

Recommandations sur l'utilisation des outils de prédiction du drainage minier acide

BOUZHDAH Hassan, BENZAZOUA Mostafa, BUSSIÈRE Bruno et PLANTE Benoît

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue 445, boulevard de l'université, Rouyn-Noranda (QC), J9X5E4

Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : Hassan.Bouzhadah@uqat.ca

RESUME

Les rejets miniers sulfurés soumis à l'action de l'eau et de l'oxygène atmosphériques sont susceptibles de générer du drainage minier acide (DMA) suite à l'oxydation des minéraux sulfurés qu'ils contiennent, en l'absence d'un potentiel neutralisant. Les effluents acides liés au DMA peuvent être chargés en métaux et sont dommageables à l'environnement. Une prédiction fiable de ce phénomène est d'une grande importance car elle est capable de déterminer les coûts et la manière de restaurer les sites miniers pour préserver l'environnement. Les outils usuellement utilisés pour la prédiction du DMA sont les tests statiques dans un premier temps et les essais cinétiques quand les premiers livrent une prédiction incertaine. Ces outils sont nombreux, leurs protocoles sont assez distincts et il n'existe aucun guide pour orienter l'utilisateur dans leur choix. Ainsi, ce papier se fixe l'objectif de présenter des recommandations pour orienter le choix parmi les tests statiques et les essais cinétiques. Ces outils sont utilisés par l'industrie minière pour la prédiction du DMA en se basant sur les caractéristiques intrinsèques des rejets miniers (tests statiques) et des objectifs de l'étude (essais cinétiques).

MOTS-CLÉS : Drainage minier acide, outils de prédiction, tests statiques, essais cinétiques, cellule humide ASTM, minéralogie

ABSTRACT

The sulphidic tailings subjected to the atmospheric water and oxygen action may generate acid mine drainage (AMD). AMD is due to the oxidation of sulphide minerals they contain in the absence of a neutralizing potential. The effluents related to AMD are acidic, metal loaded and are often harmful towards the surrounding environments. A reliable prediction of this phenomenon to preserve the environment is of great importance as it is able to impact the costs and the ways to restore mines sites. The most frequently tools used for AMD prediction are static tests and kinetic tests when the first provide uncertain prediction results. AMD prediction tests are available in several versions whose protocols are quite divergent. Also, there is no guide orientating users in their choice. Thus, the objective of this review paper is to give clear recommendations to help choosing among either static and kinetic tests for AMD prediction based on tailings intrinsic characteristics (for static tests) and on the objectives of the study (for kinetic assays).

KEYWORDS: Acid mine drainage, prediction tools, static tests, kinetic tests, ASTM humidity cell, mineralogy

Recommandations sur l'utilisation des outils de prédiction du drainage minier acide

BOUZAHZAH Hassan, BENZAAZOUA Mostafa, BUSSIÈRE Bruno et PLANTE Benoît

I. INTRODUCTION

L'exploitation des mines et le traitement du minerai génère des quantités importantes de rejets liquides et solides. Les rejets solides peuvent contenir des quantités non négligeables de minéraux sulfurés qui s'oxydent naturellement et produisent de l'acidité et des métaux dissouts qui sont souvent à l'origine du drainage minier acide (DMA). Pour réduire l'impact de ce phénomène, les rejets miniers doivent être gérés de façon à garantir une protection maximale de l'environnement. Pour ce faire, le potentiel de génération d'acide (PGA) qui conditionne les manières de gérer les rejets miniers et la restauration des sites d'entreposage doit être prédit de manière précise par les outils de prédiction disponibles et qui sont les tests statiques et les essais cinétiques. Or, dans la pratique, il existe de nombreuses variantes chimiques et minéralogiques des tests statiques et la prédiction qu'ils permettent de donner peut être différente selon les différents protocoles (auteurs) et selon que l'on utilise le pouvoir net de neutralisation (PNN) ou le rapport PN/PA pour la classification des rejets miniers en termes de leur PGA (Bouzahzah 2013a; Bouzahzah *et al.* 2014b). D'autre part, les critères de classification (PNN et PN/PA) des tests statiques sont caractérisés par une zone où il est difficile de classer avec certitude certains rejets miniers. Ainsi, pour ces rejets et sachant les erreurs de prédiction qui peuvent être liées aux protocoles des tests statiques eux-mêmes, les essais cinétiques sont recommandés pour compléter la prédiction du PGA. Les essais cinétiques soumettent les rejets miniers à une oxydation accélérée et contrôlée au laboratoire renseignent sur les taux des réactions d'oxydation-neutralisation, le temps de latence avant la génération du DMA et la chimie des effluents. Les essais cinétiques fournissent une prédiction plus précise et réaliste du DMA et constituent un outil de grande importance pour guider le choix des scénarios de restauration des sites miniers qui dépendent fortement de leur PGA (Bussière *et al.* 1999, 2004; Villeneuve, 2004; Benzazoua *et al.*, 2001, 2004; Mend, 2009; Villeneuve *et al.*, 2009). Comme les tests statiques, les essais cinétiques sont nombreux, avec des protocoles et des dimensions de leurs dispositifs assez distincts et dont les prédictions peuvent être divergentes pour un même échantillon (Bouzahzah *et al.* 2010, 2012; Benzazoua *et al.*, 2008; Demers *et al.*, 2008).

Face à cette variété de tests statiques et d'essais cinétiques, il est souvent difficile de faire un choix. Dans ce papier, on présentera des recommandations sous forme d'organigrammes décisionnels pour aider l'utilisateur à choisir le ou les tests statiques de prédiction adéquats en fonction des informations chimiques et minéralogiques disponibles sur les échantillons. Pour les essais cinétiques, le choix se fait souvent en fonction les objectifs fixés. Ce papier vient compléter celui de Bouzahzah *et al.* (2014b) paru dans le numéro 66 de la revue Déchets Sciences & techniques, qui est une synthèse de revue de la littérature sur les tests statiques et les essais cinétiques montrant leur principe, avantage et limites.

