



METHODES PREDICTIVES GEOCHIMIQUES STATIQUES ET PLAN DE FERMETURE DE MINE. CAS DE LA MINE D'OR DE YOUNGA - BURKINA FASO

Basile OUÉDRAOGO¹, Nicolas KAGAMBEGA², Mathias OUÉDRAOGO¹, Djibril ZOUNGRANA³.

¹Centre d'Étude pour la Promotion, l'Aménagement et la Protection de l'Environnement (CEPAPE), 03 BP : 7021 Ouagadougou 03 – Burkina Faso,

²École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Fada N'Gourma (ENSI-F), BP : 46 Fada N'Gourma – Burkina Faso,

³Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB), 01 BP : 601 Ouagadougou 01 – Burkina Faso,

Nicolas KAGAMBEGA: BP: 46 Fada N'Gourma, Tel: (226) 24770440, Email: kaninicolas@yahoo.fr

Abstract — Youga gold mine, which began production in 2008, currently has huge quantities (more than eight million tons) of sulfurous tailings (final treatment sludge) in its designed park. To this must be added the waste rock stored in the dumps. Sulfurous minerals, which are stable under natural conditions, are therefore exposed to oxygen and precipitation. The oxidation of sulfurous minerals leads to the production of sulfuric acid and thus to a decrease in pH and therefore to the mobilization of metals which, at high concentrations, may constitute a significant threat to the receiving environment. The objective of the study is the prediction of acid mine drainage (AMD) from static geochemical methods to guide closure planning in a sustainable development perspective. The results show that the concentrations of the various metals and arsenic are lower than the standards in Burkina Faso for both mining residues and surface water and groundwater except for iron content for tailings (attributable to the mineralogy of the mineralization at Youga) and cobalt for groundwater (related to the proximity of the piezometer implicated with the tailings park). However, the analysis of the acid potential (AP) and the neutralization potential (NP) indicates that all the samples are potentially acid generators with the exception of the TSF11, taken from the watertight drain of the channel.

Keywords — Environment, Tailings, Static geochemical methods, Closure plan, Burkina Faso.

Résumé — La mine d'or de Youga dont la production a démarré en 2008, enregistre actuellement d'énormes quantités (plus de huit millions de tonnes) de résidus miniers sulfureux (boue de traitement final) dans son parc conçu à cet effet. À cela s'ajoutent les stériles francs et de sélectivité entreposés dans les haldes. Les minéraux sulfureux, stables dans les conditions naturelles, sont donc exposés à l'oxygène de l'air et aux eaux de précipitation. Or, l'oxydation des minéraux sulfureux entraîne la production d'acide sulfurique et donc une baisse du pH et par conséquent, la mobilisation des métaux qui, à des concentrations élevées, pourront constituer une menace non négligeable pour le milieu récepteur. Cette étude a pour objectif principal la prédiction du drainage minier acide (DMA) à partir de méthodes géochimiques statiques afin de guider la planification de fermeture dans une perspective de développement durable. Les résultats montrent que les concentrations des différents métaux et de l'arsenic sont inférieures aux normes en vigueur au Burkina Faso, aussi bien pour les résidus miniers que pour les eaux de surface et les eaux souterraines, exception faite de la teneur en fer pour les résidus miniers (attribuable à la minéralogie de la minéralisation à Youga) et du cobalt pour les eaux souterraines (relative à la proximité du piézomètre incriminé avec le parc à résidu). Toutefois, l'analyse du potentiel acide (PA) et du potentiel de neutralisation (PN) indique que tous les échantillons analysés sont potentiellement générateurs d'acide à l'exception de l'échantillon TSF11 prélevé dans le drain étanche du canal.



Mots clés — Environnement, Résidus miniers, Méthodes géochimiques statiques, Plan de fermeture, Burkina Faso.

1. INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, l'environnement et l'idée d'un développement durable sont au cœur de toutes les attentions, que ce soit d'un point de vue des émissions atmosphériques, des ressources énergétiques limitées ou encore de la pollution des sols et des eaux. Les besoins croissants en eau pour la consommation humaine ou pour l'agriculture font de la préservation ou du renouvellement de cette ressource un enjeu majeur. Parmi les pollutions qui affectent les milieux aquatiques, les drainages de mine constituent l'une des plus préoccupantes (Egal, 2009a).

L'exploitation de la mine d'or de Youga située au Sud du Burkina Faso à l'image de toutes les autres mines à ciel ouvert en production (depuis mai 2008) génère beaucoup de déchets (plus de 5,5 millions de tonne de boue environ) dont certains contiennent encore une quantité non négligeable de métaux. Ces matériaux entreposés à l'air et la mise à nu des roches par l'exploitation peuvent être la cause d'un drainage minier acide (DMA). Les DMA constituent une préoccupation aussi bien pour l'industrie minière que pour les décideurs politiques du fait de la menace qu'ils représentent tant pour l'environnement que pour la santé humaine. La paragenèse minérale observée dans la minéralisation aurifère de Youga contient des sulfures (pyrite, pyrrhotite, arsénopyrite, chalcopryrite). De surcroît, ces sulfures contenus dans les stériles et les résidus miniers sont sujettes aux conditions atmosphériques et par conséquent, source potentielle de production acide et de lixiviation des métaux.

