

Prédiction du drainage minier acide et modélisation environnementale à partir des caractéristiques géologiques intrinsèques du gisement aurifère de Sissingué, Nord de la Côte d'Ivoire

Yacouba DIARRA, Gbele OUATTARA*, Barthélémy Gnammytchet KOFFI et Alphonse Kouakou YAO

Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques, UMRI 68, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

* Correspondance, courriel : gbele.ouattara@yahoo.fr

Résumé

Ce travail porte sur la prédiction des risques de pollutions environnementales liées à l'exploitation industrielle aurifère en Afrique de l'Ouest, particulièrement en Côte d'Ivoire. L'un des problèmes majeurs dans l'exploitation aurifère est la gestion des rejets miniers susceptibles de produire du drainage minier acide (DMA), avec dissolution de métaux lourds dangereux pour l'environnement. Afin de réduire les impacts environnementaux de l'exploitation de la mine de Sissingué, nous élaborons un outil de prédiction du DMA par modélisation, à partir des caractéristiques géologiques intrinsèques du gisement. L'étude menée porte sur la caractérisation de l'état initial des eaux de surface et souterraines, les tests géochimiques sur les potentialités de génération du DMA et la modélisation géo-environnementale. Les résultats montrent que les eaux de surface et souterraines sont faiblement minéralisées avec une acidité proche de la neutralité. Au plan géologique, les formations du gisement de Sissingué sont des métasédiments (siltstones, sandstones et conglomérats), granites et dykes felsiques. La paragenèse métallifère est constituée, principalement, de pyrite, d'arsénopyrite, d'or et accessoirement de chalcopyrite, d'oxydes de titane, de galène et de pyrrhotite. L'altération hydrothermale est marquée par une séricitisation, une carbonatation, une silicification et une épidotisation. Le modèle élaboré montre que les roches granitiques et les dykes felsiques sont non acidogènes (Non Acid Formation ou NAF), alors que les métasédiments le sont en général (Potentiel Acid Formation ou PAF), et méritent donc une attention particulière lors de l'exploitation du gisement.

Mots-clés : *gisement aurifère, sulfures, drainage minier acide, Sissingué, Côte d'Ivoire.*

Abstract

Prediction of acid mine drainage and Environmental modeling from the intrinsic geological characteristics of the Sissingué gold deposit, Northern Ivory Coast

This work focuses on the prediction of environmental pollution related to gold exploration in West Africa, particularly in Ivory Coast. One of the major problems in gold exploration is the controlling of residues likely to produce acid mine drainage (AMD), with dissolution of heavy metals dangerous for the environment. In order to reduce the environmental impacts of the Sissingué mine, we have developed a tool for the prediction of AMD, based on the intrinsic geological characteristics of the deposit. The study focuses on the characterization of the initial state of surface and groundwater, geochemical tests on the potential

for generation of AMD and geo-environmental model. The results show that surface and groundwater are weakly mineralized with an acidity close to neutrality. Formations of the Sissingué deposit are metasediments (siltstones, sandstones and conglomerates), granites and felsic dykes. Metalliferous paragenesis consists mainly of pyrite, arsenopyrite, gold and, weakly, chalcopyrite, titanium oxides, galena and pyrrhotite. Hydrothermal alteration is marked by sericitization, carbonation, silicification and epidotisation. The model developed makes it possible to deduce that the granitic rocks and the felsic dykes of this deposit are non-acidogenic (Non Acid Formation or NAF), whereas the sediments are in general (Potential Acid Formation or PAF), and therefore justify a special attention during exploitation of the deposit.

Keywords : *gold deposit, sulfides, acid mine drainage, Sissingué, Ivory Coast.*

1. Introduction

L'exploitation minière produit chaque année de très grandes quantités de rejets solides entreposés à l'air libre. Il s'agit d'une part, de morts terrains et du minerai à faible valeur économique au moment de l'exploitation ; et d'autre part des résidus miniers qui sont de fines particules issues du traitement hydro-métallurgique du minerai à valeur économique. La composition en éléments chimiques de ces rejets est fonction des paramètres géologiques du gisement et des additifs utilisés dans le circuit de traitement du minerai [1, 2]. Exposés à l'air libre (eau + oxygène) et sous l'effet de certaines bactéries, les rejets miniers sont susceptibles de générer du drainage minier acide (DMA) suite à l'oxydation naturelle des minéraux sulfurés qu'ils peuvent contenir [3 - 7]. Les recherches sur le DMA ont été pendant longtemps focalisées sur les problèmes causés par les parcs à résidus [8 - 9]. Ces travaux ont porté sur l'origine et les conséquences des DMA [11 - 22]. D'autres travaux ont traité de la prédiction des rejets miniers à générer le DMA [1, 23]. Afin de limiter les impacts environnementaux du drainage minier acide, le présent travail vise à élaborer un outil géologique qui permet de prédire le phénomène DMA dans les verses à stériles, à partir des paramètres géologiques intrinsèques du gisement de Sissingué, avant même le début de son exploitation. Il s'agit donc d'élaborer un outil, sous forme de modèle géologique qui puisse prédire la répartition spatiale des composants acidogènes (susceptibles de générer le DMA) et non acidogènes du gisement afin de définir de façon proactive des solutions de prévention ou de traitement appropriées.

2. Cadre géologique

Le gisement de Sissingué est situé à l'Est de Tengréla dans le nord de Côte d'Ivoire. Au niveau régional, les formations géologiques (*Figure 1*) sont constituées de :

- métasédiments de type tarkwaien (métaconglomérats) ;
- sillons volcano-sédimentaires ou sillon Boundiali-Syama (métagrès, métasilt, volcanites mafiques et volcanoclastites) ;
- granites et granodiorites intrusifs, microgranites à biotite, dykes felsiques porphyriques à phénocristaux de plagioclase ;
- granites migmatitiques.

Les grandes structures régionales sont orientées N-S, NNE-SSO et NNO-SSE avec des pendages globalement orientés Est.

