

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL - Faculté des bioingénieurs

**« REHABILITATION D'UN SITE MINIER DEGRADE DU SECTEUR DE BETARE-
OYA (EST CAMEROUN) »**



BELLA ATANGANA Marie Sorella (9468-18-00)

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES
PAYS EN DEVELOPPEMENT**

Filière Eau et sol

ANNEE ACADEMIQUE 2018-2019

REDIGE SOUS LA DIRECTION DE Alain HANSON

LECTEUR 1 : Amandine LIENARD

LECTEUR 2 : Bruno DELVAUX

Copyright © « *Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège et de l'Université catholique de Louvain.* * L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULiège et/ou de l'UCL ».

"Le présent document n'engage que son auteur"

Auteur du présent document : Marie Sorella BELLA ATANGANA

Email : mariesorella@yahoo.fr

DEDICACE

A ma famille !

REMERCIEMENTS

Je remercie l'Eternel Dieu pour avoir permis tout ceci.

Je remercie sincèrement toutes les personnes et les organismes qui de manière directe ou indirecte ont contribué à la réalisation de ce travail :

- L'Académie de Recherche de l'Enseignement Supérieur (ARES) pour la bourse d'étude ayant permis de suivre la formation qui aboutit la réalisation de ce mémoire.
- Mon promoteur de travail de fin d'étude M. Alain HANSON pour la supervision de ce travail, les conseils et les encouragements.
- Le CAPAM et tout particulièrement son Sous-Directeur M. Serge Lionel NABONG, le Site Manager de Bétaré-Oya M. Casimir, et M. NDOKO Agent du CAPAM pour avoir facilité le travail de terrain.
- Tout le corps enseignant des Universités de Liège et Catholique de Louvain-La-Neuve pour les enseignements procurés et leur disponibilité.
- Les Coordinateurs du Master de Spécialisation en Science et Gestion de L'Environnement dans les Pays en Développement, M. Bernard TYCHON (ULG) et M. Charles BIELDERS (UCL) pour le suivi et l'encadrement tout au long de la formation.
- Tous mes amis de promotion pour la bonne ambiance, l'entraide, la solidarité et les encouragements mutuels durant ce séjour loin de chez nous.
- La famille ASSENGUE ESSOLA Placide pour le soutien et leur accueil chaleureux.
- La famille ATANGANA MBONO M. J. pour le soutien constant.
- M. Roland ESSAMA pour sa disponibilité et son aide durant la mission de collecte de données.
- Martin Gailly pour son soutien et ses encouragements.

Financement : l'auteur remercie

- L'Académie de Recherche de l'Enseignement Supérieur (ARES) pour la bourse d'étude ayant permis de suivre la formation qui aboutit la réalisation de ce mémoire.
- Le Fond Elisabeth et Amélie (FEA) pour le financement de la mission de collecte de données sur le terrain.

A tous, merci infiniment.

RESUME

Le district aurifère de Bétaré-Oya dans la région de l'Est Cameroun attire de nombreux artisans miniers et sociétés minières. Les formations géologiques à l'origine de cette attraction sont liées à une minéralisation aurifère issue de veines de quartz sulfurées contenant de l'or, de la pyrite, de la galène, de la chalcopryrite et de l'hématite. Le potentiel minier en or de la région est estimé à 20 tonnes. Les activités d'exploitation de l'or modifient considérablement le relief et sont la cause de nombreux accidents dans la région (éboulement de terrain, bétail qui tombent dans les trous, accidents divers). L'exploitation qui au début était pratiquée de manière artisanale par des techniques traditionnelles a recours aujourd'hui à des substances chimiques qui polluent l'environnement et notamment les eaux de surface du secteur. Les analyses des paramètres physiques effectuées *in situ* ont montré que les eaux sont légèrement acides à acides ($5,4 < \text{pH} < 6,6$), faiblement minéralisées et conductrices ($10 < \text{EC} < 80 \mu\text{S}/\text{cm}$), avec un taux d'oxygène très faible ($0 < \% \text{ de saturation} < 2$). La turbidité est moyenne (17,2 à 936 NTU), les TDS sont faibles ($0 < \text{TDS} < 30 \text{ mg/l}$) et la température variant de 24,8 à 31 °C. L'analyse des échantillons d'eau de surface par l'ICP-OES a révélé des valeurs de concentrations hautement supérieures à la norme OMS 2011 pour certains éléments, notamment Al, Fe, Mn, Hg, V et S. Le calcul de l'indice de qualité des eaux (IQE) a permis de classer les eaux analysées dans l'intervalle 0-44 qui correspond à des eaux comportant des concentrations s'écartant généralement des niveaux naturels ou souhaitables. L'indice de pollution des métaux lourds calculé a permis de préciser que Al, le Fe, le Mn, le Hg, le V et le S sont à l'origine de la pollution constatée. La phytoremédiation a été choisie pour la réhabilitation des sites abandonnés et des méthodes d'exploitations respectueuses de l'environnement sont préconisées pour les sites en activité. Des espèces hyper-accumulatrices de métaux lourds ont été identifiées pour le traitement de pollution dans ce travail. Le choix de la méthode s'est basé sur le coût moindre, la facilité d'implantation et le temps imparti pour sa mise en place.

Mots clés : réhabilitation, métaux lourds, phytoremédiation, orpaillage, sites abandonnés, Bétaré-Oya.

ABSTRACT

The gold district of Bétaré-Oya in the eastern region of Cameroon attracts many artisanal miners and mining companies. The geological formations responsible for this attraction are related to gold mineralization from sulphide quartz veins containing gold, pyrite, galena, chalcopyrite and hematite. The gold mining potential of the region is estimated at 20 tons. Gold mining activities significantly alter terrain and are the cause of many accidents in the region (landslide, cattle falling into holes, various accidents). The exploitation which at the beginning was practiced by traditional techniques uses today chemical substances which pollute the environment and in particular the surface waters of the sector. The analyzes of the physical parameters carried out in situ showed that the waters are slightly acid to acid ($5.4 < \text{pH} < 6.6$), weakly mineralized and conductive ($10 < \text{EC} < 80 \mu\text{S} / \text{cm}$), with a rate of very low oxygen ($0 < \% \text{ saturation} < 2$). The turbidity is average (17.2 to 936 NTU), the TDS are low ($0 < \text{TDS} < 30 \text{ mg} / \text{l}$) and the temperature varies from 24.8 to 31 ° C. The analysis of surface water samples by ICP-OES revealed concentration values well above the WHO 2011 standard for some elements, including Al, Fe, Mn, Hg, V and S. The calculation of the The Water Quality Index (WQI) classifies the analyzed waters in the range 0-44 which corresponds to waters with concentrations generally deviating from natural or desirable levels. The calculated heavy metal pollution index indicated that Al, Fe, Mn, Mn, Hg, V and S are at the origin of the pollution observed. Phytoremediation has been chosen for the rehabilitation of abandoned sites and environmentally friendly farming methods are recommended for active sites. Hyperaccumulator species of heavy metals have been identified for the treatment of pollution in this work. The choice of the method was based on the lower cost, the ease of implementation and the time allotted for its implementation.

Key words: rehabilitation, heavy metals, phyto-remediation, gold panning, abandoned mining sites, Betaré-Oya.

Table des matières

Table des matières

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
Table des matières	v
Liste des figures :	vii
Liste des tableaux :	viii
Liste des abréviations :	ix
INTRODUCTION	1
I- Contexte	1
II- Problématique	2
III- Objectifs	3
1- Objectif général	3
2- Objectifs spécifiques	3
IV- Structure du travail	3
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE	4
I- GENERALITES SUR L'EXPLOITATION MINIERE	4
1- Etapas d'un projets d'exploitation minière	4
2- Exploitation minière semi-mécanisée de l'or	4
3- Exploitation minière artisanale traditionnelle	5
II- IMPACTS DE L'EXPLOITATION MINIERE	5
1- Impacts socio-économique	5
2- Impacts sur l'environnement	6
3- Impacts sur la santé humaine	6
III- LEGISLATION MINIERE ET EXPLOITATION AU CAMEROUN	6
1- Législation minière de première génération	6
2- Législation minière de seconde génération	7
IV- GENERALITES SUR LA REHABILITATION DES SITES MINIERES	7
1- Types de réhabilitation	7
2- Techniques de réhabilitation	9
3- Caractérisation des polluants	15

4- Enjeux à protéger	17
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE.....	19
I- PRESENTATION DU SITE.....	19
1- Localisation	19
2- Topographie	20
3- Climat	20
4- Hydrographie.....	21
5- Géologie et pédologie.....	22
METHODOLOGIE	23
1- Matériel de terrain	23
2- Méthode de collecte de données.....	24
3- Echantillonnage	24
CHAPITRE III : PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION	29
I- PARAMETRES PHYSIQUES IN-SITU	29
1- Caractérisation du paysage	29
2- Présentation	30
3- Interprétation.....	32
II- ANALYSES DES METAUX LOURDS.....	35
1- Interprétation.....	36
2- Indice de qualité des eaux (IQE)	42
3- Indice de pollution des métaux lourds (Heavy metal Pollution Index HPI).....	44
CHAPITRE V : DISCUSSION	46
I- CARACTERISATION PHYSIQUES DES EAUX	46
II- POLLUTION PAR LES METAUX LOURDS	46
III- REHABILITATION	48
1. Sites en activité.....	48
2. Sites abandonnés.....	49
4- Gestion des plantes après dépollution.....	53
CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS	54
BIBLIOGRAPHIE.....	56
ANNEXES.....	60

Liste des figures :

Figure 1 : Les quatre principales catégories de traitement des sites pollués (Bernheim, 1999).....	8
Figure 2 : principe de fonctionnement des barrières réactives	10
Figure 3 : principe de désorption thermique ex situ (gauche) et in situ (droite) (Roudier, 2004).	11
Figure 4 : principe de l'électrocinétique (Roudier, 2004).....	12
Figure 5 : principe de l'excavation (Roudier, 2004).	12
Figure 6 : principe de lavage in situ (Roudier, 2004).	13
Figure 7 : principe de la phytoremédiation (Roudier, 2004).....	14
Figure 8 : Carte de localisation de la zone d'étude	19
Figure 9 : topographie de la zone d'étude	20
Figure 10 : carte hydrographique de la zone d'étude	21
Figure 11 : Carte géologique de la zone d'étude	23
Figure 12 : Spectrométrie à Emission Optique couplée à l'ICP (8000 ICP-OES-IITA)	28
Figure 13 : sites abandonnés	29
Figure 14 : sites en activités	29
Figure 15 : profil lithologique type à Bétaré-Oya	30
Figure 16 : Carte de prélèvement de la zone d'étude	31
Figure 17 : Paramètres physiques (Ph, % de saturation O2 et température) dans les échantillons.....	34
Figure 18 : Paramètres physiques (TDS, CE et turbidité) dans les échantillons	34
Figure 19 : échantillon BOCE 1	37
Figure 20 : échantillon BOCE 2	37
Figure 21 :échantillon BOCE 3	38
Figure 22 : échantillon BOCE 4	38
Figure 23 : échantillon BOCE 5	39
Figure 24 : échantillon BOCE 6	39
Figure 25 : échantillon BOCE 7	40
Figure 26 : échantillon BOCE 8	40
Figure 27 : échantillon BOF	40
Figure 28 : échantillon BOPO1	41
Figure 29 : éléments à concentrations inférieurs aux seuils de l'OMS (2011).	41
Figure 30 : éléments à concentrations supérieurs aux seuils de l'OMS (2011).	42

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Classification des techniques de traitements des sites (Simonot et Croze, 2008).....	9
Tableau 2 : récapitulatif de la campagne d'échantillonnage.....	25
Tableau 3 : résultats d'analyses des paramètres physiques in-situ.....	32
Tableau 4 : résultats d'analyses des métaux lourds	35
Tableau 5 : Classification des valeurs de l'indice de qualité des eaux.....	43
Tableau 6 : Indices de qualité des eaux par échantillon	44
Tableau 7 : Indice de pollution par les métaux lourds (HPI).....	45

Liste des abréviations :

Aw : Climat tropical de savane A = climat de type tropical, w = climat de la savane (classification climatique de Köppen).

CAPAM : Cadre d'Appui et de Promotion de l'Activité Minière.

CE : Conductivité électrique.

FMI : Fond Monétaire International.

GICAMINES : Groupe d'Initiative Commune des Artisans Miniers.

HPI : Heavy Metal Index pour Indice de Métaux Lourds.

IITA Cameroon : (International Institut of Tropical Agriculture – Cameroun Station).

IQE : Indice de Qualité des Eaux.

MDDEP : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (Québec).

MES : Matières En Suspension.

NGB : Natural Geochemical Background ou Fond Géochimique Naturel en français (FGN).

NTU : c'est la méthode néphélométrique normalisée pour mesurer la turbidité de l'eau.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

ONG : Organisation Non Gouvernementale.

pH : Potentiel d'hydrogène.

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

PRECASEM : Projet de REnforcement des CAPacites dans le SEcteur Minier.

RCA : République Centre Africaine.

TDS/STD : Total Dissolves Solides ou Solides Totaux Dissous.

VIH/SIDA : Virus de l'Immuno Déficience Humaine / Syndrome Immuno Déficitaire Acquis.

INTRODUCTION

I- Contexte

Les institutions internationales (FMI, Banque Mondiale) ont identifié le secteur minier comme potentiel levier économique pour sortir les pays du Sud de la pauvreté et de l'endettement (Thomas, 2013). On assiste dès lors à un boom minier dans les années 1990-2000 et l'exploitation des ressources naturelles devient un secteur d'activité essentiel pour de nombreux pays en développement dans le monde (Dialga, 2013). Le secteur minier constitue un moteur de croissance permettant la création d'emplois et l'accroissement des recettes fiscales des Etats, contribuant ainsi à leurs souverainetés. Le Cameroun tout entier regorge de ressources minières (diamant, fer, or, bauxite, uranium, cobalt, rutile, etc.) et la région de l'Est en est le chef-lieu. L'or est principal minéral sollicité dans cette zone et son exploitation y est semi-mécanisée ou artisanale (PRECASEM, 2019). Il est alors question de rendre les cadres réglementaires de l'activité minière plus attractifs pour les investisseurs étrangers mais aussi respectueux des normes internationales (processus de Kimberley, ITIE, etc.) et des principes du développement durable (Himbé, 2017) : on observe des réformes de codes miniers dans tous les pays concernés. Le Cameroun n'est pas en marge de ces réformes. En 2016, les nouveaux textes de lois régissant le code minier sont promulgués, ils seront connus sous le nom de la « Loi Gbwaboubou » (Himbé, 2017). Elle apporte un vent nouveau qui vise l'amélioration des conditions de gouvernance dans le secteur minier camerounais notamment avec en ce qui nous concerne la création d'organismes de mise en œuvre de la politique minière. Parmi les innovations figure « la création d'un Fond de Restauration, de réhabilitation et de fermeture des sites miniers et des carrières » (Himbé, 2017).

La réhabilitation est l'« ensemble d'opérations (réaménagement, traitement de dépollution, confinement, résorption des déchets, contrôles institutionnels...) effectuées en vue de rendre un site apte à un usage donné » (Vandamme, 2012). Sa mise en place fait appel à des nombreuses disciplines qui font intervenir les sciences naturelles, juridiques et économiques et sociales (Vandamme, 2012). Dans le secteur minier, la réhabilitation intervient lorsque la pollution du milieu est avérée. Le dictionnaire Larousse définit la pollution comme étant la « dégradation d'un milieu naturel par des substances chimiques, des déchets industriels ou ménagers » (Vandamme, 2012). La mine peut conduire au développement mais elle est malheureusement à l'origine de problèmes environnementaux, sociaux et même politiques parfois radicaux, difficiles à compenser et de longue durée.

II- Problématique

Si la réhabilitation des sites pollués est une préoccupation assez récente à l'échelle européenne (années 1990) (Vandamme, 2012), elle est encore difficilement mise en application en Afrique de manière générale et plus particulièrement au Cameroun. En effet, malgré la volonté des pouvoirs publiques à régulariser le secteur minier au Cameroun à travers les améliorations régulières du code minier, beaucoup reste encore à faire en terme d'application sur le terrain (Himbé, 2017). Les différentes mesures prises dans le code minier camerounais visent dans un premier temps à attirer les investisseurs et dans un second temps à assurer la notion de préservation de l'environnement conformément au courant actuel de développement durable. « La restauration, après la fermeture des sites d'exploitation » est bien une obligation pour toute société minière au Cameroun (Code minier, 2016) mais les dispositions mises en œuvre pour contraindre les entreprises à restaurer les sites ne sont visiblement pas suffisantes. C'est ainsi que dans la localité de Bétaré-Oya, principal district aurifère de la région de l'Est Cameroun, de nombreux sites d'exploitation sont laissés en état, sans aucune restauration. Il n'est déjà pas aisé de conformer les sociétés minières en ce qui concerne la restauration des sites, il est encore plus difficile de conformer les artisans miniers (orpailleurs) tant sur les pratiques que sur la restauration des sites. Ces derniers ignorent l'existence du code minier pour la plupart, ils mènent généralement leurs activités sur les surfaces délaissées par les sociétés minières car les travaux d'excavation y ont déjà été effectués à l'aide des pelleteuses. Il est donc fort difficile de leurs réclamer quelques restaurations que ce soient. Bétaré-Oya, présente un paysage qui porte de nombreuses blessures dues à cette activité. Les pratiques utilisées pour l'extraction aurifère sont souvent peu respectueuses de l'environnement (Nguepjou et Manyacka, 2008). Les métaux lourds exposés et concentrés au cours de l'exploitation représentent un problème pour l'environnement et aussi la santé humaine car bien que les populations consomment majoritairement l'eau issue des forages, une partie utilise l'eau des cours d'eau lorsque ces derniers sont en panne ou trop éloignés (Nguepjou et Manyacka, 2008).

C'est donc avec une volonté de protection de la biodiversité et de remise à l'état naturel (secondaire) des sites dégradés par l'exploitation minière que cette étude vise la réhabilitation d'un site dégradé du secteur de Bétaré-Oya en vue de léguer aux populations un environnement satisfaisant et compatible avec un usage futur.

III- Objectifs

1- Objectif général

Les ressources naturelles ont longtemps été considérées comme inépuisables et auto-réparatrices, ce qui conduit généralement à une surexploitation de ces dernières. Or, l'augmentation des activités minières accroît les pressions sur les ressources dans les zones exploitées. Le milieu naturel se retrouve perturbé, la qualité de l'eau, des sols, de l'air ainsi que les paysages sont considérablement modifiés au cours des divers travaux d'exploitation. Le présent travail s'inscrit dans l'optique de déterminer la qualité des eaux de surface du secteur de Bétaré-Oya et caractériser leur pollution notamment par les métaux lourds. Ceci afin de proposer des solutions potentielles pour la réhabilitation de ces sites non restaurés.

2- Objectifs spécifiques

Trois objectifs spécifiques sont à atteindre :

- faire un état des lieux du secteur ;
- caractériser la pollution des eaux de surface par les métaux lourds due à l'orpaillage ;
- proposer des solutions à la réhabilitation des sites miniers dégradés.

IV- Structure du travail

L'amorce de ce travail commence par une introduction générale et se clôturera par une conclusion générale. Il s'articulera autour de quatre chapitres permettant de tirer cette conclusion :

- Le premier chapitre (Revue de la littérature) traitera des généralités sur l'exploitation minière, ses impacts, la législation minière qui l'entoure au Cameroun et enfin sur la réhabilitation de sites miniers pollués.
- Le second chapitre concernera les matériels et méthodes. Une présentation du site d'étude sera effectuée suivi de la méthodologie de travail adoptée.
- Dans le troisième chapitre, les résultats des analyses effectuées seront présentés avec leur interprétations notamment les analyses des paramètres physiques et des métaux lourds.
- Le dernier chapitre sera consacré à la discussion. Elle consistera à la synthèse et mise en commun des observations, et des propositions de réhabilitation pour le secteur d'étude.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

I- GENERALITES SUR L'EXPLOITATION MINIERE

1- Etapes d'un projets d'exploitation minière

Dans la plupart des pays africains, l'exploitation est encore de type traditionnel (artisanale) ou semi-mécanisée. Pour faire la nuance entre les exploitations industrielles et celles dites à petite échelle, les étapes d'un projet minier seront présentées de manière succincte.

De manière globale, les étapes d'un processus minier peuvent être regroupées en quatre phases (exploration et étude de faisabilité, planification et construction, exploitation, et fermeture et restauration des sites) (Thomas, 2012):

- **La phase d'exploration** : c'est l'étape de prospection, elle regroupe l'exploration (reconnaissance, localisation des anomalies minérales, découverte et échantillonnage) et l'étude de faisabilité (décision quant à la réalisation et la rentabilité du projet).
- **Planification et construction** : encore appelée phase de développement, elle comprend la planification (les plans de la mine, environnemental et social, et de fermeture ; l'évaluation environnementale, les permis) et la construction (défrichage, décapage, abattage et infrastructures)
- **La phase d'exploitation de la mine** : c'est l'exploitation proprement dite, elle comporte les processus d'extraction (concassage, broyage, concentration) du minerai, la gestion des stériles, résidus et eaux usées et amorce la remise en état).
- **La phase de fermeture de la mine et de restauration du site** : ici on procède au nettoyage et à la remise en état du site. Cette étape est généralement accompagnée du suivi environnemental.

