



**EVALUATION DES IMPACTS DE
L'EXPLOITATION DE LA MINE D'OR DE
BONIKRO (Côte d'Ivoire) SUR LES RESSOURCES
EN EAU**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DUMASTER EN INGENIERIE
DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT**

OPTION : Environnement

Présenté et soutenu publiquement le 22 Juin 2012 par :

BAMBA Yacouba

Travaux dirigés par : **Ing. KOUAKOU Marcelin**

UTER : **GVEA**

Aman MESSOU, CECAF International

Jury d'évaluation :

Président :

Membres et correcteurs :

Promotion 2011/2012

DEDICACE

A Mon Père, Bamba Adama

En vous, je vois un père dévoué à sa famille.

A Ma Mère, Doumbia Marama

En vous, je vois la maman parfaite, toujours prête à se sacrifier pour le bonheur de ses enfants.

A Ma Grand-Mère, Touré Fanta

Ta sollicitude à mon égard me marquera à jamais.

A mes oncles et tantes, frères et sœurs.

Qui, je le sais ma réussite est très importante pour vous.

Qu'Allah vous paye Pour tous vos bienfaits.

REMERCIEMENTS

C'est grâce au soutien permanent et aux encouragements de plusieurs personnes que ce travail a pu être réalisé. Je tiens sincèrement à les remercier.

En premier lieu Monsieur **KOFFI Kouassi Jacques** qui m'a accueilli dans son cabinet d'études.

Je remercie également Monsieur **MESSOU Aman** et **KOUAKOU Marcelin** pour leur encadrement et leurs conseils précieux.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance au personnel du cabinet d'étude **CECAF International** en particulier **KOFFI Jean Marc Mouchet** et **TIEMELE Jacques André** pour leur gentillesse et pour leur soutien constant durant mon séjour au bureau.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au corps professoral du **2iE** pour les connaissances dispensées pendant mes formations de **Bachelor** et de **Master**.

Mes sincères remerciements s'adressent à tous mes promotionnels et frères, pour les agréables moments passés ensemble durant les cinq années d'études à **2iE**.

RESUME

Le diagnostic de l'état actuel des ressources en eau a été réalisé sur le périmètre minier de Bonikro dans la commune d'Hiré (Côte d'Ivoire). L'exploitation minière affecte les ressources en eaux par leurs utilisations pour le traitement du minerai et par le rejet des effluents. Cependant, la qualité des eaux de surface et souterraines en ce qui concerne les éléments traces métalliques (ETM) et produits chimiques utilisés par la mine a été étudiée au voisinage du centre minier de Bonikro. Des échantillons d'eau ont été prélevés le long des cours d'eau qui drainent ce site minier. Les résultats d'analyse ont permis de relever une pollution élevée des eaux souterraines par le cyanure total (CN) avec une valeur maximale de 865 µg/l. D'autre part, l'analyse des eaux de surface a montré une contamination des eaux par le cyanure libre et total avec des concentrations maximales respectives de 1209 µg/l et 1143 µg/l et des teneurs élevées en ETM ([Al] = 361,2 µg/l, [As] = 20 µg/l et [SiO₂] = 29,5 mg/l). Les concentrations dans les eaux dépassent largement dans certaines stations les normes de potabilité (O.M.S, 1990). Les résultats montrent la dégradation de l'environnement aquatique au voisinage du centre minier. Les résidus de traitement et les versées à stérile constituent les principales sources de pollution. En outre, le bilan écologique de la mine à travers le rapport (Disponibilité en eau/Besoins en eau) a été évalué, ceci indique que les besoins actuels en eau pour le traitement des deux millions de tonnes par an (Mtpa) sont admissibles avec un excédent d'eau de 5 951 009,8 m³.

Mots clés : Qualité des eaux, mine d'or, Bonikro, ressources en eau, ETM.

ABSTRACT

The diagnosis of the present state of water resources has been achieved close to the mining district in the municipality of Bonikro Hiré (Ivory Coast). The mining exploitation affects resources in waters by their uses for the treatment of ore and by the dismissal of sewages. However, the quality of the surface waters and groundwater with regard to elements metallic traces (ETM) and chemicals used by the mine has been studied near the mining center of Bonikro. Samples of Water were collected along the rivers that drain this mining district. Results of analysis permitted to raise pollution raised of the groundwater by the total cyanide (CN) with the respective maximal value of 865 µg/l. On the other hand, the analysis of the surface waters showed a contamination of waters by the free and total cyanide with the respective maximal concentrations of 1209 µg/l and 1143 µg/l and of contents raised in ETM ([Al] = 361,2 µg/l, [Have] =20 µg/l and [SiO₂] = 29,5 mg/l). The water concentrations pass extensively in certain stations far exceed the drinking water standards (OMS, 1990). The results show the degradation of the aquatic environment near the mining center. Residues of treatment constitute the main sources of pollution. In addition, the water balance of the mine through the report (Water availability/Needs in Water) has been evaluated, this indicates that the current water requirements for the treatment of two million tons per year (Mtpa) are eligible to a surplus of **5 951 009, 8 m³** of water.

Key Word: Water quality, gold mine, Bonikro, water resources, ETM.

SIGLES ET ABBREVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

CECAF : Cabinet d'Etudes, Conseils d'Assistance et de Formation

EIES : Étude Impacts Environnementale et Sociale

ETM : Élément Trace Métallique

DRA : Drainage Rocheux Acide

DMA : Drainage Minier Acide

pH : Potentiel Hydrogène

FEPS : Fondation de l'eau Potable Sûre

O.M.S : Organisation Mondiale pour la Santé

Fe : Fer

As : Arsenic

CN : Cyanure

ppm : Partie par million

Pb : Plomb

Zn : Zinc

Cu : Cuivre

Cd : Cadmium

Mo : Molybdène

NTU : Unité de turbidité Néphélométrique

Al : Aluminium

SiO₂ : Silice

m³ : Mètre cube

m² : Mètre carrée

Mtpa : Million tonne par an

Mm³ : Million de mètre cube

Km : Kilomètre

m : mètre

ha : hectare

t : tonne

mm : Millimètre

% : Pourcentage

mg/l : Milligramme par litre

BEM : Bordeaux école de management

BRGM : Bureau de Recherches Géologique et Minière

C.I.E.H. : Comité Interafricain d'études hydrauliques

SAG : Semi-autogène

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
SIGLES ET ABREVIATIONS	v
INTRODUCTION :.....	1
• Contexte et Problématique	1
• Objectifs	1
• Hypothèses	2
I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE LA ZONE D'ETUDE.....	4
1.1. Présentation de la structure d'accueil	4
1.2. Présentation du projet et des différentes activités	5
• Zone d'étude.....	5
• Historique du projet aurifère de Bonikro.....	6
• Les produits chimiques utilisés dans le procédé.....	7
• Différentes activités de la mine	7
1.3. Impacts d'une activité minière sur les ressources en eau	8
1.3.1. Drainage minier acide.....	9
1.3.2. Contamination par le métal et filtration.....	9
1.3.3. Pollution par les produits chimiques	10
1.3.4. Érosion et sédimentation	10
1.3.5. Consommation d'eau.....	10
II. MATERIELS ET METHODES	12
2.1.1. Ressources en eau de la zone d'étude.....	12
2.1.1.1. Hydrologie.....	12
2.1.1.2. Pluviométrie	12
2.1.2. Sources d'approvisionnement en eau de la mine.....	13
2.1.2.1. Cours d'eau.....	13
2.1.2.2. Forages	14
2.1.2.3. Parc à résidu	15
2.1.2.4. Carrière.....	16
2.2. Méthodologie.....	16
2.2.1. Recherche documentaire	16

2.2.2.	Phase terrain	17
2.2.3.	Traitement des données	17
III.	RESULTATS ET DISCUSSION	21
3.1.	Qualité des eaux de surface et souterraines	21
3.1.1.	Eaux souterraines.....	21
3.1.2.	Eaux de surface.....	24
3.2.	Bilan Écologique de la mine.....	29
3.2.1.	Besoins en eau de la mine	29
3.2.2.	Disponibilité des ressources en eau	30
3.2.3.	Bilan écologique de la mine	34
IV.	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	36
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	38
	ANNEXES	40

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Consommations annuelles des produits chimiques utilisés à Bonikro (EIES du projet, 2006)</i>	7
<i>Tableau 2: Résultats des analyses des échantillons prélevés dans les eaux souterraines de la zone d'étude</i>	24
<i>Tableau 3: Concentration des ETM et As dans les eaux surface du site minier</i>	28
<i>Tableau 4: Besoin en eau pour l'arrosage des pistes du site minier</i>	30
<i>Tableau 5: Volume d'eau disponible dans les barrages</i>	31
<i>Tableau 6: Volume d'eau disponible dans la carrière</i>	32
<i>Tableau 7: Volume d'eau brute recyclable sur le site minier de Bonikro</i>	33
<i>Tableau 8: Volumes d'eau prélevés dans les forages</i>	33
<i>Tableau 9: Volume d'eau brute disponible sur le site minier de Bonikro</i>	34
<i>Tableau 10: Bilan écologique de la mine</i>	34
<i>Tableau 11: Résultats de l'analyse des échantillons prélevés dans les eaux souterraines avant l'exploitation de la mine en Mai 2004</i>	40
<i>Tableau 12: Résultats de l'analyse des échantillons prélevés dans les eaux de surface avant l'exploitation de la mine en Mai 2004</i>	41
<i>Tableau 13: Volumes d'eau disponibles sur les sous-bassins Gnouzalé et Bandamakro</i>	43
<i>Tableau 14: Pertes par évaporation au niveau des plans d'eau</i>	43
<i>Tableau 15: Estimation des dépôts solides au niveau des retenues d'eau du site minier de Bonikro</i>	43
<i>Tableau 16: Apports au niveau du parc à résidus</i>	44
<i>Tableau 17: Évaporation dans le parc à résidus et le bassin de récupération des suintements</i>	44