2. Recommandations pour l'utilisation des tests statiques

Les trois principaux types de tests statiques qui sont généralement utilisés par l'industrie minière pour la prédiction du DMA sont les essais NAG (Net-Acid Generation tests), les tests statiques chimiques et les tests statiques minéralogiques. Les essais NAG se déroulent en une seule étape, ne nécessitent aucune connaissance, ni caractérisation préalable des rejets et ne seront donc pas traités dans ce papier. Les tests statiques chimiques, quant à eux, nécessitent une caractérisation chimique des rejets et les tests statiques minéralogiques nécessitent une caractérisation minéralogique détaillée. À ce jour, le choix du test statique (chimique ou minéralogique) pour la prédiction du DMA n'est basé sur aucun guide, ni critère. La tendance générale est que les australiens utilisent le NAG test, alors qu'en Amérique du nord, ce sont plutôt les tests statiques chimiques (basés sur la méthode de Sobek *et al.*, 1978) et minéralogiques qui sont utilisés. Cette section présente un guide sous forme de recommandations pour le choix du (ou des) test(s) statique(s) en se basant sur les propriétés chimiques et minéralogiques des rejets miniers. Ce choix est tributaire d'une caractérisation chimique et minéralogique très précise (voir Bouzahzah, 2006; Bouzahzah, 2008; Bouzahzah *et al.*, 2008; Cabri *et al.*, 1998; Cropp *et al.*, 2003; Fandrich, 2007; Gu, 2003; Knight *et al.* 2002; Lastra *et al.*, 1998; Mermillot-Blondin, 2005; Mermillot-Blondin *et al.*, 2011; Petruk, 2000; Pirard, 2004).

Comme le démontrent les travaux de Bouzahzah (2013a) et Bouzahzah *et al.* (2014a,b), les différents protocoles relatifs aux tests statiques et les critères de classification qui s'en découlent peuvent grandement influencer les résultats de la prédiction du potentiel de génération d'acide. Les tests statiques peuvent fournir des résultats erronés s'ils ne sont pas judicieusement choisis en fonction de la minéralogie des échantillons. Le choix d'un test statique donné, comme outil de prédiction du DMA, doit être basé sur les résultats d'une caractérisation minéralogique la plus précise possible. La Figure 1 présente le schéma global de l'utilisation des tests statiques en se servant des différentes caractérisations disponibles sur l'échantillon. Les Figures 2 et 3 présentent deux organigrammes décisionnels pour choisir quel(s) test(s) statique(s) utiliser en fonction des informations minéralogiques et chimiques (carbone) disponibles sur l'échantillon. Pour mieux expliquer l'utilisation des Figures 2 et 3 et choisir le test statique adapté à l'échantillon en fonction de sa minéralogie, on se servira de trois exemples de rejets miniers de composition minéralogique différente. La minéralogie de ces trois rejets, présentée au Tableau 1, a été déterminée avec précision après une série de caractérisation chimiques et minéralogiques et une réconciliation des données (Bouzahzah, 2013a).

2.1 Choix du test statique chimique

Seul le choix du test statique pour déterminer le pouvoir de neutralisation (PN) est discuté dans cette section car les plus grandes divergences entre les différents tests statiques concernent ce paramètre. Le potentiel de génération d'acide (PA), quant à lui, est facilement calculable à l'aide de la teneur en soufre sulfure de l'échantillon (Lawrence et Wang 1997) et ne sera pas discuté. Le Tableau 2 présente les PN obtenus à l'aide de trois tests statiques qui sont ceux de Sobek *et al.* 1978, Sobek modifiée par Lawrence et Wang (1997) et la méthode de Sobek modifiée par Bouzahzah (2013) qui est basée sur un Fizz quantitative (pour les détails des tests, voir Bouzahzah (2013a) et Bouzahzah *et al.* (2014b)). Ces résultats montrent que :

Pour le rejet A

i) le test de Sobek *et al.* (1978) donne un PN de 379 kg CaCO_3/t car il prend en considération, à tort, tout le pouvoir de neutralisation de la sidérite, alors que théoriquement, la sidérite a un PN nul. Cependant, le pouvoir de neutralisation de la sidérite peut être positif et est proportionnel à la quantité du Ca et Mg qu'elle peut contenir en substitution du Fe;

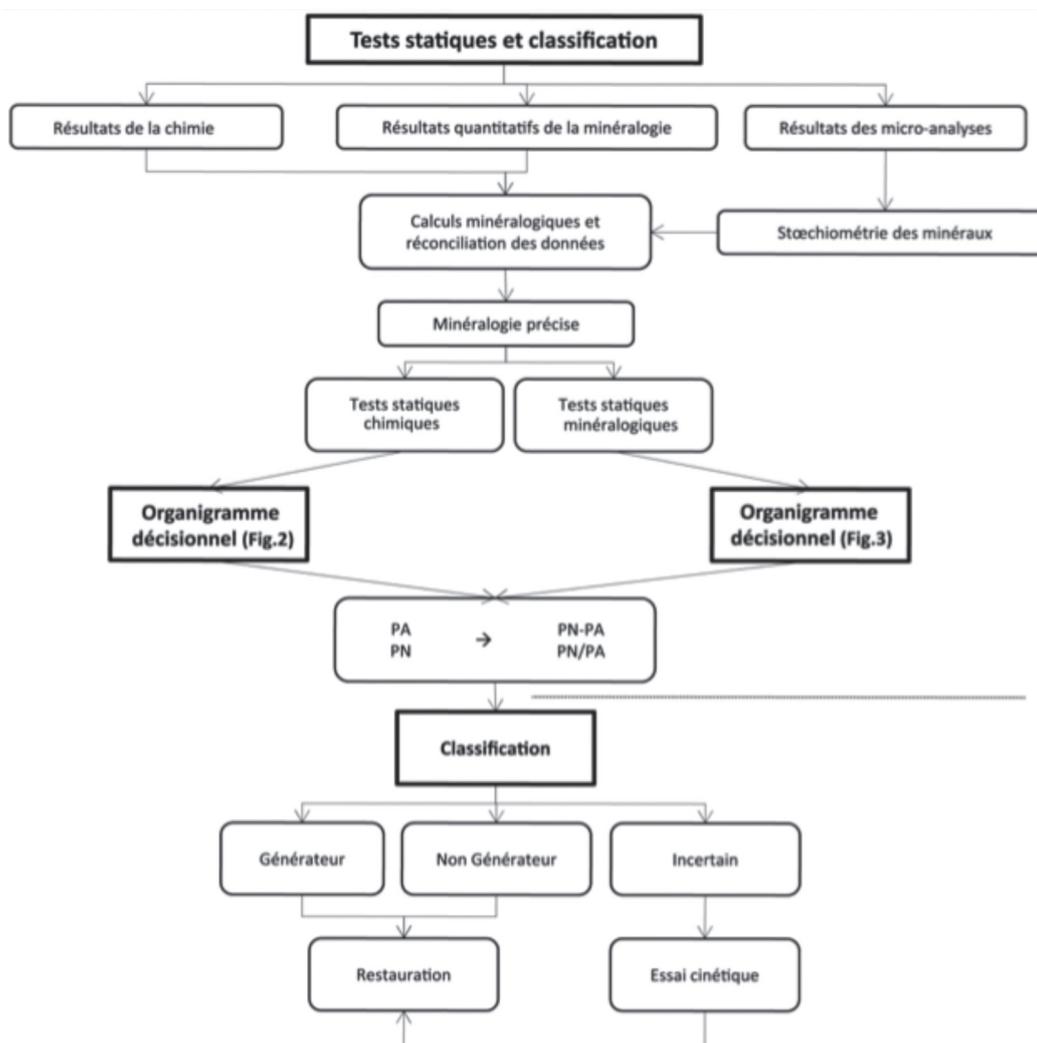


Figure 1. Schéma global de l'utilisation des tests statiques en vue de la prédiction du potentiel polluant des rejets miniers