En effet, lors de l'exploitation, les sulfures métalliques utiles sont séparés du sulfure de fer ou pyrite sans valeur économique qui constitue l'essentiel des résidus qui sont stockés dans les parcs à résidus. Lorsqu'exposés aux agents atmosphériques, les résidus miniers riches en sulfures sont oxydés et produisent des eaux acides (production d'acide sulfurique). Cette acidité favorise la dissolution des métaux présents en grandes quantités dans les résidus (fer, mais aussi des métaux hautement toxiques tels que le plomb, le cadmium, chrome) ainsi que l'arsenic ou le mercure. Ces écoulements issus de l'activité minière actuelle ou passée sont caractérisés par une couleur rouille, des concentrations élevées en métaux et métalloïdes toxiques et une forte acidité entraînant ainsi la contamination des nappes, cours d'eau ou lacs, sources de problèmes pour l'environnement et la santé humaine. La durée de vie des DMA est de plusieurs centaines d'années et la pollution métallique peut s'étendre sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres en aval de la mine. Les réactions d'altération peuvent aussi accroître la solubilité

des éléments dans les roches et dans le sol, menant ainsi à une lixiviation accrue de métaux (Aubertin et al. 2002a).

Les tests géochimiques (statiques et cinétiques) sont des méthodes qui permettent de prédire le drainage minier acide pour une meilleure gestion des stériles et des résidus miniers.

L'objectif de ce présent travail est d'évaluer l'efficacité des mesures prédictives et en particulier, les tests géochimiques statiques sur les résidus miniers dans le plan de fermeture de mine.

2. ZONE D'ETUDE

Le permis d'exploitation du projet aurifère de Youga est situé au Sud de Tenkodogo chef-lieu de la région de l'Est, dans la commune rurale de Zabré, province de Boulgou (**Figure 1**). Il représente localement un prolongement au Burkina Faso, des ceintures de roches vertes favorables qui hébergent tous les principaux gisements d'or du Ghana. A Youga, la minéralisation est portée par des faciès détritiques du Tarkwaïen, constitués par des conglomérats à galets "flottants" et par des grès à stratifications obliques à niveaux riches en magnétite détritique. Le Tarkwaïen est traversé par des lames basiques (dykes de microgabbro) dont la mise en place s'effectue peu après le phénomène principal de sulfuration. La minéralisation est épigénétique et correspond à un front de sulfuration (sulfures disséminées et stockwerks) développé pendant le fonctionnement d'une zone de cisaillement régionale ENE-WSW. La paragenèse est marquée par la présence d'or libre, fin ou en micro-fractures dans les sulfures, et par des sulfures (pyrite et arsénopyrite prismatiques dominantes avec présence accessoire de galène) associés à une altération à silice, albite et carbonate (Trinquard et al. 2003). Dans un premier temps, il se développe une sulfuration à pyrite disséminée dominante et une altération pervasive de la roche, avec un développement majeur de sulfures le long des lits riches en magnétite détritique. Ensuite, cette sulfuration est suivie par une minéralisation plus fissurale, principalement à arsénopyrite et à un stade plus tardif, par des veines à quartz-carbonate, pauvres en sulfures.

L'usine de traitement est à l'image des autres mines du pays. L'installation proposée utilise un concept très simple pour la construction ainsi que de son exploitation. La conception comprend en résumé les activités de traitement suivantes : concassages primaire et secondaire; recyclage, broyage à l'étape unique et classification; récupération de la concentration gravimétrique et des résidus de lixiviation intensive; lixiviation au carbone et récupération de l'or par élution du carbone, encore appelé lixiviation au Carbone

(CIL); stockage de la boue de traitement dans le bassin conçu spécialement c'est-à-dire le parc à résidus. Les réactifs typiques utilisés dans les processus de traitement et de concentration de l'or sont: l'hydroxyde de calcium pour contrôler le pH dans le circuit CIL; le cyanure de sodium utilisé pour la lixiviation de l'or à partir du minerai

dans le circuit CIL et l'extraction de l'or du carbone chargé en solution durant le processus d'élution; le soude caustique pour contrôler le pH dans le circuit d'élution; l'acide chlorhydrique pour nettoyer le carbone dans le circuit d'élution; le carbone activé pour adsorber l'or une fois lessivé du minerai dans le circuit CIL.