2- Exploitation minière semi-mécanisée de l'or

Le terme exploitation se-mécanisée désigne une exploitation assez structurée où on retrouve des engins miniers d'un certain calibre (tracteur sur chenille, excavateurs, laveuses, motopompes, panneurs, camions, etc (PRECASEM, 2019). L'exploitation est planifiée selon des méthodes semi-industrielles pour un gisement légalement reconnu de taille moyenne. Pour être reconnue, le site doit satisfaire aux critères suivants : un effectif inférieur à 40 employés et une production de moins de 50000 t/an pour moins d'un 1000000 € d'investissement (Nguepjou et Manyacka, 2008).

3- Exploitation minière artisanale traditionnelle

Le code minier du Cameroun (2016) définit l'exploitation minière artisanale comme « toute opération qui consiste à extraire et concentrer des substances minérales, à en récupérer les produits marchands pour en disposer en utilisant des méthodes et procédés traditionnels et manuels » (Code minier Cameroun, 2016). L'exploitation est faite sans aucune planification, avec des outils rudimentaires, par un individu ou un groupe d'individus. L'activité est généralement périodique (alternance avec l'agriculture) et souvent informelle (Nguepjouo et Manyacka, 2008). L'exploitation minière artisanale peut être divisée en deux principales phases (pré-exploitation et exploitation) :

- **La phase de pré-exploitation** : elle comprend le défrichage (des espaces à forer et de déversement du stérile, et des espaces de campement) et la prospection. Cette dernière est faite différemment selon que les sites sont contrôlés par le CAPAM ou non. Dans le premier cas l'organisme se charge des démarches administratives pour l'acquisition de l'autorisation d'exploitation artisanale, du regroupement des mineurs en GICAMINES (regroupement de 50 mineurs maximum) et de l'appui matériel (outils pour l'exploitation). Dans le second cas, les mineurs autonomes s'occupent de tout, leurs chantiers sont généralement illégaux (Nguepjouo et Manyacka, 2008).
- **La phase de production** : elle comprend l'excavation, l'extraction et le lavage du minerai.

II- IMPACTS DE L'EXPLOITATION MINIERE

1- Impacts socio-économique

L'exploitation minière a des incidences sur le domaine socio-économique. Ce sont entre autres :

- **L'éducation des enfants** : Ces derniers constituent une main d'œuvre non négligeable dans les exploitations artisanales généralement constituées par les membres de la famille. Les salles de classes sont abandonnées au profit des chantiers miniers où les enfants sont en charge du « panage ». Les conséquences se traduisent par le taux alarmant d'analphabétisation de la région de 73% (PRECASEM, 2019).
- **Les revenus** : selon l'étude d'impact environnemental de la construction du barrage Lom-Pangar, les revenus généraux des ménages orpailleurs seraient de 647.000 FCFA contre

247.000 FCFA chez les non orpailleuses (Ntep Gwet et Thomas, 2005). L'exploitation semi-mécanisée rapporte aux employés (3500 FCFA/jour) (PRECASEM, 2019).

2- Impacts sur l'environnement

Les impacts de la mine sur l'environnement sont nombreux :

- **La dégradation des sols** : la destruction de la végétation expose les sols à l'érosion. Les substances chimiques utilisées (mercure) dans les processus de séparation et/ou concentration du minerai polluent les sols, les rendant impropres à l'agriculture (Keita, 2001).
- **La pollution des eaux** : les résidus de mine et les substances chimiques toxiques issus des activités minières polluent la ressource en eau dans l'environnement immédiat et en dehors des sites miniers. Ce sont la pollution par les métaux lourds, le drainage minier acide, la turbidité des eaux, ... (Nguepjouo et Manyacka, 2008).
- **La destruction de la végétation** : la phase de pré-exploitation en exploitation artisanale consiste à abattre les arbres et défricher la végétation pour l'installation des sites et des camps (Nguepjouo et Manyacka, 2008).
- ...

3- Impacts sur la santé humaine

Les impacts de l'exploitation minière sur la santé humaine peuvent être directs ou indirects.

- **De manière directe** : il s'agit des accidents de travail dans les chantiers miniers.
- **De manière indirecte** : ce sont les maladies hydriques (pollution des eaux), les infections sexuellement transmissibles (milieu généralement dépravé), le VIH, les maladies respiratoires, l'alcoolisme, les drogues diverses (Keita, 2001).
- ...

III- LEGISLATION MINIERE ET EXPLOITATION AU CAMEROUN

1- Législation minière de première génération

Himbé (2017) qualifie les législations minières antérieures au code minier de 2016 de législations de première génération (Himbé, 2017). Elles rassemblent les codes, décrets et arrêtés allant de 1964 à 2014, ce sont : - la loi fédérale n° 64/LF/3 du 06 avril 1964 portant régime des substances minérales, - la loi n° 78/24 du 29 décembre 1978 régissant les le recouvrement, les redevances et

les taxes minières, - le premier code minier issu de la loi n° 001 du 16 avril 2001, - Décret n° 2002/648/PM du 26 mars 2002 de son application qui ont abrogés les dispositions antérieures. Ledit code sera modifié plus tard par la loi n° 2010/011 du 29 juillet 2010 et son décret d'application du 04 juillet 2014 (le Décret n° 2014/1882/PM). Ces législations comportent de nombreuses lacunes qui résultent dans le « pillage systématique des ressources minières ». De manière sommaire, ces lacunes sont la non reconnaissance de l'exploitation "semi mécanisée et aucune contrainte imposée quant à la réhabilitation des sites ni aux études d'impact environnemental.

2- Législation minière de seconde génération

La législation de seconde génération est constitué par le code minier 2016 encore appelé loi « Loi Gbwaboubou » (Himbé, 2017). Les règles ont changé : les mines artisanale, semi-mécanisée et industrielle sont bien distinctes, l'obligation d'une étude d'impact environnemental et social est préalable au début de toute activité et la réhabilitation de l'environnement après la fermeture du site, sous peine de sanctions pénales. De plus, l'exploitation minière se doit de participer au développement social et économique des populations locales.

IV- GENERALITES SUR LA REHABILITATION DES SITES MINIERES

D'après (Le Roux, 2002), « la réhabilitation étant le processus de réparation des effets de l'exploitation sur l'environnement », son niveau le plus accompli est la restauration écologique mais elle peut aussi se limiter à la stabilisation et la sécurisation des terrains, ou à la (re)végétalisation des terrains.

1- Types de réhabilitation

Il existe quatre grandes familles de traitements des sites et sols pollués en fonction du lieu de traitement : les traitements hors site ; les traitements sur site ; les traitements in situ ; le confinement (Bernheim, 1999).

- **les traitements hors site** dans lesquels les déchets, les terres et les eaux pollués sont excavés et transportés dans des centres de traitement adaptés (incinérateur, centre d'enfouissement technique, centre de traitement des terres ou des eaux polluées) ;

- **les traitements in situ** où les sols/eaux/déchets restent en place et on peut soit extraire ou traiter le polluant en surface, soit le fixer dans le sol, soit encore le dégrader dans le milieu.

- **les traitement sur site** au cours desquels terres/eaux/déchets pollués sont extraits pour être traités sur place (pas de transport vers un centre). Les produits traités pouvant être laissés sur site ou évacués.

- **le confinement** : ici terres/eaux/déchets pollués restent en place, le traitement vise à empêcher la migration des polluants.

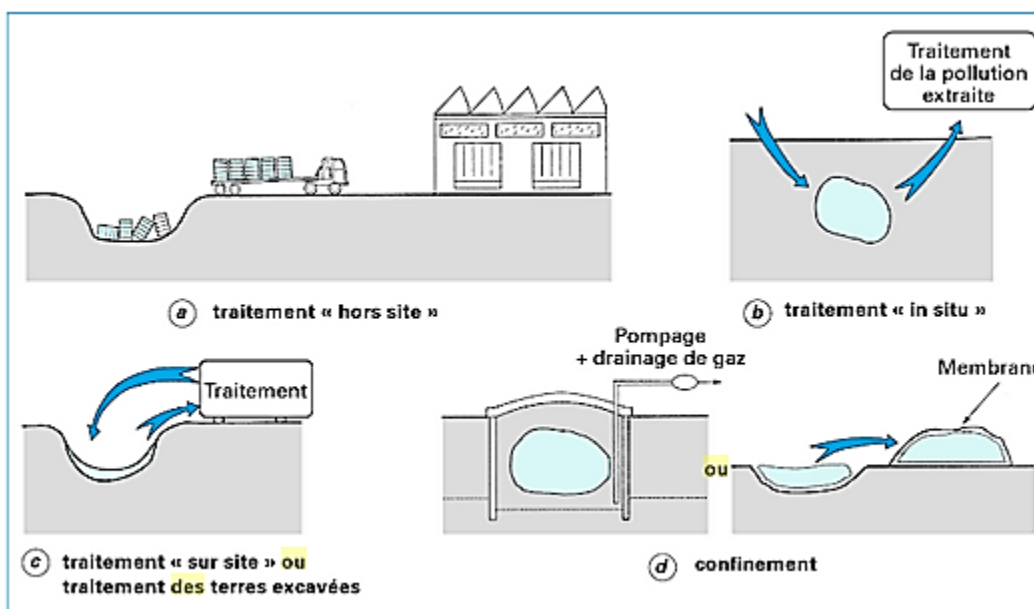


Figure 1 : Les quatre principales catégories de traitement des sites pollués (Bernheim, 1999).

A l'intérieur de ces classes, les techniques utilisées peuvent être des procédés physiques, chimiques ou biologiques (Simonot et Croze, 2008) :

- les **procédés physiques** rendent les contaminants immobiles ou apportent de l'énergie de manière thermique, mécanique ou électrique pour les dégrader ou les extraire. Les techniques qui font recours aux procédés physiques sont entre autres l'incinération, la stabilisation, la désorption thermique, le venting.
- les **procédés chimiques** sont ceux qui font intervenir des réactifs pour éliminer ou extraire les polluants. On retrouve le lavage par solvant, la réduction, l'oxydation.
- les **procédés biologiques** qui sont réalisés à base de végétaux et/ou de micro-organismes. Ce sont la bio-augmentation, l'atténuation naturelle, le bioslurry, la biotertre, bioventing, etc.

Tableau 1 : Classification des techniques de traitements des sites (Simonot et Croze, 2008)

Techniques		Sur site « in situ »		Sur site « ex situ »		Hors site	
		Sols	Eaux	Sols	Eaux	Sols	Eaux
Physiques	Confinement/mise en décharge	xxx	xxx	xxx	o	xxx	o
	Stabilisation	xx	o	xx	o	x	o
	Pompage et traitement	o	xxx	o	xxx	o	x
	Ecrémage	o	xxx	o	xxx	o	o
	Sparging (barbotage in situ)	o	xxx	o	o	o	o
	Venting (volatilisation)	o	o	o	o	o	o
	Désorption thermique	x	o	xxx	o	xxx	o
	Lavage à l'eau	x	o	x	o	xx	o
	Méthodes électriques	o	o	o	o	o	o
Chimiques	Oxydation	x	xx	x	o	o	o
	Réduction	x	xx	x	o	o	o
	Barrière réactive	o	xx	o	o	o	o
	Lavage par solvant	o	o	x	o	x	o
	Lavage par tensioactif	x	x	x	o	x	o
Biologiques	Bioventing	xx	o	o	o	o	o
	Biosparging	o	xx	o	o	o	o
	Barrière biologique	o	x	o	o	o	o
	Atténuation naturelle	x	x	o	o	o	o
	Phytoremédiation	o	x	x	x	o	o
	Andain	o	o	xxx	o	xxx	o
	Bioterre	o	o	xxx	o	xxx	o
	Landfarming (épandage)	o	o	xxx	o	xxx	o
xxx : méthode courante ; xx : méthode employée ; x : méthode anecdotique ; o : non employée/techniquement impossible.							

2- Techniques de réhabilitation

L'ensemble des techniques mentionnées ici sont tirées du document de (Roudier, 2004). Ce sont des techniques applicables au traitement de la pollution par les métaux lourds, elles concernent à la fois le traitement des sols et des eaux (bien que ce travail porte sur les eaux de surfaces, les éléments traces métalliques étudiés proviennent des sols et peuvent migrer d'un milieu à l'autre).

a) Barrière réactives / barrière hydraulique

Elle est généralement utilisée pour traiter la pollution des sols et des nappes phréatiques par certains métaux lourds et les polluants organiques (solvants chlorés). La technique consiste à implanter une barrière perméable de la surface du sol jusqu'à à la base de l'aquifère pour bloquer le mélange de pollution. La barrière contient un réactif qui permet de dégrader les polluants dissouts dans l'eau.

Principe : La barrière réactive (tranchée), remplie du principe actif de traitement, est implantée perpendiculairement au sens d'écoulement de l'eau à traité. En la traversant, l'eau est débarrassée

de sa pollution. La tranchée doit être de dimensions à intercepter toute le polluant et le temps de résidence de ce dernier doit être suffisant pour traiter toute la pollution.

Avantages : Ne nécessite pas de pompage, dure plusieurs années et maintenance réduite.

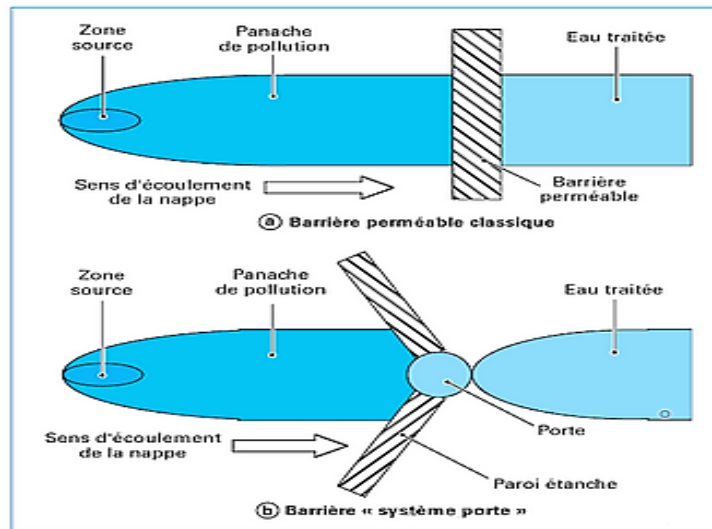


Figure 2 : principe de fonctionnement des barrières réactives

b) Désorption thermique ex et in situ

Cette technique d'extraire par volatilisation les polluants volatils ou semi-volatils du sol. Elle se fait par application de chaleur.

Principe : Ex situ : Après excavation, les terres contaminées sont dirigées vers une unité de désorption ou four dans lequel elles sont chauffées entre 150 et 540°C. La technique favorise d'une part la désorption des polluants adsorbés sur les particules de terre et d'autre part l'augmentation de la tension vapeur des composés peu volatils permettant de les extraire en phase gazeuse. Les vapeurs récupérées vont être traitées (brûleur, oxydation catalytique, condenseur ou charbon actif).

In situ : dans ce cas le sol a traité est chauffé par différents moyens, l'eau s'en évapore et les polluants qui possèdent une température d'ébullition inférieur à celle de l'eau se volatilisent.

Avantages : Coût inférieur à l'incinération, traitement rapide et sur site, rendements d'extraction supérieurs au venting (In situ) et atteignant des teneurs résiduelles très basses (Ex situ).

Inconvénients : excavation des terres, grandes surfaces, coût du transport hors site, coût du traitement des fumées.

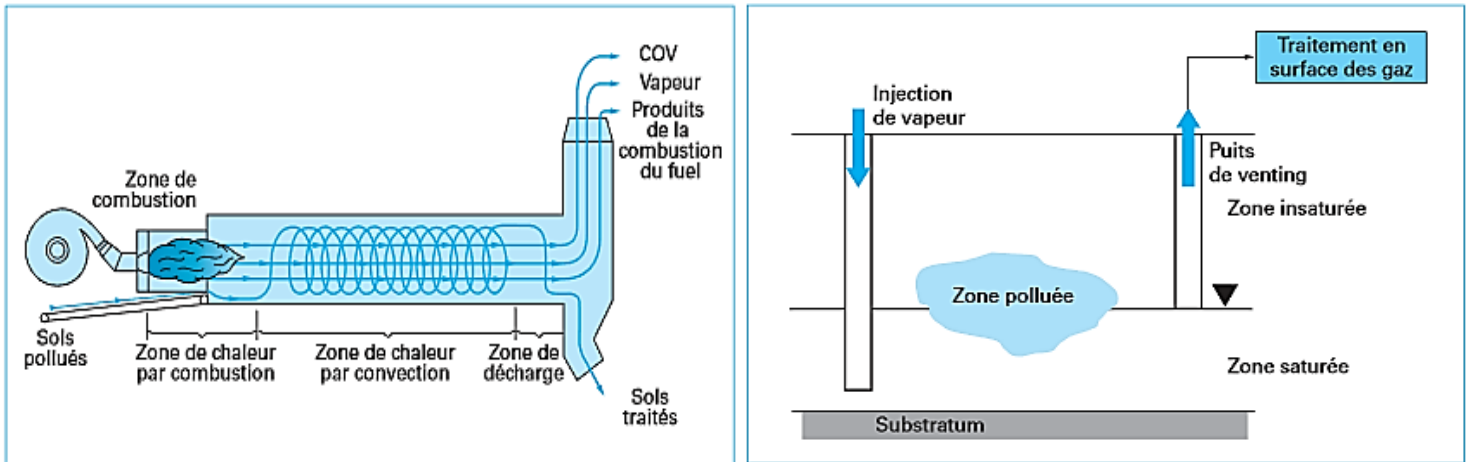


Figure 3 : principe de désorption thermique ex situ (gauche) et in situ (droite) (Roudier, 2004).

a) **Electrocinétique**

C'est l'injection d'un courant électrique dans le milieu à traiter afin de concentrer les ions près des points de récupération. La technique est in situ.

Principe : C'est la séparation et l'extraction des métaux lourds, composés organiques et radioéléments des panaches de pollution. La méthode consiste à faire migrer les polluants suivant un champ électrique par électro-osmose, électro-migration ou électrophorèse.

Avantages : La faible perméabilité des sols optimise l'application de la technique, meilleure solution au traitement de la pollution par les métaux lourds.

Inconvénients : Limitée par la solubilité du polluant, lente décontamination des zones faiblement conductrices

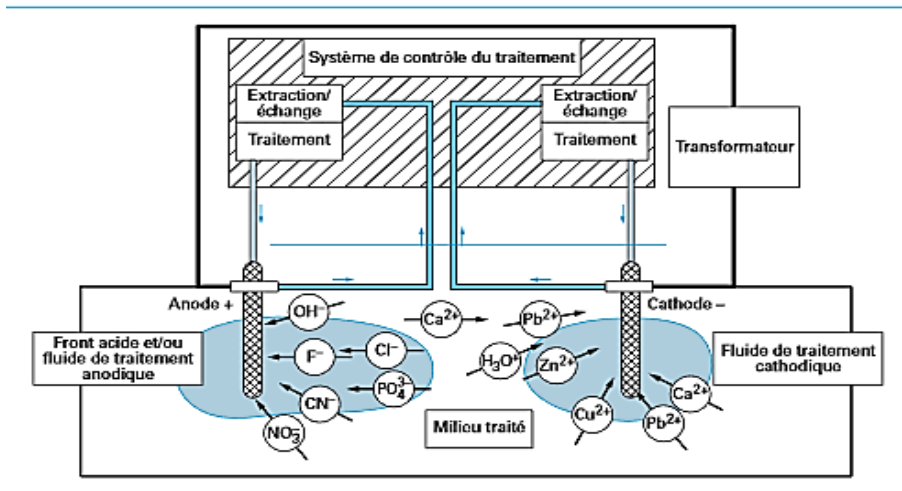


Figure 4 : principe de l'électrocinétique (Roudier, 2004).

c- Excavation

Elle peut être pratiquée pour tout type de pollution et donc ne constitue pas réellement un traitement mais intervient avant ou après le traitement véritable.

Principe : C'est le fait d'enlever les parties polluées de l'ensemble du sol. Les terres polluées excavées peuvent être transportées vers des filières de traitement ou traitées sur place. La technique nécessite un bon accès au site.

Avantages : favorise la restauration rapide du site, c'est la technique la plus rapide de réhabilitation.

Inconvénients : nécessite l'arrêt des autres activités sur le site, nécessite généralement le transport et des engins lourds (excavatrices, pelleteuses, etc.)



Figure 5 : principe de l'excavation (Roudier, 2004).

d) *Lavage in situ*

La technique consiste à faire passer une solution de lavage à travers le sol en place pour en extraire le contaminant.

Principe : percolation sur le sol de l'eau ou d'agents mobilisateurs en solution (solution de lavage) en amont hydraulique et pompage en aval hydraulique de la zone polluée. Le fluide s'enrichit en polluants et le panache extrait est traité en surface.

Avantages : temps de traitement réduit, traitement d'une vaste gamme de polluants, peut être associé à d'autres traitements, ...

Inconvénients : longue durée, perte de solution lavage, nécessite des additifs pour le traitement de la solution de lavage, ...