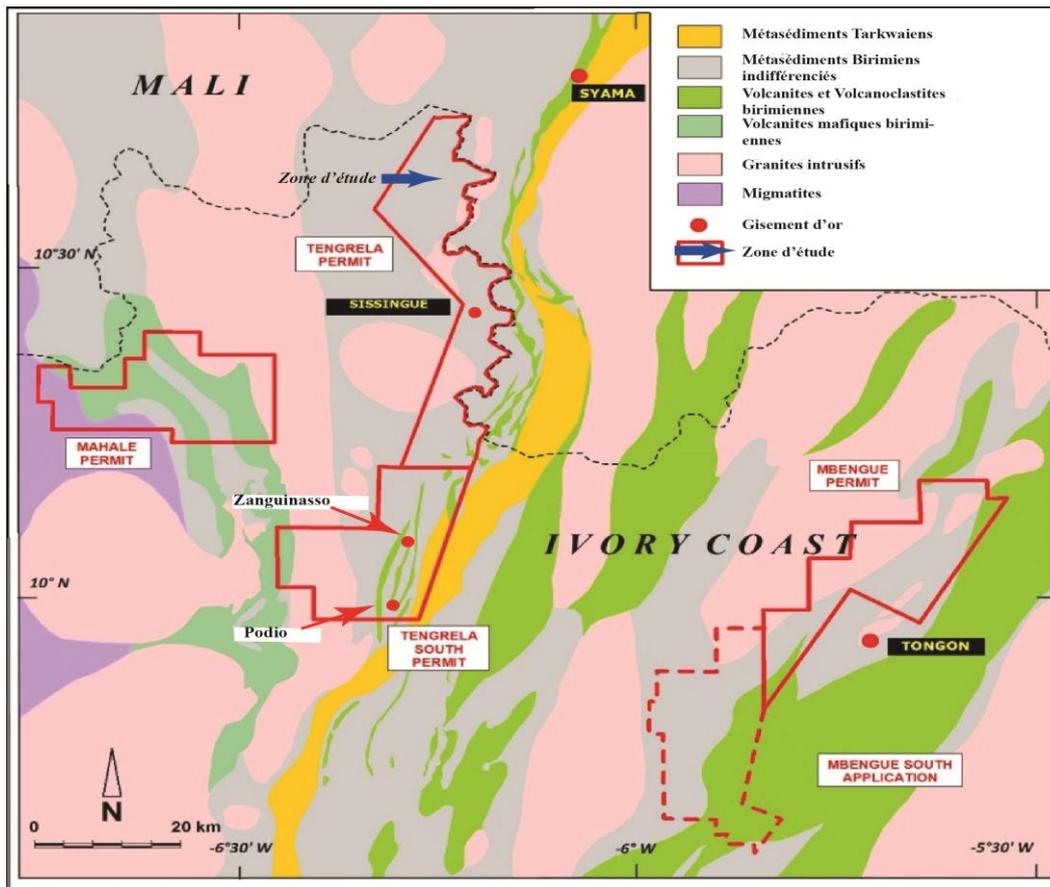


Figure 1 : Carte géologique et localisation des différents permis d'exploration aurifère et de la zone d'étude (modifiée, d'après [10])

3. Matériel et méthodes

En l'absence de tout affleurement, la quasi-totalité de nos travaux ont porté sur les échantillons de carottes du gisement de Sissingué. Trois principales études ont été menées sur la qualité des eaux et les échantillons de carottes. Il s'agit :

- de la caractérisation, en terme de qualité, de l'état initial des eaux de surface et des eaux souterraines ;
- de la caractérisation environnementale du gisement, à partir des résultats des tests géochimiques statiques DMA, selon le protocole australien Amira [24]. Il faut signaler que d'autres protocoles existent comme ceux du Canada [25, 26] ;
- et la caractérisation géologique du gisement, sanctionnée par l'élaboration du modèle géologique en 3D.

3-1. Etat initial des eaux

Il s'agit d'échantillonner les eaux (de surface et souterraines) de la zone d'étude et de mesurer leur pH et teneur initiale en métaux lourds, afin de les comparer aux normes de qualité de l'OMS et de la Banque Mondiale.

3-2. Caractérisation géologique du gisement

Cette étude consiste à déterminer les caractéristiques géologiques intrinsèques du gisement à savoir la lithologie, la minéralogie, l'altération hydrothermale etc.

3-3. Tests de caractérisation géochimique et environnementale (test statique DMA)

Les paramètres ci-dessous ont été mesurés dans les conditions de laboratoire, selon le protocole Australien [24] :

- le pH et le test de Conductivité électrique (EC) ;
- l'acidité maximale potentielle (MPA), à partir du pourcentage du soufre total %S ;
- la capacité de neutralisation d'acidité (ANC), à travers le test Sobek modifié ;
- le potentiel de production d'acide net (NAPP), donné par la différence MPA et ANC ;
- le test unique de génération Net d'acide (NAGpH).

Les tests statiques permettent, ainsi, de déterminer l'acidité maximale potentielle (MPA) et la capacité de neutralisation d'acide (ANC). La différence entre MPA et ANC donne le potentiel net de production d'acide (NAPP), en Kg d'acide sulfurique par tonne de rejet rocheux, soit $\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}$. L'interprétation des résultats du NAPP et du test unique d'acidité NAGpH permettent de considérer l'échantillon comme : Formation Non Acidogène ou NAF, Formation Potentiellement Acidogène ou PAF et Formation incertaine ou UC. Dans ce dernier cas, des tests cinétiques ou des analyses minéralogiques complémentaires sont recommandées pour lever l'incertitude. A partir des tests géochimiques, l'échantillon est classé :

- *Formation non acidogène (NAF)* : est généralement défini comme NAF lorsqu'il a un NAPP négatif et le NAGpH final $\geq 4,5$
- *Formation potentiellement acidogène (PAF)* : est généralement défini comme PAF lorsqu'il a un NAPP positif et un NAGpH final $< 4,5$.
- *Incertitude (UC)* : une classification incertaine est utilisée, lorsqu'il existe une contradiction apparente entre les résultats NAPP et NAG (c'est-à-dire lorsque le NAPP est positif et NAGpH $> 4,5$, ou lorsque le NAPP est négatif et NAGpH $\leq 4,5$).

4. Résultats et discussion

4-1. Etat initial des eaux de surface et des eaux souterraines

Les eaux de surface de la zone du projet présentent des conductivités électriques très élevées en saison sèche comparativement à la saison sèche (*Tableau 1*). La turbidité est également élevée pendant la saison sèche. En ce qui concerne les éléments chimiques (nitrates et chlorures), les teneurs sont largement inférieures aux normes internationales. Les teneurs en métaux lourds, comme l'arsenic, le sélénium, le mercure, le plomb, le cadmium, le nickel, le cobalt et le chrome, sont largement en deçà des normes internationales. Seul le fer montre des teneurs élevées. Les valeurs de pH obtenues sont faiblement basiques (7,23-8,5). On peut donc dire que les eaux initiales de surface et souterraines sont faiblement minéralisées, avec une acidité proche de la neutralité. Elles répondent donc aux normes de la Banque Mondiale et de l'OMS.

Tableau 1 : Résultats des analyses des échantillons prélevés dans les eaux de surface (A) et souterraines (B à I). Les concentrations sont exprimées en mg /l à l'exception du pH, de la température (°C), de la turbidité (NTU) et de la conductivité (mS/m), alcalinité (mg/l de CaCO3), normes de rejet de la Banque Mondiale (B.M); SS : Saison sèche, SP : Saison des pluies. Eaux souterraines à Danzourou (B), Kotou (C), Pourou (D), Sissingué (E, F), M'Basso (G, H), Tialaka (I)