ii) le test de Sobek *et al.* (1978) modifié par Lawrence et Wang (1997) donne un PN de 126 kg CaCO₃/t car il ne considère pas tout le pouvoir de neutralisation de la dolomite et de la sidérite à cause de leur faible cinétique de dissolution, et à cause de la courte durée du test (24h);

iii) le test de Sobek *et al.* (1978) modifié par Bouzahzah (2013) donne un PN de 280 kg CaCO₃/t. Cette valeur est plus réaliste car la durée de la digestion permet une dissolution complète de la dolomite et la sidérite, et la titration avec du NaOH + H₂O₂ prend en considération l'acidité générée par le fer de la sidérite. Ce résultat a été confirmé par les tests statiques minéralogiques.

Tableau 1. Composition minéralogique de trois rejets miniers servant à l'utilisation des outils décisionnels

Minéraux	Formules chimiques	Proportions minéralogiques (% poids)		
		Rejet A	Rejet B	Rejet C
Quartz	SiO ₂	11.06	49.41	41.9
Muscovite	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	22.9	6.7	3.5
Chlorite	(Fe,Mg) ₂ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,O)	4.5		
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	2.5		2.5
Oligoclase	(Na,Ca)(Si,Al) ₄ O ₈		3.8	
Orthose	KAlSi ₃ O ₈			3.9
Actinolite	Ca ₂ (Mg,Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂		9.78	
Calcite	CaCO ₃			25.9
Dolomite	Ca _{0.5} Mg _{0.5} (CO ₃) ₂	26		
Sidérite	FeCO ₃	11.7		
Ankérite	Ca _{0.5} (Fe _{0.06} ,Mg _{0.29} ,Mn _{0.15})(CO ₃) ₂		20.56	
Pyrite	FeS ₂	17.56	7.4	7.95
Pyrrhotite	FeS			1.55
Arsénopyrite	FeAsS	3.52	0.72	12.3
Chalcopyrite	CuFeS ₂		0.65	0.52
Rutile	TiO ₂	0.26	0.98	
Total		100	100	100

Pour le rejet B

i) le test de Sobek *et al.* (1978) donne un PN de 206 kg CaCO₃/t car il prend en considération, à tort comme pour la sidérite, tout le pouvoir de neutralisation de l'ankérite ;

ii) le test de Sobek *et al.* (1978) modifié par Lawrence et Wang (1997) donne un PN de 83 kg CaCO₃/t car il ne considère pas tout le pouvoir de neutralisation de l'ankérite à cause de sa faible cinétique de dissolution, et à cause de la courte durée du test (24h) ;

iii) Le test de Sobek *et al.* (1978) modifié par Bouzahzah (2013) donne un PN de 102 kg CaCO₃/t. La valeur obtenue est plus réaliste car la durée de la digestion permet une dissolution complète de l'ankérite, et la titration avec du NaOH + H₂O₂ prend en considération l'acidité générée par le fer et le Mn de l'ankérite. Ce résultat a été confirmé par les tests statiques minéralogiques ;

Pour le rejet C

Les trois méthodes de digestions (Tableau 2) donnent sensiblement le même PN qui est estimé à environ 200 kg CaCO₃/t car l'échantillon contient uniquement la calcite. La calcite est le minérale le plus soluble qui ne contient pas d'éléments oxydables et hydrolysables (Fe-Mn) et l'ajout du H₂O₂ n'influence donc pas la détermination du PN.

A la lumière de ces résultats et pour les trois rejets A, B et C, le tableau 3 explique l'utilisation de l'organigramme décisionnel de la Figure 2. Il explique comment choisir le test statique adéquat et les raisons d'exclusions des autres tests. Une caractérisation minéralogique précise peut être difficile à obtenir (complexité) ou très coûteuse ce qui rend difficile le choix du test statique adéquat pour la détermination du PN. Dans ces conditions, Bouzahzah (2013a) propose i) une digestion dans un volume de 20 ml d'HCl ou ii) une digestion par ajout séquentiel d'HCl (Figure 2).

2.2 Choix du test statique minéralogique

La Figure 3 présente le diagramme décisionnel qui aide à choisir le test statique minéralogique le plus adéquat à un échantillon en fonction de sa minéralogie quand elle est connue avec précision. Dans cette figure, le potentiel de neutralisation des carbonates (PNC et PNCC), calculé à partir de la teneur en carbone inorganique total de l'échantillon, est présenté parmi les méthodes minéralogiques car cet élément

Tableau 2. Résultats des PN (Kg CaCO₃/t) déterminés par trois méthodes de digestion différentes

	Sobek <i>et al.</i> (1978)	Sobek modifiée par Lawrence et Wang (1997)	Sobek modifiée par Bouzahzah (2013) basé sur le fizz quantitatif
Rejet A	379	126	280
Rejet B	206	83	102
Rejet C	201	196	195

est directement lié aux carbonates de l'échantillon (minéralogie). Pour mieux expliquer l'utilisation de la Figure 3, on se servira des trois rejets A, B et C du Tableau 1. Les résultats des PA et PN minéralogiques calculés sont présentés au Tableau 4.

Pour le rejet A

• Choix du test statique pour calculer le PN

► PNCC : potentiel de neutralisation des carbonates modifié par Plante *et al.* (2012) car présence de la dolomite et de la sidérite qui est pure (FeCO_3). Le PNCC ne prend pas en considération le PN des silicates, toutefois, l'éventuelle sous-estimation du PN est négligeable car les silicates sont essen-

tiellement représentés par le quartz (inerte) et la muscovite qui est très peu réactive.

► Les tests de Paktunc (1999), Lawrence et Scheske (1997), Lawrence et Scheske (1997) modifié par Plante *et al.* (2012) et Kwong (1993) peuvent aussi être utilisés, mais nécessitent beaucoup plus de calculs. Cependant, le PNCC est rapide et donne le même résultat que les tests précédents (Tableau 4).

• Choix du test statique pour calculer le PA

► Paktunc (1999) modifié par Bouzahzah *et al.* (2013) car le calcul prend en considération l'acidité produite par l'arsénopyrite et les taux de réactivité des sulfures.