LISTE DES PHOTOS

<i>Photo 1: Aperçu de l'usine de traitement de la mine de Bonikro</i>	6
<i>Photo 3: Image d'un drainage minier acide (www-dsv.cea.fr)</i>	9
<i>Photo 4: Parc à résidu de la mine de Bonikro</i>	16
<i>Photo 5: Carrière de la mine de Bonikro</i>	16

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: Localisation de la zone d'étude (Cabinet CECAF)</i>	5
<i>Figure 2: Schéma des activités typiques de la phase d'exploitation de la mine (EIES du projet, 2006)</i>	8
<i>Figure 3: Bassins versants de la zone aurifère de Bonikro</i>	12
<i>Figure 4: Evolution pluviométrique mensuelle de la zone minière (2009-2011) (Station météo de la mine)</i>	13

<i>Figure 5:Localisation des barrages du site minier de Bonikro.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 6:Emplacement des forages de production du site minier de Bonikro</i>	<i>15</i>
<i>Figure 7:Teneurs en As des eaux souterraines avant l'exploitation de la mine</i>	<i>21</i>
<i>Figure 8:Teneurs en Cyanure total dans les forages de production de la mine de Bonikro</i>	<i>22</i>
<i>Figure 9:Points échantillonnés sur les eaux superficielles de la mine de Bonikro</i>	<i>26</i>
<i>Figure 10:pH dans les eaux au voisinage du centre minier.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 11:Teneurs en Fer dans les eaux de surface au voisinage du site minier</i>	<i>27</i>
<i>Figure 12:Teneurs en Cyanure libre et total dans les eaux de surface du site minier de Bonikro</i>	<i>28</i>
<i>Figure 13:Teneurs en Al (a) et SiO2 (b) dans les eaux de surface du site minier de Bonikro</i>	<i>29</i>

INTRODUCTION :

• Contexte et Problématique

L'exploitation des ressources minières s'est développée en Afrique de l'Ouest et au Sahel depuis le XIX^e siècle. Ce secteur est caractérisé par la coexistence de l'exploitation à grande échelle pratiquée par les grandes compagnies qui constitue une source significative des recettes pour l'Etat et l'exploitation à petite échelle (mine artisanale) (Keita, 2009). En Côte d'Ivoire, l'exploitation minière a connu un essor depuis les années quatre-vingt (80) mais, l'essentiel de l'activité minière était réalisée par des mineurs artisanaux. Comme les autres activités anthropiques, l'exploitation minière affecte les bassins d'eau douce par l'utilisation d'eau pour le traitement du minerai et par le rejet des effluents. L'ennoyage des galeries crée des réservoirs potentiellement utilisables comme ressource en eau. Cependant, cette eau est souvent trop minéralisée pour être directement utilisable pour l'alimentation en eau potable, et dans certains cas extrêmes, elle est une source de contamination importante de l'environnement (BRGM, 2005). Ainsi, l'eau a été surnommée « l'eau la victime de l'exploitation minière » par James Lyon (FEPS, 2008). Par conséquent, la protection doit rester le but premier de la société, ce qui implique un engagement total à la protection des ressources naturelles notamment les ressources en eau et des communautés des régions minières. Le respect et l'application de ces actions permettront de ne pas transformer la course à l'extraction de l'or en cauchemar de cours d'eau empoisonnés (FEPS, 2008). Face à ces défis majeurs que sont l'approvisionnement en eau potable des communautés, la protection des systèmes écologiques et la connaissance de la qualité des ressources en eau de la zone d'activité minière reste une priorité. Ainsi, cette évaluation vise la détermination des impacts de l'activité d'exploitation minière pour une meilleure gestion qualitative et quantitative des ressources en eau. La présente étude centrée sur la gestion des eaux de la zone d'exploitation minière de Bonikro, s'inscrit dans cette optique.

• Objectifs

L'objectif général de cette étude est de déterminer les impacts de l'activité d'exploitation minière pour une meilleure gestion qualitative et quantitative des ressources en eau.

De façon spécifique, il s'agira de :

- Analyser les paramètres de qualité des eaux de surface et souterraines ;
- Evaluer les besoins en eau des activités du projet et la disponibilité des ressources en eau;
- Identifier les impacts significatifs de l'activité minière sur les ressources en eau.

- **Hypothèses**

Pour bien cerner ce travail, les hypothèses suivantes ont été formulées:

- ✓ La qualité des eaux environnantes de la mine d'or de Bonikro n'est pas conforme à la norme de qualité des eaux pour la consommation humaine ;
- ✓ L'écosystème aquatique de la zone du projet est modifié due l'exploitation de la mine ;
- ✓ Les ressources d'eau sont surexploitées par la mine d'or de Bonikro.

Résultats attendus sont:

- Les différentes sources de pollution des eaux de surfaces et souterraines de la zone minière sont identifiées ;
- les impacts de la mine d'or sur les ressources en eau et leur importance sur le milieu naturel sont caractérisés ;
- Les besoins en eau des activités du projet et la quantité d'eau disponible sont évalués.

Le rapport est structuré comme suit :

Introduction

Présentations de la structure d'accueil et de la zone d'étude

Matériels et méthodes

Résultats et discussions

Conclusion et recommandations

I

PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE LA ZONE D'ETUDE

I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE LA ZONE D'ETUDE

1.1. Présentation de la structure d'accueil

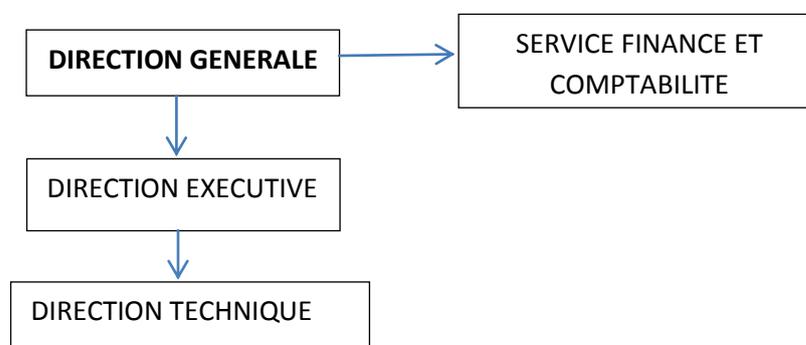
Le Cabinet d'Etudes, Conseils d'Assistance et de Formation (CECAF) International est un bureau d'étude privé chargé de réaliser les études d'impact environnemental et social pour le compte des clients. Le cabinet d'études est situé dans la commune de Cocody, appartenant au district d'Abidjan. Il intervient dans le domaine global de l'Environnement et regroupe en son sein des consultants/experts nationaux et internationaux de compétences diverses.

Il a été agréé par Arrêté Ministériel n° 00559 du 25 Mars 2008 portant attribution d'agrément pour les activités d'audits environnementaux et connexes, ainsi que pour la réalisation des études d'impact environnemental et social des projets de développement.

Le cabinet CECAF International intervient dans ses domaines suivants :

- Appui institutionnel et formation pédagogique,
- Etudes d'Impact Environnemental et Social,
- Système de Management Environnemental,
- Audit environnemental et connexes,
- Gestion des déchets,
- Déplacement et réinstallation involontaire de populations,
- Alimentation en eau potable,
- Prévention des risques incendies et industriels,
- Aménagement urbain et bâtiment,
- Aménagement hydro-agricole.

L'Organigramme de CECAF International :



1.2. Présentation du projet et des différentes activités

• Zone d'étude

La zone aurifère de Bonikro appartient à la sous-préfecture de Hiré qui relève de la préfecture de Divo dans la région du Lôh-Djiboua. Le prospect de Bonikro est situé à quelque 60 km au Sud-Ouest de Yamoussoukro et est accessible par la route en empruntant la nationale N1 Abidjan-Yamoussoukro jusqu'à Toumodi, puis en suivant la route secondaire de l'Ouest qui mène à la ville d'Oumé. L'approche finale se fait par une piste rurale de 7 km qui permet d'atteindre le village de Bonikro et dont l'embranchement se situe sur la route de Hiré à quelque 19 km au Sud d'Oumé. La carte ci-dessous indique la localisation précise de la zone d'étude.