Paramètres	A							B					C					D					E				
	SFSWI		SBORKSWI		SSSWI		Normes B.M.	SDGWI		SDGW2		Norme O.M.S	SKGW1		SKGW2		Norme O.M.S	SPGW1		SPGW2		Norme O.M.S	SSGW1		SSGW2		Norme O.M.S
	SS	SP	SS	SP	SS	SP		SS	SP	SS	SP		SS	SP	SS	SP		SS	SP	SS	SP		SS	SP	SS	SP	
Paramètres physiques																											
Température (°C)	33,2	30	29,8	27	31,2	27,7	-	32,8	31,6	28,9	28,6	-	29,7	29,5	30,4	30	-	30,1	29,9	29,8	29,6	-	27,9	27,6	28,6	28,5	-
pH	8,58	7,57	7,65	7,35	7,55	27,7	6,0-9,0	7,12	7,25	6,56	6,81	6,5-8,5	6,3	6,89	7,9	7,1	6,5-8,5	6,93	6,95	6,85	6,84	6,5-8,5	6,54	6,52	6,39	6,24	6,5-8,5
Vraie couleur	10	5	<5	5	<5	5	-	<5	5	<5	<5	15,5	<5	<5	<5	<5	15,5	<5	<5	<5	<5	15,5	5	<5	<5	<5	15,5
Turbidité	215	34	2,3	86	2,6	82	-	32	100	0,7	4,6	5	6,4	18	5,1	8,1	5	0,4	0,2	1,5	1,2	5	125	86	1,6	15	5
Matières dissoutes	76	43	35	22	41	26	-	180	194	43	35	1000	13	22	152	142	1000	130	132	122	136	1000	90	50	29	61	1000
Matières en suspension	170	47	2	23	<1	23	50	-	-	-	-	-	8	21	13	18	-	<1	<1	<1	2	-	68	12	3	33	-
Conductivité	10,3	6,2	5,1	3,9	5,7	4,2	-	-	-	-	-	-	1,8	3,5	21,1	18,7	-	16,9	17,4	15,8	18	-	11,6	8,4	3,8	8,6	-
Paramètres chimiques et nutriments																											
Dureté totale	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<5	11	65	58	500	42	44	37	43	500	25	18	8	12	500
Alcalinité	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	13	99	89	-	80	79	68	71	-	21	20	11	5	-
Nitrates (NO ₃)	8,06	<0,06	<0,06	0,48	0,41	0,28	-	<0,06	<0,06	4,93	8,84	50	0,6	0,87	<0,06	0,07	50	0,06	<0,06	1,88	5,91	50	10,4	7,41	3,04	23,4	50
Nitrites (NO ₂)	<0,05	0,19	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	-	<0,05	<0,05	0,07	0,05	3	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	3	<0,05	0,05	<0,05	0,08	3	<0,05	0,07	<0,05	0,08	3
Calcium (Ca ⁺⁺)	<1	2	2	2	2	2	-	14	15	1	1	-	<1	4	11	9	-	9	10	9	11	-	5	4	<1	2	-
Magnésium (Mg ⁺⁺)	0,8	1,2	1,3	2,4	1	1	-	9,2	9,2	1,3	0,6	-	<0,5	<0,5	9,1	8,6	-	4,6	4,7	3,6	3,8	-	2,8	1,8	1,5	1,6	-
Phosphates (PO ₄)	0,27	0,09	0,09	<0,02	<0,02	0,08	-	<0,02	<0,02	<0,02	0,05	-	<0,02	0,06	0,32	0,04	-	1,14	1,05	0,87	0,59	-	0,33	0,55	0,09	0,5	-
Chlorures (Cl)	6	1,6	0,5	2,2	0,6	1,9	-	<0,1	2,4	<0,1	<0,1	250	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	250	<0,1	<0,1	0,5	1,7	250	8,8	5	0,6	4,8	250
Sodium (Na)	8,3	3	4,4	3	4,7	3	-	19	19	5,4	5,1	200	0,9	0,6	11	9,9	200	15	21	18	20	200	4,7	3	1,6	4,4	200
Potassium (K)	14	6,6	2,5	2,2	2,2	2,4	-	4	3,5	3,2	2	-	0,5	0,6	2,5	2,3	-	4,4	4	4,4	4,2	-	7,8	6	2,1	5,4	-
Sulfates (SO ₄)	8	<1	<1	4	<1	4	-	<1	<1	<1	<1	250	<1	<1	2	<1	250	<1	<1	<1	<1	250	7	7	2	<1	250
DCO	100	38	<25	<25	<25	<25	250	<25	<25	<25	<25	-	<25	<25	<25	<25	-	<25	<25	<25	<25	-	<25	<25	<25	<25	-
DBO ₅	<5	-	<5	-	<5	-	50	<5	-	<5	-	-	<5	-	<5	-	-	<5	-	<5	-	-	<5	-	<5	-	-
Métaux lourds																											
As (Total - dissout)	<0,002	0,002	<0,002	0,002	<0,002	0,002	0,1	<0,002	0,002	<0,002	0,002	0,01	<0,002	0,002	<0,002	0,002	0,01	<0,002	0,002	<0,002	0,002	0,01	<0,002	0,002	<0,002	0,002	0,01
Sb (Total - dissout)	-	-	-	-	-	-	-	<0,003	-	<0,003	-	0,005	<0,003	-	<0,003	-	0,005	<0,003	-	<0,003	-	0,005	<0,003	-	<0,003	-	0,005
Se (Total)	<0,003	-	<0,003	-	<0,003	-	0,1	<0,003	-	<0,003	-	0,01	<0,003	-	<0,003	-	0,01	<0,003	-	<0,003	-	0,01	<0,003	-	<0,003	-	0,01
Hg (Total - dissout)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,001
Fe (Total)	9,1	2,1	0,9	4,5	0,6	4,6	3,5	5,7	7,4	0,3	<0,1	0,3	0,9	0,5	1	0,5	0,3	<0,1	<0,1	0,3	<0,1	0,3	2,1	1,2	0,4	0,2	0,3
Mn (Total)	0,16	0,05	0,09	0,04	0,06	0,05	-	0,11	0,17	1,05	<0,02	0,5	0,09	0,03	0,07	0,04	0,5	0,02	0,02	<0,02	<0,02	0,5	0,03	<0,02	<0,02	0,03	0,5
Cu (Total)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,5	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1
Zn (Total)	<0,05	<0,05	0,07	<0,05	<0,05	<0,05	2	0,13	0,1	<0,05	<0,05	3	0,07	<0,05	0,1	<0,05	3	0,06	<0,05	0,11	0,07	3	0,09	<0,05	0,09	<0,05	3
Pb (Total)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Cr (Total)	0,02	<0,01	0,02	<0,01	0,01	<0,01	0,1	0,01	<0,01	1,02	<0,01	0,05	0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,05	0,02	<0,01	0,01	<0,01	0,05	0,02	<0,01	0,01	<0,01	0,05
Ni (Total)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,5	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,02
Cd (Total)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,1	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003
Al (Total)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,48	0,63	0,72	0,29	0,2	0,15	<0,03	0,33	<0,03	0,2	4,15	7,14	0,19	0,74	0,2
Mo (Total)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-
Co (Total)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-

Tableau 1 : (suite)