Tableau 3. Exemple de l'utilisation du diagramme décisionnel de la Figure 3 en fonction des données minéralogiques

Selon les entrées du diagramme décisionnel de la Figure 3.	Rejet A	Rejet B	Rejet C
Les données minéralogiques précises sont-elles disponibles ?	oui	oui	oui
Est-ce que les carbonates de Ca-Mg sont les seuls présents ?	non, l'échantillon contient de la sidérite	non, l'échantillon contient de l'ankérite	oui
Est-ce que seule la calcite est présente avec une teneur < 25% (massique) ?	non	non	oui
Est-ce que les carbonates de Mg-Fe-Mn sont présents ?	oui, l'échantillon contient la dolomite et la sidérite	oui, l'échantillon contient de l'ankérite	non
Est-ce que les silicates de Fe-Mn-Al sont présents ?	oui, muscovite, chlorite, albite, quartz	oui, muscovite, actinolite, oligoclase, quartz	oui, muscovite, albite, orthose, quartz
Est-ce que le carbone inorganique total est disponible ?	oui	oui	oui
	Choix du test statique		
	Digestion de l'échantillon dans le volume d'HCl (7,7 mL) calculé par l'équation 24 (Tableau 2) avec ajustement du pH ou Digestion de l'échantillon dans le volume d'HCl (7,7 mL) calculé par l'équation 25 (Tableau 2) avec ajustement du pH	digestion de l'échantillon dans le volume d'HCl (4,2 mL) calculé par l'équation 24 (Tableau 2) avec ajustement du pH ou Digestion de l'échantillon dans le volume d'HCl (4 mL) calculé par l'équation 25 (Tableau 2) avec ajustement du pH	Toutes les méthodes de digestion sont valables. Cependant la méthode la plus recommandée et la plus rapide est celle de Sobek <i>et al.</i> (1978) car l'échantillon ne contient que de la calcite comme carbonate et très peu de silicates (10% massique en excluant le quartz considéré comme inerte).
	Pour les deux types de digestion à l'aide du Fizz quantitatif, qui correspondent à la modification du test de Sobek proposée par Bouzahzah (2013), il faut faire une titration avec du NaOH et du H_2O_2 pour prendre en considération l'acidité générée par le Fe de la sidérite dans le rejet A et par le Fe et le Mn de l'ankérite dans le rejet B (et éventuellement par le Fe et Al des silicates).		

Tableau 3. Exemple de l'utilisation du diagramme décisionnel de la Figure 3 en fonction des données minéralogiques - suite

Selon les entrées du diagramme décisionnel de la Figure 3.	Rejet A	Rejet B	Rejet C
	Raison d'exclusion des autres tests statiques chimiques :		
	<p>Le test de Sobek original (1978) ne peut pas être utilisé car la titration se fait uniquement par du NaOH alors que l'échantillon contient de la sidérite. Les silicates (30% massique) peuvent se dissoudre et entraîner une surestimation du PN</p> <p>Le test de Sobek modifié par Lawrence et Wang (1997) ne peut pas être utilisé car i) l'échantillon contient 26 % (massique) de dolomite et la digestion acide d'une durée de 24h n'est pas suffisante pour sa dissolution totale (sous-estimation du PN), et ii) la titration se fait uniquement par NaOH alors que l'échantillon contient de la sidérite contenant du Fe et du Mn oxydables et hydrolysables.</p>	<p>Le test de Sobek original (1978) ne peut pas être utilisé car la titration se fait uniquement par NaOH alors que l'échantillon contient de l'ankérite (présence de Fe et Mn). Les silicates (20% massique) peuvent se dissoudre et influencer le PN</p> <p>Le test de Sobek modifié par Lawrence et Wang (1997) ne peut pas être utilisé car i) l'échantillon contient 21 % (massique) d'ankérite moins soluble que la dolomite et le test a une durée de 24h ce qui n'est pas suffisant pour sa dissolution totale (sous-estimation du PN), et ii) la titration se fait uniquement par NaOH ce qui ne prend pas en considération l'acidité générée par le Fe et le Mn de l'ankérite.</p>	Toutes les méthodes de digestion sont variables.

Tableau 4. Résultats* des PA et PN (Kg CaCO₃/t) déterminés par 5 tests statiques minéralogiques

	Paktunc (1999)	Paktunc (1999) modifié par Bouzahzah et al. (2013)	Lawrence et Scheske (1997)	Lawrence et Scheske (1997) modifié par Plante et al. (2012)	PNC	PNCC
	Détermination du PN (Kg CaCO ₃ /t)					
Rejet A	282	-	284	284	383	282
Rejet B	102	-	4	169	201	¥
Rejet C	259	-	262	262	257	257
	Détermination du PA (Kg CaCO ₃ /t)					
Rejet A	314	347	‡	‡	‡	‡
Rejet B	135	136	‡	‡	‡	‡
Rejet C	231	343	‡	‡	‡	‡

*Les résultats de Kwong ne sont pas présentés car ils ne sont pas exprimés en kg CaCO₃/t.

¥ Le PN doit être calculé par le test statique chimique adéquat selon la minéralogie

‡ Le PA doit être calculé sur la base du soufre sulfure (%Sulfur*31.25) si les données minéralogiques ne sont pas disponibles