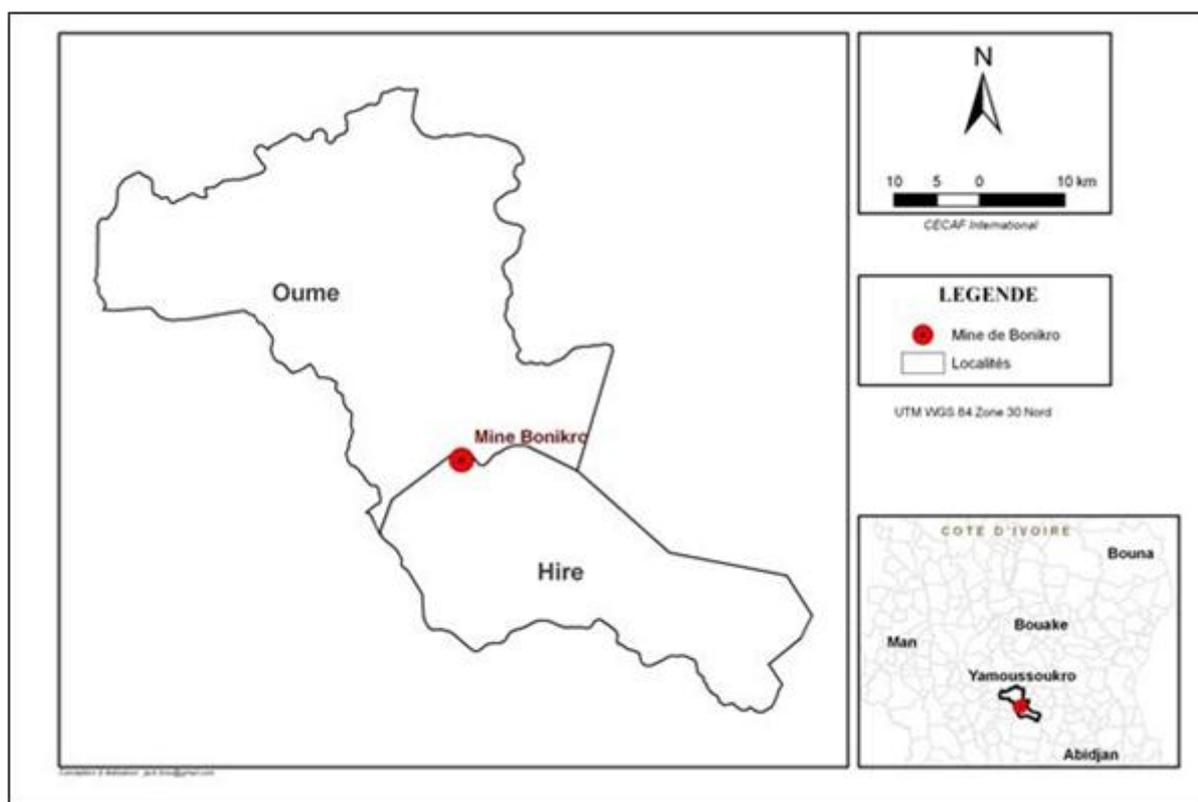


Figure 1: Localisation de la zone d'étude (Cabinet CECAF)

Les installations de la mine de Bonikro (Photo 1) comprennent deux verses à stérile, un parc à résidu, une carrière à ciel ouvert, l'usine de traitement et des installations de surface (le laboratoire, la cantine, l'administration, la clinique, bureau de la mine, service achat et maintenance mobile).

- Les verses à stérile sont constitués de matériaux de découverte dépassant plus de 20 m de hauteur ne contenant que peu ou pas de minerais et occupant une superficie très

importante du site minier de Bonikro. Ces stériles sont de grand volume et nuisent à l'esthétique du paysage.

- La carrière à ciel ouvert est située au pied des stériles; il s'agit d'une excavation de superficie de plus de 10 ha.



Photo 1: Aperçu de l'usine de traitement de la mine de Bonikro

- **Historique du projet aurifère de Bonikro**

En vertu de l'article 39 du code de l'environnement et de l'article 77 du code minier, Equigold, avant d'entreprendre quelques travaux que ce soit sur le terrain dans le cadre du titre ou de l'autorisation, a préparé et soumis à l'approbation de l'administration des Mines et de l'administration de l'Environnement et de tous autres services prévus par la réglementation minière, une étude complète d'impact environnemental, et un programme de gestion de l'environnement comprenant un plan de réhabilitation des sites et leurs coûts prévisionnels.

Lihir Gold Limited a acquis le projet aurifère de Bonikro en Juin 2008, par le biais d'une fusion avec Equigold. Equigold avait obtenu la zone du projet Oumé en 1996. La minéralisation aurifère à Bonikro a été découverte peu après à la suite d'échantillonnage géochimique du sol sur la zone Oumé. L'anomalie en or dans les sols a ensuite été forée, culminant dans l'estimation des ressources et des études d'optimisation de la fosse. En Juillet 2006, Equigold a annoncé l'achèvement d'une étude de faisabilité bancable à Bonikro. L'approbation du Conseil pour le développement final du projet a été accordée en Mai 2007 et la construction de la mine a commencé ce mois. La production commerciale a débuté en Août

2008. En Septembre 2010 Newcrest a assumé la propriété de l'Opération Bonikro suite à la fusion de Newcrest Mining Limited et Lihir Gold Limited.

• Les produits chimiques utilisés dans le procédé

Les produits chimiques utilisés sont typiques pour ce genre de procédé de traitement du minerai. Il s'agit principalement du cyanure de sodium, de la chaux, du charbon actif, de la soude caustique, et de l'acide chloréologique. Une petite quantité d'hypochlorite de calcium est stocké et utilisé pour la décontamination des sites en cas de pollution accidentelle. Les consommations annuelles de ces produits sont indiquées au Tableau 1.

Tableau 1: Consommations annuelles des produits chimiques utilisés à Bonikro (EIES du projet, 2006)

Produits	Cyanure de sodium	Chaux	Charbon actif	Soude caustique	Acide chloréologique	Hypochlorite de calcium
Consommation annuelle (t)	1100	1200	10	80	180	Négligeable

• Différentes activités de la mine

Depuis la carrière, le minerai est transporté à l'usine de traitement et classé dans différentes piles de stockage selon des propriétés physiques et la teneur aurifère. A partir des piles de stockage, le minerai est accumulé et transféré dans une benne à un concasseur primaire couplé à un concasseur secondaire. Les concasseurs réduisent le tout-venant en fragments de 700 mm à moins de 50 mm qui sont transférés par convoyeur vers une pile de stockage du minerai concassé puis vers le broyeur semi-autogène (SAG). Afin d'élever le pH en prévision de la cyanuration, la chaux hydratée est ajoutée à partir d'un silo directement sur le convoyeur d'alimentation du broyeur SAG. (Figure 2)

La décharge du broyeur passe dans un tamis cylindrique (trommel). Le matériel refusé au trommel est reconduit par un convoyeur de recyclage vers le concasseur et/ou la trémie d'alimentation du broyeur. Les pulpes à la sortie du circuit de broyage sont collectées dans une cuve de distribution puis pompées vers une batterie de cyclones. La surverse des cyclones formera le produit final du circuit de broyage et contiendra 80 % de particules inférieures à 106 µm.

La pulpe rentre dans le circuit de lixiviation au niveau de la première cuve où sera ajoutée une solution de cyanure de sodium. L'or va alors se dissoudre des solides et former un complexe avec les cyanures présents en solution. Du charbon actif, régénéré ou frais, sera circulé vers l'amont de la cuve n°6 à la cuve n°2 à contre-courant du débit de la pulpe.

L'or est libéré du charbon actif chargé à l'aide d'une solution chaude constituée d'hydroxyde de sodium et de cyanure de sodium. Cet éluât chaud circulera dans la colonne qui fonctionne sous pression (350 kPa) et à une température d'environ 120°C. A la sortie de la colonne, la liqueur mère passera dans une cellule d'électrolyse où l'or et l'argent seront déposés sur des cathodes de laine d'acier.

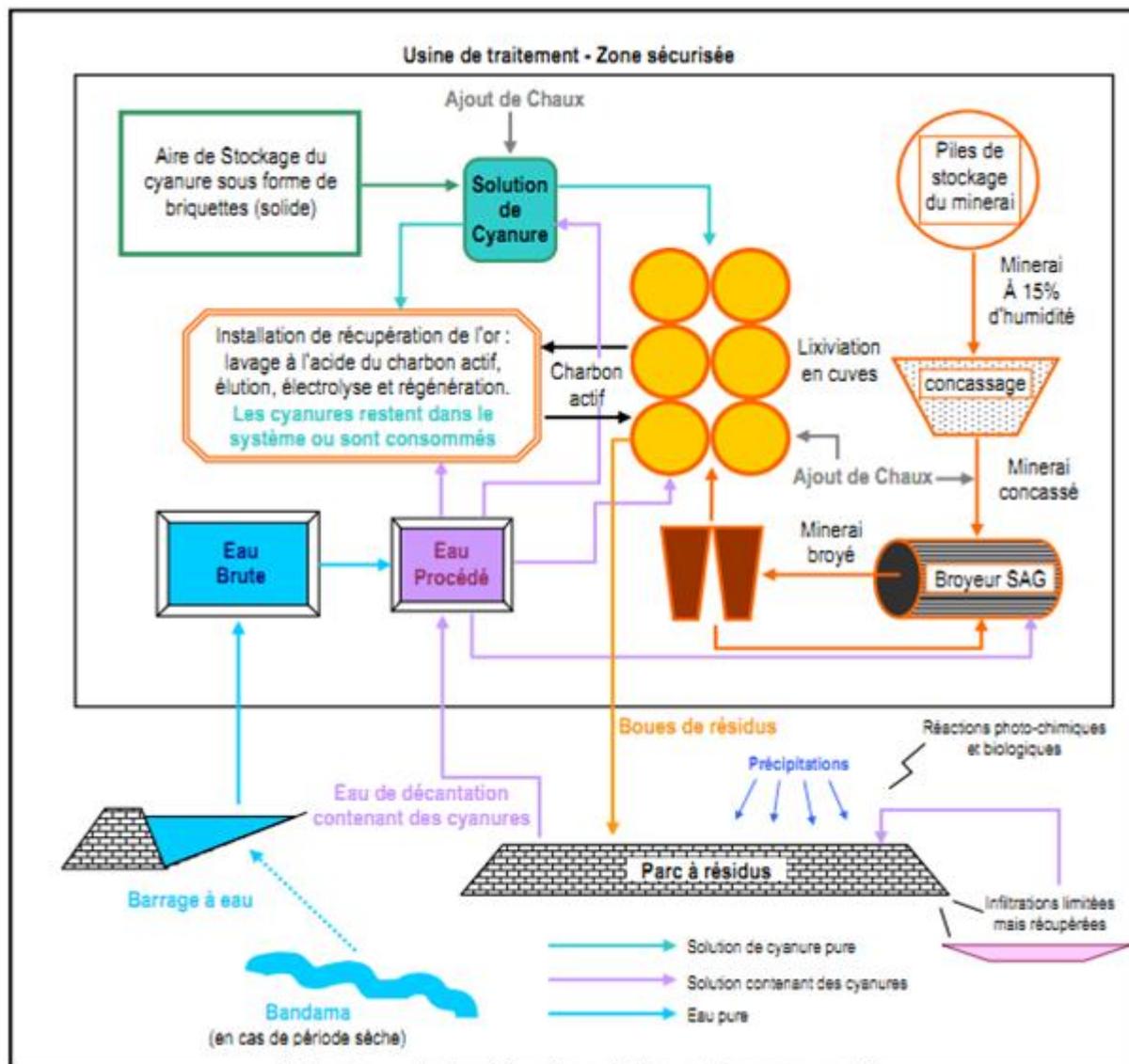


Figure 2: Schéma des activités typiques de la phase d'exploitation de la mine (EIES du projet, 2006)

1.3. Impacts d'une activité minière sur les ressources en eau

L'extraction minière peut entraîner des désordres multiples dont la modification du fonctionnement hydrogéologique du bassin minier (BRGM, 2005). Il y a plusieurs types d'impacts provenant de l'exploitation minière qui affectent la qualité de l'eau.