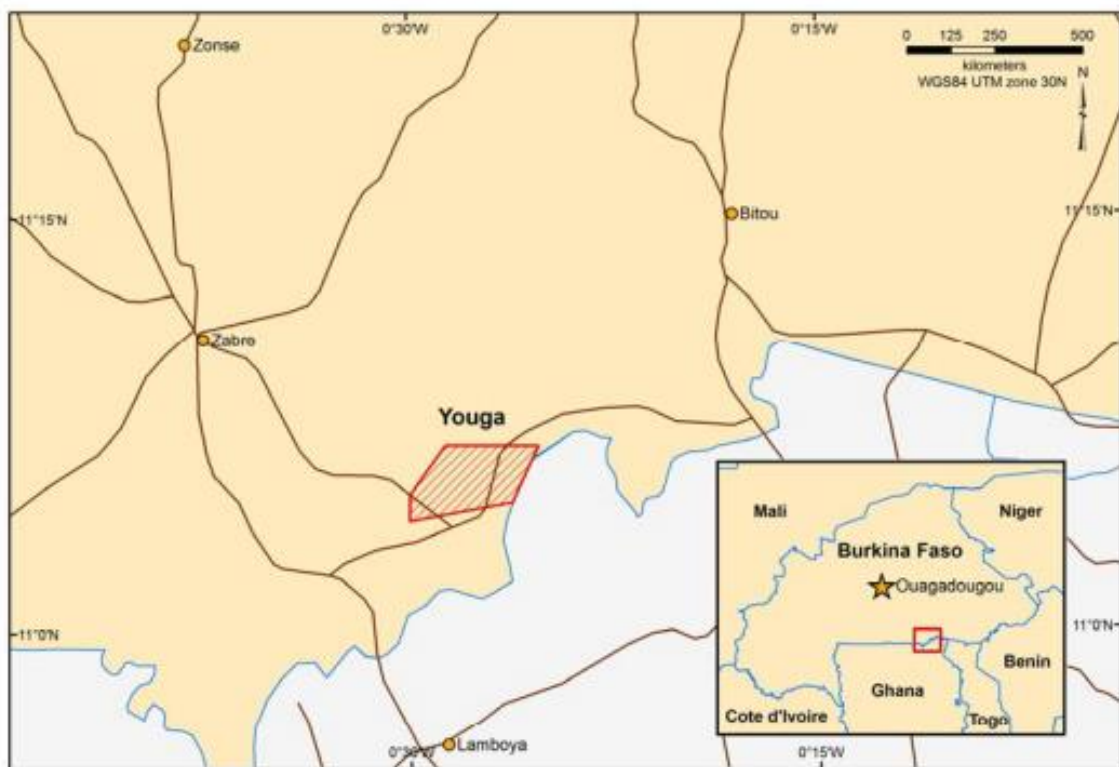


Fig. 1: Localisation de la mine de Youga

3. METHODOLOGIE

Un échantillonnage ciblé et qualitatif a été effectué. L'échantillonnage ciblé consiste généralement à prélever des échantillons à des endroits où l'on soupçonne la présence de contaminants. Il est également possible d'effectuer un échantillonnage ciblé afin de connaître le bruit de fond ou de démontrer l'absence de contamination dans un secteur donné (CEAEQ, 2008). Chaque échantillon de résidu minier est un composite de trois à cinq sous-échantillons prélevés dans le parc à résidus suivant une ligne passant par la diagonale du parc qui est de forme rectangulaire et espacé de 10-20 m les uns des autres. Les échantillons ont été prélevés dans des fosses peu profondes. Au laboratoire, les échantillons de résidus

miniers (0,5-5 kg) ont été séchés et tamisés. Pour les analyses chimiques, la fraction inférieure à 2 mm (50-100g) est recommandée pour être homogénéisée dans un broyeur à boulets en agate pour la finesse d'analyse (inférieure à 0,063 mm).

Des échantillons d'eau de surface et d'eau souterraine ont également été prélevés en vue de déterminer leur qualité et mettre en évidence une éventuelle contamination.

Les analyses (pour les échantillons d'eau) sont réalisées au laboratoire du Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina Faso (BUMIGEB) pour la détermination des paramètres physico-chimiques et les teneurs en métaux, en arsenic, en cyanure et en mercure. Les échantillons de



résidus miniers ont été analysés au laboratoire du Bureau National des Sols du Burkina Faso (BUNASOLS) pour la détermination du soufre total et de la teneur en métaux et en arsenic. Les teneurs en métaux totaux ont été déterminées pour tous les échantillons (boue et eau) par ICP-MS ("Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry").

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Simple et peu coûteux, les tests géochimiques statiques permettent d'analyser un grand nombre d'échantillons et d'estimer ainsi la variabilité du potentiel d'acidification à l'échelle du site (dresser la balance entre le potentiel de génération d'acide (PA) et le potentiel de la neutralisation (PN) pour un matériau donné). On parle de conditions statiques dans la mesure où ils ne prennent pas en compte les vitesses relatives de production et de consommation d'acide. Leurs résultats ont donc surtout une valeur indicative et prédictive (Collon, 2003). Les tests statiques fonctionnent tous sur le même principe. Le test statique est considéré positif si le potentiel net de neutralisation (PNN) est inférieur à 20kg CaCO₃ /tonne de matériau ou que le rapport de neutralisation PN/PA est inférieur à 3. À ce stade, à moins d'effectuer un test cinétique de confirmation

du potentiel acide, les échantillons avec un tel profil sont de facto considérés générateurs d'acide.

Les tests statiques couramment appelés tests géochimiques sont basés sur des données analytiques et on en distingue trois principaux: la mesure du pH et de la conductivité en pâte saturée (EC), le test d'aptitude à la production d'acidité nette (ABA ou NAPP) et le test de génération d'acidité nette (NAG).

Au total 11 échantillons (de 5 kg) de boue de traitement final du parc à résidus (dont 10 dans le parc à résidu et 01 dans le drain étanche du canal) plus 11 échantillons d'eau (07 d'eau de surface et 04 d'eau souterraine) ont été prélevés sur le site.