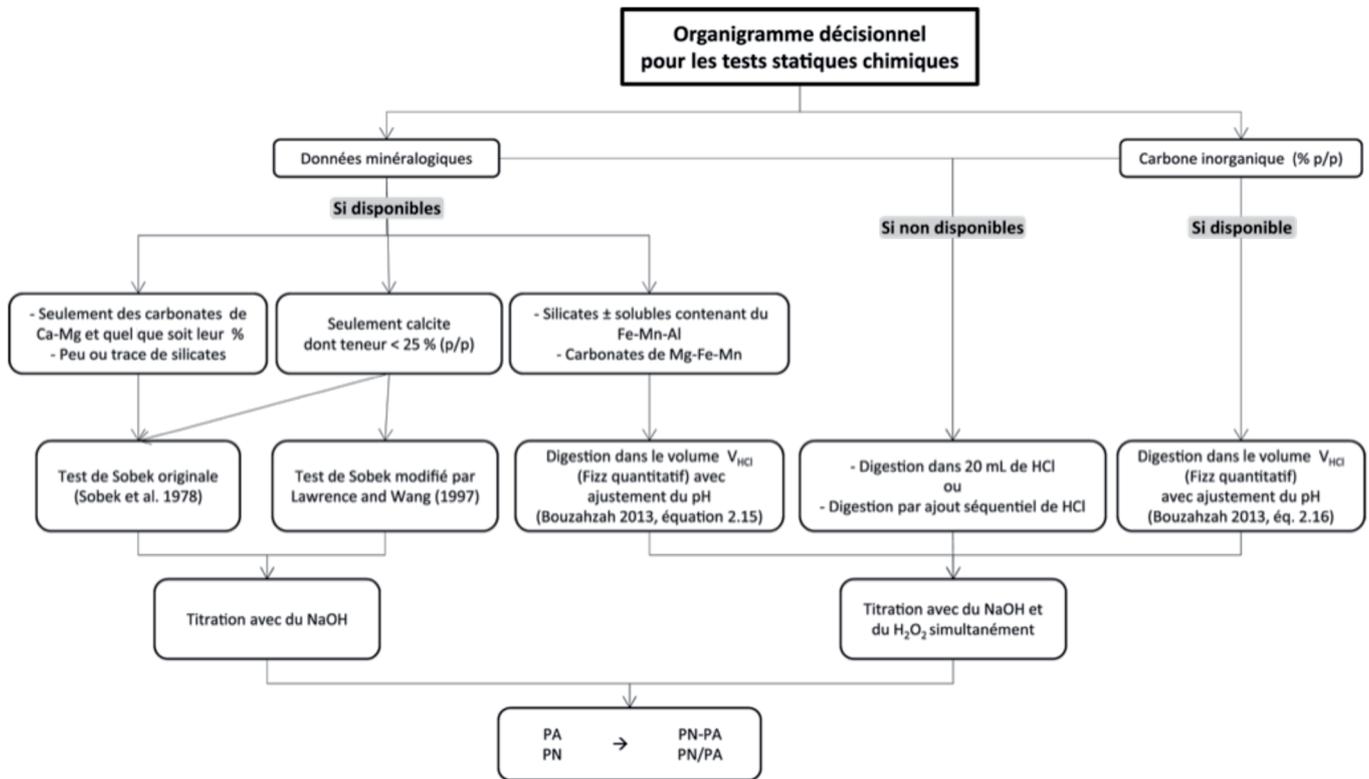


Figure 2. Diagramme décisionnel pour aider au choix du test statique chimique selon la minéralogie de l'échantillon

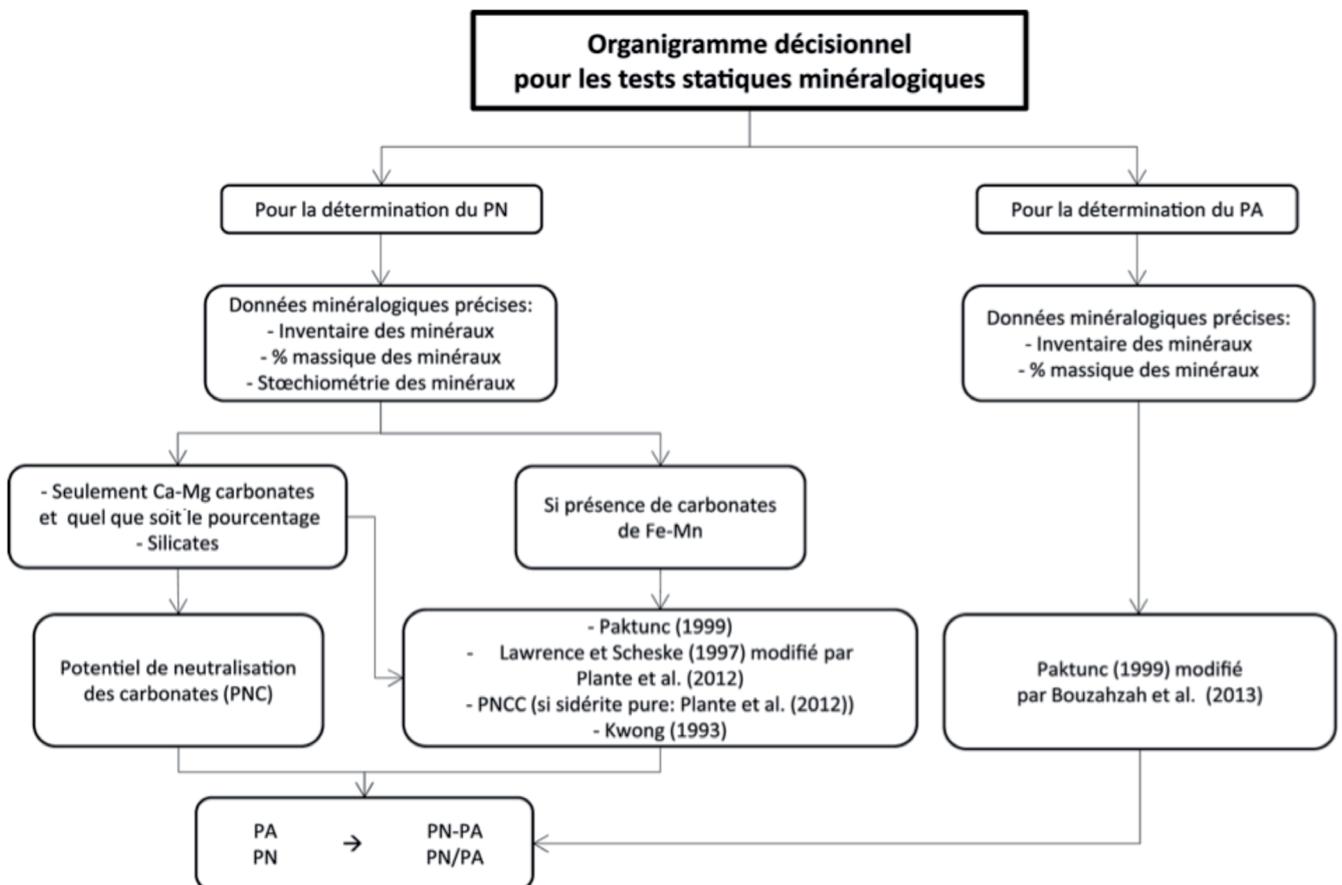


Figure 3. Diagramme décisionnel pour aider au choix du test statique minéralogique selon la minéralogie de l'échantillon

• Raisons d'exclusion des autres tests statiques minéralogiques

- ➔ Le PNC surestime le pouvoir de neutralisation de l'échantillon de 36% car il prend en considération tout le PN de la sidérite qui est en théorie nul
- ➔ Le test de Paktunc (1999) sous-estime légèrement le PA car il ne considère pas la réactivité relative des sulfures qui confère à l'arsénopyrite un pouvoir acidifiant plus fort