1.3.1. Drainage minier acide

Le Drainage Rocheux Acide (DRA) est un processus naturel où l'acide sulfurique est produit lorsque les roches sulfureuses sont exposées à l'air et l'eau. Le Drainage Minier Acide (DMA) est pratiquement le même processus mais amplifié (photo 2). Quand de grandes quantités de roches contenant du sulfure sont creusées dans des fosses ouvertes, les roches réagissent avec l'eau et l'oxygène, ce qui crée l'acide sulfurique. Lorsque l'eau atteint un certain niveau d'acidité un type naturel de bactérie tel que *Thiobacillus ferroxidans* peut aider le processus d'oxydation et d'acidification filtrant plus de métaux dans les déchets. L'acide filtrera tant que la roche sera exposée à l'air et l'eau jusqu'à ce que le sulfure soit entièrement filtré dans la roche. Ce processus peut durer des centaines même des milliers d'années. L'acide se déplace hors des sites des mines grâce à l'eau de pluie ou le drainage et s'infiltre dans les cours d'eaux comme les rivières, lacs et eau souterraine. Le DMA dégrade sérieusement la qualité de l'eau, détruit la vie aquatique et rend l'eau pratiquement inutilisable.



Photo 2: Image d'un drainage minier acide (www-dsv.cea.fr)

1.3.2. Contamination par le métal et filtration

La contamination par les métaux est causée par l'arsenic, le cobalt, le cuivre, le cadmium, le plomb, l'argent et le zinc contenu dans la roche exposée dans des mines souterraines lorsqu'elles sont en contact avec l'eau. Les métaux sont filtrés et l'eau qui se déplace en aval nettoie le dessus des roches. Les métaux peuvent devenir stables lorsque le pH est neutre. Par contre, le processus de filtration est accéléré lorsque le pH est bas comme lors du drainage minier acide.

1.3.3. Pollution par les produits chimiques

Ce type de pollution est produit quand les agents chimiques (cyanure ou l'acide sulfurique) se déversent ou se filtre dans des étendues d'eau voisine au site minier. Ces produits chimiques peuvent être très toxiques pour la faune et la flore.

1.3.4. Érosion et sédimentation

Le développement minéral dérange la roche et le sol au cours de la construction et le maintien des routes, des fosses ouvertes et dans les déchets miniers. Sans prévention adéquate et stratégie de contrôle, l'érosion de la terre peut entraîner un déversement dans les cours d'eau, les rivières et les lacs. Le déversement excessif de sédiment peut bloquer des rivières, étouffer la végétation, détruire la faune, la flore et la vie aquatique.

1.3.5. Consommation d'eau

L'extraction peut épuiser des bassins d'eau souterraine et de surface. Les mines drainent l'eau des bassins d'eau souterraine. En effet, au Nevada, l'État le plus sec des États-Unis, draine l'eau de la Humboldt river pour l'extraction de l'or le long de Carlin Trend. Des mines dans le Nord-Est du Nevada ont pompés plus de 580 milliards de gallons d'eau entre 1986 et 2001 (assez pour alimenter les robinets de New-York pendant plus d'une année) (FEPS, 2008). En Arizona du Sud, l'eau souterraine pompée du bassin Santa Cruz pour une usine de cuivre, réduit de plus en plus la nappe phréatique et assèche la rivière (FEPS, 2008).

II

MATERIELS & METHODES

II. MATERIELS ET METHODES

L'étude s'est déroulée en trois phases, en l'occurrence :

- ✓ Une recherche documentaire afin de collecter l'ensemble des informations en rapport avec le sujet, obtenues lors des études précédentes;
- ✓ Les entretiens avec certains responsables de la société minière lors de la mission de terrain;
- ✓ Le dépouillement, l'exploitation des données mises à disposition par la société et la rédaction du rapport.

2.1. Matériels

2.1.1. Ressources en eau de la zone d'étude

2.1.1.1. Hydrologie

La zone du projet appartient aux bassins versants des fleuves Bandama à l'Est et Boubo au Sud. Cette zone est constituée de quatre sous-bassins versants. Ces sous-bassins composés des affluents du Bandama que sont le Gnouzalé, le Gnénessi et le Zéssié qui drainent près de 90% de la superficie du site minier. Enfin, le Boubo dont l'affluent est le Lélébiaba, draine environ 10% de la zone aurifère (Figure 2).

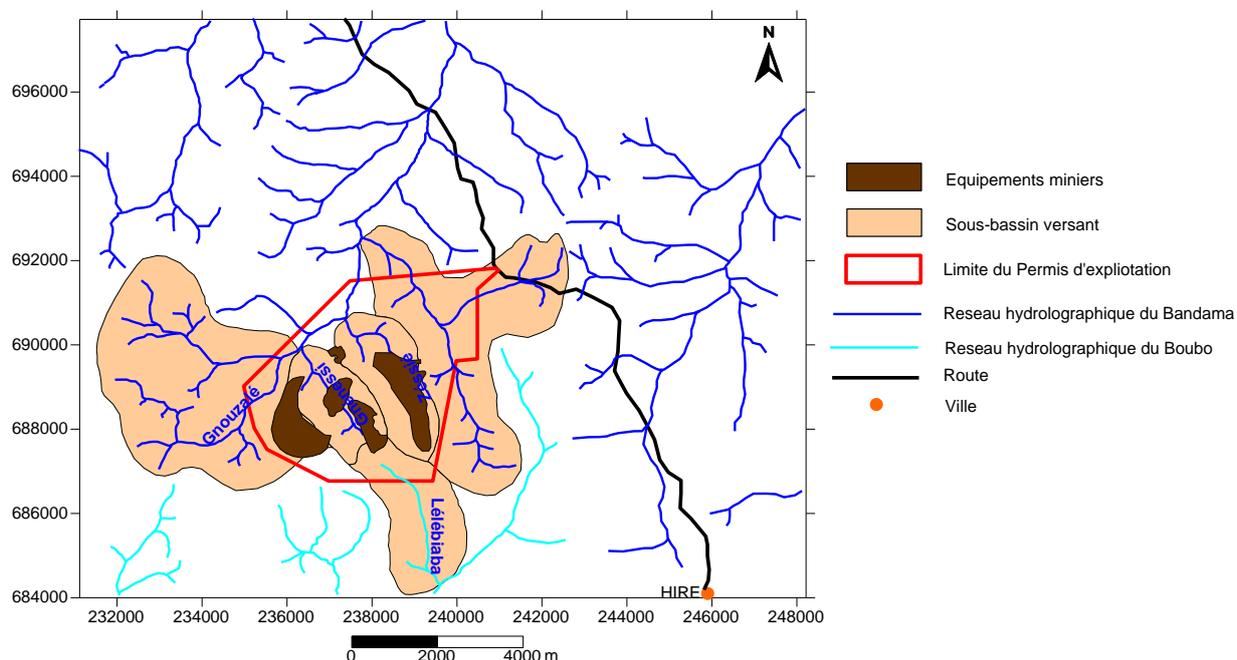


Figure 3: Bassins versants de la zone aurifère de Bonikro

2.1.1.2. Pluviométrie

Le site aurifère de Bonikro baigne dans un climat équatorial de transition caractérisé par quatre saisons nettement différenciées par leur régime pluviométrique. La grande saison des

pluies se situe entre Mars et Juin suivie d'une petite saison sèche (Juillet-Août). La petite saison pluvieuse intervient dans le mois de Septembre pour prendre fin au mois de Novembre. Les mois de Novembre, Décembre, Janvier et Février constituent la grande saison sèche (Figure 3). Les hauteurs de pluies varient de 246,15 mm en Juin (grande saison de pluies) à 29,8 mm en Janvier (grande saison sèche). Dans la zone aurifère, la pluie annuelle varie entre 1169 et 1503 mm avec une moyenne interannuelle de 1305 mm.