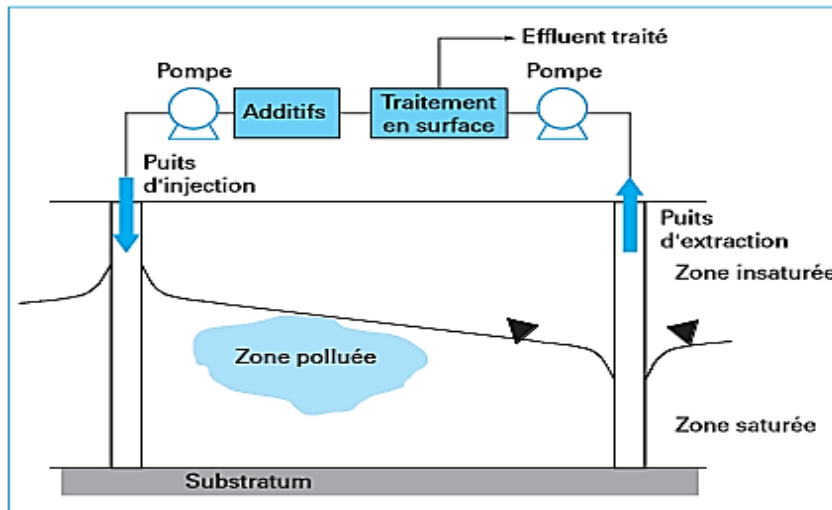


Figure 6 : principe de lavage in situ (Roudier, 2004).

e) *La phytoremédiation*

C'est l'utilisation de végétaux pour dépolluer les sols des composants organiques et des métaux.

Principe : c'est l'ensemble des technologies qui font recours aux plantes pour la transformation, la dégradation, la concentration, la stabilisation ou la volatilisat ion des polluants. Parmi ces technologies on compte la phyto-extraction, la phyto-stabilisation, la rhizofiltration et la phyto-dégradation.

Avantages : faible coût, traitement de grande superficie, faible perturbation du milieu, visuellement attractive.

Inconvénients : limitée aux couches superficielles, longue durée, élimination des biomasses contenant le polluant, ...

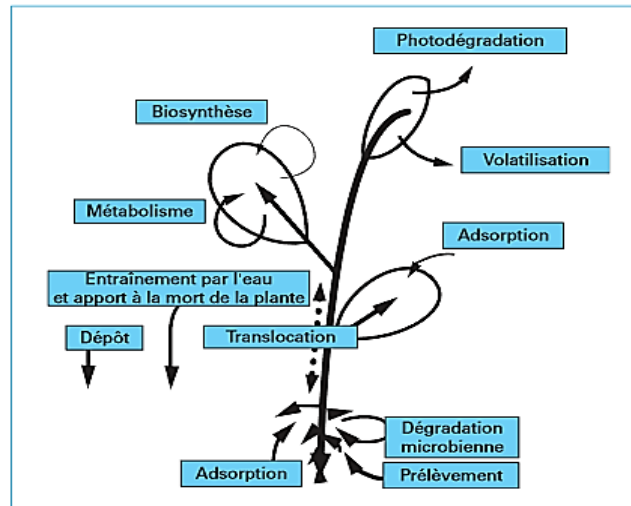


Figure 7 : principe de la phytoremédiation (Roudier, 2004).

La phytoremédiation a été identifiée comme la technique la mieux adaptée à la réhabilitation dans notre contexte compte tenu du faible coût, de la facilité, et du temps de sa mise en place. En effet, les cout d'implantation de la méthode seraient de 60000 à 300000 \$US/ha contre 130000 à 1600000 \$US/ha pour les techniques physiques et chimiques (Mendez et Maier, 2008). La phytoremédiation comprend quatre phases :

- **La phyto-stabilisation** : cultiver les surfaces dénudées permet de les stabiliser les sols et limite le transport de particules contaminées par les phénomènes d'érosion (ruissellement, lessivage, ...).
- **La rhizo-atténuation** : stimule l'activité biologique dans la rhizosphère, favorisant la dégradation des polluants. Dans la rhizosphère, il se forme un capuchon végétatif à l'intérieur duquel les métaux lourds sont immobilisées (Mendez et Maier, 2008) ;
- **La phyto-extraction** : c'est l'utilisation des plantes pour prélèvement des polluants par les racines et leur transfert dans la partie aérienne où ils sont accumulés et piégés dans la biomasse végétale aérienne. Elle implique l'accumulation ou l'hyper-accumulation de métaux dans les feuilles, les plantes sont ensuite récoltées et éliminées en tant que déchets dangereux ou incinérées pour la récupération des métaux (Mendez et Maier, 2008).

- **La phyto-volatilisation** : c'est la métabolisation des polluants en leur forme chimique volatile à partir de laquelle ils sont volatilisés (Morel, 2014).

3- Caractérisation des polluants

Bétaré-Oya est une zone rurale de la région de l'Est Cameroun. Les principales activités y sont l'orpaillage, l'agriculture et la pêche. Divers types de polluants peuvent être rencontrés dans le secteur notamment les intrants agricoles, les substances toxiques issues de l'activité minière et les déchets domestiques.

a) Origine naturelle

Les polluants étudiés dans le cadre de ce travail sont des métaux lourds. Ce sont des éléments naturellement présents dans l'écorce terrestre à teneurs variables. Les concentrations des métaux lourds dans le milieu sont fortement liées à la nature des formations géologiques en présence (Foucault, 2013). On parlera de pollution lorsque les éléments sont retrouvés à des concentrations supérieures à celles issues des processus pédogénétiques naturels, sans aucune intervention directe de l'homme (soil Natural Geochemical Background, NGB) (Foucault, 2013).

Les teneurs en éléments métalliques dans le milieu sont fonction du matériau parental et de l'ensemble des processus et mécanismes qui régissent l'évolution de ces matériaux que sont l'altération, l'érosion, le lessivage et la sédimentation. Les formations géologiques de Bétaré-Oya sont constituées de schistes, micaschistes, orthogneiss, quartzites, granitoïdes, conglomérats de Mari et granite (Soba, 1989 ; Kankeu, 2008). L'altération de ces roches, est à l'origine de leur présence de ces éléments métalliques en quantité normales.

b) Origine anthropique

La pollution est dite anthropique lorsqu'elle est induite par les activités humaines. Les principales sources anthropiques de pollution des eaux de surface de Bétaré-Oya sont l'activité minière, l'agriculture et les rejets domestiques.

La pollution par les pratiques agricoles se fait par l'irrigation (drainage agricole), l'utilisation des pesticides et des intrants minéraux. Dans le monde, 115 millions de tonnes d'engrais minéraux azotés sont appliqués chaque année sur les cultures dont 20 % s'accumulent dans les sols et la biomasse (FAO, 2018).

Dans le cas de la pollution par les activités minières, la contamination des eaux et des sols par les métaux lourds est principalement due aux résidus miniers, aux hydrocarbures utilisés pour le fonctionnement des engins et aux éléments métalliques contenus dans les batteries (plomb dans les piles, ...). En effet, la part mondiale des métaux lourds dans les sols et eaux a augmenté, les estimations sont de 22000 tonnes de cadmium, 939000 t de cuivre, 783000 t de plomb et 1350 000 t de zinc (Singh et al., 2003).

Les déchets domestiques sont également une source de pollution par les métaux lourds notamment contenus dans les emballages divers. Zmirou et al, (2003) dénombrent parmi ces sources domestiques les boîtes de conserves métalliques, les feuilles d'aluminium, l'électroménager, les résidus de produits de nettoyage et la peinture (Zmirou *et al.*, 2003).

c) Voies de transfert

Le transfert des métaux lourds issus des processus naturels et/ou anthropiques se fait à travers les différents compartiments du cycle de l'eau (Zmirou et al., 2003). Le transfert des polluants métalliques en zone d'exploitation minière est généralement un transfert de particules par érosion, par ruissellement et par lessivage. On peut aussi noter le transfert par voie dissoute dans le cas du drainage minier acide avec le soufre.

Selon les processus naturels d'altération des roches et d'érosion des sols, les éléments métalliques vont être mis en solution et transitent à travers les ruissellement, lessivage, percolation, etc. jusqu'aux cours d'eaux. Associé à cela, les activités minières au cours desquelles les sols sont remaniés, excavés ainsi que les résidus de mines riches en métaux lourds, vont favoriser l'exposition des éléments métalliques et leur évacuation dans les eaux de surface.

Les métaux libérés dans les cours d'eau d'abord sous forme particulaire, vont ensuite s'associer aux matières organiques et/ou MES pour soit former des précipités et se déposer, soit être remis en suspension, transportés et être redéposés plus loin (Zmirou et al., 2003).

d) Voies d'exposition

Les populations de Bétaré-Oya sont exposées à la pollution des eaux de surface par les métaux lourds principalement au travers des activités d'extraction et de lavage du minerai. Les artisans miniers sont alors les premières cibles car directement en contact avec les substances toxiques (mercure pour amalgamation). Les populations riveraines sont elles aussi exposées via l'air respiré

qui est chargé de poussières et de particules toxiques volatiles. L'autre voie d'exposition à la pollution est par la consommation de l'eau contaminée en amont par les activités d'orpaillage. En effet, les populations s'approvisionnent en eau dans les cours qui drainent les zones d'exploitation en amont. Enfin, les populations sont exposées à la pollution à travers la consommation d'aliments contaminés notamment les poissons et certains produits vivriers.

4- Enjeux à protéger

a) Les populations et les variables humaines d'exposition aux pollutions

- Populations

Les populations riveraines et les travailleurs de mines sont les premières cibles exposées à la pollution par les métaux lourds dans la zone d'étude. En effet, ils sont en contact direct avec les polluants (travailleurs/mineurs) et indirect (population riveraines). Le rapport du (PRECASEM, 2019) fait état d'une population d'environ 100000 habitants à Bétaré-Oya, dont 150000 sont engagés à plein temps dans l'artisanat minier, hommes, femmes et enfants confondus (Tchindjang *et al.*, 2010).

- Voies d'exposition

Les principales voies d'exposition à la pollution par les métaux lourds identifiés sont l'inhalation de poussières et de gaz issus des activités d'extraction notamment le broyage et l'amalgamation (mercure) ; l'ingestion de terres ou de poussières notamment par les enfants ; la consommation d'eau provenant des cours d'eaux près des sites d'exploitation ; la consommation des produits de la pêche contaminés (poissons, etc.) (PRECASEM, 2019).

- Vecteurs de transfert

Pour la forme volatile de pollution, notamment dans le cas du mercure lorsque l'amalgame est chauffé, le Hg devient volatil et le principal vecteur de transfert est l'air ambiant.

Pour la pollution non volatile, le transfert se fait par l'eau : ruissellement, lessivage, érosion, etc. En général, les métaux migrent des sols remaniés aux cours d'eau sous leurs formes solide ou particulaire, adsorbés sur les matières en suspension ou librement.

b) Les ressources et les milieux naturels

Au Cameroun comme dans beaucoup de pays, la gestion de l'environnement est régie par un ensemble de loi et de textes. C'est ainsi que l'article 16 de la Loi no 94/001 du 20 janvier 1994 portant régime des forêts, de la faune et de la pêche, pour la première fois prescrit explicitement

l'évaluation environnementale pour tout projet de développement susceptible d'entraîner des perturbations en milieu forestier ou aquatique (Loi N°94, 1994).

En 2004 le ministère de l'environnement et de la protection de nature (MINEP) est créé par Décret n°2004/320 pour d'élaborer, mettre en œuvre et suivre la politique environnementale au Cameroun (Décret N°, 2004).

En 2012, le MINEP devient le Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature et du Développement Durable et ses missions se voient élargies pour répondre tant aux enjeux de protection de la nature qu'à ceux du développement durable (Décret N° 2012, 2012).

Ainsi, l'identification des ressources, de milieux naturels et de la biodiversité à protéger sont régis par des législations en vigueur. Le département du Lom et Djerem compte de nombreuses aires protégées (notamment les pacs du Mbam et Djérem et de Deng Deng), des forêts et des savanes riches en espèces végétales et animales parfois protégées (chimpanzés, gorilles, buffles, ...), de nombreux cours d'eau (dont les principales rivières sont le Lom, le Pangar et le Djérem, tous affluents de la Sanaga) (Tchindjang *et al.*, 2017).

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE

I- PRESENTATION DU SITE

1- Localisation

Situé entre les coordonnées $14^{\circ} 05'$ et $14^{\circ} 10'$ de longitude Est et entre $5^{\circ} 35'$ et $5^{\circ} 40'$ de latitude Nord, Bétaré-Oya est le chef lieux de l'arrondissement du même nom dans le département du Lom et Djerem, région de l'Est Cameroun. Il s'étend sur une superficie de 12 600 km². La zone d'étude pour sa part s'étend du Nord au Sud, d'amont en aval du cours Lom depuis Bangbel jusqu'au bac en passant par Nguengue, Mali, Gbedjéré, Lom Aval (Bac), Békadé (Piscine), Mbal comme le présente la figure 1 (Mboudou *et al.*, 2017 ; Rakotondrabe *et al.*, 2017).

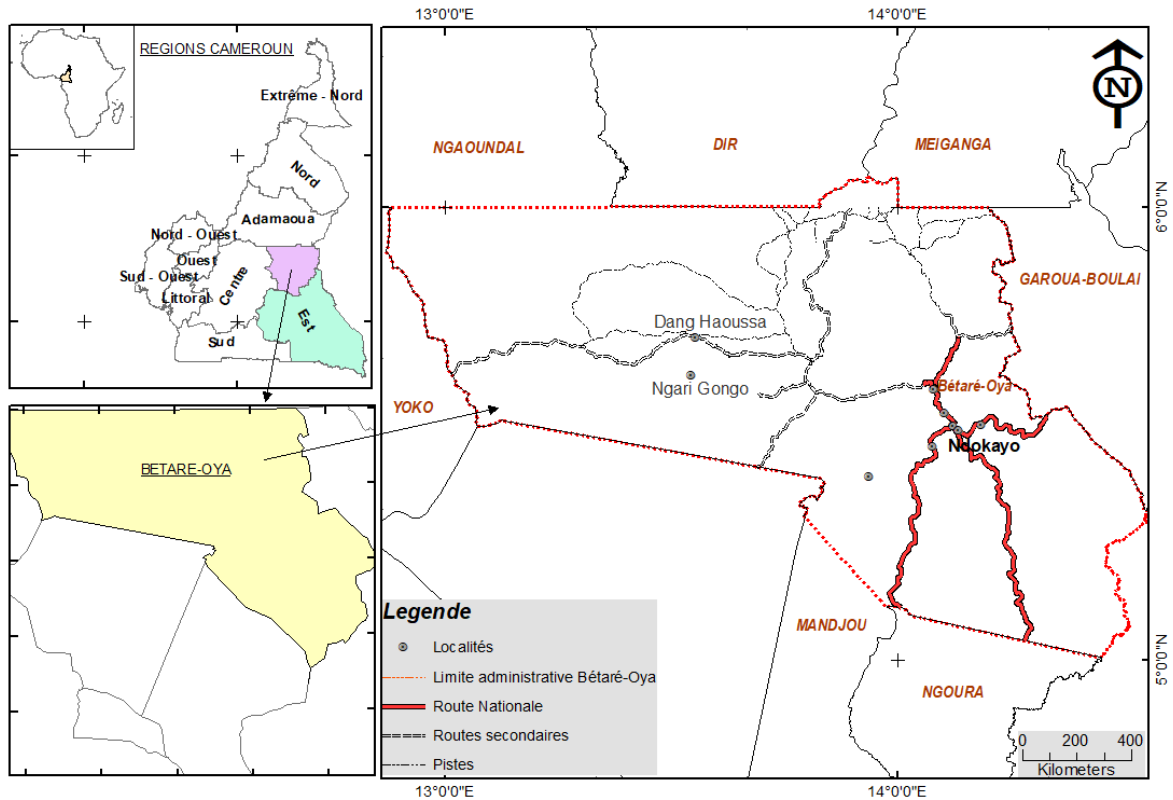


Figure 8: Carte de localisation de la zone d'étude

2- Topographie

L'altitude à Bétaré-Oya varie de 680 m à 960 m. Le relief comprend des sommets et des vallées. C'est un relief assez accidenté où on retrouve des zones basses de vallées et des monticules rocheux qui représentent une ressource exploitée comme produit de carrière (Abendé, 2017).

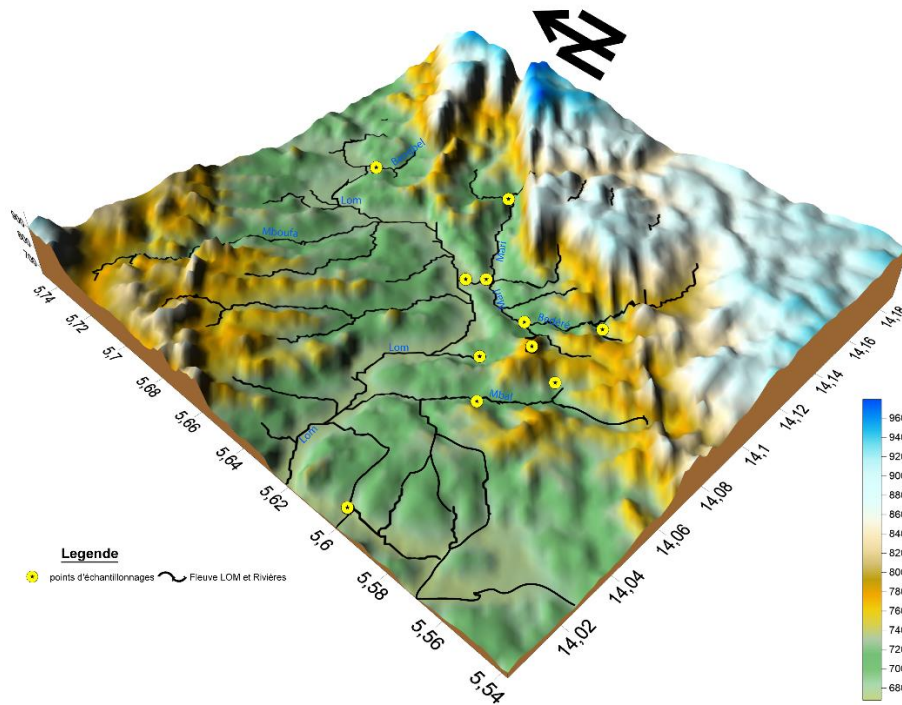


Figure 9: topographie de la zone d'étude

3- Climat

Le climat à Bétaré-Oya est un climat de savane avec hiver sec (Aw) selon la classification de Köppen-Geiger. Il est caractérisé par quatre saisons, deux saisons de pluie qui alternent avec deux saisons sèches : une longue saison sèche de décembre à avril, une légère saison de pluie de mai à juin, une courte saison sèche de juillet à septembre et une intense saison de pluie d'octobre à novembre. La pluviométrie annuelle moyenne est de 1543mm et les températures les plus élevées ont été observées en janvier et février, avec une moyenne de 24,7°C (Mimba *et al.*, 2017 ; Olivry *et al.*, 1986).

4- Hydrographie

Le bassin du Lom appartient au grand bassin versant de la Sanaga. La rivière Lom prend sa source à la lisière Sud-Est de l'Adamaoua (à 70 km à l'Est de Meigangan) avec la RCA et draine une superficie de 11 100 km² avec un débit moyen de 17 m³/s dans la zone de Bétaré-Oya. Avec le Djerem ils constituent les principaux affluents du fleuve Sanaga. Le Lom a une longueur de 380 km, son dénivelé est de 590 m et sa pente est comprise entre 1,55 % et 20 % (Olivry, 1986). Le Lom forme un réseau dendritique avec ses affluents dont les principaux sont Pangar, Mari, Mbal.

On retrouve deux types de nappes souterraines fonctionnant en bicouche dans le secteur de Bétaré-Oya. Un aquifère supérieur continu situé à environ 20 m profondeur en dessous duquel on retrouve un aquifère plus profond, fissuré discontinu. La première nappe est exploitée pour des puits, la qualité de l'eau y est parfois douteuse. La seconde est produite par les forages, l'eau qui en provient est de meilleure qualité (Rakotondrabe *et al.*, 2017) . La population s'approvisionne en eau dans les rivières (46%), dans les sources et les puits (44%) et seulement 10% accède à une eau de bonne qualité (MINTAD, 2011).

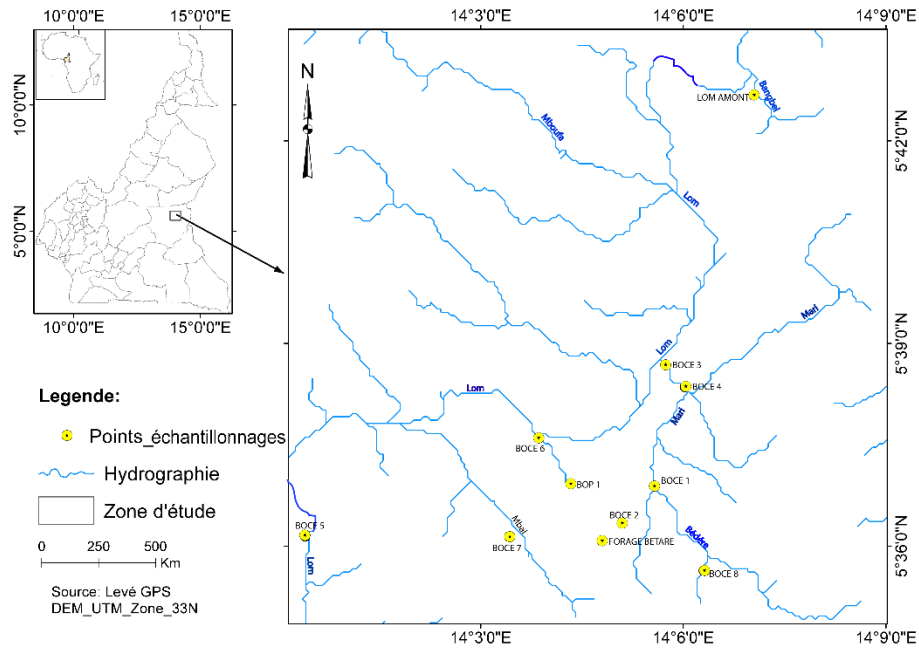


Figure 10: carte hydrographique de la zone d'étude

5- Géologie et pédologie

Le secteur de Bétaré-Oya est situé sur le socle Panafricain du Cameroun. Il est compris entre deux zones de cisaillement : au Nord par le cisaillement de l'Adamaoua et au Sud par celui de la Sanaga (Ngako et al., 2003 ; Kankeu et al., 2009).