Pour le rejet B

• Choix du test statique pour calculer le PN

- ➔ Les tests de Paktunc (1999) et de Kwong (1993) peuvent être utilisés

• Choix du test statique pour calculer le PA

- ➔ Paktunc (1999) modifié par Bouzahzah *et al.* (2013) car le calcul prend en considération l'acidité produite par l'arsénopyrite et la chalcopryrite et les taux de réactivité des sulfures

• Raisons d'exclusion des autres tests statiques minéralogiques

- ➔ Le PNC surestime de 200% le pouvoir de neutralisation car il prend en considération tout le PN de l'ankérite alors que cette dernière contient du Fe et du Mn qui génèrent l'acidité après leur oxydation et hydrolyse
- ➔ Lawrence et Scheske (1997) car il ne considère pas l'alcalinité de l'ankérite

Pour le rejet C

• Choix du test statique pour calculer le PN

- ➔ PNC car l'échantillon contient seulement de la calcite. C'est le test le plus recommandé quand l'échantillon ne contient que la calcite et la dolomite pures. Le PNC ne prend pas en considération le PN des silicates, toutefois, la sous-estimation est négligeable car les silicates ne représentent que 10% massique et sont essentiellement représentés par la muscovite qui est très peu réactive

- ➔ Les tests de Paktunc (1999), de Lawrence et Scheske (1997), et de Kwong (1993) peuvent être utilisés, mais nécessitent plus de calculs. Le PNC est rapide et donne le même résultat (Tableau 4).

• Choix du test statique pour calculer le PA

- ➔ Paktunc modifié par Bouzahzah *et al.* (2013) car le calcul prend en considération l'acidité produite par l'arsénopyrite et la chalcopryrite et les taux de réactivité des sulfures

3. Recommandations pour l'utilisation des essais cinétiques

Le choix de l'essai cinétique, contrairement aux tests statiques, ne dépend pas des propriétés chimiques ou minéralogiques des rejets miniers, mais plutôt de leurs propriétés physiques et des objectifs visés par l'étude. La Figure 4 montre de manière synthétique les différents types d'essais cinétiques qu'on peut mettre en œuvre en laboratoire ou sur le terrain. Les essais cinétiques sont sélectionnés selon des objectifs spécifiques tels que discutés plus bas :

- Objectif : Evaluer la génération du DMA à partir de la comparaison des taux de génération et de neutralisation d'acide quand les résultats des tests statiques sont incertains

Choix : Cellule humide modifiée par Bouzahzah *et al.* (2012) ou mini-cellule d'altération modifiée par Bouzahzah *et al.* (2014a).

- Objectif : Besoin d'un essai cinétique normé

Choix : Cellule humide normée ASTM (D 5744-96, 2007). Cependant, Bouzahzah *et al.* (2012, 2014c) démontre que le protocole ASTM standard de la cellule humide peut être défavorable à une réactivité optimale des rejets confirmant les résultats obtenus par Frostad *et al.* (2002); Howell *et al.* (2006) et Sapsford *et al.* (2009) et proposent une version modifiée de l'essai cinétique en cellule humide. La modification consiste à maintenir les rejets sous un degré de saturation autour de 50% de façon automatisée en insérant dans l'échantillon une sonde de teneur en eau volumique commandant son humidification (par un contrôleur) favorisant ainsi une oxydation optimale de l'échantillon pour une prédiction plus sécuritaire du DMA.

- Objectif : Evaluer le comportement environnemental d'un rejet minier afin de prédire les qualités d'eau de drainage

Choix : Colonne au laboratoire, cellule humide ou mini-cellule d'altération.

- Objectif : Evaluer le PGA ou le comportement environnemental mais ne disposant que d'une quantité très faible d'échantillon

Choix : Mini-cellule d'altération car elle nécessite moins de 100g d'échantillon

- Objectif : Tester des scénarios de restauration

Choix : Colonne au laboratoire ou sur le terrain

- Objectif : Simuler les conditions de terrain

Choix : Colonne ou parcelles de terrain

Pour les stériles, souvent sous forme d'échantillons grossiers (propriétés physiques), les essais cinétiques les mieux adaptés sont ceux en colonnes de plus grandes dimensions (environ 60cm de diamètre et 100 cm de hauteur) et les parcelles et terrain. Il existe une variante des cellules humides recommandée pour les stériles miniers, sauf que ces derniers doivent être concassés pour avoir 100% des grains passant 6.3 mm (ASTM, 2007)

CONCLUSION

La prédiction du pouvoir de génération d'acide en vue de la gestion et de la restauration des sites générateurs de DMA nécessite une caractérisation multidisciplinaire des rejets miniers solides. Cette caractérisation multidisciplinaire obtenue par la DRX, la microscopie optique et électronique, la chimie totale, la stœchiométrie des minéraux (par micro-analyses élémentaires) et l'entrecroisement de toutes les données pour leur réconciliation, permet souvent d'aboutir à une minéralogie assez précise des rejets miniers. Cette dernière est nécessaire pour choisir le test statique le plus adéquat en utilisant les diagrammes décisionnels fournis dans ce papier. De manière très synthétique, le PA d'un rejet minier peut être tout simplement calculé sur la base de la teneur total en soufre lié aux sulfures (en soustrayant la forme sulfate et biologique). Il peut également être déterminé par la méthode minéralogique de

Paktunc (1999) modifiée par Bouzahzah *et al.* (2013b). Cependant, la méthode de détermination du PN dépend fortement de la minéralogie de l'échantillon. Ainsi, le PNC est recommandé pour un rejet minier contenant des silicates et des carbonates calciques et magnésiens purs (sans Fe et Mn). Pour un rejet contenant des Fe-Mn-Al-silicates \pm solubles et des Fe-Mn-Mg-carbonates (ex. sidérite, ankérite), le test de Sobek modifié par Bouzahzah (2013a) est recommandé pour la détermination du PN. Si toutefois la minéralogie n'est pas connue, le PN peut être déterminé avec une digestion dans un volume de 20 mL d'HCl ou avec une digestion par ajout séquentiel d'HCl (Bouzahzah 2013a). Pour toutes les méthodes de digestion, la titration doit se faire avec du NaOH+ H₂O₂ sauf dans le cas où l'échantillon contient des silicates non solubles et uniquement des carbonates calciques et magnésiens purs. Les résultats des tests statiques basés sur la minéralogie peuvent être très divergents selon les auteurs et si l'on considère les silicates. Il est donc préférable d'utiliser les méthodes de digestion modifiée basées sur celle de Sobek *et al.* (1978). Si les tests statiques classent les rejets miniers comme incertains, l'utilisation d'un essai cinétique est nécessaire. Dans ce cas, l'essai cinétique en mini-cellule d'altération modifié par Bouzahzah *et al.* (2014a) est recommandé. Cet essai est peu coûteux, rapide et fournit des résultats aussi fiables que les cellules humides et les colonnes.