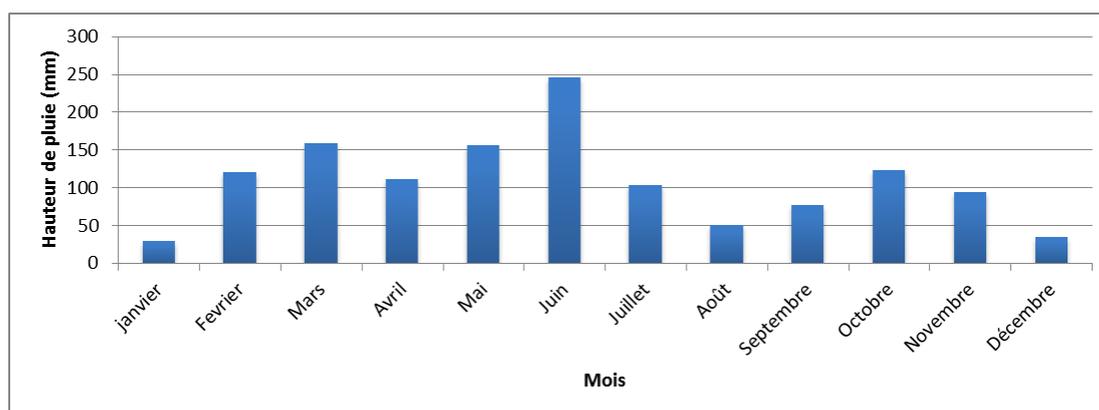


Figure 4: Evolution pluviométrique mensuelle de la zone minière (2009-2011) (Station météo de la mine)

2.1.2. Sources d'approvisionnement en eau de la mine

Les eaux provenant des différentes sources d'alimentation sont utilisées aux usages domestiques, industriels et l'arrosage des voies d'accès à la mine et des pistes sur le site.

2.1.2.1. Cours d'eau

Le Gnouzalé, le Gnénessi, le Zéssié et le Lélébiaba constituent les principales sources d'alimentation en eau de surface du site minier. Sur certaines de ces rivières, ont été construites des digues de fortune pour l'approvisionnement en eaux brutes de l'usine de traitement. L'eau brute issue du cours d'eau Gnénessi est aussi utilisée pour l'arrosage des voies d'accès à la mine et des pistes à l'aide de camion-citerne. Les barrages 1 (aval) et 2 (central) sont construits sur le cours d'eau Gnénessi, (Figure 5). Ils couvrent respectivement des sous-bassins d'une superficie de l'ordre de 1 172 464 m² et 786 401 m². Quant au barrage 3 (amont), il est situé dans la vallée du Lélébiaba. La superficie du sous bassin de Lélébiaba se trouvant dans la zone du permis d'exploitation de la mine est de l'ordre de 1 377 000 m².

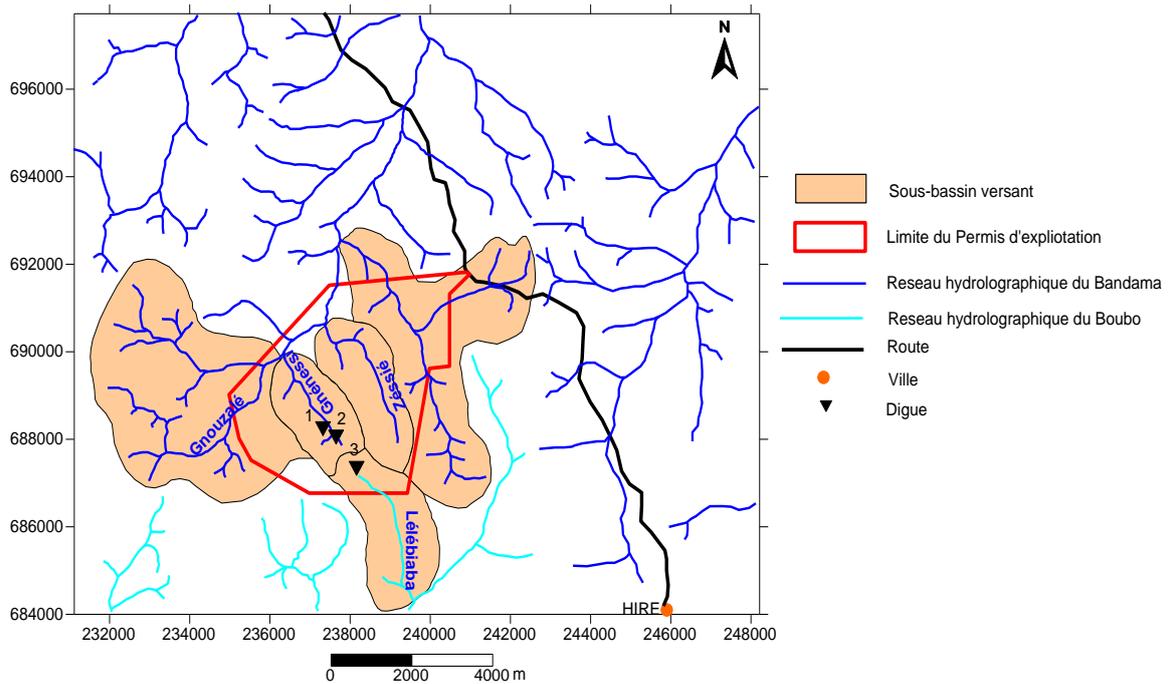


Figure 5: Localisation des barrages du site minier de Bonikro

2.1.2.2. Forages

Les forages constituent l'unique source d'approvisionnement en eau souterraine de la mine. La mine dispose de quatre (4) forages de production (figure 6). Les trois forages PB01, PB02 et PB04, sont destinés à alimenter la mine en eau brute et le forage PB03, approvisionne la mine après traitement pour la consommation humaine. Les eaux provenant des forages sont aussi utilisées pour les toilettes.

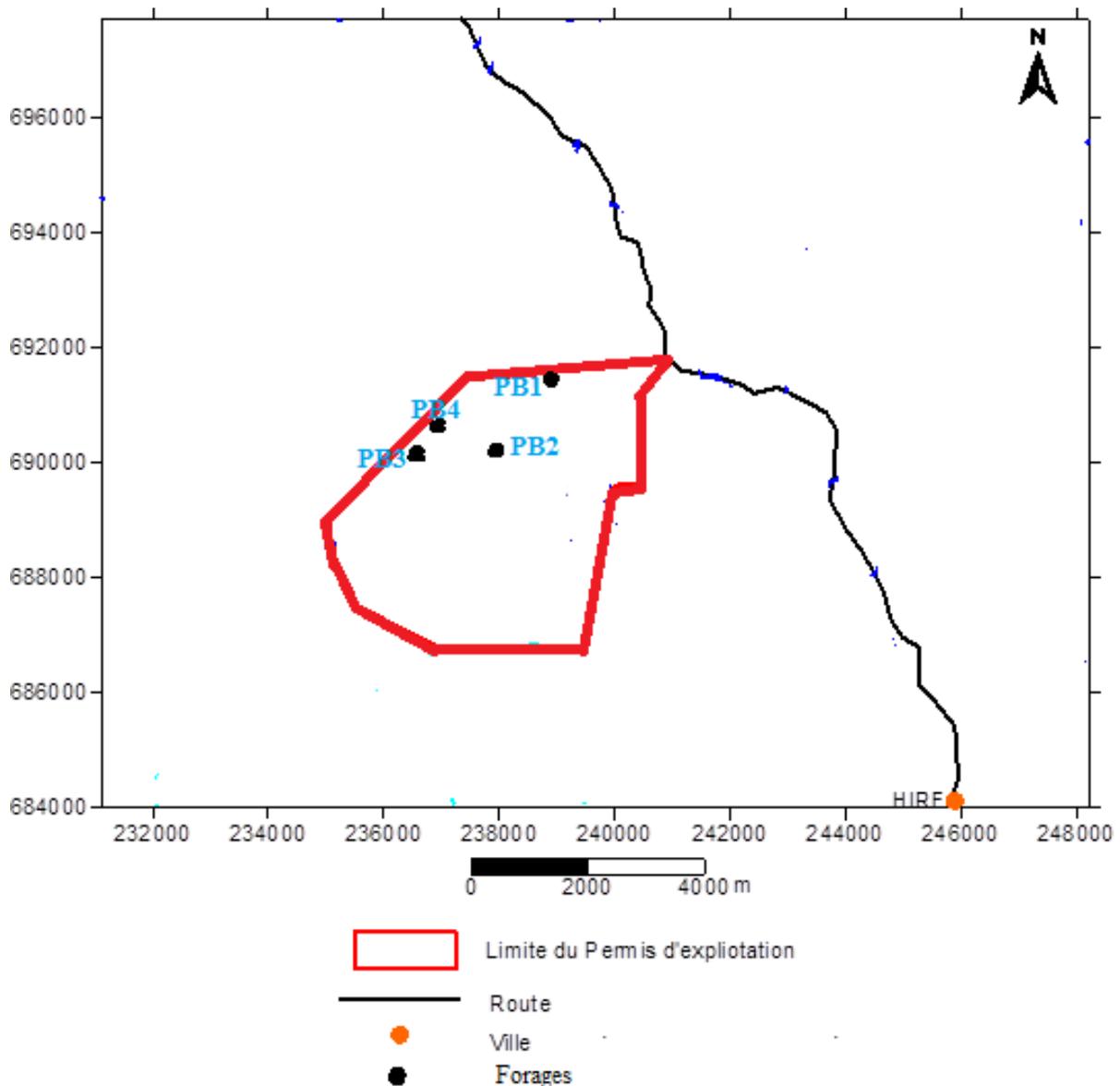


Figure 6: Emplacement des forages de production du site minier de Bonikro

2.1.2.3. Parc à résidu

Le parc à résidu est constitué d'un seul grand bassin divisé en deux par une levée empierrée (photo 3). Il s'agit d'un premier grand bassin et d'un bassin de décantation situé plus bas. Le principe consiste à laisser les matières solides se déposer dans le bassin principal et l'eau passe à travers les pierres vers le second bassin. On obtient ainsi une eau assez claire qui est envoyée à l'aide de deux pompes vers le bassin d'eau de procédé pour être réutilisée à l'usine de traitement. Durant la saison des pluies, le bassin à résidus reçoit beaucoup d'eau de ruissellement. Pendant la saison sèche, il est utilisé comme source d'appoint des puits forés et des bassins naturels pour maintenir le fonctionnement de l'usine de traitement.