4.1. Teneur en sulfure des résidus miniers

Les teneurs en sulfures ou soufre total des différents échantillons sont reportées dans le diagramme de Miller et al., 1991 (Figure 2) qui permet à partir de la teneur seuil de 0,3% de distinguer le domaine où les échantillons ne sont pas acidogènes de celui où ils sont potentiellement générateurs d'acide.

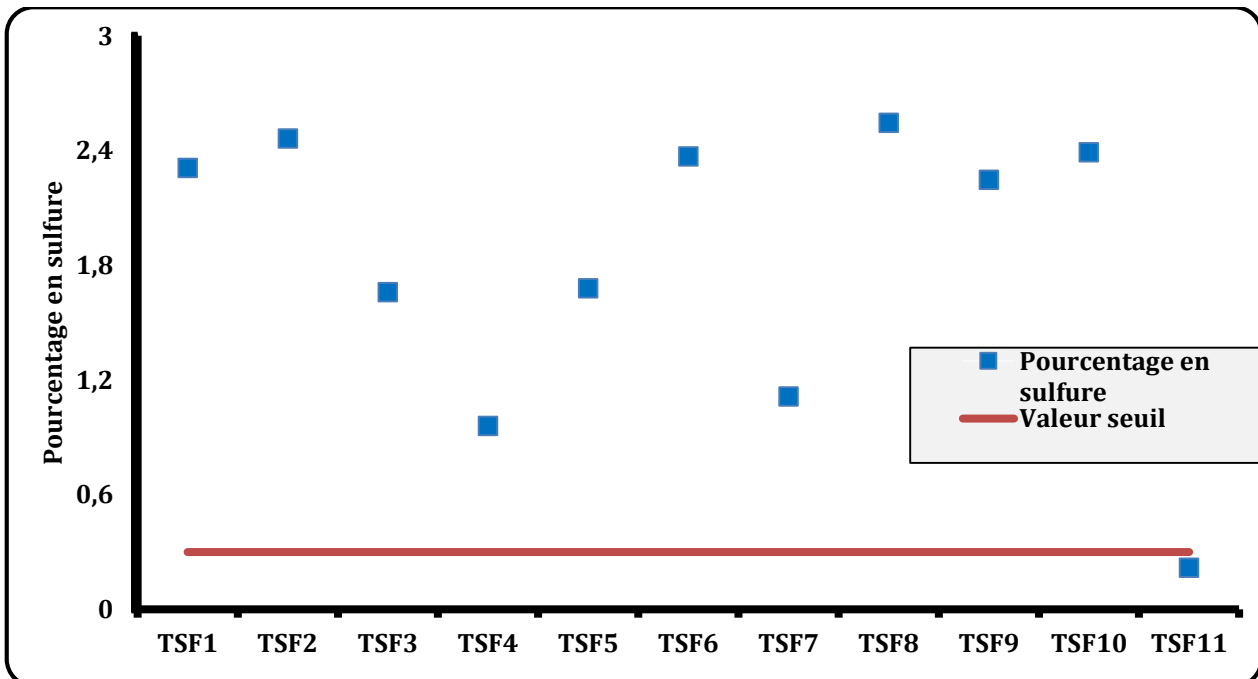


Fig. 2 : Teneur en sulfure des résidus miniers



Les résultats obtenus montrent des teneurs en sulfure strictement supérieures à 0,3% pour tous les échantillons à l'exception de TSF11. Les résidus miniers peuvent être considérés comme acidogènes. La teneur en soufre dans les rejets miniers influence le processus d'acidification, et permet d'évaluer un potentiel d'acidité (Sorrenti, 2007).

La variabilité catégorielle des teneurs au sein du parc s'explique d'une part par le processus de sédimentation ou de décantation sous l'effet de la densité intrinsèque des minéraux constitutifs de la boue de traitement finale et d'autre part de la catégorie de minerai en cours d'exploitation. En effet, le minerai est classé en trois catégories: haute teneur, moyenne teneur et basse teneur. L'exploitation du minerai de moyenne ou de basse teneur produit généralement moins de sulfures que celle du minerai de haute teneur. Et selon (Chtaini, 1999), la teneur en soufre dans le parc augmente avec la profondeur pour atteindre des valeurs oscillantes entre 9 et 10%.

La minéralisation à Youga est soulignée par la présence de pyrite et arsénopyrite. Toutefois, la teneur en soufre n'est

pas synonyme de production d'acide car des minéraux inhibiteurs ou neutralisants (carbonates) peuvent produire des réactions tampon.

4.2. Potentiel d'acidification des résidus miniers

La méthode ABA (Acid Base Accounting) identifie la capacité d'un échantillon à générer de l'acidité à partir du dosage des différents types de soufre. La méthode la plus commune consiste à déterminer le soufre total. Cette valeur est ensuite convertie en potentiel acide (PA) par la relation suivante : $PA = (\% \text{ soufre total}) * 31,25$.

Les valeurs du potentiel acide sont relativement élevées pour tous les échantillons (**Tableau 1**). Elles montrent donc que les échantillons sont problématiques car potentiellement acidogènes. En dehors de TSF11, tous les échantillons analysés sont susceptibles de subir une acidification consécutive à l'oxydation des sulfures, et par conséquent problématiques.