Les roches dominantes sont para et ortho-dérivées : ce sont des schistes, des micaschistes, des orthogneiss de Wakaso et de Ndokayo, des quartzites recoupés par des granitoïdes panafricains et des conglomérats de Mari, des granite post-tectonique de Ngibi et Kongolo et des granites intrusifs de la « série de Lom » (Soba, 1989 ; Kankeu, 2008). Ces formations géologiques présentent une foliation orientée NE-SO correspondant à la direction du cisaillement dextre et senestre de la zone de cisaillement centrale du Cameroun (Ngako et al., 2003). Les minéralisations de la série de Lom sont métamorphiques-hydrothermales, de nature polymétallique (or et minéraux associés), elles sont parfois diffuses dans la masse, ou associées à une gangue à silice, à barite et à calcite dans des veines de quartz. On dénombre deux principaux types de minéralisation dans zone : des gisements alluviaux et éluviaux (Kankeu, 2008), et une minéralisation aurifère issue de veines de quartz sulfuré contenant de l'or, de la pyrite, de la galène, de la chalcopryrite et de l'hématite (Vishiti *et al.*, 2017). L'exploitation des gisements alluviaux et éluviaux date des années 1930, principalement dans les berges du Lom et de ses affluents (Mari, Gbédjéré, Mbal, ...). Celle des gisements filoniens est plus récente, elle est plus intense du fait de l'épuisement du minerai alluvial et/ou éluvial. L'or plus fin est extrait par amalgamation avec le mercure et parfois par flottation avec le cyanure. En plus de l'or, on retrouve aussi des gisements de sables et d'autres matériaux de carrières.

Les sols qui recouvrent les formations géologiques à Bétaré-Oya sont principalement ferralitiques. Ils sont rouges ou bruns et généralement très épais mais assez pauvres en éléments nutritifs. On retrouve aussi des sols hydromorphes dans les vallées marécageuses, ils sont de couleur sombre signe d'abondance de matière organique (Olivry, 1986).

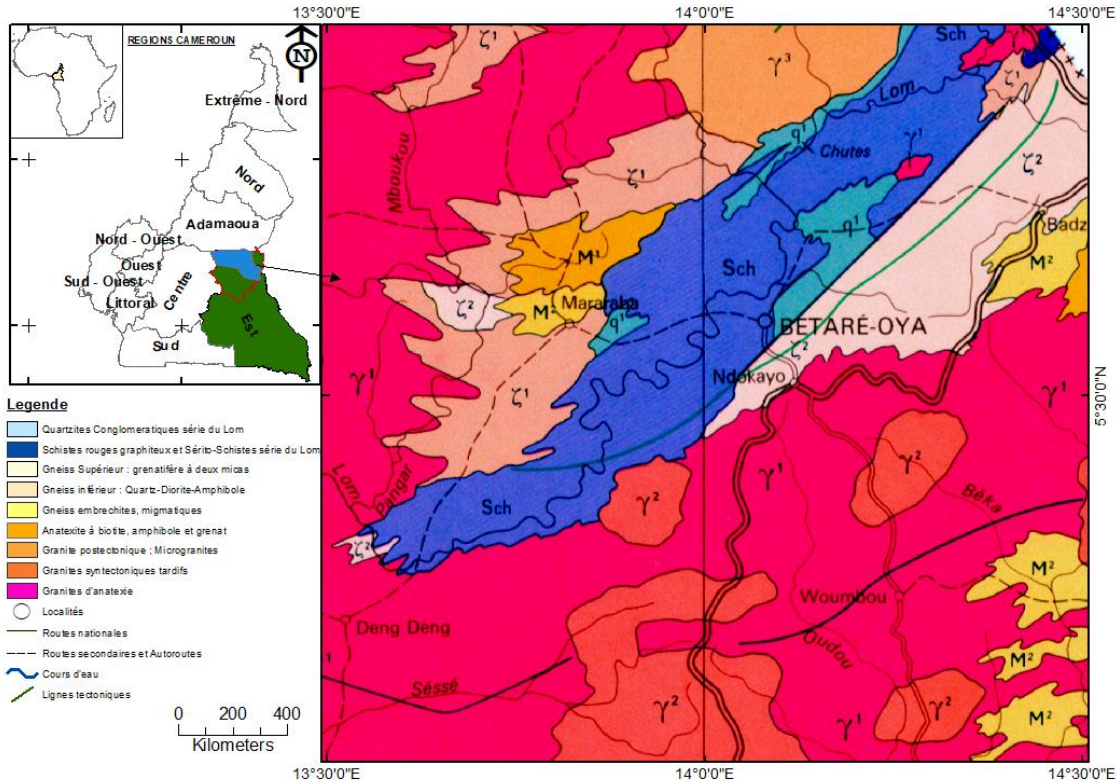


Figure 11: Carte géologique de la zone d'étude

METHODOLOGIE

La méthodologie de travail a consisté en deux principales phases :

- la revue de la littérature scientifique disponible sur le sujet traité et la zone d'étude ;
- et le travail de terrain qui a été effectué à Bétaré-Oya : identification des sites, prélèvement des échantillons et analyse en laboratoire. Les résultats obtenus sont ensuite interprétés et discutés avec les travaux similaires effectués dans la zone ou ailleurs.

1- Matériel de terrain

Le matériel de travail était constitué de :

- Un appareil multi paramètres de mesure de pH/conductivité/TDS/température de marque Hanna HI9811-5

- Un turbidimètre AL250T-IR (Fisher Scientific, code produit : 11709079)
- Un appareil de mesure de l'oxygène dissous de marque PCE-PHD 1
- Un GPS
- Une bouteilles d'échantillonnage
- Une glacière
- Un appareil photo

2- Méthode de collecte de données

Les données nécessaires pour ce travail de terrain ont été collectées dans la documentation disponible en ligne, au CAPAM (rapports), et sur le terrain par divers moyens.

La zone d'étude présente un important intérêt économique c'est ainsi que de nombreux ouvrages/travaux y ont été réalisés tant dans le domaine géologique que dans celui de l'exploitation minière et de l'environnement (Rakotondrabe et al, 2018 ; Abendé, 2017 ; ...).

Les moyens déployés sur le terrain ont principalement consisté en des visites de localisation de sites, d'interviews des agents du CAPAM et de quelques artisans miniers, des photographies et du prélèvement des échantillons.

3- Echantillonnage

La campagne d'échantillonnage s'est effectuée à Bétaré-Oya. Les échantillons ont été prélevés le long du fleuve Lom et ses affluents (Mali, Bangbel, Mbal, ...) en dix points situés près des sites d'exploitation. A l'exception d'un point (BOF), tous les prélèvements ont été effectués dans les cours d'eau où les effluents miniers sont rejetés.

a) La procédure d'échantillonnage :

Les échantillons ont été prélevés à l'aide de bouteilles en polyéthylène d'1l préalablement lavées à l'eau distillée. A chaque prélèvement les bouteilles et leurs bouchons sont rincées à nouveau (énergiquement 3 fois) avec l'eau à analyser ensuite on procède au prélèvement. Assez éloigné des bordures et face au courant, on égoutte la bouteille l'ouverture vers le bas avant de la plonger verticalement dans l'eau et une fois qu'elle est bien immergée (environ 30 cm) on l'incline en un tour de main d'environ 45° face au courant, on la laisse se remplir sans bulles d'air à l'intérieur et on la remonte. Rincer le bouchon et refermer aussitôt la bouteille avec précaution. Les bouteilles sont conservées dans une glacière pour être maintenues le plus près possible des conditions

(température, pH, ...) du milieu de prélèvement. Les échantillons ont été remis au laboratoire dans les 24h.

Le principal collecteur dans la zone de travail est la rivière Lom. Tous les cours d'eau qui drainent la zone de Bétaré-Oya se jettent dans ce dernier. Le secteur de travail a donc été circonscrit autour du Lom. Le tableau 2 ci-dessous récapitule les prélèvements réalisés sur dix points d'amont en aval du Lom ainsi que leurs localisations et quelques observations.

Tableau 2 : récapitulatif de la campagne d'échantillonnage

Code échantillon	Type de prélèvement	Coordonnées géographiques (dég.min.sec)			observations	Localisation
		latitude	longitude	Altitude (m)		
BOCE-1	1	N05°42'41,1''	E014°07'02,6''	677	Eau profonde de couleur jaunâtre, assez trouble, activité minière en amont	Bangbel
BOCE-2	1	N05°39'46,4''	E014°08'14,6''	689	Peu profond, couleur jaunatre, activité minière, nombreux trous difficiles d'accès	Nguengué
BOCE-3	1	N05°38'21,2''	E014°06'01,1''	680	Eau assez clair, débit assez élevé, 1 site actif dans le secteur	Mari
BOCE-4	1	N05°38'16,7''	E014°06'04,2''	677	Cours d'eau fortement dévié, se jette dans le Mari, couleur jaunâtre, nombreux trous abandonnés	Gbedjéré
BOCE-5	1	N05°36'08,4''	E014°00'24,1''	671	Profond, se traverse sur le bac	Lom Aval (Bac)

BOPO-1	2	N05°36'53,6''	E014°04'19,7''	687	Piscine d'orpaillage en activité, utilisation de mercure	Békadé (Piscine)
BOCE-6	1	N05°36'21,2''	E014°03'25,2''	692	Très faible débit (aspect de ruisseau) => saison sèche, couleur rougeâtre,	Mbal
BOCE-7	1	N05°36'55,5''	E014°04'20,3''	689	Fortement dévié pour alimentation des piscines, utilisation de mercure	Békadé
BOCE-8	1	N05°35'38,1''	E014°06'18,0''	719	Fortement dévié, utilisation de mercure, or filonien	Yondéré
BOF		N05°36'05,0''	E014°04'48,3''	789	Eau de forage consommée par la population.	Sous-préfecture

Les échantillons prélevés pour dans les cours d'eau portent le code BOCE (Bétaré-Oya Cours d'Eau). L'échantillon BOF provient du forage (Bétaré-Oya Forage) et l'échantillon BOPO1 a été prélevé dans un piscine d'orpaillage (Bétaré-Oya Piscine d'Orpaillage). Trois échantillons ont été sélectionnés pour l'analyse du soufre total (BOCE4, BOCE5 et BOF) : le premier en amont du fleuve Lom, le second en aval du fleuve et le troisième dans un forage au centre-ville comptant comme représentatif de l'eau de consommation de la population.

b) Mesures in-situ :

Parallèlement à l'échantillonnage, des mesures in situ des eaux ont été effectuées pour les paramètres physiques de pH, de température, conductivité électrique, turbidité, oxygène dissout.

La température, le pH, les solides totaux dissouts (TDS) et la conductivité électrique (EC) ont été mesurés à l'aide d'un multi paramètre à sondes de marque Hanna HI9811-5. Il mesure le pH de 0 à 14 avec une résolution de 0.1, la conductivité de 0 à 6000 µS/cm et les TDS de 0 à 3000 mg/l. La calibration est rapide et facilement réalisable sur site avec une solution d'étalonnage certifiée

commune aux différents paramètres. La sonde est rincée à l'eau distillée après les mesures sur chaque échantillon.

Les mesures de turbidité ont été faite avec le Turbidimètre AL250T-IR (Fisher Scientific, code produit : 11709079).

L'oxygène dissout a pu être mesuré à partir d'un appareil à sonde l'Instrumental/ Oxygène dissous, PCE-PHD 1. L'étalonnage est effectué dans l'air à pression atmosphérique. On rince la sonde à la fin de chaque mesure avec de l'eau distillée.

c) Analyse au laboratoire

Le terme métaux lourds sera employé dans ce travail pour désigner à la fois certains métaux de transition, métaux pauvres et métalloïdes, tous compris dans la gamme d'éléments métalliques choisis pour cette étude.

Les métaux lourds ont été analysés au laboratoire de l'IITA par Spectrométrie à Emission Optique couplée à l'ICP (Spectrométrie de Masse à Plasma Induit) à l'aide de l'appareil Optima 8000 ICP-OES. Une gamme de quatorze éléments (Al, Fe, Cu, Mn, Zn, Mn, Pb, Ni, Co, As, V, Cr, Hg, Cd et S) a été sélectionnée à cet effet sur la base de la composition chimique des roches et des sols, tirée des travaux en revue de la littérature du secteur d'étude : Vishiti *et al.*, (2018) ; Ngako et al., (2003) ; Kankeu et al., (2009), ... Le choix du mercure a en plus été motivé par son utilisation pour l'amalgamation dans l'exploitation de l'or.

Les analyses à plasma induit permettent de mesurer de façon quantitative les teneurs en éléments d'une substance ou d'une solution. La gamme de mesure va des parties par billion aux pourcentage massique. A l'exception de H, C, O, N et des halogènes, la technique peut mesurer tous les éléments.

Procédure : Les échantillons d'eau ont été vaporisés au cœur d'un plasma induit d'argon dont les températures peuvent atteindre 8000°C. Température à laquelle toute substance à analyser subit l'atomisation, l'ionisation et l'excitation thermique. Le spectromètre à émission optique peut alors détecter et quantifier les éléments en présence.

La Spectrométrie à Emission Optique couplée à l'ICP (ICP-OES) consiste en l'excitation thermique des ions dans le plasma et l'analyse de la lumière émise par ces ions excités. Chaque élément émet

des longueurs d'onde caractéristiques. Les longueurs d'onde sont alors séparées, identifiées et leurs intensités mesurées par un spectromètre. La concentration élémentaire est ensuite déterminée par confrontation à une calibration externe. Les difficultés rencontrées avec cette méthode d'analyse sont les interférences physiques (viscosité, tension superficielle, acidité, charge en sels dissous) et optiques (émission de longueurs d'ondes proches par deux éléments).



Les résultats des analyses seront présentés sous forme de tableaux et interprétés par des histogrammes et des courbes. Pour des raisons de lisibilité, certains graphiques pourront subir une transformation logarithmique afin de pallier aux écarts entre les valeurs maximales et les valeurs minimales.

CHAPITRE III : PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATION

I- PARAMETRES PHYSIQUES IN-SITU

1- Caractérisation du paysage

Une descente sur le terrain de la période de 28 mars au 23 avril 2019 a permis de constater que sur les sites miniers de Bétaré-Oya, le paysage est fait de monticules de terres excavés, de trous/puits d'exploitation (sortes de mines à ciel ouvert), de piscines de lavage, etc. faisant penser à des cratères du paysage lunaire. Les images qui suivent (fig.13 et 14) ont été prises sur sites pour représenter l'état actuel du paysage.



Les travaux de Mboudou et al, (2017) ont permis d'identifier le profil lithologique type de la zone d'étude : du haut vers le bas, un horizon surfacique d'environ 1 m, suivit par une saprolite d'environ 2m en dessous de laquelle on retrouve un niveau sableux de 1,5m que suivent des sables conglomératiques sur environ 1,4m qui repose sur du schiste (Mboudou *et al.*, 2017).

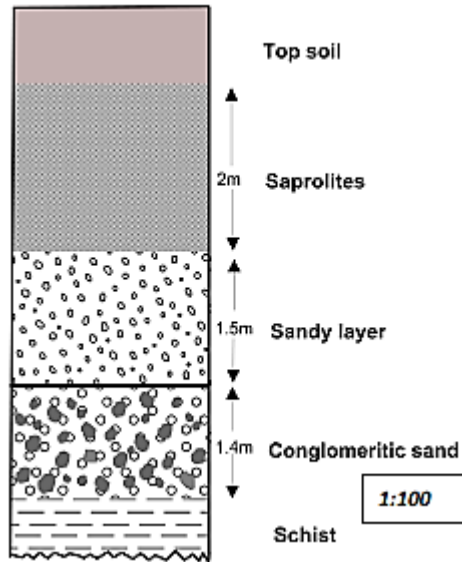


Figure 15 : profil lithologique type à Bétaré-Oya

2- Présentation

Les paramètres physiques : pH, température, conductivité électrique, turbidité, oxygène dissout ont été analysés sur le terrain. Les points de prélèvement ont été positionnés d'amont en aval de la rivière Lom (de Bangbel à Lom), près des sites d'exploitation aurifère. Les sites en activité sont majoritairement rencontrés sur la rive droite du côté de la rivière Mari. Cette dernière est sollicitée probablement pour son enrichissement dû à ses nombreux méandres et pour le fait qu'elle ne s'assèche pas pendant la saison sèche, facilitant ainsi l'accès à l'eau pour le lavage du minerai. Les points de prélèvement ont également été choisis pour leur proximité avec la route. La carte qui suit (fig. 16) présente la localisation des différents points d'échantillonnage.

« REHABILITATION D'UN SITE MINIER DEGRADE DU SECTEUR DE BETARE-OYA (EST CAMEROUN) »

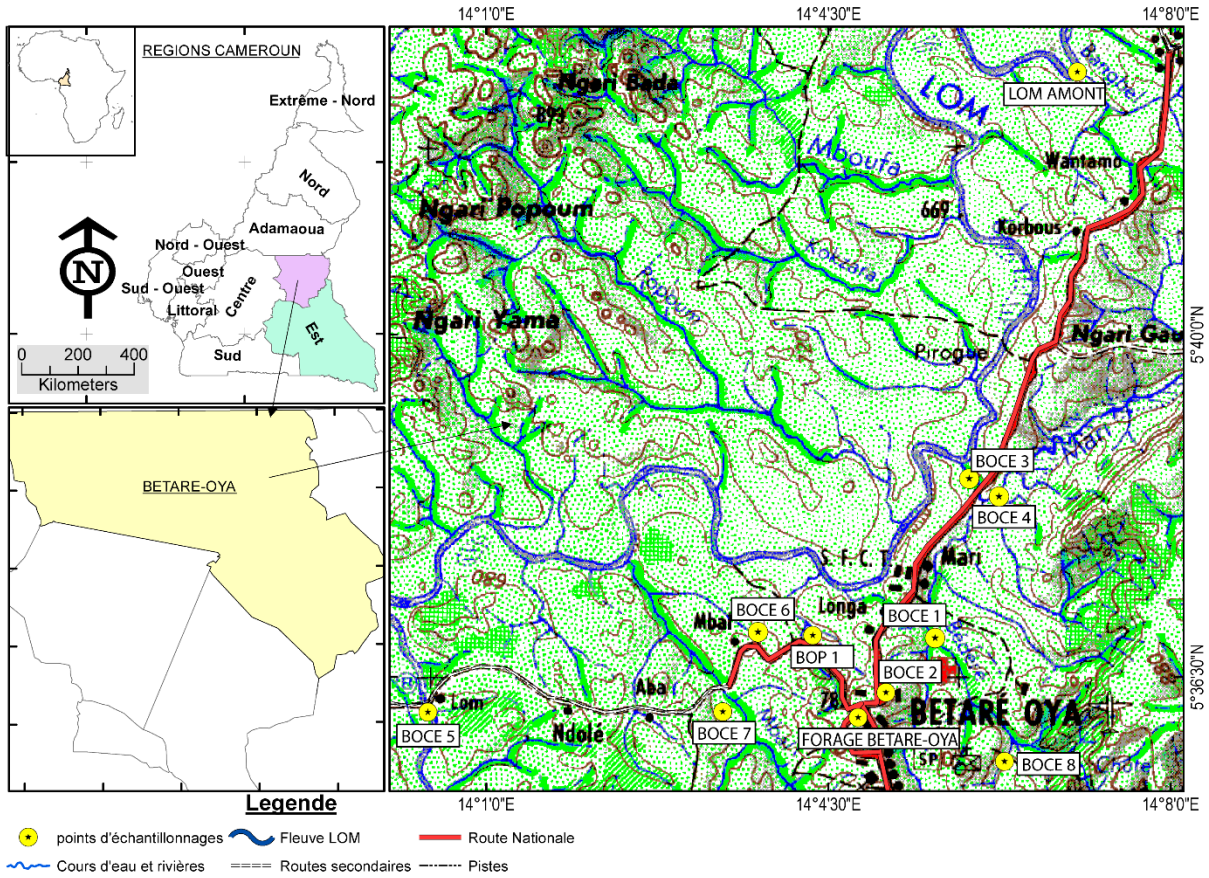


Figure 16: Carte de prélèvement de la zone d'étude

Les résultats des paramètres in situ obtenus pour chaque échantillon prélevé sont regroupés dans le tableau 3 qui suit :