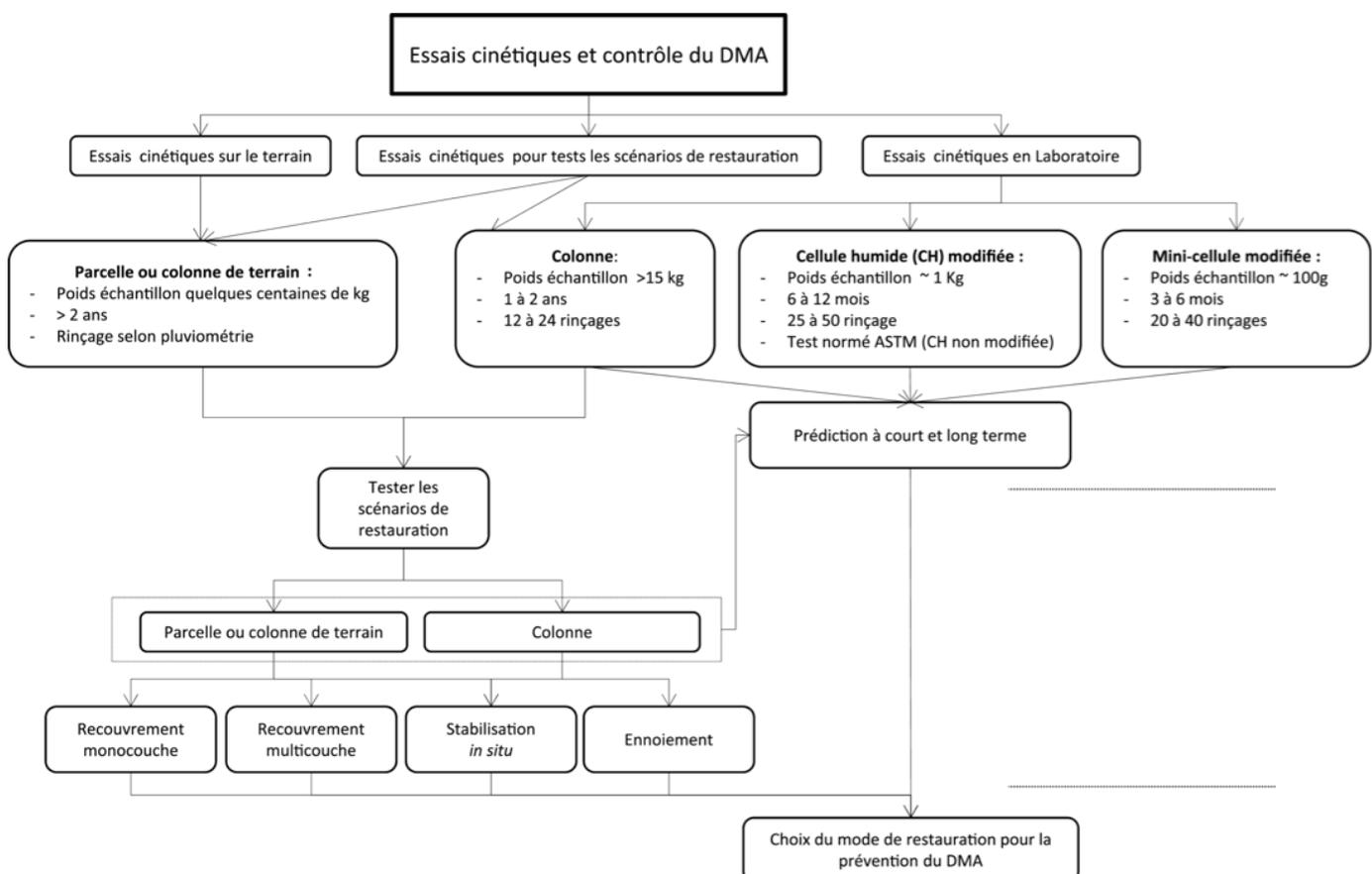


Figure 4. Schéma global de l'utilisation des essais cinétiques en vue de la prédiction du potentiel polluant des rejets miniers

Remerciements

Ce travail a pu être réalisé grâce au soutien financier de la Chaire de recherche du Canada sur la gestion intégrée des rejets miniers et la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers. La fondation de l'UQAT (FUQAT) a également participé au financement d'une partie des travaux. Les auteurs sont également reconnaissants envers le personnel de "l'Unité de Recherche et de service en technologie Minérale" pour le soutien technique.

Références bibliographiques

ASTM., 2007. D5744-07, Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Humidity Cell. Annual Book of ASTM Standards.

BENZA AZOUA M., BUSSIERE B., DAGENAIS A.M., 2001. Comparison of kinetic tests for sulfide mine tailings. In: Tailings and Mine Waste 01. Fort Collins, Colorado, January 2001. Balkema Ed., Rotterdam, pp : 263-272

BENZA AZOUA M., BUSSIERE B., DAGENAIS A.M., ARCHAMBAULT M., 2004. Kinetic test comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. *Environmental Geology* 46(8), pp : 1086-1101

BENZA AZOUA M., BUSSIÈRE B., DEMERS I., AUBERTIN M., FRIED E., BLIER A., 2008. Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals Engineering*, Volume 21, Issue 4, pp : 330-340

BOUZH ZAH H., 2006. Prédiction du potentiel du drainage minier acide des résidus sulfurés. Master thesis. University of Liege Belgium. 240 p.

BOUZH ZAH H., CALIFICE A., MERMILLOD-BLONDIN R., BENZA AZOUA M., PIRARD E., 2008. Modal analysis of mineralogical blends using optical image analysis versus X-Ray diffraction and ICP. 9th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM), Brisbane, QLD, (Australia) 8-10, September 2008.

BOUZH ZAH H., 2008. Comment pourrait-on améliorer la caractérisation des rejets miniers afin de mieux comprendre leur comportement environnemental? Rapport de synthèse environnementale présenté comme exigence partielle du doctorat en sciences de l'environnement. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Québec, Canada.

BOUZH ZAH H., BENZA AZOUA M. et BUSSIÈRE B., 2010. A modified protocol of the ASTM normalized humidity cell test as laboratory weathering method for mill tailings. International Mine Water Association Symposium 2010, "Mine Water and innovating thinking". Sydney Nova Scotia, Canada 5 - 9 September 2010. Wolkersdorfer & Freund Eds, pp : 567-570

BOUZH ZAH H., BENZA AZOUA M. et BUSSIÈRE B., 2012. Modification and automation of the humidity cell test protocol to favor tailings reactivity. 9th Internat. Conf. on Acid Rock Drainage (ICARD), May 20 - 26, 2012. Ottawa (ON), Canada

BOUZH ZAH H., 2013a. 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), 274 p.