Paramètres	F					G					H					I				
	SSGW4		SSGW5		Norme O.M.S	SMGWW1		SMGWW2		Norme O.M.S	SDJGW1		SDJGW2		Norme O.M.S	STGW1		STGW2		Norme O.M.S
	SS	SP	SS	SP		SS	SP	SS	SP		SS	SP	SS	SP		SS	SP	SS	SP	
	Paramètres physiques					Paramètres physiques					Paramètres physiques					Paramètres physiques				
Température	29,3	29,3	30,4	30,1	-	29,4	29,2	29,5	29,4	-	29,6	29,8	28,7	28,7	-	190	12	3	5	-
pH	7,29	7,22	6,41	6,51	6,5-8,5	6,75	6,18	7,18	6,3	6,5-8,5	6,74	6,88	6,61	6,5	6,5-8,5	7,14	6,53	7,21	7,13	6,5-8,5
Vraie couleur	<5	<5	<5	<5	15,5	<5	<5	<5	<5	15,5	<5	<5	<5	<5	15,5	<5	<5	<5	<5	15,5
Turbidité	5	20	14	330	5	35	12	11	20	5	1,4	3,3	7,2	10	5	27	12	16	77	5
Matières dissoutes	190	200	39	41	1000	50	27	148	29	1000	77	120	77	58	1000	132	122	162	156	1000
Matières en suspensions	<1	4	67	405	-	30	11	<1	15	-	1	15	22	13	-	-	-	-	-	-
Conductivité	31	32,4	5,1	6	-	6,8	4,7	22,2	4,8	-	11,8	19,6	10,7	7,7	-	17,1	16,4	21,2	23,3	-
	Paramètres chimiques et nutriments					Paramètres chimiques et nutriments					Paramètres chimiques et nutriments					Paramètres chimiques et nutriments				
Dureté totale	109	111	9	16	500	15	8	82	10	500	35	72	28	17	500	46	24	59	71	500
Alcalinité	150	150	23	23	-	19	8	98	10	-	50	78	43	22	-	68	14	98	105	-
Nitrates (NO ₃)	0,11	<0,06	0,15	0,2	50	8,11	7,7	4,18	7,28	50	0,73	3,49	2,59	5,64	50	8,76	40,7	0,08	<0,06	50
Nitrites (NO ₂)	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	3	0,05	0,07	0,06	<0,05	3	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	3	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	3
Calcium (Ca ⁺⁺)	25	25	2	2	-	2	1	24	3	-	9	25	4	3	-	6	5	9	12	-
Magnésium (Mg ⁺⁺)	11,5	11,8	1,4	2,5	-	2,4	1,1	5,2	0,6	-	3,2	2,4	4,2	2,2	-	7,8	2,9	8,7	10,2	-
Phosphates (PO ₄)	0,09	0,07	0,13	0,37	-	<0,02	<0,02	0,05	<0,02	-	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	-	-	0,03	-	0,26	-
Chlorures	<0,1	0,7	<0,1	0,4	250	1,2	1,2	0,5	0,7	250	<0,1	0,2	<0,1	1	250	1,3	11,6	<0,1	0,2	250
Sodium (Na)	23	21	3	3,6	200	3,9	2,8	7,4	2	200	6,4	5,5	6,9	4,5	200	17	9,9	19	20	200
Potassium (K)	2	2	1,6	2	-	0,8	1,1	1,4	1,3	-	1	1,5	1	1,2	-	2,2	6,3	2,6	2,6	-
Sulfates (SO ₄)	<1	<1	<1	<1	250	2	<1	2	<1	250	1	1	<1	<1	250	1	<1	1	<1	250
DCO	<25	<25	<25	61	-	<25	<25	<25	<25	-	<25	<25	<25	<25	-	<25	<25	<25	<25	-
DBO ₅	<5	-	<5	-	-	<5	-	<5	-	-	<5	-	<5	-	-	<5	-	<5	-	-
	Métaux lourds					Métaux lourds					Métaux lourds					Métaux lourds				
As (Total - dissout)	<0,002	0,002	<0,002	0,006	0,01	<0,002	0,002	<0,002	0,001	0,01	<0,002	0,002	<0,002	0,002	0,01	<0,002	0,002	<0,002	0,002	0,01
Sb (Total - dissout)	<0,003	-	<0,003	-	0,005	<0,003	-	<0,003	-	0,005	<0,003	-	<0,003	-	0,005	<0,003	-	<0,003	-	0,005
Se (Total)	<0,003	-	<0,003	-	0,01	<0,003	-	<0,003	-	0,01	<0,003	-	<0,003	-	0,01	<0,003	-	<0,003	-	0,01
Hg (Total - dissout)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
Fe (Total)	1	0,7	1,6	4,5	0,3	1,6	0,5	1,7	0,3	0,3	0,2	<0,1	0,8	0,1	0,3	8,2	0,1	4,1	0,7	0,3
Mn (Total)	0,13	0,13	0,05	0,06	0,5	0,02	0,03	0,12	<0,02	0,5	0,02	<0,02	0,03	<0,02	0,5	0,16	<0,02	0,06	0,05	0,5
Cu (Total)	<0,02	<0,02	<0,02	0,03	1	<0,02	<0,02	<0,02	2,53	1	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1
Zn (Total)	0,14	<0,05	0,07	0,08	3	0,06	0,05	0,11	0,05	3	0,08	<0,05	0,06	<0,05	3	0,13	0,06	0,08	0,06	3
Pb (Total)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Cr (Total)	0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,05	0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,05	0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,05	0,03	<0,01	0,01	<0,01	0,05
Ni (Total)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	0,02
Cd (Total)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003
Al (Total)	0,2	<0,03	0,9	3,33	0,2	2,1	1,66	0,58	1,11	0,2	0,18	0,03	0,69	0,08	0,2	0,98	0,45	<0,03	<0,03	0,2
Mo (Total)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-
Co (Total)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-

4-2. Géologie et Minéralisation du gisement

Les formations sont réparties en deux ensembles géologiques (**Figures 2 et 3**): les métasédiments et les intrusions constituées de formations felsiques (granites et dykes felsiques porphyriques). La métasomatose subséquente des formations intrusives a eu pour effets une altération hydrothermale constituée de : séricite-carbonates, silicification et minéralisation aurifère. Cette dernière est dissiminée ou parfois associées aux fractures et aux veinules de quartz-carbonates. Dans les sédiments, les teneurs sont moins élevées et lorsque ceux-ci se trouvent en contact des intrusives, l'altération hydrothermale est beaucoup marquée. De très fortes teneurs sont aussi rencontrées le long des fractures avec de l'or visible. La minéralisation est associée à la pyrite et à l'arsénopyrite [10]. Le gisement de Sissingué est similaire à certains gisements de l'Afrique de l'Ouest [27 - 31].

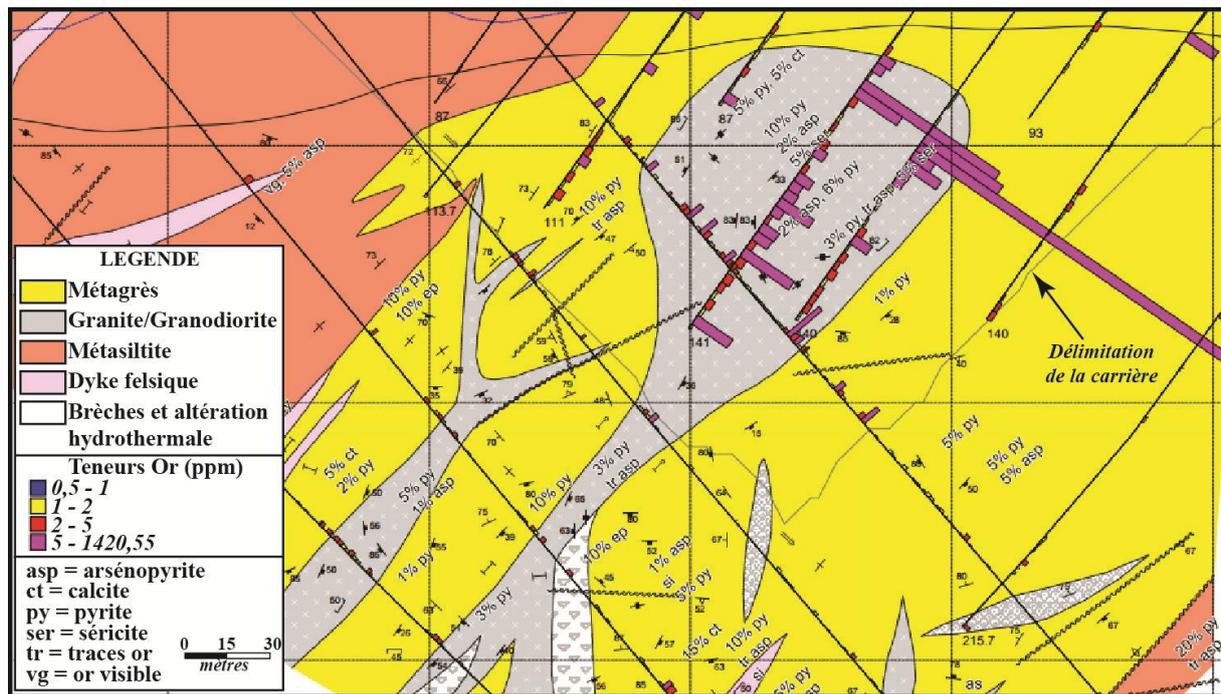


Figure 2 : Corrélation litho-structurale et minéralogique des trous diamanté SD373 et SD377 et des trous RC de la section N 1153200 de Sissingué, modifiée, d'après [10]