Tableau 3 : résultats d'analyses des paramètres physiques in-situ

BOCE- X/ BOPO- Y	Coordonnées géographiques (dég.min.sec)			Paramètres in-situ							
	Long.	Lat.	Alt. (m)	pH	Température (°C)	Conductivité Electrique (µS/cm)	Turbidité (NTU)	Oxygène dissout (mg/l)	TDS (mg /L)	% de saturation	Localités
BOCE- 1	N05°42'41,1''	E014°07'02,6''	677	6,5	24,8	20	177	0,5	00	5,95	Bangbel
BOCE- 2	N05°39'46,4''	E014°08'14,6''	689	6	26,0	40	17,2	0,2	10	2,47	Nguengué
BOCE- 3	N05°38'21,2''	E014°06'01,1''	680	5,8	25,0	10	59,0	0,3	00	3,64	Mari
BOCE- 4	N05°38'16,7''	E014°06'04,2''	677	6,3	30,5	50	936	0,1	30	1,33	Gbedjéré
BOCE- 5	N05°36'08,4''	E014°00'24,1''	671	6,6	26,0	30	204	0,7	00	8,65	Lom Aval (Bac)
BOCE- 6	N05°36'21,2''	E014°03'25,2''	692	6,3	28,6	20	788	0,4	00	5,22	Mbal
BOCE- 7	N05°36'55,5''	E014°04'20,3''	689	6	26	30	526	0,9	00	11,12	Békadé (cours d'eau)
BOCE- 8	N05°35'38,1''	E014°06'18,0''	719	5,9	30,4	40	761	0,4	10	5,33	Yondéré
BOPO- 1	N05°36'53,6''	E014°04'19,7''	687	6,3	31	50	236	1,0	20	13,50	Békadé (Piscine)
BOF	N05°36'05,0''	E014°04'48,3''	789	5,4	27,9	80	62	0,3	30	3,84	Sous- préfecture
MAX			789	6,6	31	80	936	1	30	13,5	
MIN			671	5,4	24,8	10	17,2	0,1	0	1,33	
MOY			697	6,11	27,62	37	376,62	0,48	10	6,105	

3- Interprétation

a) Température

La température des eaux prélevées dans la région étudiée varie de 24,8 à 31 °C, la valeur moyenne est de 27,62°C. Certains échantillons ont des valeurs supérieures à celles des normes fixées par l'O.M.S. (25 °C) pour la consommation. Les températures sont élevées dans la zone d'étude. Cela peut être dû au fait que la campagne d'échantillon s'est déroulée pendant la grande saison sèche.

b) Potentiel hydrogène (pH)

Le pH exprime la concentration en ion H⁺ d'une solution, il détermine l'acidité ou l'alcalinité. Les valeurs de pH varient entre 5,4 et 6.6. Les mesures du pH sont légèrement inférieures à l'intervalle optimal de potabilité de l'OMS (6,5 et 9,5), les valeurs les plus élevées se retrouvent dans les échantillons de Lom aval, Bangbel, Mbal, Gbedjéré et Békadé (BOCE5, BOCE1, BOCE6, BOCE4 et BOPO 1). Ces eaux sont donc acides à légèrement acides. Ceci peut être dû à d'une part à l'acidité de l'eau de pluie et d'autre part à l'oxydation des certains minéraux comme la pyrite qui libère les ions H⁺ dans le milieu.

c) La conductivité électrique (CE)

La conductivité traduit globalement la teneur d'une eau en sels dissous. C'est la capacité d'une matière à faire passer le courant électrique. L'eau sera plus ou moins conductrice selon sa concentration en sels minéraux. Les eaux analysées présentent des valeurs inférieures à 250 µS/cm (limite OMS), les valeurs les plus élevées sont retrouvées dans les échantillons BOF, BOPO-1, BOCE-4. Ces eaux sont faibles en sels minéraux et donc faiblement conductrices.

d) Le taux de saturation en oxygène dissout

Il est calculé à partir de l'oxygène dissout et de la température mesurés in-situ, et des valeurs maximales d'oxygènes dissout aux températures de prises de mesures selon la formule :

$$\% \text{ de Sat.} = \left(\frac{\text{valeur mesurée d'oxygène dissous dans l'eau}}{\text{valeur de solubilité max dans l'eau à température et pression données lors du prélèvement}} \right) \times 100$$

L'oxygène dissout dans les échantillons vari de 0,1 à 1mg/l avec une valeur moyenne de 0,48, la valeur la plus élevée est retrouvée dans le BOPO1. Pour des concentrations allant de 1 à 2 mg/l, le taux d'oxygène est considéré insuffisant pour la survie de la plupart des organismes, cela indique que la pollution des eaux est toutefois réversible. L'oxygène dissout dépend essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. Les eaux étudiées contiennent donc de très faibles teneurs en oxygène dissout. Parallèlement, le % de saturation dans tous les échantillons analysés est inférieur à 60%, le taux d'oxygène est donc très faible dans les eaux de Bétaré-Oya.

e) La turbidité

C'est la mesure de la présence de matières en suspension dans l'eau. Elles sont constituées de très fines particules (débris de roche, micro-organismes). Sur le terrain, les eaux analysées présentaient dans la majorité un aspect assez trouble, voire opaque. La turbidité de ces eaux est très élevée (17,2 à 936 NTU). Cette importante turbidité des eaux analysées est probablement

due à l'intense activité minière dans la zone. L'échantillon provenant du forage possède la valeur la plus faible (eau potable).

f) Les TDS

TDS désigne les solides totaux dissous. Les valeurs obtenues oscillent entre 0 et 30 mg/l. L'OMS recommande des valeurs optimums de TDS en dessous de 1000 mg/l. Les eaux analysées présentent toutes des valeurs conformes aux normes, les plus élevées sont rencontrées dans les échantillons BOCE-4 et BOF. Les figures 17 et 18 ci-dessous représentent les diagrammes croisés dynamiques des paramètres physiques mesurés in-situ.

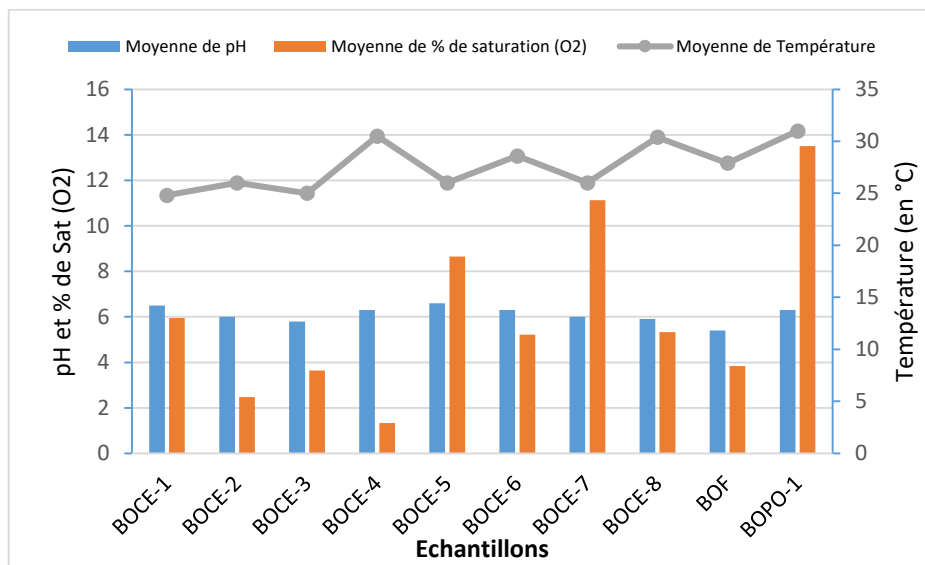


Figure 17 : Paramètres physiques (Ph, % de saturation O2 et température) dans les échantillons

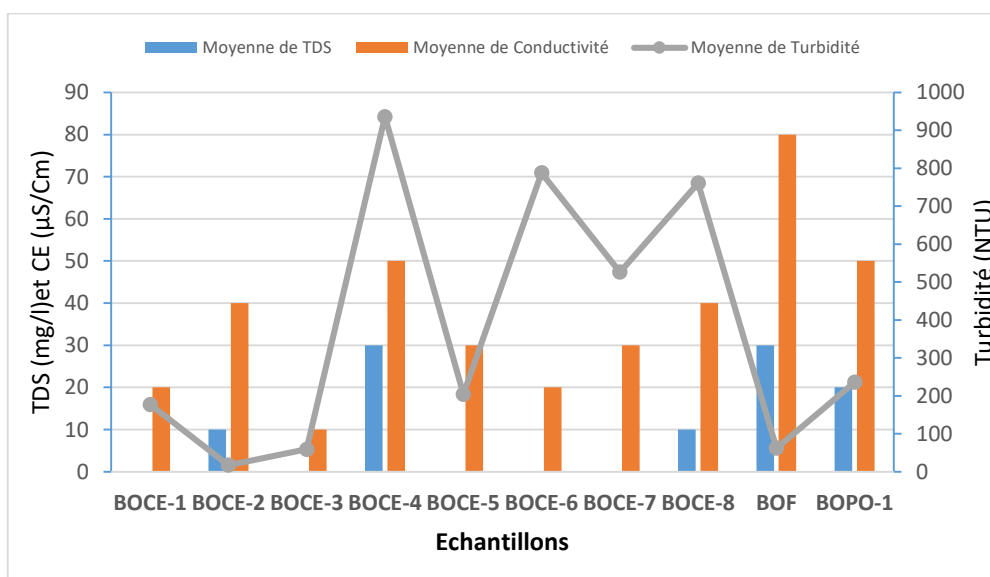


Figure 18 : Paramètres physiques (TDS, CE et turbidité) dans les échantillons

II- ANALYSES DES METAUX LOURDS

Les échantillons d'eau prélevés à Bétaré-Oya ont été analysés au laboratoire de IITA Cameroun par techniques analytiques à plasma induit (ICP-OES). Parmi les échantillons prélevés (BOCE1, à BOCE7, BOF, BOPO1), trois ont été sélectionnés pour l'analyse du soufre total (BOCE4, BOCE5 et BOF) : le premier en amont du fleuve Lom, le second en aval du fleuve et le troisième dans un forage au centre-ville comptant comme représentatif de l'eau de consommation de la population. La comparaison des concentrations en soufre des échantillons en amont et en aval permettrons de se prononcer sur son origine (naturelle ou anthropique).

Tableau 4 : résultats d'analyses des métaux lourds

	Al	Fe	Cu	Zn	Mn	Pb	Ni	Co	As	V	Cr	Hg	Cd	S
Unité	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
BOCE 1	10,2 3	4,66 8	0,01 6	0,20 5	0,02 1	0,00 5	0,02 5	0 0	0,00 2	0,159	0,00 6	0,03 4	0,00 1	
BOCE 2	0,08 5	0,39 5	0,00 1	0,12 3	0,51 8	0,00 2	0,00 9	0,00 1	0,01 3	0,141	0,00 8	0 0	0,00 2	
BOCE 3	3,64 7	2,29 1	0,00 2	0,10 1	0,01 2	0,00 2	0,00 7	0,00 2	0,00 7	0,154	0,00 5	0,01 5	0,00 1	
BOCE4	9,02 9	3,02 1	0,02 5	0,53 1	0,10 6	0,00 4	0,03 3	0,00 1	0,00 2	0,157	0,00 2	0,01 9	0,00 1	1,583
BOCE 5	9,83 3	4,93 8	0,01 6	0,44 4	0,02 8	0,00 1	0,02 5	0 0	0,00 2	0,164	0,00 5	0,02 6	0 0	1,04
BOCE 6	4,41	3,09 4	0,01 3	0,35 6	0,01 5	0,00 2	0,02	0,00 2	0,00 3	0,155	0,00 3	0,01 9	0,00 1	
BOCE 7	1,44 5	0,77 5	0,00 3	0,12 6	0,19	0,00 7	0,00 9	0 0	0,00 2	0,154	0,00 6	0,00 6	0,00 1	
BOCE 8	2,13 6	2,04 5	0,01 3	0,24	1,06 1	0,06	0,01 3	0 0	0,00 7	0,149	0,00 4	0,00 2	0,00 1	
BOF	0,02 2	0,00 2	0,00 6	0,05 8	0,00 9	0,00 3	0,00 3	0,00 1	0,01 5	0,141	0,00 7	0 0	0,00 1	0,83
BOPO1	1,55 7	0,83 6	0,00 4	0,13 3	0,46 4	0,00 6	0,00 8	0 0	0,00 8	0,15	0,00 6	0 0	0,00 1	
MAX	10,2 3	4,93 8	0,02 5	0,53 1	1,06 1	0,06	0,03 3	0,00 2	0,01 5	0,164	0,00 8	0,03 4	0,00 2	1,583
MIN	0,02 2	0,00 2	0,00 1	0,05 8	0,00 9	0,00 1	0,00 3	0 0	0,00 2	0,141	0,00 2	0 0	0 0	0,83
MOYEN NE	4,23 97	2,20 65	0,00 99	0,23 17	0,24 24	0,00 92	0,01 52	0,00 07	0,00 61	0,1524	0,00 52	0,01 21	0,00 1	1,151
NORME S	0,2	0,3	2	3	0,05	0,01	0,07	0,07	0,01	0,0000 01	0,05	0,00 6	0,00 5	0,0000 05

1- Interprétation

a) Examen préliminaire des données

Le balayage visuel des données permet de constater la prédominance d'aluminium, fer manganèse, du vanadium, du mercure et du soufre. Zinc, cuivre, nickel, chrome, plomb, cobalt, arsenic, cadmium présentent les concentrations les moins élevées.

b) Allure générale des valeurs de concentration

L'aluminium varie de 0,022 à 10,233 mg/l, son maximum est remarquable dans l'échantillon BOCE1 prélevé dans les eaux de Bangbel où les sites sont en activité. Les concentrations en fer évoluent de 0,002 mg/l à 4,938 mg/l, avec le taux le plus élevé dans l'échantillon BOCE 5 prélevé en aval du fleuve Lom (C'est la confluence de tous les affluents). La teneur en cuivre dans les échantillons fluctue entre 0,003 mg/l et 0,025 mg/l, elle atteint son summum dans l'échantillon BOCE 4 prélevé dans le cours d'eau Gbedjéré. Les concentrations en zinc varient de 0,058 mg/l à 0,531 mg/l. la valeur la plus faible étant retrouvée dans l'échantillon d'eau de forage. Le taux de manganèse varie de 0,009 mg/l à 1,061 mg/l. la valeur la plus élevée est celle du cours d'eau Békadé dans l'échantillon BOCE7. Le plomb présente des valeurs très faibles allant de 0,001 mg/l à 0,060 mg/l dans l'échantillon BOCE8 à Yondéré, site où l'activité était la plus intense. Les valeurs de nickel oscillent entre 0,003 mg/l et 0,033 mg/l, il est maximal dans l'échantillon BOCE4 de l'aval du Lom mais sa teneur reste très faible. Le cobalt et le cadmium présentent les concentrations les plus infimes quel que soit l'échantillon considéré (0,000 mg/l à 0,002 mg/l).

Les teneurs en vanadium sont conséquentes, elles évoluent de 0,141 mg/l à 0,159 mg/l. La concentration la plus faible (0,141 mg/l) correspondant à l'échantillon du forage. Le chrome pour sa part varie de 0,002 mg/l à 0,008 mg/l sa teneur est relativement faible dans tous les échantillons. Les concentrations en mercure évoluent de 0,000 mg/l à 0,034 mg/l. Bien qu'utilisé pour l'amalgamation, le mercure n'est pas présent dans tous les échantillons (notamment dans l'eau de forage), on le retrouve surtout dans les eaux de sites en activités où l'or est extrait des filons de quartz et où l'exploitation est semi-mécanisée (BOCE1 à Bangbel, BOCE5 en aval du Lom). Pour le soufre, les concentrations vont de 0,83 à 1,583 mg/l, la valeur la plus faible correspond à l'échantillon d'eau du forage (BOF) représentatif de la qualité de l'eau de consommation.

c) Evolution par échantillon et comparaison aux normes OMS 2011

Dans l'échantillon BOCE 1, l'ordre croissant les éléments dominants est Al, Fe, Zn, V, Hg, Ni, Mn, Cu, Cr, Pb, Cd et Co. La concentration en Al est la plus élevée des tous les éléments, celle du Co est nulle. Seuls les teneurs en Al, Fe, Hg, V et S sont supérieures aux normes OMS 2011.

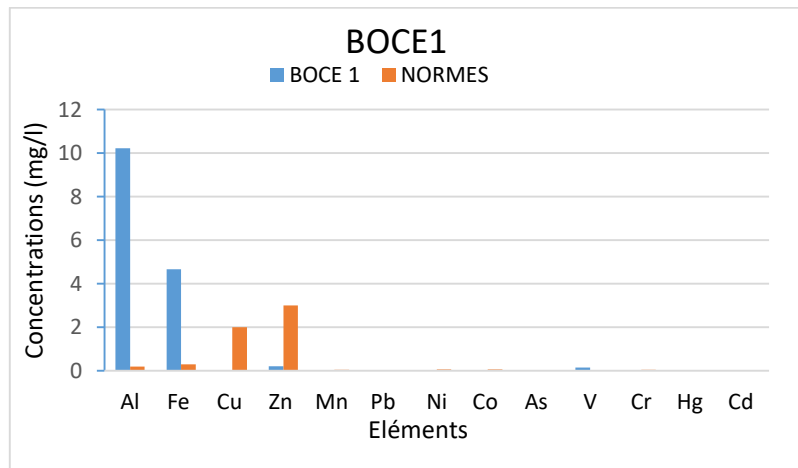


Figure 19 : échantillon BOCE 1

L'échantillon BOCE 2 pour sa part présente une dominance du Mn, suivi des éléments Fe, Zn, V, Al. Les autres ont de très faibles concentrations. Les teneurs en Al et Mn sont supérieures à la directive OMS 2011, celles de Fe et As n'excèdent des seuils que par leurs deuxièmes décimales.

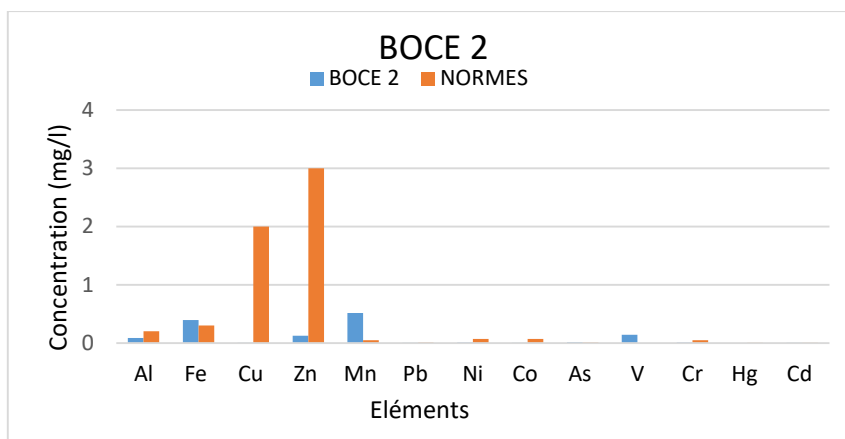


Figure 20: échantillon BOCE 2

L'Al, Fe, V et Zn sont les plus abondants dans l'échantillon BOCE 3. En suite viennent les Mn, Hg suivis de Ni, As, Cr, Cu, Pb, Co et Cd. Le soufre a été analysé dans cet échantillon pour déterminer son origine dans la zone. Sa valeur est très élevée et pourrait être due à la forte

activité dans le cours d'eau. Les concentrations en Al, Fe, Hg et V dépassent les valeurs préconisées par la directive OMS (2011).

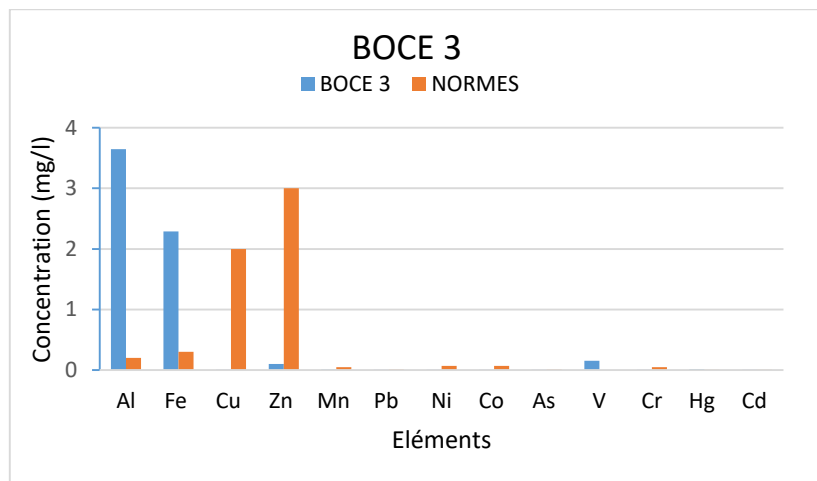


Figure 21 : échantillon BOCE 3

L'échantillon BOCE 4 affiche des concentrations très élevées en Al, Fe, et S. Les autres éléments sont présents en très faibles quantités. Les valeurs de Al, Fe, S et V sont supérieures aux normes OMS 2011.