Tableau 1 : Valeurs du potentiel acide (PA) des résidus miniers

Échantillon	TSF1	TSF2	TSF3	TSF4	TSF5	TSF6	TSF7	TSF8	TSF9	TSF10	TSF11
PA (Kg CaCO ₃ /t)	72,10	76,92	51,82	29,93	52,46	74,03	34,76	79,50	70,16	74,67	6,76

4.3. Potentiel de neutralisation des résidus miniers

La capacité des roches ou des résidus miniers à neutraliser l'acidité produite par l'oxydation des sulfures métalliques est communément appelée potentiel de

neutralisation (PN). Comme les carbonates sont les principaux minéraux consommateurs d'acide, il a été procédé à la détermination du potentiel de neutralisation des carbonates (PNCa). Le PNCa peut être obtenu aisément à partir du dosage du carbone total. Il a été calculé en considérant les poids moléculaires à l'aide de la relation : $PNCa = \% \text{ carbone} * 8,33$.



Tableau 2 : Valeurs du potentiel de neutralisation (PN) des résidus miniers

Échantillon	TSF1	TSF2	TSF3	TSF4	TSF5	TSF6	TSF7	TSF8	TSF9	TSF10	TSF11
PN (Kg CaCO ₃ /t)	2,27	2,27	1,45	1,45	1,90	1,90	1,90	2,71	2,14	2,08	4,28

Les valeurs du potentiel de neutralisation est très faible pour tous les échantillons (**Tableau 2**). Elles indiquent une incapacité des résidus miniers à tamponner (c'est-à-dire neutraliser) un éventuel drainage acide qui serait produit suite à leur oxydation. L'échantillon TSF11 présente la valeur de PN la plus élevée ce qui confirme sa valeur de PA faible. Une comparaison du potentiel acide et du potentiel de neutralisation est présentée à la figure

suivante. Elle montre que les potentiels acides des différents échantillons sont nettement supérieurs aux potentiels de neutralisation (1,5 à 39 fois), ce qui confirme une fois de plus le caractère acidogène des résidus miniers. La faiblesse du potentiel de neutralisation de ces résidus miniers peut également être justifiée par l'absence et la proportion très faible de minéraux acidivores ou neutralisants comme les carbonates.

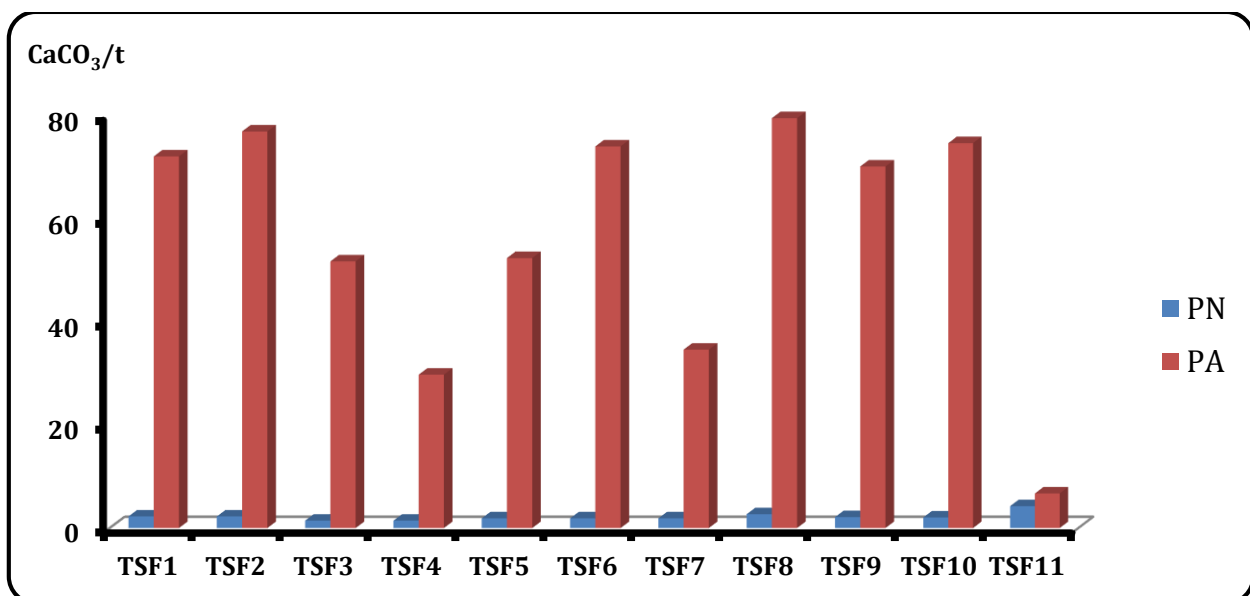


Fig. 3 : Diagramme comparatif du potentiel d'acidification (PA) et de neutralisation (PN)

4.4. Prédiction du potentiel de génération acide

Le diagramme PA-PN (**Figure 4**) permet de prédire à partir des valeurs de potentiel acide et de neutralisation une potentielle génération d'effluents acides des échantillons. Il montre qu'en dehors de l'échantillon TSF11, tous les autres sont problématiques car

potentiellement générateurs d'acide. En effet, TSF11 est un échantillon prélevé en sub-surface dans le canal par rapport aux autres échantillons et de ce fait ayant beaucoup plus été lessivé comparativement aux autres. Cela a probablement influencé les résultats des analyses. En outre ces résultats confirment l'hypothèse évoquée plus haut qui considère que la teneur en soufre dans le parc augmente

avec la profondeur pour atteindre des valeurs oscillantes entre 9 et 10% (Chtaini, 1999).