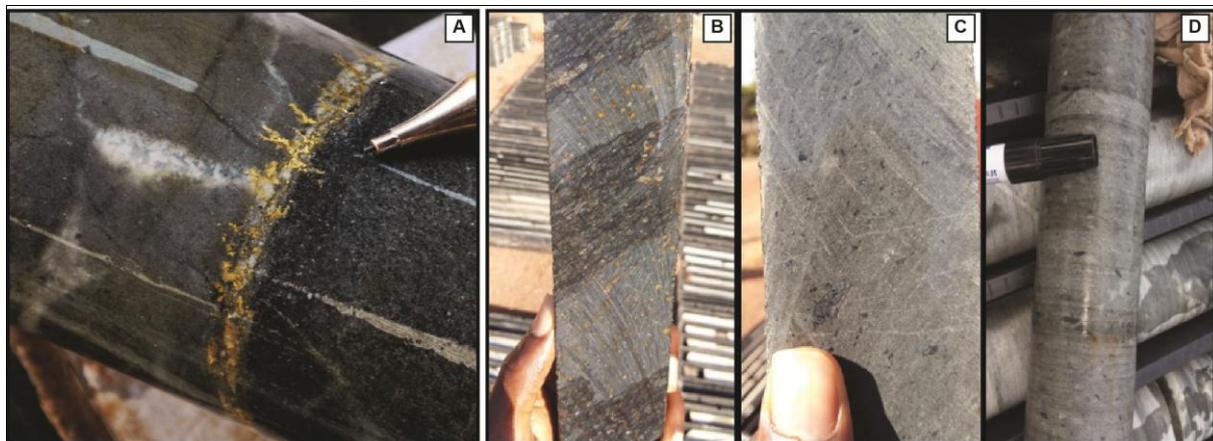


Figure 3 : Veine de quartz-carbonates minéralisée avec or visible (A) et métasédiements riches en pyrite (B; C, D)

4-3. Caractérisation environnementale du gisement

Les tests statiques DMA effectués sur des échantillons des différentes lithologies du gisement, dans les conditions de laboratoire, ont permis de déterminer selon le protocole Australien ARD de Amira International [24], leur aptitude à générer ou non le DMA. Tous les échantillons oxydés ont des teneurs en sulfures (Total-S) inférieures à 0,01 %, à l'exception d'un seul (**Tableau 2**). Les faibles valeurs en sulfures permettent de dire que tous les échantillons oxydés analysés peuvent être classés non acidogènes (NAF). Cela signifie que les rejets oxydés ne constitueront pas de danger en termes de génération de DMA pendant l'exploitation du gisement. La matrice des roches sulfurées contient des carbonates, avec des teneurs parfois élevées (1,5 %), (**Tableau 3**). L'intensité de cette altération hydrothermale carbonatée est restée constante et homogène à travers les différentes lithologies du gisement qu'elles soient proximales ou distales. Les résultats montrent, dans l'ensemble, que les métasédiments sont très souvent classés potentiellement acidogènes (PAF), avec des teneurs en soufre total variant entre 0,62 et 1,4 %. Cependant, d'autres échantillons sont non acidogènes (**Figure 4**), lorsqu'ils contiennent des teneurs très faibles en sulfures. Les résultats obtenus montrent que le DMA est préférentiellement associé aux métasédiments avec des NAPP positifs et des NAGpH en dessous de 4,5, alors que les intrusifs felsiques ont présenté des NAPP négatifs avec des NAGpH au dessus de 4,5. De façon plus détaillée, les silstones apparaissent plus acidogènes comparées aux sandstones. Les granites et dykes felsiques sont non acidogènes. Seuls deux échantillons (02/25) montrent des cas d'incertitudes. Ce sont un granite et un dyke felsique.

Tableau 2 : Résultats acido-basiques DMA des échantillons oxydés - Projet Or Sissingué. EC = Conductivité électrique ; ANC = Capacité nette de Neutralisation d'Acide ; NAPP = Potentiel Net de production d'acide ; AFP = Potentiel de formation d'acide ; NAG = Génération Nette d'Acide ; NAF = Formation on Acidogène ; Nc = Non calculé ; Nm = Non mesuré ; pH-(1:2) et EC-(1-2) correspondent au pH et EC mesurés à partir d'échantillons pâteux préparés avec de l'eau distillée dans les proportions solide/eau 1:2)

Echantillon	Lithologie (quand reconnaissable)	pH (1:2)	EC (1:2) [mS/cm]	Total-S (%)	Total-C (%)	CO3-C (%)	ANC (kgH ₂ SO ₄ /t)	NAPP (kgH ₂ S O ₄ /t)	NAG-pH	AFP
K0016949	Latérite	6,9	0,16	<0,01	0,23	0,15	2	Nc	6,6	NAF
K0016950	Colluvion	6,9	0,076	<0,01	0,23	0,12	3	Nc	6,7	NAF
K0016904	Silstone	5,6	0,026	<0,01	0,10	Nm	2	Nc	6,1	NAF
K0016944	Sandstone/Silstone	5,8	0,011	<0,01	0,09	Nm	1	Nc	5,8	NAF
K0016916	Silstone	6,5	0,059	<0,01	0,06	Nm	1	Nc	6,4	NAF
K0016922	Silstone	6,4	0,028	<0,01	0,02	Nm	1	Nc	6,3	NAF
K0016813	Silstone	6,9	0,077	<0,01	0,04	Nm	10	Nc	6,8	NAF
K0016923	Silstone	7,2	0,029	<0,01	0,04	Nm	4	Nc	7,1	NAF
K0016934	Silstone	5,9	0,014	<0,01	0,05	Nm	<1	Nc	6,5	NAF
K0016921	Silstone	6,9	0,061	<0,01	0,02	Nm	8	Nc	6,7	NAF
K0016939	Silstone/Sandstone	7,2	0,056	<0,01	0,04	Nm	10	Nc	6,8	NAF
K0016931	Granite Siltstone	7,0	0,047	<0,01	0,04	Nm	8	Nc	6,8	NAF
K0016929	Granite	7,2	0,055	<0,01	0,02	Nm	5	Nc	6,8	NAF
K0016902	Dyke felsique	7,1	0,095	0,03	0,02	Nm	4	Nc	7,1	NAF
K0016903	Dyke felsique	7,0	0,031	<0,01	0,2	0,02	9	Nc	6,7	NAF