BOUZH ZAH H., BENZA AZOUA M. et BUSSIÈRE B., 2013b. Acid-generating potential calculation using mineralogical static test: modification of the Paktunc equation. 23rd World mining Congress, Held in conjunction with ISARC 2013. Track: Tailings, Water & Mine Site Rehabilitation. Montreal, Quebec, Canada. August 11-15, 2013.

BOUZH ZAH H., BENZA AZOUA M. BUSSIÈRE B. Plante B., 2014a. Prediction of Acid Mine Drainage: Importance of Mineralogy and the Test Protocols for Static and Kinetic Tests Mine Water and the Environment. *Mine Water and the Environment*. Mine Water and the Environment 33, pp : 54-65

BOUZH ZAH H., BENZA AZOUA M. BUSSIÈRE B. Plante B., 2014b. Revue de littérature détaillée sur les tests statiques et les essais cinétiques comme outils de prédiction du drainage minier acide. *Déchets Sciences et techniques*. 66, pp : 14-31

BOUZH ZAH H., BENZA AZOUA M., BUSSIÈRE B., PLANTE B., 2014c. ASTM Normalized Humidity Cell Kinetic Test: Protocol Improvements for Optimal Sulfide Tailings Reactivity. Accepté pour publication dans *Mine Water and the Environment*.

BOWELL R.J., SAPSFORD D.J., DEY B.M. et WILLIAMS K.P., 2006. Protocols affecting the reactivity of mine waste during laboratory-based kinetic test. Conférence présentée à l'International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), St Louis, March 2006, 25p.

BUSSIÈRE B. et AUBERTIN M., 1999. Clean tailings as cover material for preventing acid mine drainage: an in situ experiment. Conférence présentée au Sudbury '99 Mining and the Environment II, Sudbury, Ontario, 13-17 September 1999. Edited by N.B.D. Goldstack, P. Yearwood, and G. Hall. Vol. 1, pp : 19-28.

BUSSIÈRE B., BENZA AZOUA M., AUBERTIN M. et MBONIMPA M., 2004. A laboratory study of covers made of low sulphide tailings to prevent acid mine drainage. *Environmental Geology*, Vol. 45(5), pp : 609-622.

CABRI L.J., GASPAR O.C., LASTRA R. ET MCMAHON G., 1998. Distribution of gold in tin-rich samples from the Corvo orebody, Portugal, *The Canadian Mineralogist*, 36, pp : 1347-1360.

CROPP A.F., BUTCHER A.R., FRENCH D., GOTTLIEB P., O'BRIEN G., PIRRIE D., 2003. Automated measurement of coal and mineral matter by QemSCAN - A new mineralogical tool based on proven QEM*SEM Technology. Helsinki, Proceedings, Applied mineralogy.

DEMERS I., BUSSIERE B., BENZA AZOUA M., MBONIMPA M., BLIER A., 2008. Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Minerals Engineering* 21, pp : 317-329

FANDRICH R., GU Y., BURROWS D., MOELLER K., 2007. Modern SEM-based mineral liberation analysis. *Int. J. Miner. Process.* 84, pp : 310-320

FROSTAD S., KLEIN B., LAWRENCE R.W., 2002. Evaluation of Laboratory Kinetic Test Methods for Measuring Rates of Weathering. *Mine Water and the Environment*, vol 21, pp : 183-192.

GU Y., 2003. Automated Scanning Electron Microscope Based Mineral Liberation Analysis. An Introduction to JKMR/FEI Mineral Liberation Analyser. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 2, N° 1, pp : 33-41.

KNIGHT R.D., KLASSEN R.A., HUNT P., 2002. Mineralogy of fine-grained sediment by energy-dispersive spectrometry (EDS) image analysis - a methodology. *Environmental Geology*. 42, pp : 32-40.

KWONG Y.T.J., 1993. Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective. MEND Report 1.32.1, CANMET, Ottawa, 47 p.

LASTRA R., PETRUK W., WILSON J.M.D., 1998. Image-analysis techniques and applications to mineral processing. Commission on Ore Mineralogy, International Mineralogical Association. L.J. Cabri et D.J. Vaughan, Ottawa : Mineralogical Association of Canada, 27, pp : 327-366

LAWRENCE R.W. et WANG Y., 1997. Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. p. 451-464. In Proc. 4th Int. Conf. on Acid Rock Drainage, Vancouver, BC, Canada. 31 May-6 June 1997. Vol. 1. pp.449-464, Mine Environment Neutral Drainage, Nat. Resour. Canada, Ottawa, ON.

LAWRENCE R.W. et SCHESKE M., 1997. A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Environmental Geology*. (Berlin) 32, pp : 100-106.

MEND, 2009. MEND report I.20.1. Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials. By Price, W.A. CANMET, Natural resources Canada, Canada.

MERMILLOD-BLONDIN R., 2005. Influence des propriétés superficielles de la pyrite et des minéraux sulfurés associés sur la rétention de molécules organiques soufrées et aminées : Application à la désulfuration environnementale. Thèse de doctorat inédite en cotutelle, en Géosciences de l'environnement à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France et Génie minéral à l'École Polytechnique de Montréal, Canada, 394 p.

MERMILLOD-BLONDIN R., BENZAAZOUA M., KONGOLO M., DE DONATO P., BUSSIÈRE B., MARION P., 2011. Development and Calibration of a Quantitative, Automated Mineralogical Assessment Method Based on SEM-EDS and Image Analysis: Application for Fine Tailings Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 10, No.12, pp : 1111-1130

PAKTUNC A.D., 1999. Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage. Environmental Geology 39 : 2, pp : 103-112.

PETRUK W., 2000. Applied Mineralogy in the Mining Industry. Elsevier Science BV, Amsterdam, 268 p.

PIRARD E., 2004. Image measurements. P. Francus (ed.) 2004. Image Analysis, Sediments and Paleoenvironments. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

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, Vol. 114, March 2012, pp : 57-69

SAPSFORD D.J., BOWELL R.J., DEY M., WILLIAMS K.P., 2009. Humidity cell tests for the prediction of acid rock drainage. Minerals Engineering, Vol. 22, Issue 1, pp : 25-36

SOBEK A.A., SCHULLER W.A., FREEMAN J.R., SMITH R.M., 1978. Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. EPA-600/2-78-054. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

VILLENEUVE M., 2004. Evaluation 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 sciences appliquées (Génie minéral), Département des génies civil, géologique et des mines. Université de Montréal, Québec, Canada.

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 8e International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), June 23-26, 2009, Skellefteå, Sweden.