., BENZAAZOUA, M. (2012). Issues and Challenges to Enable Remediation of Moroccan Mine Sites, *International Congress on the Management of Mining Wastes and Closed Mines*, 3-6 April 2012 Marrakech, Morocco

HAKKOU, R., BENZAAZOUA, M., BUSSIÈRE, B. (2008). Acid mine drainage at the abandoned Kettara mine (Morocco): I. Environmental characterization. *Mine Water and the Environment*, 27(3), pp : 145-159.

HILLS, C. D., POLLARD, S. J. (1997). The influence of interference effects on the mechanical, microstructural and fixation characteristics of cement-solidified hazardous waste forms. *Journal of Hazardous materials*, 52 (2), pp : 171-191.

KHALIL, A., HANICH, L., BANNARI, A., ZOUHRI, L., POURRET, O., HAKKOU, R. (2013) Assessment of soil contamination around an abandoned mine in a semi-arid environment using geochemistry and geostatistics: Pre-work of geochemical process modeling with numerical models. *Journal of Geochemical Exploration*, 25, pp : 117-129

LGHOUL M., KCHIKACH A., HAKKOU R., ZOUHRI L., GUERIN R., BENDJOURI H., TEIXIDOT, PEÑA J.A., ENRIQUE L., JAFFAL M., HANICH L. (2012). Etude géophysique et hydrogéologique du site minier abandonné de Kettara (région de Marrakech, Maroc) : contribution au projet de réhabilitation. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (2), pp : 370-381

NF EN 13139. (2003). Granulats pour mortiers. CEN Comité européen de normalisation.

NM 10.1.004. (2003). Liants hydrauliques, Ciments, Composition, spécifications et critères de conformité.

NF EN 1097-3. (1998). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie3: méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire. CEN Comité européen de normalisation.

NF EN 1097-6. (2001). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie6: détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. CEN Comité européen de normalisation.

NF EN 1015-3. (1999). Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie: détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses). CEN Comité européen de normalisation.

NF EN 1015-2. (1999). Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 2 : échantillonnage global des mortiers et préparation des mortiers pour essai. CEN Comité européen de normalisation.

NF EN 1015-6. (1999). Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente du mortier frais. CEN Comité européen de normalisation.

NF EN 1015-11. (2000). Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci. CEN Comité européen de normalisation.

PARK, C. K. (2000). Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 30(3), pp : 429-435.

ROSE, J., MOULIN, I., HAZEMANN, J. L., MASION, A., BERTSCH, P. M., BOTTERO, J. Y., HAEHNEL, C. (2000). X-ray absorption spectroscopy study of immobilization processes for heavy metals in calcium silicate hydrates: I. Case of lead. *Langmuir*, 16(25), pp : 9900-9906.

SMOUNI, A., ATER, M., AUGUY, F., LAPLAZE, L., EL MZIBRI, M., BERHADA, F., DOUMAS, P. (2010). Évaluation de la contamination par les éléments-traces métalliques dans une zone minière du Maroc oriental. *Cahiers Agricultures*, 19(4), pp : 273-279.

VENKATARAMA REDDY, B. V., GUPTA, A. (2008). Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry. *Construction and Building Materials*, 22(8), pp : 1614-1623.

Young RA in: Young RA (Ed.). *The Rietveld Method*, Oxford University Press, 1995, 312 p.