Tableau 3 : Résultats acido-basiques DMA pour les rejets sulfurés - Projet Or Sissingué. EC= Conductivité électrique ; ANC= Capacité nette de Neutralisation d'Acide ; NAPP= Potentiel Net de production d'acide ; AFP= Potentiel de formation d'acide ; NAG= Génération Nette d'Acide ; NAF= Formation on Acidogène ; Nc= Non calculé ; Nm=Non mesuré ; pH-(1:2) et EC-(1-2) correspondent au pH et EC mesurés à partir d'échantillons pâteux préparés avec de l'eau distillée dans les proportions solide/eau 1:2)

Echantillon	Lithologie (quand reconnaissable)	pH (1:2)	EC (1:2) [mS/cm]	Total-S (%)	Total-C (%)	CO3-C (%)	ANC (kgH ₂ S O ₄ /t)	NAPP (kgH ₂ S O ₄ /t)	NAG-pH	AFP
K0016926	métasiltite	8,5	0,20	1,2	0,31	0,19	32	4,7	2,9	PAF
K0016945	métasiltite	8,5	0,11	0,74	0,66	0,54	42	19	4,0	PAF
K0016920	métasiltite	8,4	0,15	0,62	0,10	0,82	8	11	3,5	PAF
K0016953	sandstone	8,3	0,23	1,4	1,3	0,59	41	1,9	3,6	PAF
K0016959	sandstone	8,3	0,18	0,97	1,1	0,34	41	11	2,9	PAF
K0016957	sandstone	8,3	0,13	0,90	0,66	0,41	24	3,0	3,5	PAF
K0016951	sandstone	8,4	0,17	0,76	0,52	0,93	34	10	8,0	PAF
K0016941	granite	8,3	0,11	0,32	0,94	0,36	55	-45	9,2	NAF
K0016940	granite	8,5	0,19	0,14	0,49	1,2	29	-24	8,7	NAF
K0016935	granite	8,5	0,26	0,74	1,3	1,0	52	-29	8,7	NAF
K0016936	granite	8,4	0,13	0,74	1,1	0,16	40	-17	8,6	NAF
K0016911	granite/dyke	8,4	0,19	0,65	0,28	0,73	36	-16	9,0	NAF
K0016909	granite	8,3	0,091	0,37	0,82	1,0	31	-19	6,6	NAF
K0016908	granite	8,2	0,18	0,36	1,2	0,32	38	-26	9,0	NAF
K0016927	granite	8,3	0,095	0,38	0,38	0,43	27	-15	9,0	NAF
K0016910	granite	8,3	0,099	0,21	0,46	0,49	36	29	10,5	UC
K0016942	granite	8,4	0,16	0,11	0,55	1,4	52	-48	10,5	NAF
K0016970	granite	8,4	0,20	0,10	1,5	0,88	120	-110	9,0	NAF
K0016955	granite	8,3	0,17	0,73	1,2	0,27	61	-39	4,0	NAF
K0016959	granite	8,4	0,20	0,43	0,463	0,75	28	-15	8,4	NAF
K0016965	granite/dyke	8,3	0,15	0,38	1,0	0,50	49	-37	8,05	NAF
K0016906	dyke felsique	8,2	0,10	0,73	0,91	0,63	51	-29	8,08	NAF
K0016938	dyke felsique	8,5	0,14	0,33	0,68	0,89	69	-58	9,5	NAF
K0016952	dyke felsique	8,2	0,15	2,0	1,1	0,87	55	-6,2	8,5	NAF
K0016954	dyke felsique	8,3	0,23	1,5	1,1	1,1	58	12	8,0	UC
Echantillon	Lithologie (quand reconnaissable)	pH (1:2)	EC (1:2) [mS/cm]	Total-S (%)	Total-C (%)	CO3-C (%)	ANC (kgH ₂ S O ₄ /t)	NAPP (kgH ₂ S O ₄ /t)	NAG-pH	AFP
K0016926	métasiltite	8,5	0,20	1,2	0,31	0,19	32	4,7	2,9	PAF
K0016945	métasiltite	8,5	0,11	0,74	0,66	0,54	42	19	4,0	PAF
K0016920	métasiltite	8,4	0,15	0,62	0,10	0,82	8	11	3,5	PAF
K0016953	sandstone	8,3	0,23	1,4	1,3	0,59	41	1,9	3,6	PAF
K0016959	sandstone	8,3	0,18	0,97	1,1	0,34	41	11	2,9	PAF
K0016957	sandstone	8,3	0,13	0,90	0,66	0,41	24	3,0	3,5	PAF
K0016951	sandstone	8,4	0,17	0,76	0,52	0,93	34	10	8,0	PAF
K0016941	granite	8,3	0,11	0,32	0,94	0,36	55	-45	9,2	NAF
K0016940	granite	8,5	0,19	0,14	0,49	1,2	29	-24	8,7	NAF
K0016935	granite	8,5	0,26	0,74	1,3	1,0	52	-29	8,7	NAF
K0016936	granite	8,4	0,13	0,74	1,1	0,16	40	-17	8,6	NAF
K0016911	granite/dyke	8,4	0,19	0,65	0,28	0,73	36	-16	9,0	NAF
K0016909	granite	8,3	0,091	0,37	0,82	1,0	31	-19	6,6	NAF
K0016908	granite	8,2	0,18	0,36	1,2	0,32	38	-26	9,0	NAF
K0016927	granite	8,3	0,095	0,38	0,38	0,43	27	-15	9,0	NAF
K0016910	granite	8,3	0,099	0,21	0,46	0,49	36	29	10,5	UC
K0016942	granite	8,4	0,16	0,11	0,55	1,4	52	-48	10,5	NAF
K0016970	granite	8,4	0,20	0,10	1,5	0,88	120	-110	9,0	NAF
K0016955	granite	8,3	0,17	0,73	1,2	0,27	61	-39	4,0	NAF
K0016959	granite	8,4	0,20	0,43	0,463	0,75	28	-15	8,4	NAF
K0016965	granite/dyke	8,3	0,15	0,38	1,0	0,50	49	-37	8,05	NAF
K0016906	dyke felsique	8,2	0,10	0,73	0,91	0,63	51	-29	8,08	NAF
K0016938	dyke felsique	8,5	0,14	0,33	0,68	0,89	69	-58	9,5	NAF
K0016952	dyke felsique	8,2	0,15	2,0	1,1	0,87	55	-6,2	8,5	NAF
K0016954	dyke felsique	8,3	0,23	1,5	1,1	1,1	58	12	8,0	UC