Photo 3: Parc à résidu de la mine de Bonikro

2.1.2.4. Carrière

La carrière représente une source d'approvisionnement en eau de surface par le biais des eaux de ruissellement et des arrivées d'eau des nappes souterraines. Ces eaux sont acheminées à travers des pompes hydrauliques vers un bassin de rétention d'eaux brutes. Ces eaux sont utilisées aussi pour les toilettes.



Photo 4: Carrière de la mine de Bonikro

2.2. Méthodologie

2.2.1. Recherche documentaire

Elle a consisté à collecter les données existantes sur le projet aurifère de Bonikro et prendre connaissance des études réalisées dans la zone d'étude avant et pendant l'exploitation de la mine d'or de Bonikro. Cette recherche a permis d'avoir les informations sur les exploitations minières afin de dégager les sources d'impacts majeurs sur les ressources naturelles (sol, eau,

faune, flore, etc.). Après la collecte des informations, une synthèse bibliographique a été effectuée afin de mieux ressortir la problématique de l'étude.

2.2.2. Phase terrain :

• Visite de la mine

La visite du 08/03/2012 au 13/03/2012, a permis de faire le diagnostic de la mine et de son environnement immédiat afin d'apprécier objectivement les risques environnementaux liés à l'exploitation minière et d'identifier les impacts associés. Cette phase s'est effectuée par une observation des ouvrages de la mine, ainsi que leur fonctionnement, afin de déterminer :

- les sources d'approvisionnement en eau ;
- le parc à résidu ;
- L'usine de traitement du minerai;
- Les verses à stérile ;
- les bassins d'eau.

• Entretiens

Des entretiens ont été initiés avec les acteurs concernés par la gestion environnementale et la santé-sécurité au travail. Ces entretiens ont permis de connaître les activités principales de la mine, le fonctionnement des installations et les impacts de la mine sur l'environnement. Les données des résultats d'échantillonnage des eaux de surface et souterraines ont été fournies par le coordinateur environnement. (Fiche de questionnaire pour les entretiens en annexe 8).

2.2.3. Traitement des données

Les volumes d'eau prélevés sont comparés à la disponibilité en eau actuelle et une analyse de l'évolution des consommations est réalisée. De même, une analyse de l'évolution de la qualité des eaux a été effectuée sur la base des données de mesures du programme de suivi-surveillance fournies par la société Newcrest. Par ailleurs, une analyse des zones potentiellement inondables est faite au regard de la topographie du site minier.

L'approche méthodologique à consister d'abord à définir les usages des ressources en eau du site, suivi de l'examen de leurs qualités physico-chimiques et d'une analyse du bilan écologique. Ensuite, les besoins actuels de la mine ont été évalués par le biais des consommations des différentes unités. Enfin, la disponibilité en eau a été examinée à travers l'évaluation des ressources en eau par l'approche du bilan hydrologique, suivi de l'établissement du bilan écologique global de la mine.

En l'absence de données sur le site minier de Bonikro, l'évaporation sur les sols dépourvus de végétation et les plans d'eau du site minier de Bonikro a été estimée (par **Krigeage**) à l'aide des valeurs enregistrées par les évaporomètres de **Piche** installés au niveau des stations synoptiques de Gagnoa, Yamoussoukro et Daloa.

L'absence de données notamment au niveau des eaux souterraines n'a pas permis de déterminer les conditions d'exploitation optimale des forages. De même, le manque de mesure en continue (plusieurs années) des prélèvements d'eau au niveau des sources d'approvisionnement n'ont pas permis d'apprécier de manière efficiente les volumes d'eau utilisés par les différentes unités de la mine.

Les résultats des analyses des échantillons prélevés pendant la phase d'exploitation ont été comparés aux valeurs limites proposées par l'O.M.S. afin de déterminer les modifications dues à la présence des polluants. Les formules permettant de calculer les volumes d'eau sont les suivantes :

- **Besoins eau des installations** = $[besoins\ domestiques] \times [consommation\ spécifique] \times [Nombre\ personnel]$;
- **Volume d'eau par camion** = $[Capacité\ citerne] \times [Nombre\ voyage\ par\ jour] \times [Nombre\ jour\ sec]$;
- **Besoins en eau du site minier** = $[Besoin\ des\ installations] + [Volume\ d'eau\ par\ camion] + [besoin\ de\ l'usine]$;
- **Volume d'eau écoulé dans le site** = $[superficie\ totale] \times [lame\ d'eau\ ruisselée] \times [coefficient\ de\ ruissellement]$;
- **Volume d'eau dans la carrière** = $[Volume\ d'eau\ global] - [Perte]$;
- **Volume d'eau de surface de disponible** = $[ruissellement\ provenant\ des\ sous-bassins] + [quantité\ d'eau\ stockée\ dans\ les\ barrages] + [exhaure] + [écoulement\ provenant\ du\ parc\ à\ résidus]$.

- **Apport d'eau**

Les apports (quantité d'eau susceptible d'arriver à l'exutoire de la retenue d'eau) sont calculés pour une année considérée à partir de la formule :

$$A_p = S * P * K_e \quad [1]$$

Avec:

- **S**= Superficie du bassin versant ;
- **P**= Pluviométrie (1305 mm dans la zone du projet);
- **Ke**= Coefficient d'écoulement (10% dans la zone du projet)

- **Ap**= Apport annuel (m³)

- **Pertes par dépôts solides**

La méthode de l'EIER – CIEH est proposée pour évaluer les transports solides. L'approche de calcul est définie comme suit :

$$D = 700 * (P/500)^{-2,2} * S^{0,1} \quad [2]$$

Avec :

P (mm) = pluviométrie moyenne annuelle, en mm;

S (km²) = superficie du bassin versant, en km²;

D (m³/km²/an) = dégradation spécifique annuelle.

- **Pertes par évaporation : Méthode de Krigeage**

C'est une méthode d'interpolation qui consiste à estimer la valeur d'attribut pour des sites non échantillonnés situés à l'intérieur des limites définies par les positions comme suite :

$$F(x_p) = \sum_{i=1}^m W_i \cdot F(x_i)$$

Avec :

m: nombre station

x = point

F(x) = perte d'évaporation en x

Wi = poids ou distance

III
RESULTATS
&
DISCUSSION

III.RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Qualité des eaux de surface et souterraines

3.1.1. Eaux souterraines

- Avant l'exploitation de la mine

Les résultats de l'analyse des paramètres conventionnels dans les échantillons d'eau récoltés en Mai 2004 sont présentés dans le tableau 10 en annexe.

L'eau souterraine était caractérisée par une dureté et une alcalinité moyenne, une minéralisation moyennement marquée et un pH proche de la neutralité.

Pour les métaux lourds, seuls le fer et l'arsenic ont été détectés dans tous les échantillons prélevés. Le manganèse, le zinc et l'aluminium ont aussi été mesurés mais en faibles concentrations, toujours en dessous des normes de potabilité proposées par l'O.M.S. (1990). Par contre, il est important de noter que la norme de potabilité de l'O.M.S. de 0,01 mg/l pour l'arsenic a été dépassée pour quatre des cinq échantillons analysés (GW1, GW2, GW3 et GW5) (figure 7). Ce genre de concentration n'est pas inhabituel dans les formations géologiques du birimien et particulièrement dans les zones aurifères qui contiennent de l'arsénopyrite (FeAsS). Pour le fer, seul le forage de Konankro dépasse la norme de l'O.M.S (0,3 mg/l).

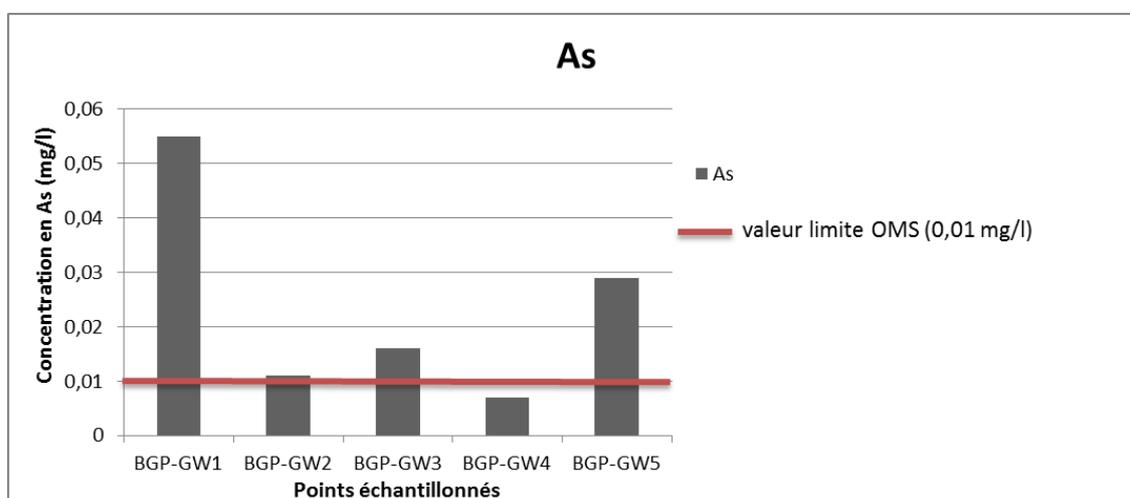


Figure 7: Teneurs en As des eaux souterraines avant l'exploitation de la mine

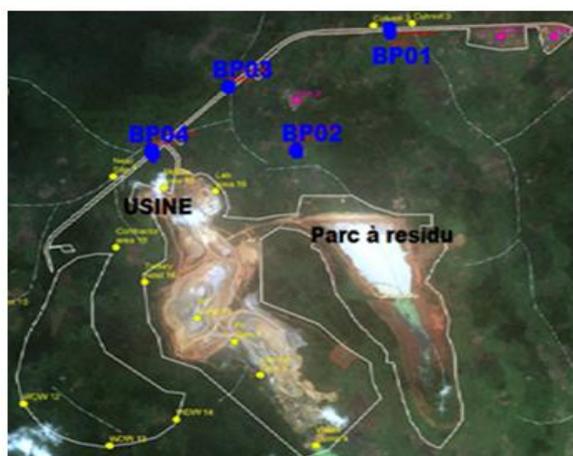
L'examen microbiologique des eaux souterraines avait révélé une contamination importante des puits de Bonikro (GW3, 23 MPN/100ml) et Bandamakro (GW4, 80 MPN/100ml). Les origines de cette contamination peuvent être diverses. L'absence totale d'infrastructures sanitaires peut contribuer de façon significative à cet apport en micro-

organismes (Coliforme totaux). Les normes de l'O.M.S. prescrivent l'absence totale de ce genre de micro-organismes dans des eaux destinées à la consommation humaine.