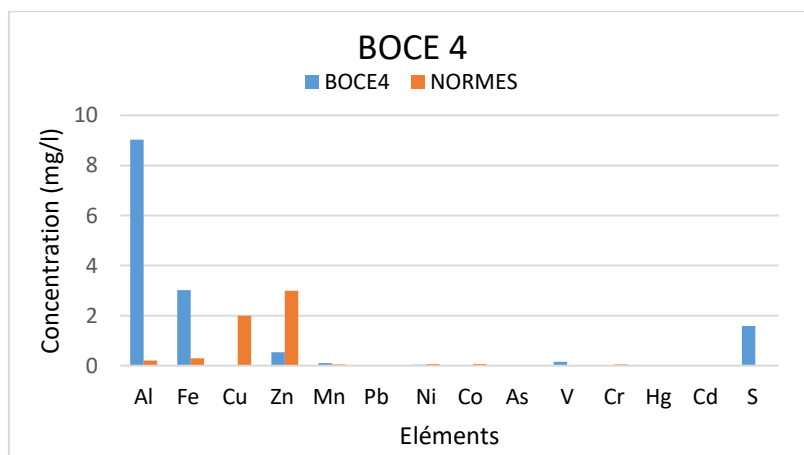


Figure 22 : échantillon BOCE 4

L'Al, le Fe et le S sont dominants dans l'échantillon BOCE 5, ensuite arrivent le Zn et le V. Les concentrations de Mn, Hg, Ni et Cu suivent, après lesquelles se trouvent celles de Cr, As et Pb. Les teneurs en Cd et Co sont nulles dans cet échantillon. Les trois éléments dominants de l'échantillon sont aussi ceux dont les teneurs sont supérieures aux normes de l'OMS.

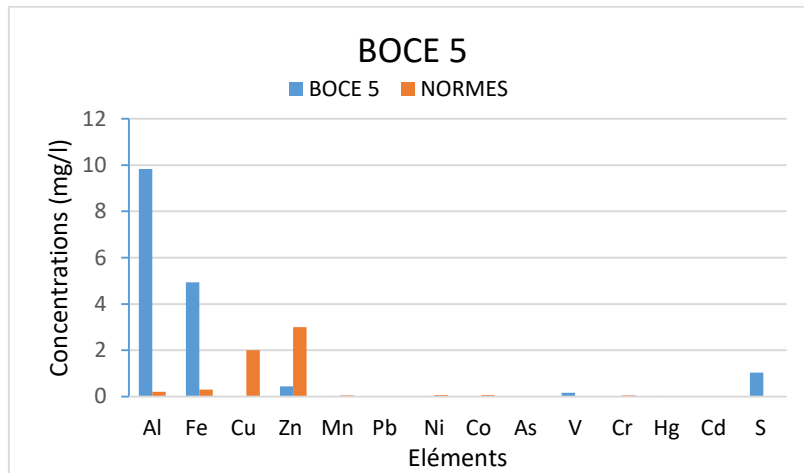


Figure 23 : échantillon BOCE 5

Les éléments les plus abondants dans l'échantillon BOCE 6 sont l'Al et le Fe, suivis de Zn et V. Les teneurs en Cu, Hg et Ni sont de l'ordre du 1/10^è de mg/l et reste des éléments de l'ordre du 1/100^è de mg/l. l'Al, le Fe et le V possèdent des concentrations plus élevées que celles souhaitées par l'OMS (2011).

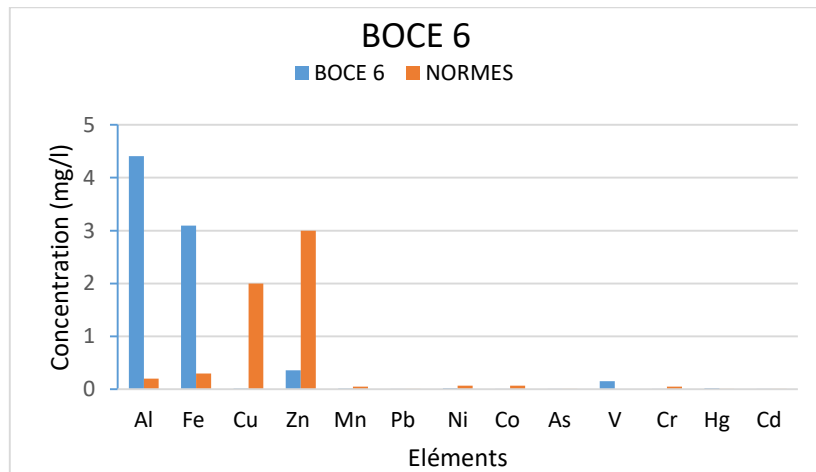


Figure 24 : échantillon BOCE 6

Dans l'échantillon BOCE 7, l'Al, le Fe et le Mn, sont les plus abondants. Les concentrations de V, et Zn sont les secondes plus abondantes mais elles restent inférieures à la directive de l'OMS (2011). Tandis que l'aluminium, le fer et le manganèse ont des teneurs qui dépassent les niveaux préconisés par l'OMS (2011).

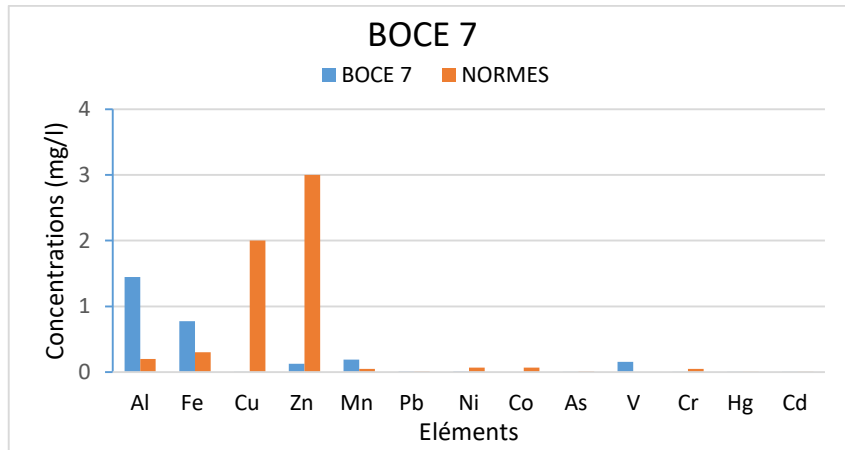


Figure 25 : échantillon BOCE 7

L'échantillon BOCE 8 présente une dominance de Al, Fe et Mn, suivi de V. Ces éléments sont présents en quantité supérieures à la directive de l'OMS (2011).

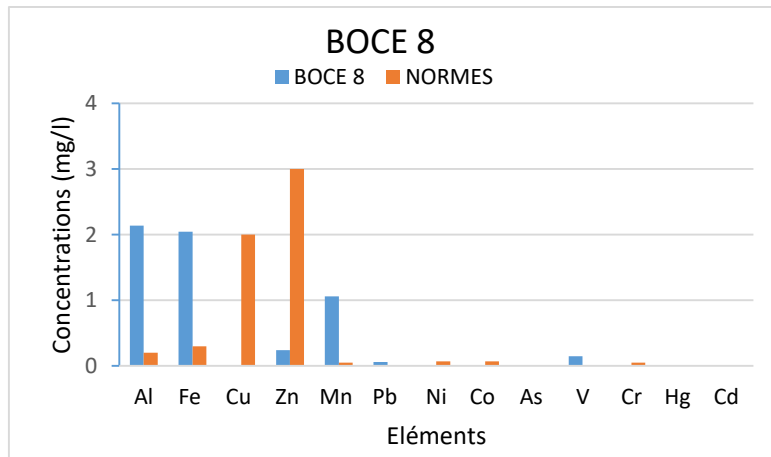


Figure 26 : échantillon BOCE 8

Les concentrations des éléments sont négligeables et inférieures aux valeurs préconisées par l'OMS pour l'eau potable, dans l'échantillon BOF à l'exception de S et V. Cet échantillon est représentatif de la qualité de l'eau consommée par les populations de la zone.

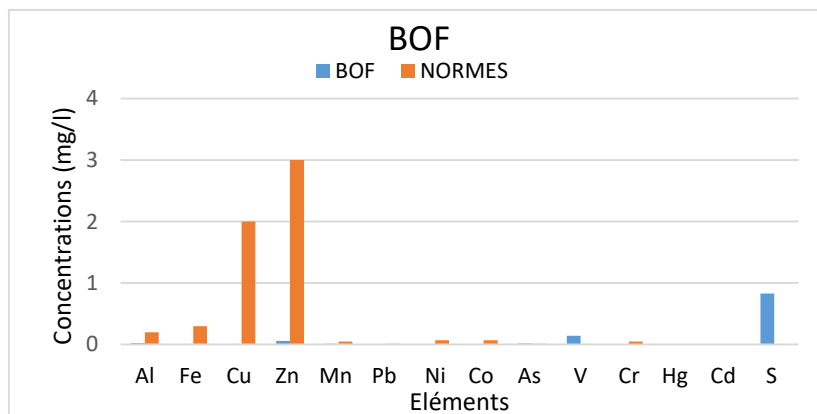


Figure 27 : échantillon BOF

Dans le BOPO1, l'Al, le Fe, le Mn et le V sont prédominants. Leurs valeurs sont plus élevées que celles recommandées par l'OMS (2011).

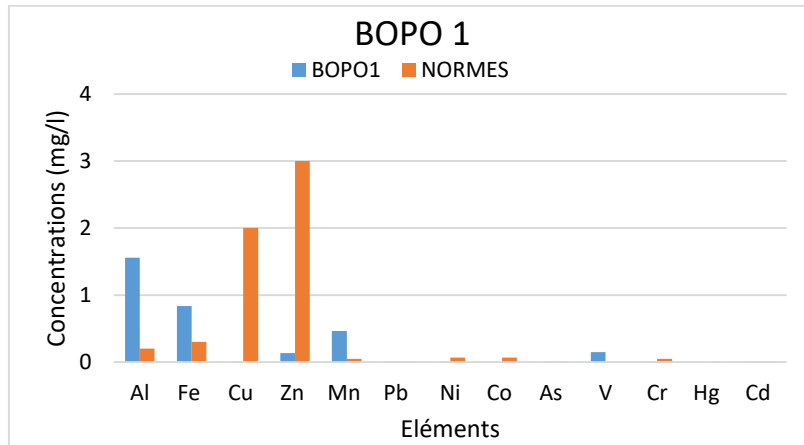


Figure 28 : échantillon BOPO1

La figure 29 qui suit présente les éléments dont les concentrations dans les eaux analysées ne dépassent pas les normes prescrites pour la consommation de l'eau.

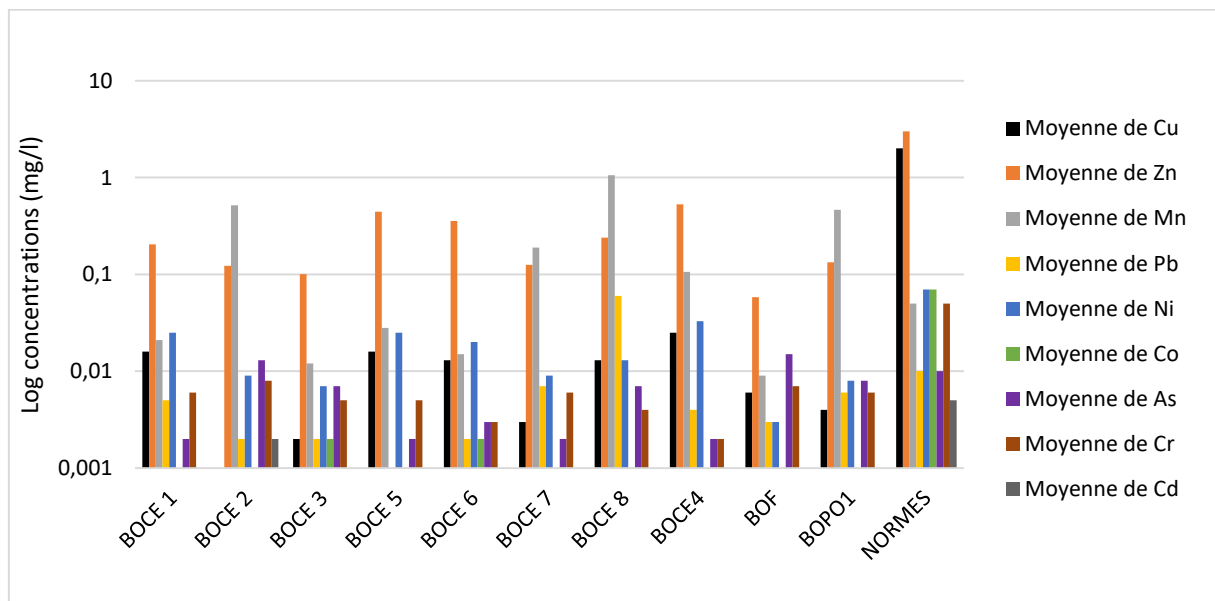


Figure 29 : éléments à concentrations inférieurs aux seuils de l'OMS (2011).

La figure ci-dessous représente les moyennes des concentrations des métaux lourds qui dépassent les valeurs seuils de l'OMS 2011 pour la consommation.

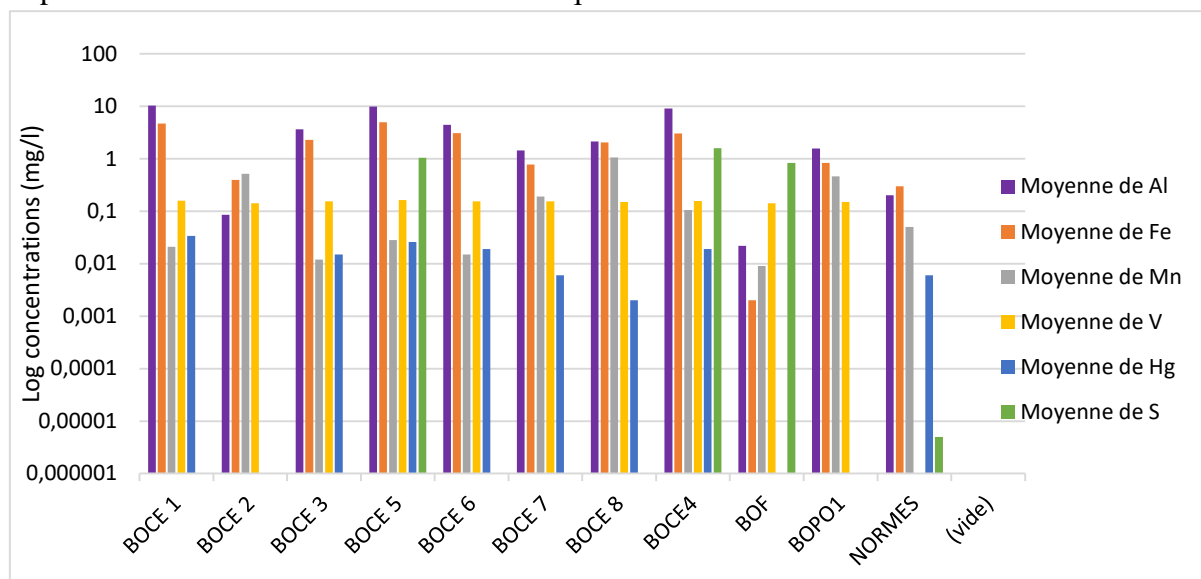


Figure 30 : éléments à concentrations supérieurs aux seuils de l'OMS (2011).

d) Origine probable des fortes concentrations

Les concentrations élevées en Al, Fe, S, Mn, V et Hg, sont certainement dues aux différentes activités liées à l'extraction de l'or dans la zone. Les teneurs en Hg proviennent probablement de son utilisation pour l'amalgamation au cours de l'extraction de l'or. Le fer est naturellement présent dans les roches du secteur et sa forte concentration peut être justifiée par les phénomènes d'altération et d'érosion mais plus encore par les activités qui conduisent à son exposition en surface. L'Al proviendrait éventuellement des minéraux argileux en suspension. Le manganèse pourrait provenir de l'altération des roches. Aucune recommandation n'a été effectuée par l'OMS (2011) quant aux seuils de S et V. Le Cameroun ne disposant de ses propres normes pour les qualités de l'eau potable, les valeurs obtenues de V et S ont été considérées comme élevées.

2- Indice de qualité des eaux (IQE)

L'indice de qualité des eaux utilisé ici a été mis au point par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) du Canada pour rendre compte de la qualité des eaux de surface pour un usage spécifique ou un ensemble d'usages. L'IQE permet de dresser un portrait de la qualité des eaux de surface.

Le calcul de l'IQE se fait à partir de trois paramètres à savoir l'étendue (F1), la fréquence (F2) et l'amplitude (F3). F1 représente le pourcentage de paramètre ayant au moins un dépassement de critère de la qualité des eaux ; F2 traduit le pourcentage de résultats analytiques de tous les

paramètres, qui excèdent les critères (normes de l'OMS) ; F2 est l'écart type entre les résultats analytiques non conformes et les critères de qualité ; le critère ici est représenté par les normes OMS (2011).

$$F1 = \frac{\text{Nombre de paramètres non conformes}}{\text{Nombre total de Paramètres}} \times 100$$

$$F2 = \frac{\text{Nombre de résultats non conformes}}{\text{Nombre total de résultats}} \times 100$$

F3 :

$$- \text{ Coefficient d'écart} = \frac{\text{Valeurs de résultats non conformes}}{\text{critères}} - 1$$

$$- \text{ Sncé} = \frac{\text{Somme d'écarts}}{\text{Nombre total de résultats}}$$

$$\text{IQE} = 100 - \frac{\sqrt{\text{Sncé}}}{0,01\text{Sncé}+0,01}$$

$$\text{IQE} = 100 - \frac{\sqrt{F12+F22+ F32}}{1,732}$$

Les valeurs de l'IQE vont de 0 à 100 et sont classés suivant le tableau 5 qui suit :

Tableau 5 : Classification des valeurs de l'indice de qualité des eaux

Intervalle IQE	Qualité de l'eau	Commentaire
95 – 100	Excellente	Concentrations conformes aux critères à peu près en tout temps
80 – 94	Bonne	Concentrations rarement écartées des niveaux naturels ou souhaitable
65 – 79	Satisfaisante	Concentrations s'écartant parfois des niveaux naturels ou souhaitables
45 – 64	Douteuse	Concentrations s'écartant souvent des niveaux naturels ou souhaitables
0 – 44	mauvaise	Concentrations s'écartant généralement des niveaux naturels ou souhaitables

Le tableau 6 suivant représente les valeurs d'IQE des eaux prélevées dans les cours à Bétaré-Oya après calculs :

Tableau 6 : Indices de qualité des eaux par échantillon

Sample	Etendu	Fréquence F2	Amplitude	IQE
Id	(F1)	(F2)	(F3)	
BOCE 1	30,769	30,769	99,991	17,139
BOCE 2	23,077	23,077	99,990	20,078
BOCE 3	30,769	15,385	99,991	19,651
BOCE 4	42,857	28,571	99,997	14,530
BOCE 5	35,714	21,429	99,996	17,691
BOCE 6	30,769	30,769	99,991	17,139
BOCE 7	30,769	23,077	99,991	18,595
BOCE 8	38,462	30,769	99,991	15,305
BOF	14,286	14,286	99,995	22,484
BOPO1	30,769	21,429	99,991	18,856

Les valeurs de l'indice de qualité des eaux de Bétaré-Oya sont toutes comprises dans l'intervalle [0-44], les concentrations s'écartant généralement des niveaux naturels ou souhaitables.

3- Indice de pollution des métaux lourds (Heavy metal Pollution Index HPI)

L'indice de pollution des métaux permet d'évaluer la pollution globale en métaux lourds dans les eaux de surface étudiées. Il est calculé à partir de la pondération unitaire (W_i), des sous-indices et des normes recommandées (S_i) par l'OMS, à l'aide des formules suivantes (Rakotondrabe *et al.*, 2017) :

$$W_i = k / S_i$$

$$Q_i = 100 \times V_i / S_i$$

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

w_i est compris entre 0 et 1 et représente le poids attribué à chaque métal. W_i est la pondération unitaire, c'est l'inverse de la norme recommandée (S_i) du paramètre i correspondant. L'indice de pollution **critique correspond à une valeur de 100**.

L'indice a été calculé pour chacun des éléments à partir des valeurs de concentration moyenne en mg/l. Le tableau 7 ci-dessous présente les indices de pollution des métaux dans les eaux analysées en comparaison avec les normes de l'OMS (2011) pour l'eau de consommation :

Tableau 7 : Indice de pollution par les métaux lourds (HPI)

ELEMENT	MOYENNE (mg/l)	HPI (mg/l)	NORMES OMS 2011 (mg/l)
Al	4,2397	2119,85	0,2
Fe	2,2065	735,5	0,3
Cu	0,0099	0,495	2
Zn	0,2317	7,7233	3
Mn	0,2424	484,8	0,05
Pb	0,0092	92	0,01
Ni	0,0152	21,7143	0,07
Co	0,0007	1	0,07
As	0,0061	61	0,01
V	0,1524	15240000	0,000001
Cr	0,0052	10,4	0,05
Hg	0,0121	201,6667	0,006
Cd	0,001	20	0,005
S	1,151	6906000	0,000005

Le vanadium et le soufre présente des indices de pollution très largement supérieurs à la valeur critique, le milieu serait alors fortement pollué en ces deux métaux. Al, Fe, Mn, Hg possèdent des indices supérieurs à la valeur critique. Les autres éléments ont des indices inférieurs au seuil critique de pollution. Les eaux analysées montrent une pollution critique en Al, Fe, Mn, Hg, V et S.