Ce diagramme confirme les observations faites sur les valeurs du potentiel acide et du potentiel de neutralisation. Un suivi-contrôle des résidus miniers s'avère donc

indispensable. Ces résultats permettent également d'envisager des méthodes de prévention du drainage minier acide.

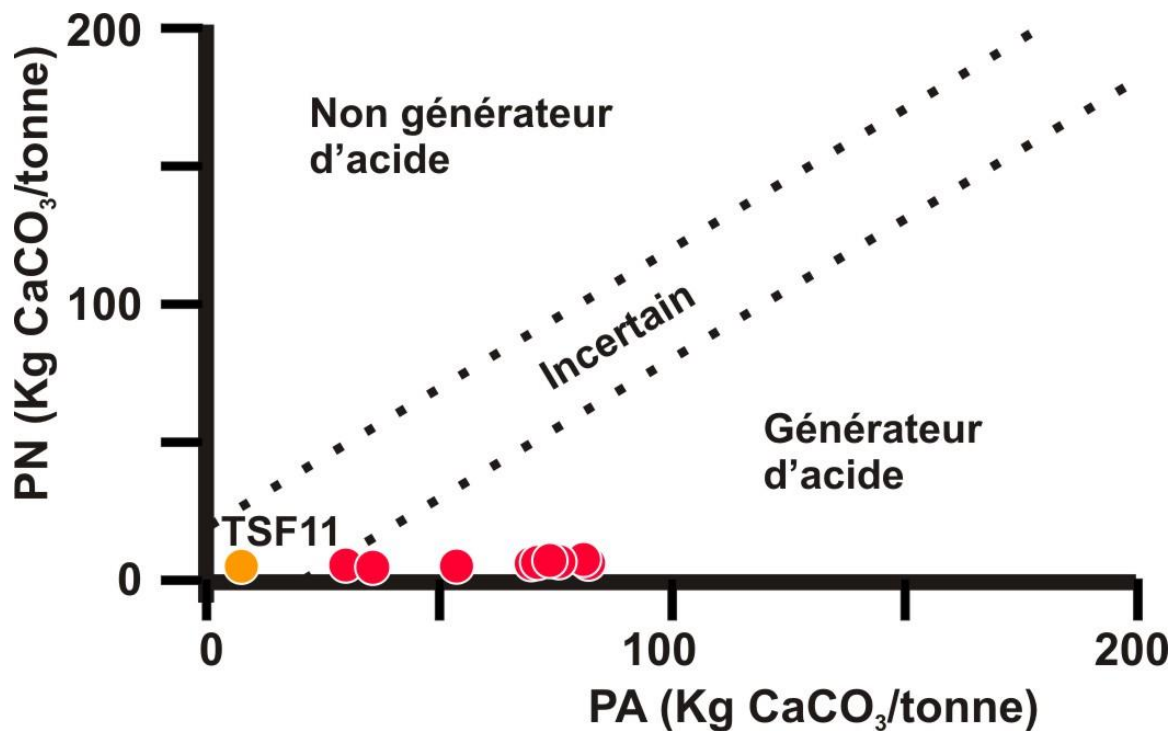


Figure 4 : Diagramme de prédiction PA-PN

Selon Plumle et al. (1999), les roches endogènes acides présentent un potentiel de production d'acidité important contrairement aux carbonates sédimentaires ou aux roches endogènes ultrabasiqes. En effet, la minéralisation à Youga est portée par des faciès détritiques du Tarkwaïen, constitués par des grès conglomératiques à galets très variés. Les galets correspondent à des granites, quartz, jaspes, rhyolites, roches vertes, schistes. Ce qui atteste le caractère felsique (acide) de la gangue minéralisée (minerai) et par conséquent le fait que le potentiel de neutralisation soit de surcroît très faible voire négligeable.

4.5. Concentrations en métaux et en arsenic des résidus miniers

A l'exception du fer, l'ensemble des éléments analysés ont des faibles teneurs, en général inférieures aux normes requises pour la qualité des sols au Burkina Faso (Tableau 3).

Les teneurs relativement élevées s'observent au niveau du cuivre, du chrome, de l'arsenic et du zinc. Cela s'explique en partie par la nature de la roche minéralisée. En effet, à Youga la minéralisation est liée aux ceintures de roches vertes birimiennes, riches en minéraux ferromagnésiens d'une part et d'autres parts en métaux tels que la pyrite, l'arsénopyrite et le chrome.