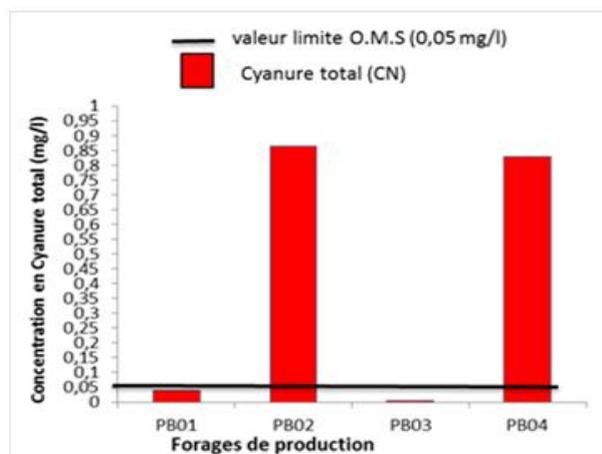
- **Etat actuel des eaux souterraines**

La qualité physico-chimique actuelle des eaux souterraines a été analysée à partir de quatre forages de production de la zone minière. La campagne de mesures couvre la période du 03 Octobre 2011 au 26 Décembre 2011.

La qualité physico-chimique des eaux souterraines est globalement moyenne à bonne par rapport aux normes de l'O.M.S sur l'ensemble des aquifères de la ville de Hiré (Kouassi, 2006). Toutefois dans le détail, les résultats des analyses effectuées mettent en évidence une situation contrastée. La norme de potabilité de l'O.M.S. de 0,05 mg/l pour le Cyanure total a été dépassée pour deux échantillons analysés PB02 et PB04 avec des valeurs respectives de 0,865 mg/l et 0,829 mg/l (figure 8). Ces fortes teneurs peuvent être expliquées par un effet de contamination à partir des résidus de traitement très riche en cyanure. En effet, ces deux forages PB02 et PB04 sont situés non loin de l'usine de traitement du minerai et du parc à résidu (figure a).



a) Localisation des forages de production de la mine



b) Concentration de cyanure dans les eaux souterraines de la mine

Figure 8: Teneurs en Cyanure total dans les forages de production de la mine de Bonikro

Les résultats des analyses montrent aussi que les eaux souterraines ont un pH proche de la neutralité (7,29 en moyenne). Elles contiennent un oxygène dissous à des teneurs anormalement élevées oscillant entre 8,19 mg/l et 8,65 mg/l pour trois forages (PB01, PB02, PB03). Elles ont une turbidité très élevée qui varie entre 12,4 et 124 NTU montrant que les eaux souterraines sont troubles. Le manganèse, le zinc, le cuivre, le chlore et l'aluminium ont

aussi été mesurés mais en faibles concentrations, toujours en dessous des normes de potabilité proposées par l'O.M.S.. Cependant, le Fer avec une concentration comprise entre 0,8 et 1,5 ppm est généralement élevé en Afrique de l'Ouest à cause du lessivage des terrains latéritiques (Kouassi, 2006). Des études antérieures montrent que le plomb (Pb), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), et le cadmium (Cd) migrent peu en profondeur dans les aquifères, sauf dans des conditions particulières de drainage ou en milieu très acide (Adriano, 1986 ; Citeau, 2004 ; Pichard et al., 2004). En effet, il existe un pH en dessous duquel ces métaux sont brusquement relargués par les sols, ce qui entraîne une mobilisation de ces métaux (Martinelli, 1999). Le pH est différent selon le métal considéré, 4 pour le Pb, 5 pour le Cu, 5,5 pour le Zn et 6 pour le Cd (Citeau, 2004). Ceci n'est pas le cas pour la zone aurifère de Bonikro où on note une alcalinité déclarée avec un pH supérieur à 7 et où ces métaux évoluent dans un milieu basique.

Ces données mettent en évidence une probable contamination des eaux souterraines en Cyanure total. Cependant, cette pollution reste relativement ponctuelle (Tableau 2). La présence d'une teneur élevée en As dans les puits proviendrait d'une contamination de la nappe par ces éléments toxiques provenant probablement de l'héritage minier.

Tableau 2: Résultats des analyses des échantillons prélevés dans les eaux souterraines de la zone d'étude

paramètres analysés		PB01	PB02	PB03	PB04	NORMES OMS
Coordonnées GPS	LONGITUDE	691549	690350	690400	690770	
	LATITUDE	238869	238013	236800	237150	
pH		7,48	7,47	7,07	7,14	6,5<pH<8,5
Fe (ppm)		0,8	1,5	0,81	0,94	<0,3
Turbidité (NTU)		20,2	124	12,4	16,1	<5
Mn (ppm)		0,513	0,389	0,552	0,49	<0,5
Cu (ppm)		0,07	0,04	0,17	0,14	<2
Zn (ppm)		<0.01	<0.01	0,01	<0.01	<3
Arsenic As		<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0,01
Cadmium Cd		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0,003
Chrome Cr		<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0,05
Molybdène Mo		0,141	0,11011	0,1398	0,1402	<0,07
Mercure Hg		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0,001
Plomb Pb		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0,01
Aluminium Al		0,014	0,012	0,009	0,0977	<0,2
Argent Ag		<0.001	0,0079	<0.001	0,0092	
Silices Sio2		58,6	74,8	64,2	56	<20
Thallium Th		<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	
TDS (ppm)		214,3	141,9	394	236	
oxygène dissous		8,33	8,19	8,65	7,95	<8
Alcalinité (mg CaCO3/L)		210	189	251,6	227	
Dureté (ppm)		277	183	438	278	500
Na (ppm)		20,17	22,16	18,12	22,17	<200
K (ppm)		1,6	1,5	1	1	<12
Sulphate (ppm)		9	0	22	17	<250
Cl (ppm)		31,25	5,8	26,7	38	<250
Ca (ppm)		81,6	66	130,4	96,4	
Mg (ppm)		17,82	4,39	27,34	9,03	
Cyanures libres		<0.0001	0,011	<0,0001	0,016	<0,05
Cyanures totaux		0,039	0,865	0,0033	0,829	<0,05
WAD				<0,0001		<0,05
Ammonium NH4+		0,13	0,28	0,02	0,25	<1,5

3.1.2. Eaux de surface

- **Avant l'exploitation de la mine**

Les résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques et microbiologiques dans les échantillons d'eau récoltés en Mai 2004 sont présentés dans le tableau 11 en annexe.

De façon globale, les eaux de surface de la zone du projet sont moyennement minéralisées (conductivité moyenne sauf pour le fleuve Bandama (point BGP-SW6) qui exhibe une valeur faible) et elles ont un pH légèrement acide à neutre (6,5 à 7,0 et 7,8 pour le Bandama). Elles sont souvent fortement colorées, contiennent des matières en suspensions inférieures à la norme de rejet de la Banque Mondiale (<50 mg/l) (2003), ont un oxygène dissous plutôt bas (fluctue entre 1 mg/l et 3,9 mg/l), une turbidité moyenne à faible, ont une dureté totale et des concentrations en nutriments plutôt élevées contrairement au Bandama (tableau 11, annexe 2). Et elles sont pratiquement dépourvues de métaux traces en concentrations détectables excepté le fer (1,52 à 13,0 ppm) qui est presque toujours élevé en Afrique de l'Ouest à cause du lessivage des terrains latéritiques, le manganèse (<0,01 mg/l à 9,75 mg/l) et le zinc (0,04 mg/l à 0,35 mg/l). Il faut aussi noter que des traces d'arsenic (0,003 mg/l à 0,046 mg/l) ont été détectées dans tous les échantillons d'eau de surface des sous-bassins de la zone du projet mais pas dans le Bandama. A titre comparatif, les normes de potabilité de l'O.M.S. et de rejet de la société financière internationale (SFI) sont de 0,01 mg/l et 0,1 mg/l respectivement. Finalement, les traces de mercures (Hg) trouvées dans les échantillons d'eau prélevés dans les marigots Gnénessi (0,004 mg/l) et Gnouzalé (0,001 et 0,004 mg/l) ne sont pas alarmantes mais classeraient l'eau dans la catégorie « non potable » (Kouassi, 2006).

Les concentrations en coliformes totaux et fécaux indiquent que les eaux de surfaces sont contaminées et non recommandées à la consommation humaine sans un traitement préalable.

- **Etat actuel des eaux de surface**

La qualité physico-chimique actuelle des eaux de surfaces a été analysée à partir de dix-huit (18) points d'échantillonnage identifiés sur le réseau hydrographique drainant la zone aurifère. La campagne d'échantillonnage a couvert la période du 28 Septembre 2011 au 24 Janvier 2012 (figure 9).