CHAPITRE V : DISCUSSION

I- CARACTERISATION PHYSIQUES DES EAUX

L'analyse des paramètres physiques *in situ* ont révélés que les eaux analysées sont acides à légèrement acides ($5,4 < \text{pH} < 6,6$), faiblement minéralisées ou conductrices ($10 < \text{EC} < 80 \mu\text{S/cm}$), avec un taux d'oxygène très faible ($0 < \% \text{ de saturation} < 2$). La turbidité est moyenne (17,2 à 936 NTU), les TDS sont faibles ($0 < \text{TDS} < 30 \text{ mg/l}$) et la température variant de 24,8 à 31 °C.

(Rakotondrabe *et al.*, 2017) montraient que les eaux de surface du secteur étaient acides à basiques ($5,40 < \text{pH} < 8,84$), tandis que (Abendé, 2017) trouve des valeurs de pH comprises entre 6,50 et 7. Pour chaque étude, certains échantillons s'éloignent des normes OMS ($6,5 < \text{pH} < 8,5$). L'acidité traduite par ces valeurs peut être due à l'acidité naturelle des eaux de pluie (chargées en H^+) et aussi à la présence de sulfures issus de l'oxydation et l'hydrolyse des minéraux qui contiennent le soufre (pyrite FeS_2 , chalcopryrite CuFeS_2 , galène PbS).

La conductivité électrique enregistrées par (Abendé, 2017) varie de 18,54 à 30,5 $\mu\text{S/cm}$, les MES de 52 et 666,6 mg/l et la turbidité de 72,83 à 237,67 NTU. Pour Rakotondrabe *et al.*, (2017), les eaux de surface étaient faiblement minéralisées ($11,60 < \text{EC} < 122,10 \mu\text{S/cm}$) avec une forte concentration en TDS ($2 < \text{TSS} < 8996 \text{ mg/l}$) et une en turbidité (1,22 à 4758 NTU). Les faibles teneurs en TDS et la turbidité des eaux analysées pourrait s'expliquer par l'augmentation de l'exploitation des filons minéralisés qui libère plus particules dans les eaux. En effet, les eaux de la zones d'étude sont chargées en sédiments issus des travaux miniers et de l'érosion des terres agricoles (Mboudou *et al.*, 2017) et ces derniers favorisent le développement des microorganismes et autres végétaux aquatiques à l'origine du faible taux d'oxygène constaté. La turbidité des eaux a pour conséquence la baisse du taux d'oxygène car elle empêche la pénétration de la lumière pour les chlorophylliens qui ne savent plus produire l'oxygène, asphyxiant parfois le milieu (Nguiepjou et Manyacka, 2008).

Les variations entre les valeurs obtenues au cours des différentes études pourraient démontrer le caractère évolutif des écosystèmes avec le temps. Bien que l'activité tant à diminuer sur les rives des cours d'eau, les impacts des activités antérieures se font ressentir sur les milieux.

II- POLLUTION PAR LES METAUX LOURDS

L'analyse des échantillons a révélé des valeurs de concentrations hautement supérieures à la normale (OMS, 2011) de certains métaux lourds, notamment Al (0,022 - 10,233 mg/l), Fe (0,002 - 4,938 mg/l), Mn (0,009 - 1,061 mg/l), Hg (0 - 0,034 mg/l), V (0,141 - 0,164 mg/l) et S

(0,83 - 1,583 mg/l). Les éléments traces ont une origine naturelle dans l'environnement, ils y sont alors présents en faible quantité (Foucault, 2013).

En effet, le soufre et le fer sont contenus dans la sphalérite (ZnS), la chalcopirite (CuFeS₂), la galène (PbS) et la pyrite (FeS₂) dont l'altération serait à l'origine de leur présence dans le milieu (Rakotondrabe *et al.*, 2017). De plus, l'origine de l'or du district de Bétaré-Oya justifie la présence de soufre dans le secteur. La minéralisation en filons-aurifères provient de veines de quartz dont les fortes proportions en soufre (δ³⁴S de 2.8 à 14.9‰) indiqueraient des sources multiples (Vishiti *et al.*, 2017). L'Al pourrait provenir de l'altération géochimique des roches sous climat tropical libérant les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium et de l'altération des argiles (kaolinites, illites) dans les conditions confinées et acides (Fiquetk *et al.*, 1997). Les teneurs élevées en vanadium auraient une origine naturelle. Vishiti *et al.*, (2018) trouvent du V (2 à 201 ppm) et du Hg (1 à 40 ppm) dans la composition chimique des minéraux sulfatés des échantillons de veines de quartz. Le mercure serait alors en partie issu de la géologie du secteur bien que les concentrations élevées constatées sont directement liées à son utilisation pour l'amalgamation lors de la concentration du minerai.

Toutefois, les travaux de Rakotondrabe *et al.*, (2017) et le rapport du PRECASEM (2019) n'identifient pas une pollution au mercure, cela pourrait être dû au fait que les échantillons montrant des concentrations élevées de Hg aient été prélevés près des piscines de lavage : cela démontre une pollution localisée en Hg et en ces autres éléments.

Les fortes teneurs en éléments traces des eaux de surface analysées dans un contexte minier sont généralement dues aux activités d'exploitation. En effet, pour Mengnjo *et al.*, (2017), les substances rencontrées dans les eaux de surface de la région sont issues de l'altération chimique du substratum minéralisé et de l'orpaillage, car les eaux de surface constituent leur principale voie de transport (Mengnjo *et al.*, 2017).

L'indice de qualité des eaux (IQE ou WQI en anglais) a permis de classer les eaux analysées dans l'intervalle 0-44 qui correspond à une mauvaise qualité des eaux, soit des eaux comportant des concentrations s'écartant généralement des niveaux naturels ou souhaitables. Rakotondrabe *et al.*, (2017 et 2018) classaient ces eaux de qualités allant d'excellente à mauvaise, les plus détériorées étant rencontrées dans le Lom et en aval du Mari où l'activité minière était intense.

Le calcul de l'indice de pollution des métaux lourds dans ces eaux vient préciser en quels éléments est-ce que ces eaux sont polluées. Il en ressort que parmi les éléments analysés, Al, Fe, Mn, Hg, V et S sont à l'origine de la pollution. Les travaux de Rakotondrabe *et al.*, (2017 et

2018) dans le même secteur présentaient déjà des résultats similaires en ce qui concerne la l'indice de pollution des métaux lourds moyen (Heavy métal pollution index) largement au-dessus de la valeur critique.

A la suite de travaux antérieurs, les résultats obtenus au cours de ce travail ont permis de démontrer puis de caractériser la pollution par les métaux lourds dans les eaux de surface de Bétaré-Oya. Elle peut être localisée dans les sites d'exploitation (Hg, Al, Fe, V, S) ou plus diffuse dans les cours d'eau environnants (Fe, Mn, Pb, Cr et Cd).

III- REHABILITATION

A Bétaré-Oya comme dans la plupart des zones minières d'Afrique, de nombreux sites sont laissés à l'abandon par les exploitants sans qu'aucune mesure de restauration ne soit prise. Le secteur comprend à la fois des sites en activité et des sites abandonnés sans restauration. (Feudjio Fokem *et al*, 2017) font état de 70 sites dont 25 (36%) sont activité et 45 (64%) sont abandonnés. La pollution des eaux de surface ayant été démontrée dans les parties précédentes, la réhabilitation envisagée dans cette partie propose : - des méthodes de traitement de la pollution pour les sites abandonnés ; - et des pratiques d'exploitation aurifère respectueuses de l'environnement pour les sites en activité. Le choix des méthodes et techniques de réhabilitation applicable à Bétaré-Oya s'est basé sur la disponibilité des moyens financiers, l'accès aux technologies et le temps. Les actions à mener seront différentes pour sites en activité et pour ceux abandonnés.

1. Sites en activité

L'exploitation actuelle de l'or, qu'elle soit mécanisée ou artisanale recours à l'utilisation du mercure pour l'amalgamation. La pratique date des années 2007 avec l'arrivée des exploitants chinois. Avant cette période, l'exploitation de l'or (orpaillage) se faisait sans mercure (PRECASEM, 2019). De nos jours, il existe de nombreuses techniques d'exploitation aurifère respectueuses de l'environnement à l'échelle de la petite mine (semi-mécanisée) et de mine artisanale :

- **Les techniques et technologies de concentration gravimétrique et densimétrique de l'or en milieu humide** : elles sont basées sur la forte densité de l'or (19,3) par rapport aux autres minéraux (usuels, métaux de base et métaux lourds). Parmi celles-ci on retrouve la battée, le sluice, le jig, la spirale, le concentrateur et la table à secousse.

En effet, les rapports du (PRECASEM, 2019) et du PNUE, (2012) identifient ces techniques comme étant respectueuses de l'environnement. Certaines sont traditionnelles et ardues, elles

présentent quelques limites (battée). D'autres font appel des technologies plus récentes (spirale, concentrateur). Lasalle, (1980) présentait déjà le sluice pour l'exploitation des placers au Québec, la technique est facile à mettre en place avec des matériaux divers (bois, métal) (Lasalle, 1980).

- **L'utilisation du mercure en circuit fermé** : le mercure est surtout utilisé pour les minerais à grains fins généralement rencontré dans les filons de quartz minéralisés. Son utilisation en circuit fermé notamment dans les cornues permet de réduire grandement les pertes dans la nature. Le guide pratique du PNUE, (2012) estime que les cornues réduisent les émissions de mercure de 70 à 95% (PNUE, 2012). Le recyclage du Hg diminue les quantités utilisées. Un exemple pratiques et peu couteux est celui de la cornue ThermEx très appréciée au Ghana et en Tanzanie (NU/CES, 2003).

2. Sites abandonnés

Les analyses effectuées sur les eaux de surface Bétaré-Oya ont permis de constater une pollution par les métaux lourds. Six éléments traces métalliques ont été trouvés en concentrations excédents les normes de l'OMS 2011 : ce sont l'Al, Fe, Mn, S (total), V et Hg. Les travaux antérieurs dans le secteur d'étude ont également identifiés une pollution par les métaux lourds des eaux de surface notamment par Fe, Mn, Pb, Cr, Cd (Rakotondrabe *et al.*, 2017). La réhabilitation de sites abandonnés vise l'aménagement des terrains de sorte à réduire l'érosion, la compaction et la toxicité métallique des sols. Ceci passe dans un premier temps par des travaux mécaniques sur les terrains, suivis de la réhabilitation par les méthodes biologiques notamment la phytoremédiation.

a) *Travaux mécaniques sur les terrains*

A l'issue de l'exploitation minière, les sites abandonnés sont dépourvus de sol et de végétation. Ils sont généralement sans vie et soumis à une forte érosion à l'origine de l'expansion de la pollution sur de vastes périmètres (Le Roux, 2002). La réhabilitation nécessite au préalable des travaux mécaniques sur les terrains pour remodeler le relief et contrôler l'écoulement des eaux : ce sont le rebouchage des trous et le nivellement des terrains.

- **Le rebouchage des trous** : les trous creusés pour l'extraction du minerai doivent être rebouchés avec les terres excavées des alentours. Ces trous sont à l'origine de nombreux accidents dans le secteur (hommes, bétail).
- **Le nivellement (déblai, remblai)** : les terrains accidentés doivent être nivelés pour résoudre le problème d'éboulement de terrains fréquents sur sites. Les monticules sont

déblayés pour remblayer les petites dépressions, les matériaux sont déposés des particules les plus grossières aux plus fines, assurant ainsi une meilleure stabilité des couches de terrain (blocs rocheux, conglomérats, sables, terre).

Les terrains ainsi mis à niveau sont prêts pour la phytoremédiation.

b) Phytoremédiation

La phytoremédiation a été identifiée comme la technique la mieux adaptée à la réhabilitation du sites de Bétaré-Oya compte tenu du faible coût, de la facilité, et du temps de sa mise en place. En effet, les coût d'implantation de la méthode serait de 60000 à 300000 \$US/ha contre 130000 à 1600000 \$US/ha pour les techniques physicochimiques (Mendez et Maier, 2008). Elle présente d'autres avantages à savoir son intégration dans le paysage et le respect de l'environnement.

La phytoremédiation par la stabilisation, l'extraction et la volatilisation des métaux lourds des eaux et des sols permet de s'attaquer à la source de la pollution pour pallier aux impacts directs et directs de cette pollution. En effet, la stabilisation des sols par développement d'un couvert végétal limiterait la libération de particules qui contribuent à la pollution (MES, TDS, éléments particuliers) des eaux.

De nombreuses plantes, algues et champignons ont été identifiés pour leur facultés d'extraction et volatilisation d'un ou de plusieurs éléments. Ces plantes dites tolérantes, accumulatrices ou hyper-accumulatrices de métaux favorisent la dépollution des milieux par l'extraction des contaminants. Certaines d'entre elles sont capables de métaboliser les polluants accumulés pour les volatiliser. La phytoremédiation a fait l'objet de nombreuses études en laboratoire et des cas pratiques dans le monde sont la preuve de son efficacité.

Ce travail ne présente que quelques espèces parmi tant d'autres capables de traiter la pollution de l'ordre de celle rencontrée dans notre secteur de travail. Certaines espèces sont comestibles et requièrent beaucoup de prudence quant à leur consommation. Le choix des éléments à traiter s'est basé sur ceux qui ont été identifiés en quantité supérieures aux normes de l'OMS (2011) dans le secteur d'étude par le présent travail et les travaux antérieures (Rakotondrabe *et al.*, 2017), notamment Al, Fe, Mn, Hg, Pb, Cr, Cd :

- **Phytoremédiation de l'aluminium** : les chlorelles, *Chlorella* (algues d'eau douce et salée) et la minuartie de printemps, *Minuartia verna* sont capables d'accumuler l'Al et d'autres métaux lourds. Le catalogue des plantes dépolluantes indique que les chlorelles

possèdent de forte capacité d'absorption des métaux lourds et du fait de leur utilisation comme complément alimentaire en diététique, elles requièrent de la prudence. La minuartie de printemps serait un excellent bio-indicateur de la présence de métaux lourds (Jost et Jost-Tse, 2018).

- **Phytoremédiation du fer** : parmi les plantes accumulatrices de fer on compte les calaminaires (*Viola calaminaria*, Pensée calaminaire ; *Noccaea calaminaria* Tabouret calaminaire), le faux-roseau (*Phalaris arundinacea Baldingère*), l'épinard piquant (*Amaranthus spinosus*). Les premières peuvent accumuler jusqu'à 1 % de leur poids sec, les secondes accumulent principalement les métaux dans leurs racines et les dernières dans leurs racines et feuilles (Jost, 2018). Les dernières sont appréciées pour l'alimentation en Afrique et en Thaïlande. Des études menées par (Sieghardt, 1990) ont montré que l'*Amaranthus spinosus* (épinard piquant) peut stocker plus 1500 mg/kg de Fe (matière sèche) dans les feuilles et environ 500 mg/kg de Fe dans le cortex racinaire.
- **Phytoremédiation du manganèse** : *Arabidopsis thaliana* (arabette des dames) et *Typha latifolia* (Massette à larges feuilles) sont accumulatrices de métaux lourds parmi lesquels le Mn. En effet, les premières accumulent les métaux dans les pousses et les racines, ce sont des espèces transgéniques qui s'adaptent aux conditions difficiles (Jost et Jost-Tse, 2018). Les deuxièmes accumulent en moyenne 20 à 300 mg/kg de Mn mais peuvent atteindre 1500 mg/kg de Mn au maximum, avec dans ce cas des valeurs moyennes de 860 mg/kg de Mn dans les racines et 990 mg/kg de Mn dans les feuilles (Sasmaz *et al.*, 2008).
- **Phytoremédiation du mercure** : *Atriplex canescens* espèce cosmopolite et réputée pour sa tolérance à la salinité, est aussi hyper accumulatrice de mercure. *Berkheya coddii* accumulerait des teneurs inférieures à 10mg/kg de Hg en poids sec. Toutefois, par ajout de ligands sulfuré, la plante peut contenir jusqu'à 8,7 mg/kg de Hg en poids sec (Moreno *et al.*, 2004). L'addition de thiosulfate d'ammonium au résidus miniers favorise l'augmentation de Hg dans les pousses de moutarde brune, *Brassica juncea* (2,7 mg/kg de Hg en poids sec). La plante est également phyto-volatilisante, elle est capable de volatiliser les métaux lourds (1,5 ng de Hg/mg de tissus racinaire/min) (Moreno *et al.*, 2004). *Lupinus sp* est aussi une plante utilisée pour la phytoremédiation du Hg. elle a la capacité de stocker le Hg dans ses pousses et les racines et aussi de le volatiliser (Moreno *et al.*, 2004).
- **Phytoremédiation du plomb** : *Agaricus campestris* et *Agaricus arvensis* (Agaric champêtre et Agaric des jachères) sont des champignons comestibles qui pousse dans

les prairies et les pâturages. Ils accumulent le plomb et le cadmium et sont considérés comme bio-indicateur de la présence de métaux lourds (Jost et Jost-Tse, 2018). *Arabidopsis thaliana* (l'arabette des dames) est une espèce cosmopolite transgénique très résistante et capable de s'autoféconder et de séquestrer des métaux lourds (Julve, 1998). *Armeria maritima* (Armérie maritime ou œillet marin), est une espèce accumulatrice de plomb et de zinc (Jost et Jost-Tse, 2018). hyper-accumulatrice de plomb, la Moutarde brune (*Brassica juncea*) possède des propriétés antifongiques (Barillas *et al.*, 2011). La Jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) est une plante de zones humides utilisée avec succès pour la phytoremédiation de nombreux métaux lourds (Zn, Pb, Cd, Hg, ...) (Lu *et al.*, 2004).

- **Phytoremédiation du chrome** : *Amaranthus spinosus* (épinard piquant) accumule les polluants des sols et des eaux dans ses racines, sa tige et ses feuilles. La concentration de chrome peut varier de 30 à 22 mg/kg dans les feuilles, de 15 à 22 mg/kg dans la tige et de 18 à 28 mg/kg dans les racines (Chinmayee *et al.*, 2012). La jacinthe d'eau accumule aussi le Cr. Sa rhizosphère contient des bactéries résistantes au chromate lui permettant de tolérer jusqu'à 200 mg de Cr (IV)/l (Abou-Shanab *et al.*, 2007). *Lemna minor* ou Lentille d'eau possède un taux d'élimination du Cr dans l'eau d'environ 99 % (Tunca, 2013). *Phragmites australis* (Roseau commun) est une espèce utilisée pour la dépollution de plusieurs métaux lourds (Al > Mn > Ba > Zn > Cu > Pb > Mo > Co > Cr > Cd > Ni), la plante peut contenir $8,82 \pm 0,09$ mg/kg dans les pousses et $11,06 \pm 0,52$ mg/kg dans les racines (Ahmad *et al.*, 2014)
- **Phytoremédiation du cadmium** : l'*Amaranthus spinosus* (Épinard piquant) peut accumuler de forte concentrations de Cd dans ses racines (20 à 34 mg/kg) contre 8 à 20 mg/kg dans ses feuilles et 14 to 27 mg/kg dans sa tige (Chinmayee *et al.*, 2012). La Jacinthe d'eau peut quant à elle accumuler jusqu'à 113,2 mg/kg de Cd dans les pousses et 2044 mg/kg de Cd dans les racines pour une concentration de 4 mg/l de Cd après 8 jours (Lu *et al.*, 2004). *Lycoperdon perlatum* est un champignon qui peut contenir des concentrations allant de 0,00 à 5,34 ppm dans les spores (McCreight et Schroeder, 1977). La Massette (*Typha latifolia*) à larges feuilles accumule en moyenne 0,44 mg/kg de Cd dans les racines et 0,21 mg/kg de Cd dans les feuilles (Sasmaz *et al.*, 2008).

NB : bien que la technique n'est pas été développées dans ce travail, l'utilisation des champignons pour le traitement des contaminants est appelée mycoremédiation. Elle diffère de

la phytoremédiation en ce point que les champignons dégradent directement les contaminants dans les sols.

3. Gestion des plantes après dépollution

Les plantes utilisées pour la phytoremédiation sont généralement par la suite récupérées pour être soit incinérées, soit enfouies, ce qui réintroduit les polluants dans l'environnement. Ce mode de gestion tant plus à déplacer le problème plutôt que de le résoudre. Des études préconisent la culture de plantes hyper-accumulatrices de métaux lourds dont la biomasse serait récoltée et brûlée pour produire du bio-minerai : c'est le phytomining ou agromine (Anderson *et al.*, 1999). Ceci pourrait s'avérer ingénieux dans l'exploitation minière lorsque les teneurs en place sont insuffisantes pour justifier une exploitation rentable par les techniques habituelles. En effet, Leblanc *et al.*, (1999) font des essais en France sur *Iberis intermedia* (Brassicaceae), capable d'accumuler près de 2000 µg/g, de masse sèche de thallium toxique. Ils estiment que trois récoltes seraient suffisantes pour dépolluer un sol de 10 µg/g de Tl dont la production d'une cendre végétale commercialisable en assumerait les coûts. Pour un rendement net en biomasse (10 t/ha contenant 0,08% de Tl en matière sèche) de 1200 dollars / ha, soit deux fois celui du blé (Leblanc *et al.*, 1999). De même, Anderson *et al.*, (1999) testent la pratique pour le nickel, le thallium et l'or. Ces auteurs réalisent leurs expériences en Californie, en Italie, en Afrique du Sud, en Toscane sur différentes espèces : *Streptanthus polygaloides* (production de 100 kg/ha de Ni sans soufre), *Alyssum bertolonii* (biomasse multiplié par 3 en ajoutant des engrais, de 4,5 t/ha à 12 t/ha pour des concentrations de 7600 mg/ kg de Ni. La moutarde indienne (*Brassica juncea*) pourrait accumuler jusqu'à 57 mg/kg d'Au en masse sèche (Anderson *et al.*, 1999).