Les teneurs en fer sont deux fois supérieures à la norme requise, exception faite de l'échantillon TSF11 (3,20% de Fe). La forte teneur en fer est due essentiellement au caractère épigénétique de la minéralisation marqué par un front de sulfuration (sulfures disséminées et stockwerks) dont la paragenèse est composée d'or libre fin ou en micro-



fractures dans les sulfures, et par des sulfures (pyrites et arsénopyrites prismatiques dominantes, avec accessoirement de la galène). La pyrite, principal minéral ferrique est typique d'un environnement réducteur et

devient la source du drainage minier acide sous des conditions oxydantes (Brassard, 1993), (Blodau, 2006), (Kagambèga et al., 2014a), (Kagambèga et al., 2014b).

Tableau 3 : Concentrations des métaux et en arsenic contenus dans les résidus miniers

Concentration (ppm)	Cu	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	Fe (%)	As	Cd	Cr	Hg
Normes au Burkina Faso	1000	2500	3000	40	700	300	3%	300	30	800	30
TSF1	62,34	8,92	50,96	10,78	27,10	32,72	7,51	79,05	2,54	90,47	0,00
TSF2	68,95	10,72	59,56	10,51	24,60	29,36	6,85	66,44	3,37	91,79	0,39
TSF3	83,61	12,57	76,85	11,65	35,75	31,75	6,66	61,54	3,61	96,70	1,35
TSF4	73,17	14,15	63,30	13,20	22,44	27,42	6,50	79,15	3,51	107,18	2,69
TSF5	83,13	8,79	67,13	10,31	27,83	27,10	6,16	59,40	2,72	17,84	0,06
TSF6	70,75	11,25	61,12	14,84	32,13	34,04	7,13	150,55	3,11	101,74	1,20
TSF7	64,32	11,72	58,82	10,83	27,54	29,16	6,37	137,53	3,08	95,58	0,44
TSF8	87,35	26,18	90,86	9,72	43,15	30,33	6,07	97,84	2,50	98,15	5,05
TSF9	60,34	10,56	53,02	11,25	22,90	24,89	5,38	82,55	2,77	103,34	0,61
TSF10	60,34	19,18	50,97	22,76	24,47	27,83	6,10	105,50	2,52	96,81	2,85
TSF11	42,67	8,55	35,64	11,80	10,34	19,24	3,20	8,46	2,80	80,17	0,00

4.6. Concentrations en métaux dans les eaux de surface

Les échantillons d'eau de surface sont issus des 06 fosses déjà exploitées ou en cours, à l'exception de celui prélevé dans le fleuve Nakambé (SWFNa). L'ensemble des



valeurs sont très largement en dessous des normes exigées au Burkina Faso (**Tableau 4**). Les teneurs en arsenic des autres échantillons sont très élevées par rapport à celui prélevé dans le fleuve. Les

échantillons d'eau de surface n'ont donc pas subi à ce stade une quelconque contamination en métaux et arsenic.

Tableau 4 : Concentrations des métaux dans les eaux de surface

Concentration (ppb)	Cu	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	As	Cd	Cr	Hg
Normes au Burkina Faso	1000	500	5000		2000	500	1000	100	200	170
SWMP	0,49	0,28	4,21	0,00	5,54	0,08	245,25	0,00	7,92	0,00
SWZP	2,27	0,18	2,55	0,00	18,16	17,29	343,42	0,00	7,30	0,33
SWEP	0,49	0,06	1,06	0,00	1,09	0,43	79,19	0,00	3,86	0,00
SWWP1	0,36	0,02	0,31	0,00	0,07	0,03	20,13	0,00	4,00	0,00
SWWP2	0,91	0,61	5,06	0,00	0,53	0,60	27,07	0,00	4,63	0,00
SWWP3	0,81	1,57	12,08	0,00	1,42	0,05	323,56	0,00	5,32	0,00
SWFNa	2,76	0,95	7,97	0,00	3,94	0,75	0,85	0,00	9,80	0,00

4.7. Concentrations en métaux dans les eaux souterraines

A l'image des eaux de surface, les teneurs en métaux des eaux souterraines sont également en dessous des normes de potabilité en vigueur au Burkina Faso. Cependant, la teneur en cobalt pour le piézomètre situé à l'ouest de la mine présente une valeur 10 fois plus élevée que la norme. Cela peut s'expliquer d'une part par la proximité du piézomètre avec le parc à résidu de traitement et d'autre part de la mobilité chimique du cobalt dans l'environnement. En effet, les transferts potentiels de

polluants chimiques à partir d'une source puis dans les différents compartiments de l'environnement sont liés aux propriétés intrinsèques des polluants (solubilité, densité, stabilité, polarité, volatilité), ainsi qu'aux propriétés du sol et du sous-sol contrôlant leur migration (Artignan et Cottard, 2003). Il peut s'agir de propriétés hydrauliques (porosité ou perméabilité du milieu), physico-chimiques (minéralisation, teneur en eau) ou biologiques (microflore, aptitude à la dégradation). La mobilisation et la biodisponibilité des métaux n'est pas fonction de leurs teneurs totales mais plutôt des phases auxquelles ils sont associés (Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005).