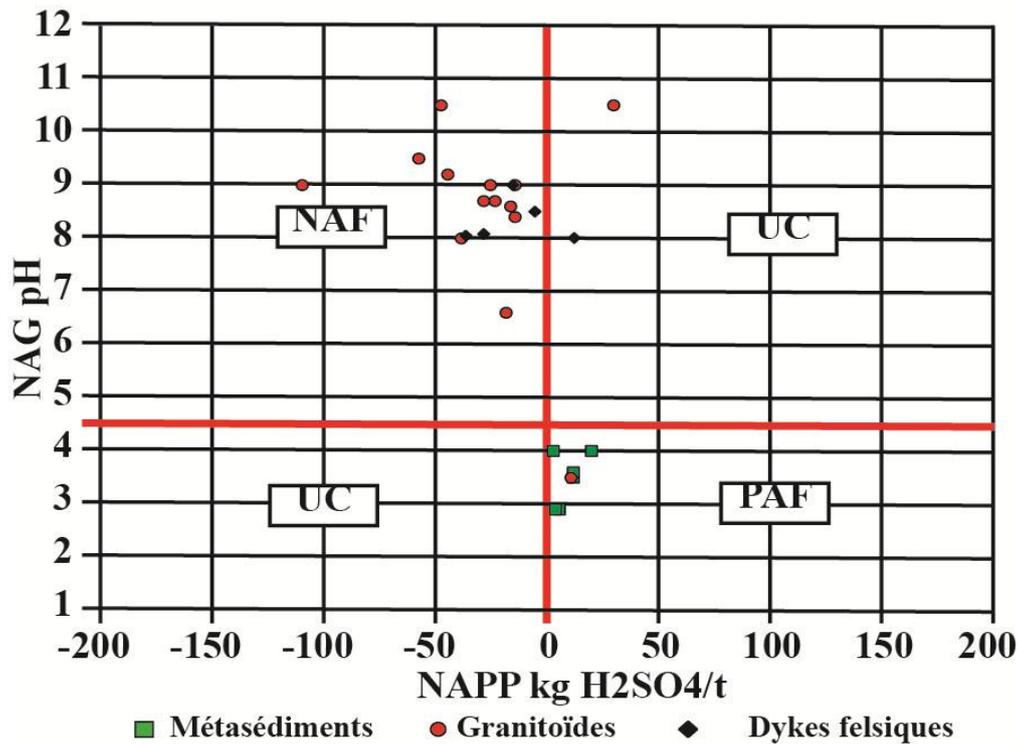


Figure 4 : Diagramme de classification géochimique [24], appliqué aux échantillons sulfurés de Sissingué

5. Modélisation géo-environnementale

Les données pétrographiques, minéralogiques et les tests géochimiques statiques DMA permettent d'élaborer un modèle géologique 3D du gisement. Ce modèle présente la répartition spatiale des différents composants du gisement et leur signature environnementale : Formations Potentiellement Acidogènes (PAF) et Formations Non Potentiellement Acidogènes (NAF). Cette différenciation est faite à partir du diagramme d'interprétation des acido-basiques des résultats des différents tests statiques réalisés sur les échantillons, comparativement à d'autres études [24, 32, 33] ; (Figure 5).

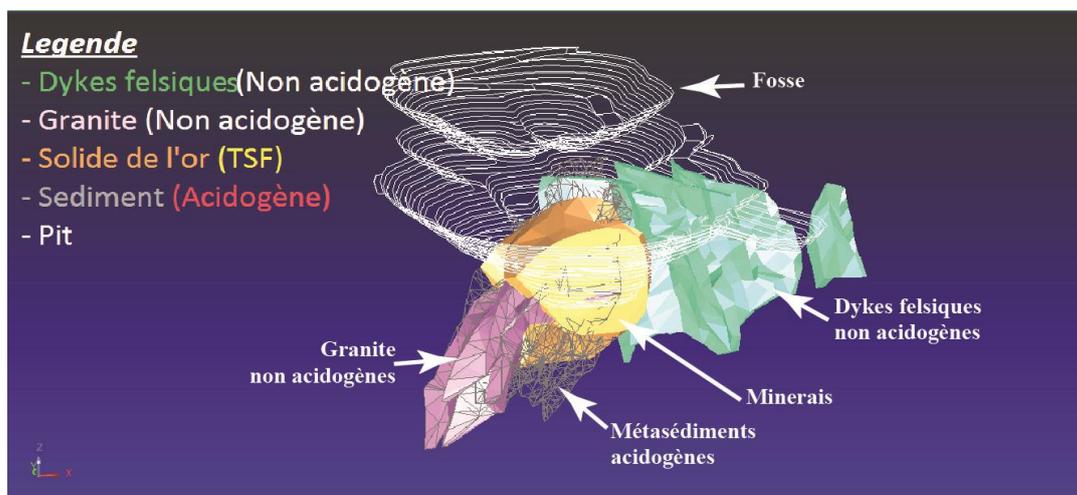


Figure 5 : Modèle géo-environnemental 3D du gisement. Les rejets oxydés sont non acidogènes et représentés par le vide dans la fosse

6. Conclusion

Au terme de nos travaux, les résultats permettent de caractériser le gisement de Sissingué du point de vue géologique et d'élaborer un modèle géologique 3D. Au plan pétrographique, les formations géologiques sont constituées de métasédiments (sandstones, silstones, conglomérats) et de formations felsiques (granites et dykes porphyriques). A partir des résultats des tests géochimiques statiques, les formations sédimentaires du gisement sont préférentiellement acidogènes, alors que les granitoïdes et dykes porphyriques à feldspath, tous intrusifs, sont non acidogènes. Malgré l'abondance de sulfures (pyrite et arsénopyrites) dans ces granitoïdes, ces formations restent globalement non acidogènes, car leur capacité de neutralisation liée aux minéraux carbonatés contenus dans leur matrice est suffisante pour neutraliser toute l'acidité produite par l'oxydation des minéraux sulfurés. Les minéraux neutralisants les plus efficaces sont les carbonates, plus particulièrement la calcite, la dolomite et l'ankérite. Les rejets miniers issus de ces granitoïdes, s'ils sont éventuellement exposés à l'air libre ne constitueront pas de danger en termes de DMA. Par contre, les sédiments doivent faire l'objet d'une attention particulière, car sont potentiellement acidogènes. Les caractéristiques initiales des eaux de surface et souterraines respectant les normes internationales, des précautions sont donc à prendre afin de limiter les risques de pollution environnementale issue des DMA. Des solutions pour gérer les résidus miniers sont proposés ailleurs sur d'anciens sites miniers [34, 35]

Remerciements

Cette publication a été possible grâce au concours de l'École Doctorale Polytechnique et du Centre d'Excellence Africain Mine et Environnement Minier (CEA MEM) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire. Nos remerciements s'adressent particulièrement à Monsieur Colin Careson, Directeur exécutif de Perseus, pour avoir accepté la prise en charge financière des travaux, et Madame Chantelle De Lahaye, Directrice du développement durable de Perseus pour avoir mis à disposition les données.

Références

- [1] - K. D. FERGUSON, P. M. ERICKSON, " Pre-Mine Prediction of Acid Mine Drainage", In: Salomons W., Förstner U. (eds) Environmental Management of Solid Waste. Springer, Berlin, Heidelberg, (1988) 24 - 43
- [2] - M. BENZAAZOUA, B. BUSSIÈRE, M. KONGOLO, J. MCLAUGHLIN, P. MARION, " Environmental desulphurization of four canadian mine tailings using froth flotation", *International Journal of Mineral Processing*, 6 (2000) 57 - 74
- [3] - R. W. HAMMACK, G. R. WATZLAI, "The effect of oxygen on pyrite oxidation", *Proceedings America Society of Mining and Reclamation*, (1990) 257 - 264
- [4] - M. AUBERTIN, R. P. CHAPUIS, "Considération hydro géotechniques pour L'entreposage des résidus miniers dans le nord-ouest du Québec", *Comptes rendus du Colloque sur la réduction et le drainage des effluents acides générés par l'activité minière*, Montréal, 3 (1991) 1 - 22
- [5] - M. DINESH, C. SUBHASH, "Removal and Recovery of Metal Ions from Acid Mine Drainage Using Lignite - a Low Cost Sorbent", *Journal of Hazardous Materials*, 137 (3) (2006) 1545 - 1553
- [6] - S. G. UDAYABHANU, B. PRASAD, "Studies on Environmental Impact Of Acide Mine Drainage Generation and its Treatment: An Appraisal", *Indian Journal of Environmental Protection*, 30, 11 (2010) 953 - 967