Il existe plusieurs techniques de phytoremédiation, elles sont peu coûteuses à mettre en place et seraient peut-être utiles dans la région de Bétaré-Oya. Des tests pourront être effectués sur des plantes et des organismes qui s'adaptent le mieux aux conditions du climat et du sol de la région ; ainsi qu'au degré de pollution des sols et des eaux de surface. L'intérêt de la technique est qu'elle permet de traiter la pollution tout en redonnant vie à l'écosystème. Le milieu réhabilité pourrait être utilisé à des fins agropastorales : un complexe agropastoral. Les lacs artificiels et les trous béants pourraient être assainis et reconvertis pour la pisciculture ou servir de bassins de stockage pour l'eau l'irrigation des cultures. L'idée est de recréer un écosystème autour des mines qui sera géré de manière intégrée avec la participation des populations riveraines organisées en coopératives. Ces dernières pourront être encadrées et soutenues par l'Etat depuis les activités de production jusqu'à la commercialisation des produits.

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

Les résultats obtenus au cours de ce travail ont permis de caractériser la pollution des eaux de surface par les métaux lourds, due à l'exploitation de l'or, et de tenter de proposer des solutions à la réhabilitation des sites miniers laissés à l'abandon. Concernant les paramètres physiques analysés, ces résultats montrent que les eaux étudiées sont acides à légèrement acides ($5,4 < \text{pH} < 6,6$), faiblement minéralisées ou conductrices ($10 < \text{EC} < 80 \mu\text{S/cm}$), avec un taux d'oxygène très faible ($0 < \% \text{ de saturation} < 2$). La turbidité est moyenne (17,2 à 936 NTU), les TDS sont faibles ($0 < \text{TDS} < 30 \text{ mg/l}$) et la température variant de 24,8 à 31 °C. La composition en métaux lourds des échantillons révèle des fortes concentrations en six éléments : Al (0,022 - 10,233 mg/l), Fe (0,002 - 4,938 mg/l), Mn (0,009 - 1,061 mg/l), Hg (0 - 0,034 mg/l), V (0,141 - 0,164 mg/l) et S (0,83 - 1,583 mg/l). Les autres éléments (Cu, Zn, Ni, Pb, Co, As, Cr, Cd) ont des concentrations en dessous des directives de l'OMS 2011 pour l'eau potable. Les calculs de l'indice de qualité des eaux (IQE/WQI) et de l'indice de pollution des métaux lourds (HPI) ont permis de caractériser les eaux. L'IQE est compris entre 0 et 44, intervalle des eaux de mauvaise qualité, eaux dont les concentrations s'éloignent des niveaux naturels ou souhaitables. Le HMPI indique des valeurs supérieures au seuil critique pour Al, Fe, Mn, Hg, V et S. Ce qui a permis de préciser la nature des éléments polluants les eaux étudiées. L'analyse de ces résultats a permis de conclure que les eaux superficielles du secteur d'étude sont polluées en métaux lourds notamment en Al, Fe, Mn, Hg, V, et S. La pollution constatée est en grande partie due aux activités d'exploitation minière dans la zone. La mise en commun des observations de cette étude avec des travaux antérieurs dans la zone porte à croire qu'il s'agit d'une pollution de longue durée localisée à l'environnement proche des sites miniers. Les conclusions sur la caractérisation de la pollution par les métaux lourds ont orienté le choix de la phytoremédiation pour la réhabilitation des sites abandonnés. A cet effet, des espèces végétales hyper-accumulatrices de métaux lourds ont été identifiées pour le traitement de la pollution en ces éléments excédants. Le choix de technique est justifié par le faible coût de la méthode comparé à celui des méthodes physico-chimique de traitement de sites pollués, son implantation est aisée et le fait que nous disposons du temps nécessaire pour la mettre en place. Le phytomining/agromine est proposé pour la gestion de ces plantes. Afin de s'attaquer à la racine profonde du problème, l'utilisation de techniques respectueuses de l'environnement est préconisée pour l'orpaillage dans les sites en activité.

Les impacts de l'exploitation minière sur l'environnement et la santé humaines sont bien connus. La pollution par les métaux lourds étant avérée dans la zone d'étude, les recommandations suivantes visent à lutter efficacement contre cette pollution :

- Mettre en application la législation existante jugée suffisante mais généralement non appliquée.
- Promouvoir et vulgariser les techniques d'exploitation de l'or respectueuses de l'environnement au près structures en place des artisans miniers, de l'administration, les entreprises minières, des ONG, etc.
- Réaliser des essai pilote de phytoremédiation pour confirmer la pertinence de ce travail et le choix des organismes les plus efficaces pour le traitement de la pollution dans le contexte de Bétaré-Oya. Ceci pourrait constituer l'objet de prochaines études dans le secteur.
- Construire un système d'épuration par lagunage avec les espèces hyper-accumulatrices de métaux lourds afin de traiter les effluents miniers avant leur rejet dans le milieu naturel.
- Mettre en place un système institutionnalisé de suivi de la pollution du réseau hydrographique dans les zones minières en activité.
- Sensibiliser les populations sur les potentiels risques encourus quant à la consommation d'eau de rivière sans traitement.
- Installer des panneaux signalant la présence de trous pour prévenir les accidents.
- ...

BIBLIOGRAPHIE

Abendé, S. R. Y. (2017) Caractérisation physico-chimique des eaux des sites d'exploitation artisanale et semi-mécanisée de Bétaré-Oya (Est Cameroun) et essai d'élimination des métaux lourds par l'argile smectique de Sabga (Nord-Ouest Cameroun). Université de Ngaoundéré.

Abou-Shanab, R. A. I., Angle, J. S. and Van Berkum, P. (2007) 'Chromate-tolérant bactéria for enhanced metal uptake by Eichhornia Crassipes (Mart.)', pp. 91–105.

Ahmad, S. S., Zafar A. Reshi, Manzoor A. Shah, Irfan Rashid, Roshan Ara and Syed M. A. Andrabi. (2014) 'Phytoremediation Potential of Phragmites australis in Hokersar Wetland - A Ramsar Site of Kashmir Himalaya', 6514(October 2015). doi: 10.1080/15226514.2013.821449.

Anderson, C. W. N. R.R. Brooks, L. A. Chiarucci, C.J. LaCoste, M. Leblanc, B.H. Robinson, R.Simcock and R.B. Stewart. (1999) 'Phytomining for nickel, thallium and gold', 67, pp. 407–415.

Barillas, J. R. V., Quinn, C. F. and Pilon-Smits, E. A. H. (2011) 'Sélénium accumulation in plants-phytotechnological application and ecological implications', 13, pp. 0–13. doi: 10.1080/15226514.2011.568542.

Bernheim, Y. (1999) *Gestion des sites et sols pollués: Typologie des techniques de réhabilitation des sites pollués.*

Chinmayee, M. D. B. Mahesh & S. Pradesh & I. Mini and T. S. Swapna (2012) 'The Assessment of Phytoremediation Potential of Invasive Weed Amaranthus spinosus L.', pp. 1550–1559. doi: 10.1007/s12010-012-9657-0.

Code minier Cameroun (2016) 'Cameroun Code minier 2016', pp. 1–69.

Décret N°, 2004 (2004) 'Décret n°2004/320 du 8 décembre 2004 portant organisation du gouvernement', 4.

Décret N° 2012 (2012) 'Décret portant organisation du MINEPDED du 01 octobre 2012-1.pdf'.

Dialga, I. (2013) 'Du boom minier au Burkina-Faso: opportunité pour un développement durable ou risque de péril pour les générations futures?'

Feudjio Fokem, M. D., Tchindjang, M. and Saha, F. (2017) 'Impact et cartographie de l'activité minière à petite échelle dans l'arrondissement de Betare-oya (Cameroun)', *Revue*

Scientifique et Technique Forêt et Environnement du Bassin du Congo, 9, pp. 77–78.

Fiquetk, M., Lallier S., Riou L., Sanjuan B. and Simeon Y. (1997) 'Caractérisation des excès d'aluminium dans les eaux superficielles de la Martinique'.

Foucault, Y. (2013) 'Réhabilitation écologique et gestion durable d'un site industriel urbain : cas d'une pollution historique en éléments inorganiques potentiellement toxiques (Pb, Cd, Zn, Cu, Sb et As).', p. 206.

Himbé, D. L. (2017) 'Le nouveau Code minier camerounais , au cœur des standards de la gouvernance extractive contemporaine', *HAL Id: halshs-01664344*. Available at: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01664344> .

Jost, J. and Jost-Tse (2018) 'Les plantes hyperaccumulatrices de métaux lourds . Une solution à la pollution des sols et de l'eau ?', (June).

Keita, S. (2002) 'Etude sur les Mines Artisanales et Les Exploitations Mini è res à Petite Echelle au Mali', (80).

Lasalle, P. (1980) *L'or dans les sédiments meubles : formations des placers, extraction et occurences dans le Sud-Est de Quebec*.

Leblanc, M., Petit, D., Deram, A., Robinson, B. H. and Brooks, R. (1999) 'The Phytomining and Environmental Significance of Hyperaccumulation of Thallium by *Iberis intermedia* from Southern France tissue', 94, pp. 109–113.

Loi N°94 (1994) 'LOI N ° 94 / 01 du 20 janvier 1994 portant régime des forêts , de la faune et de la pêche'.

Lu, X., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P. and Homyok, K. (2004) 'Removal of Cadmium and Zinc by Water Hyacinth , *Eichhornia crassipes*', 30, pp. 93–103.

Mboudou, G. M., Fozao, K.F., Njoh, O.A. and Agyingi, C.M. (2017) 'Characterization of Alluvial Gold Bearing Sediments of Betare Oya District-East Cameroon , Implication for Gold Exploration and Recovery', *Open Journal of Geology*, 7, pp. 1724–1738. doi: 10.4236/ojg.2017.711115.

McCreight, J. D. and Schroeder, D. B. (1977) 'Cadmium, lead and nickel content of *Lycoperdon perlatum* pers. in a roadside environment', *Environmental Pollution* (1970). Elsevier, 13(4), pp. 265–268. doi: 10.1016/0013-9327(77)90045-3.

Mendez, M. O. and Maier, R. M. (2008) 'Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments', pp. 47–59. doi: 10.1007/s11157-007-9125-4.

Mengnjo, J. (2017) 'Seasonal Hydrological Inputs of Major Ions and Trace Metal Composition in Streams Draining the Mineralized Lom Basin , East Cameroon : Basis for Environmental Studies', pp. 1–9. doi: 10.1007/s41748-017-0026-6.

Morel, J. (2014) 'Phytoremédiation des sols contaminés : des plantes pour guérir... les sols', (October 2012).

Moreno, N. F., Anderson, C. W. N., Stewart, R. B. and Robinson, B.H. (2004) 'Phytoremediation of mercury-contaminated mine tailings by induced plant-mercury accumulation'.

Nguepjou, D. et Manyacka, E. (2008) *Exploitation minière artisanale dans la province de l'Est Cameroun : Cas du département de la Boumba et Ngoko. Etats des lieux : constats, analyses et recommandations.* Goethe-Universität Frankfurt.

Ntep Gwet, P. and Thomas, A. (2005) 'Etude environnementale du barrage de Lom Pangar'.

NU/CES (2003) *Les défis technologiques de L'exploitation miniere artisanale en Afrique.* Available at: <http://repository.uneca.org/handle/10855/14000>.

Olivry, J. C. (1986) *Fleuves et Rivières du Cameroun.*

PNUE (2012) *Guide pratique, réduire l'utilisation du mercure dans le secteur de l'orpaillage et de l'exploitation minière artisanale.*

PRECASEM (2019) 'Réalisation d'une enquête sur l'utilisation du mercure dans le secteur de la mine artisanale et de la petite mine au Cameroun'.

Rakotondrabe, F. Ngoupayou , N. J. R., Mfonka, Z., Rasolomanana, E. H., Abolo Nyangono, A. J., Banakeng, A. L., Ako Ako, A. and Rakotondrabe, Mi. H. (2017) 'Assessment of Surface Water Quality of Bétaré-Oya Gold Mining Area (East-Cameroon)', pp. 960–984. doi: 10.4236/jwarp.2017.98064.

Roudier, P. (2004) *Gestion des sites et sols pollués : Technique de réhabilitation des sites et sols pollués. Fiches de synthèse.*

Le Roux, C. (2002) 'La réhabilitation des mines et carrières à ciel ouvert', 272(2).

Sasmaz, A., Obek, E. and Hasar, H. (2008) 'The accumulation of heavy metals in Typha

latifolia L . grown', 3, pp. 278–284. doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.05.006.

Simonot, M.-O. and Croze, V. (2008) 'Génie des procédés et protection de l ' environnement : Traitements physico-chimiques des déchets industriels liquides'.

Tchindjang, M., Mbevo F. P., Unusa, H. and Voundi E. (2010) 'Mines contre forêts et conservation au Cameroun : enjeux de l'évaluation environnementale du secteur minier pour le développement durable au Cameroun, pp. 1–38.

Thomas, F. (2013) 'Les ressources minières et le développement de l ' Afrique : défis et perspectives', pp. 137–148.

Thomas, S. (2012) *Méthodes De Végétalisation Dans La Restauration Écologique De Sites Miniers*. Université de Sherbrook.

Tunca, E. (2013) 'Phytoremediation of Cu , Cr and Pb Mixtures by Lemna minor', pp. 600–604. doi: 10.1007/s00128-013-1107-3.

Vandamme, A. (2012) 'La réhabilitation des sites pollués en Région bruxelloise : Etude des instruments financiers et focus sur les fonds d ' investissement'.

Vishiti, A. Suh, C. E., Lehman, B., Mutum, S.E., Ngome, N. J. L., Nshanji, N.J., Mongwe, O.Y., Chinjo, F.E., Chinjo, F.E., Egbe, A.J. and Petersen, S. (2018) 'Mineral chemistry , bulk rock geochemistry , and S - isotope signature of lode - gold mineralization in the Bétaré Oya gold district , south - east Cameroon', (February 2017), pp. 2579–2596. doi: 10.1002/gj.3093.

Zmirou, D., Beausoleil, M., De Coninck, P., Déportes, I., Dor, F., Empereur-bissonet, P., Keck, G., Lefebvre, L., Rouisse, L. and Hours, M. (2003) 'Déchets et sols pollués', pp. 397–440.

ANNEXES

QUELQUES PLANTES HYPERACCUMULATRICES DE METAUX LOURDS

Agaric champêtre et Agaric des jachères (champignons)

Nom scientifique : *Agaricus campestris* et *Agaricus arvensis*

Ordre : *Agaricales*

Famille : *agaricacées*

Taille : 7 à 8 cm

Habitat et répartition : prés, pâturage, champs –
Amérique, Asie, Australie, Europe

Altitude : 0 – 2200 m

Source :

<https://www.provincedeliege.be/sites/default/files/media/10952/Agaric%20champ%C3%AAtre%2028Agaricus%20campestris%29.pdf>



Arabette des dames

Nom scientifique : *Arabidopsis thaliana*

Ordre : *Brassicales*

Famille : *Brassicaceae*

Taille : 10 à 15 cm

Altitude : 1800 mètres

Habitat et répartition : zones cultivées – Afrique, Europe, Amérique

Source : <https://fleursauvageyonne.github.io/flsv/blanc/arabido.htm>



Armérie maritime ou œillet marin ou gazon d'Espagne

Nom scientifique : *Armeria maritima*

Ordre :

Famille : *Plumbaginacées*

Taille : 20 cm

Habitat et répartition : Afrique, Europe, Amérique

Source :

https://www.aujardin.info/plantes/gazon_espagne.php



Chardon pourpré

Nom scientifique : *Berkheya*

Ordre : *Asterales*

Famille : *Asteraceae*

Taille : 0,45 à 1 m

Habitat et répartition : Afrique, Europe

Source : <https://www.aujardin.info/plantes/berkheya-purpurea.php>



Chlorelles (algues vertes)

Nom scientifique : *Chlorella* (*Chlorella pyrenoidosa*, *Chlorella vulgaris*)

Ordre : *Chlorellales*

Famille : *Chlorellaceae*

Habitat et répartition : cosmopolite

Source : <https://www.encyclo-ecolo.com/Chlorelle>



Faux-roseau

Nom scientifique : *Phalaris arundinacea* *Baldingère*

Ordre : *Poales*

Famille : *Poaceae*

Taille : 80 à 200 cm de long

Altitude : 1500 m

Habitat et répartition : Lacs, rivières - Afrique, Amérique, Europe, Asie

Source : <https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/657/phalaris>



Epinard piquant

Nom scientifique : *Amaranthus spinosus*

Ordre : *Caryophyllales*.

Famille : *Amaranthaceae*

Habitat et répartition : régions tropicales et subtropicales

Source :

<https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?fr=1&g=pe&p=Amaranthus+spinosus+L.>



Jacinthe d'eau

Nom scientifique : *Eichhornia crassipes*

Ordre : *Liliales*

Famille : *Pontederiaceae*

Taille : 0,45 à 0,60 m

Habitat et répartition : cosmopolite

Source : <https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/258/jacinthe-d-eau>



Lupins

Nom scientifique : *Lupinus sp*

Ordre : *Fabales*

Famille : *Fabaceae*

Taille : 20-40 cm

Floraison : entre janvier et mai

Habitat et répartition : Europe ; Amerique ; Afrique.

Altitude : inférieures à 1 300 m

Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lupin>



Moutarde brune

Nom scientifique : *Brassica juncea*

Ordre : Brassicales

Famille : Brassicacées

Taille : jusqu'à 1,5 m

Floraison : entre janvier et mai

Habitat et répartition : Europe ; Asie, Amérique ; Afrique.

Source : <https://www.groww.fr/fr/plants/moutarde-brune>



Massette à larges feuilles

Nom scientifique : *Typha latifolia*

Ordre : Poales

Famille : Typhaceae

Taille : 1,5 et 3 m

Altitude : 1800 mètres

Habitat et répartition : près des étendues d'eau douce, cours d'eau – régions tempérée et tropicale

Source : <https://fleursauvageyonne.github.io/flsv/blanc/arabido.htm>



Minuartie de printemps, *Minuartia verna*

Nom scientifique : *Minuartia verna subsp. verna*

Ordre : Caryophyllales

Famille : Caryophyllacées

Taille : 5-20 cm

Floraison : juillet à août

Habitat et répartition : Pelouses rocailleuses des montagnes – Europe ; Asie occidentale ; Afrique septentrionale.

Altitude : 400 - 3000 mètres

Source : <https://quelle-est-cette-fleur.com/Fiches-botaniques/minuartie-de-printemps.php> (Flora Gallica : Page 647).



Extrait de la Flore descriptive & illustrée de la France, de la Corse et des contrées limitrophes - H. Coste

Pensée calaminaire ; Tabouret calaminaire

Nom scientifique : *Viola calaminaria*, *Noccaea calaminaria*

Ordre : *Violales*

Famille : *Violaceae*

Taille : 20-40 cm

Floraison : entre janvier et mai

Habitat et répartition : sur sol relativement neutre, pelouses et prairies - Europe ; Amérique ; Afrique.



Source : <http://biodiversite.wallonie.be/fr/e1-b2a-pelouses-calaminaires-a-viola-calaminaria-sensu-stricto.html?IDC=956>

Petite lentille d'eau

Nom scientifique : *Lemna minor*

Famille : *Araceae*

Taille : 5-20 cm

Diamètre de la fleur : 1-8 mm de long et 0,6 à 5 mm de large

Habitat et répartition : eau douce (mares et eaux stagnantes), pH entre 5 et 9, température entre 6 et 33°C – potentiellement présente partout, Afrique, Asie, Europe, Amérique du Nord.

Source : <https://www.aquaportail.com/fiche-plante-610-lemna-minor.html>



Pourpier de mer

Nom scientifique : *Atriplex canescens*

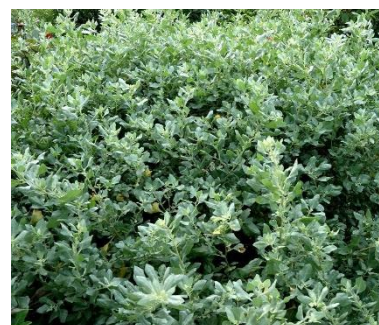
Ordre : *Liliales*

Famille : *Pontederiaceae*

Taille : 1,50 à 2 m

Habitat et répartition : le long des côtes - Afrique, Amérique,

Source : <https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/665/atriplex>



Vesse de loup perlée (Champignon)

Nom scientifique : *Lycoperdon perlatum*

Ordre : *Agaricales*

Famille : *Agaricaceae*

Taille : 1 à 6cm de hauteur, 1 à 4 cm de largeur

Habitat et répartition : En forêt

Source : <https://www.mycodb.fr/fiche.php?genre=Lycoperdon&espece=perlatum>