Tableau 5 : Concentrations des métaux dans les eaux souterraines

Concentration (ppb)	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	As	Cd	Cr	Hg
Normes au Burkina Faso	20	50	50	50	50	10	1,00	50	5,00
GWEPz	1,69	0,25	2,25	0,76	4,04	1,64	0,00	3,41	0,00
GWWPz	1,62	1,52	10,12	1,09	494,82	1,45	0,00	10,80	0,00
GWFN	0,77	0,00	0,20	0,84	0,26	0,26	0,00	13,75	0,00
GWFS	0,46	0,00	21,54	2,40	0,22	0,42	0,00	32,08	0,00

5. CONCLUSION

L'analyse d'échantillons de résidus miniers issus du parc à résidus miniers de Youga, d'eau de surface et d'eau souterraine ont permis de prédire le drainage minier acide au niveau de la mine de Youga. Les concentrations en métaux et en arsenic des résidus miniers respectent les normes en vigueur au Burkina Faso. Il en est de même des échantillons d'eau de surface. Pour les échantillons d'eau souterraine, exception faite du piézomètre proche du parc à résidus qui présente des valeurs supérieures aux exigences en vigueur, toutes les autres concentrations sont en dessous de ces normes.

Les valeurs du potentiel acide et de neutralisation montrent par contre que les échantillons de résidus miniers analysés sont potentiellement générateurs d'acide donc problématiques.

L'ensemble des grandes lignes et orientations, en matière de réhabilitation et de fermeture du site doivent prendre en compte le caractère acidogène du minerai (notamment la problématique des sulfures) mais du stérile franc et de rejets de sélectivité. Pour un plan judicieux de gestion de l'eau, il conviendrait de tenir compte du potentiel de drainage minier acide et de lixiviation des parois de fosses, des résidus, des déblais de couverture et des autres matières liées à l'exploitation. Les résultats devraient également orienter le choix des espèces (espèce hyper-accumulatrices de métaux) pour la revégétalisation du parc.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la compagnie minière de Youga et particulièrement le personnel du département de l'environnement de la mine de Youga, le directeur et les chefs de service des différentes directions du Bureau des mines et de la géologie du Burkina Faso (BUMIGEB).

REFERENCES

- [1] M. Egal, "Signatures chimiques de l'activité bactérienne dans les eaux acides minières. Geochemistry", (Thèse) Université Montpellier II-Sciences et Techniques, 232pages, 2010.
- [2] M. Aubertin, B. Bussièrè et L. Bernier, "Environnement et gestion des rejets miniers. Manuel sur céderom, 2002a.
- [3] R. Trinquard (BRGM), N. Kagambèga, S. Naba (Université de Ouagadougou), Equipe de projet SYSMIN (Coordination C. Castaing, BRGM). Notice explicative de la carte géologique du Burkina Faso à 1/200 000 ; Feuille Tenkodogo, 2003.
- [4] Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ). Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementale : cahier 1 généralité édition courante, p 1-55, 2008.
- [5] P. Collon, "Évolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain. De l'expérimentation en laboratoire à la modélisation in situ" (Thèse), Institut National Polytechnique de Lorraine, 2003.
- [6] S.D. Miller, J.J. Jeffery, J.W.C. Wong "Use and misuse of the acid base account for "AMD"



- prediction". Proc. of the Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage. Montreal, Canada. 3, p 489-506, 1991.
- [7] E. Sorrenti, "Étude de la Passivation de la Pyrite : Chimie de Surface et Réactivité". (Thèse) Institut National Polytechnique de Lorraine, 247pages, 2007.
- [8] A Chtaini, "Contrôle du drainage minier acide à l'aide de boues alcalines d'usines de pâtes à papier"; (Thèse) 317p, 1999.
- [9] G.S. Plumle, M.J. Logsdon and L.H. Filipek, The environmental geochemistry of mineral deposits. Reviews in economic geology, v. 6A-B. Littleton, CO: Society of Economic Geologists. 2 v. (xv, 583), 1999.
- [10] S.Brassard, "Évaluation potentiel acidogène de divers rejets miniers par une méthode bio-cinétique", Institut National de la Recherches scientifique (INRS-Eau) du Québec, p19-25, 1993.
- [11] C.Blodau, "A review of acidity generation and consumption in acidic coal mine lakes and their watersheds". Science of The Total Environment 369(1-3): 307-332, 2006.
- [12] N. Kagambega, S. Sawadogo, O. Bamba, P. Zombre, R. Galvez, "Acid mine drainage and heavy metals contamination of surface water and soil in southwest Burkina Faso-West Africa". International Journal of Multidisciplinary Academic Research, Vol. 2, N° 3, pp9-19, 2014a.
- [13] N. Kagambega, S. Sawadogo, Gordio, "High arsenic enrichment in water and soils from Sambayourou watershed – Burkina Faso (West Africa)". International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 2 (3): pp. 6-12, 2014b.
- [14] D. Artignan, F. Cottard, Éléments à prendre en compte pour l'évaluation des impacts environnementaux dans l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM). Rapport BRGM / RP -52049 – FR, 46 p., 5 fig., 2 tabl., 10 phot, 2003.
- [15] R. Galvez-Cloutier, P.J. Lefrançois, "Les sols contaminés par des métaux lourds : Distribution géochimique et techniques de restauration (Première partie). Vecteur environnement". Vol.38; Numéro 3, 2005.