- [7] - L. FERIS, L. J. KOTZE, "The regulation of acid mine drainage in South Africa: law and governance perspectives", *Potchefstroom Electronic Law Journal / Potchefstroomse Elektroniese Regsblad*, 17 (5) (2014) 2105 - 2163
- [8] - R. L. P. KLEINMAN, D. A. CRERAR, R. R. PACELLI, "Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation", *Min Eng*, 33 (3) (1981) 300 - 305
- [9] - A. AKCIL, S. KOLDAS, "Acid Mine Drainage (AMD) : causes, treatment and case studies", *Journal of Cleaner Production*, 14 (2006) 1139 - 1145
- [10] - PERSEUS, "Technical Report, Tengrela Gold Project, Ivory Coast, Form 43-101", (2010) 256 p.
- [11] - M. P. FILION, K. FERGUSON, "Acid mine drainage research in Canada", *Compte rendu de Biominet, Energie mines et ressources canada, CANMET*, (1989) 28 - 44
- [12] - J. L. JAMBOR, D. W. BLOWES, "Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste", *Short Course Handbook Mineralogical Association of Canada, Special Vol. 22*, (1994) 438 p.
- [13] - N. TASSE, D. GERMAIN, "Caractérisation géochimique du parc de résidus miniers", *Canadian Malartic - Rapport final, Ministère des Ressources Naturelles, Service de développement minier*, (1994) 205 p.
- [14] - M. AUBERTIN, R. P. CHAPUIS, M. AACHIB, B. BUSSIERE, J. F. RICARD, L. TREMBLAY, "Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers", *Rapport MEND/NEDEM 2.22.2a*, (1995)
- [15] - D. K. NORDSTROM, C. N. ALPERS, "Geochemistry of acid mine waters. Chapter 6", In: *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits*, G. S. Plumlee and M. J. Logsdon, eds., *Rev. Econ. Geol.*, V 6A, Soc. Geol. Inc., Littleton, CO., (1999)
- [16] - M. AUBERTIN, B. BUSSIERE, B. BERNIER, "Environnement et gestion des rejets miniers. Manuel sur cédérom", *Presses Internationales de Polytechnique, Corporation de l'Ecole Polytechnique de Montréal*, (2002)
- [17] - G. LUDIVINE, "Impact des mines sur la contamination des eaux et des sédiments du bassin amazonien bolivien", *Stage Stagiaire IRD La Paz, Bolivie "Expérience Significative à l'Étranger, un an en Bolivie"*, *Ecole des Mines d'Alès, France*, (2006) 78 p.
- [18] - E. SORRENTI, "Etude de la Passivation de la Pyrite: Chimie de Surface et Réactivité", *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine*, (2007) 246 p.
- [19] - M. L. RÄISÄNEN, P. M. KAUPPILA, T. MYÖHÄNEN, "Suitability of static tests for acid rock drainage assessment of mine waste rock", *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 82 (2010) 101 - 111
- [20] - S. GOIX, "Origine et impact des pollutions liées aux activités minières sur l'environnement et la santé, cas de Oruro (Bolivie). Interfaces continentales, environnement", *Thèse Université Paul Sabatier - Toulouse III*, (2012) 306 p.
- [21] - O. BAMBA, S. PELEDE, A. SAKO, N. KAGAMBEGA, M. Y. W. MININGOU, "Impact de l'artisanat minier sur les sols d'un environnement agricole aménagé au Burkina Faso", *Édité par J.S.C.*, 13, (2013) 1 - 11
- [22] - K. K. YOBOUE, "La question de la remédiation environnementale résultant de l'exploitation artisanale, à petite échelle du diamant : cas de l'Union du Fleuve Mano", *Thèse Géoscience Environnement Toulouse (GET), URM 5563*, (2017) 272 p.
- [23] - H. BOUZAHZAH, M. BENZAAZOUA, B. BUSSIÈRE, B. PLANTE, "Prediction of Acid Mine Drainage : Importance of Mineralogy and the Test Protocols for Static and Kinetic Tests. Mine Water and the Environment", 33 (2014) 54 - 65
- [24] - AMIRA, "ARD Test Handbook. Project P387A, Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage", *AMIRA international May 2002*, (2002) 42 p.
- [25] - CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUEBEC. "Détermination du pouvoir neutralisant, du potentiel de génération d'acide et du potentiel acidogène d'un solide", *MA. 110-ACISOL 1.0, Rév. 4, Ministère du Développement durable et de la Lutte contre les changements climatiques*, (2014) 17 p.

- [26] - CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUEBEC, "Lignes directrices concernant les travaux analytiques en chimie, DR-12-SCA-01, Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques", (2018) 24 p.
- [27] - J. P. MILÉSI, P. LEDRU, J.-L. FEYBESSE, A. DOMMANGET, E. MARCOUX, "Early Proterozoic ore deposits and tectonics of the Birimian Orogenic belt, West Africa", *Precambrian Res.*, 58 (1992) 305 - 344
- [28] - R. J. GOLDFARB, A. S. ANDRÉ-MAYER, S. M. JOWITT, G. M. MUDD, "West Africa : The World's Premier Paleoproterozoic Gold Province", *Economic Geology*, 112 (2017) 123 - 143
- [29] - Q. MASUREL, J. MILLER, K. A. A. HEIN, E. HANSSEN, N. THÉBAUD, S. ULRICH, J. KAISIN, S. TESSOUGUE, "The Yatela gold deposit in Mali, West Africa : The final product of a long-lived history of hydrothermal alteration and weathering", *Journal of African Earth Sciences*, 113 (2016) 73 - 87
- [30] - Q. MASUREL, N. THÉBAUD, J. MILLER, S. ULRICH, K. A. A. HEIN, G. CAMERON, D. BÉZIAT, O. BRUGUIER, J. A DAVIS, "Sadiola Hill: A World-Class Carbonate-Hosted Gold Deposit in Mali, West Africa", *Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology*, 112, (2017) 23 - 47
- [31] - D. Y. TRAORE, "Etude métallogénique du district aurifère de Syama (Mali) : analyse comparative de gisements situés sur une même structure lithosphérique éburnéenne", Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, *Géologie et Métallogénie*, (2017) 199 p.
- [32] - W. STEWART, S. MILLER, R. SMART, A. GERSON, J. E. THOMAS, W. SKINNER, G. LEVAY, R. SCHUMANN, "Evaluation of the Net Acid Generation (NAG) Test for Assessing the Acid Generating Capacity of Sulphide Minerals", *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock drainage (Cairns, 12 -18th July 2003)*, (2003) 617 - 625
- [33] - W. STEWART, S. MILLER, R. SMART, "Advances in acid rock drainage (ARD) characterization of mine wastes", 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), March 26-30, 2006, St. Louis MO. R.I. Barnhisel (ed.) Published by the American Society of Mining and Reclamation (ASMR), 3134 Montavesta Road, Lexington, KY 40502, (2006) 2098 - 2119
- [34] - M. N. V. PRASAD, P. J. DE CAMPOS, F. SUBODH ; K. MAITI, "Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation, 1st Edition", Elsevier, (2018) 730 p.
- [35] - R.I JAIN, " Environmental Impact of Mining and Mineral Processing, 1st Edition; Management, Monitoring, and Auditing Strategies", Butterworth-Heinemann, (2015) 322 p.