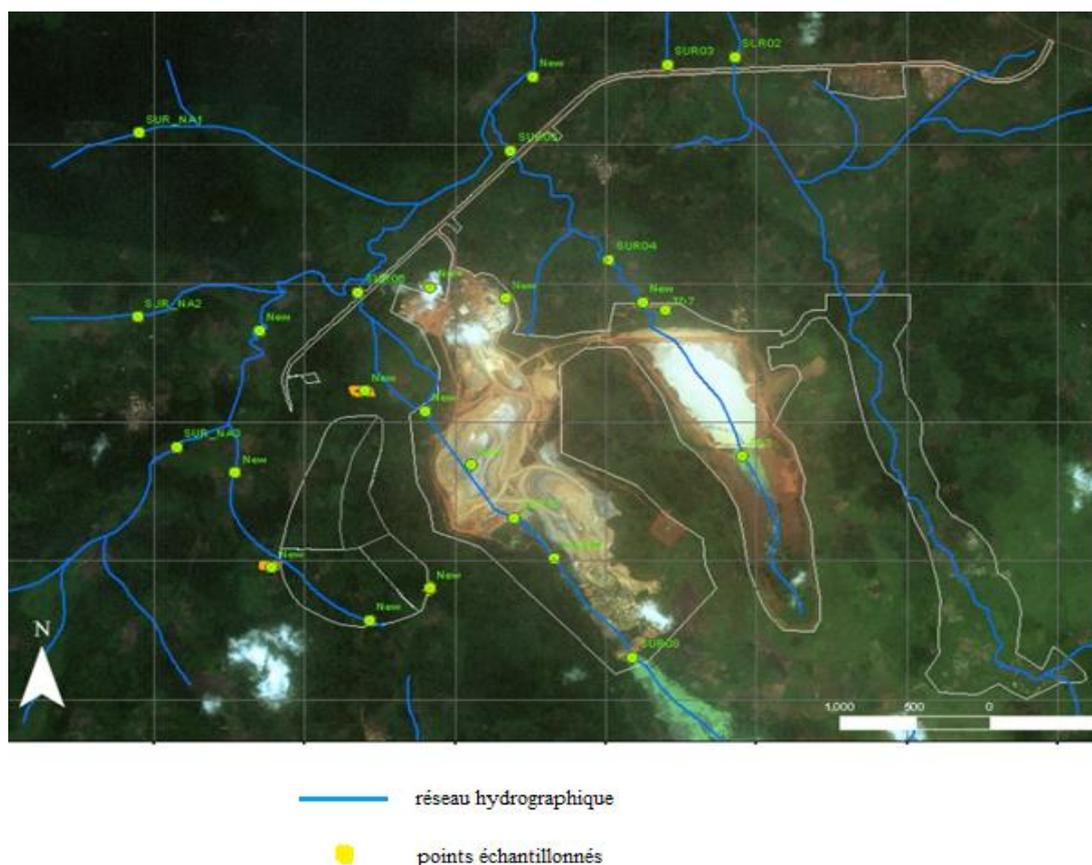


Figure 9: Points échantillonnés sur les eaux superficielles de la mine de Bonikro

Les eaux de surface présentent une minéralisation moyenne avec un pH proche de la neutralité (7,38 en moyenne) (figure 10). Ceci pourrait être dû à la présence de minéraux alcalins qui permettent de tamponner les eaux (Schindler et al., 1986). En effet, à Bonikro, l'oxydation et la lixiviation des stériles exposés à l'air et aux eaux météoriques ne génèrent pas d'acide. De plus, le minerai primaire à Bonikro contient peu de pyrite et de chalcopryrite (Kouassi, 2006), ce qui indique une exportation limitée des éléments traces métalliques en solution à partir des résidus de traitement.

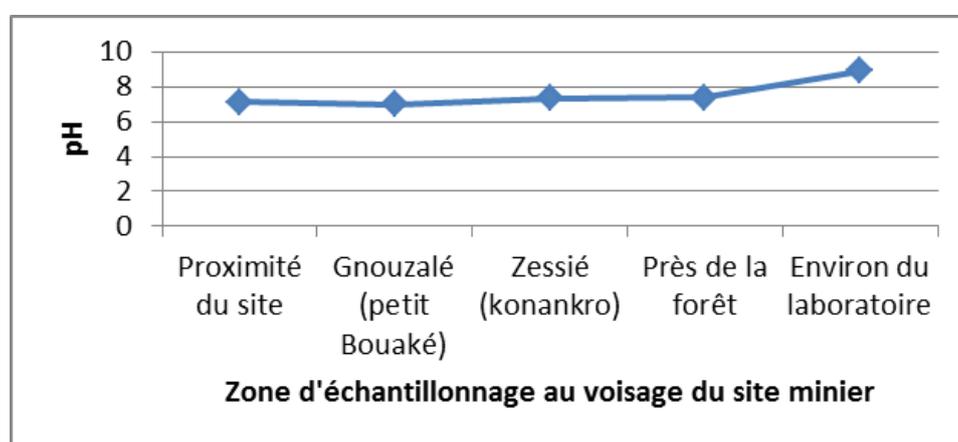


Figure 10: pH dans les eaux au voisinage du centre minier

Les concentrations en éléments traces (Zn, Mn, Cu, Cr, Pb, Al, Cd) dans les eaux de surface de la zone du projet sont en générale faibles (tableau 3) à part le fer (entre 0,03 et 7,07 mg/l). Des études ont montré que la teneur en fer est généralement élevée en Afrique de l'Ouest à cause du lessivage des terrains latéritiques (Kouassi 2006) (Figure 11).

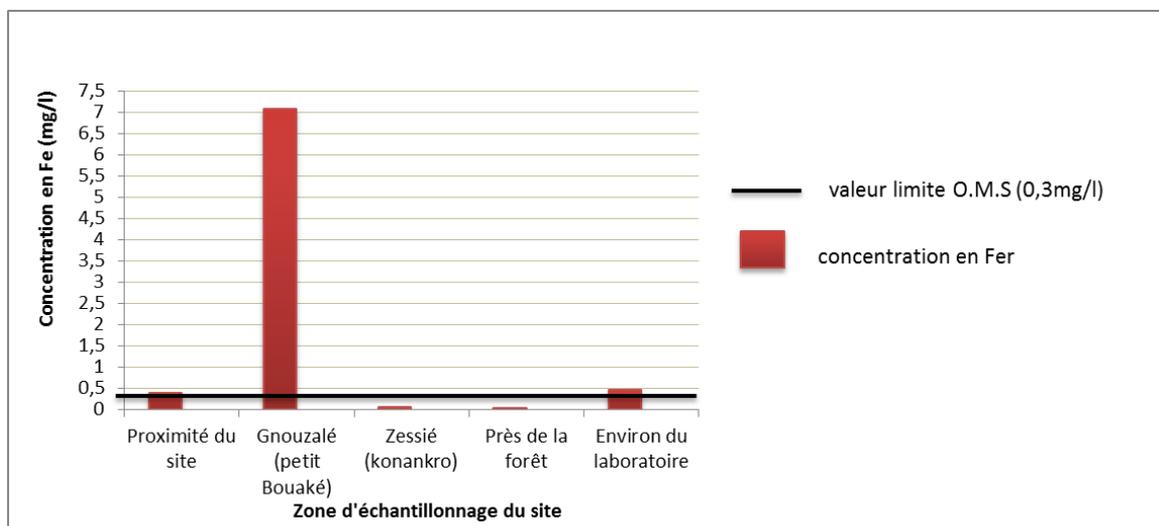


Figure 11: Teneurs en Fer dans les eaux de surface au voisinage du site minier

Ces eaux superficielles ont une turbidité et un oxygène dissous qui sont en teneurs très élevées avec des valeurs respectivement qui oscillent entre 0,93 et 64,6 NTU et entre 3,99 mg/l et 9,01 mg/l. Ces fortes teneurs montrent que ces eaux sont troubles.

Pour l'Arsenic, les concentrations enregistrées dans les eaux superficielles drainant le site aurifère de Bonikro (20 µg/l pour toutes les eaux échantillonnées) (tableau 3) dépassent d'une part la valeur limite dans les eaux douces, estimée à 0,45 µg/l (Casiot, 1999), et d'autre part la teneur maximale autorisée dans l'eau potable (10 µg/l) (O.M.S, 1990). Ces concentrations pourraient être liées à l'impact de la mine et des résidus miniers sur les eaux de surface au voisinage du centre minier. Selon Eary (1999), dans les lacs miniers à pH alcalin, l'adsorption d'un oxyanion tel que As est minime et la solubilité est élevée ; inversement, pour les cations métalliques tels que Pb et Cd, la solubilité est faible et l'adsorption est élevée. Les teneurs peuvent s'avérer importantes en As dissous et surtout particulière des eaux de surface au niveau du centre minier en période de pluie, celles-ci peuvent résulter du lessivage des résidus miniers constitués de sables fins et de poussières, et dont le lieu de stockage est non réaménagé. En étiage, un apport éolien peut résulter des résidus miniers. La granulométrie fine et l'homogénéité de la taille des particules de résidus des digues les rendent plus mobiles, que ce soit sous l'effet des vents violents dans cette région découverte,

que sous l'effet des eaux de ruissellement, surtout lors des crues annuelles (El hachimi et al., 2005).

Tableau 3: Concentration des ETM et As dans les eaux surface du site minier

	Zn	Mn	Cu	Cr	Pb	Cd	As
valeurs d'O.M.S	<3mg/l	<0,5mg/l	<2mg/l	<0,05mg/l	<0,01 mg/l	<0,003 mg/l	<0.01mg/l
Proximité du site	0,2112	0,395	0,06	<0,002	<0,01	<0,001	0,02
Gnouzalé (petit Bouaké)	0,1892	0,1473	0,0392	<0,002	<0,01	<0,001	0,02
Zéssié (Konankro)	<0,01	0,038	<0,04	<0,002	<0,01	<0,001	0,02
Près de la Forêt	0,06	0,041	0,09	<0,002	<0,01	<0,001	0,02
Environ du laboratoire	0,08	0,114	0,09	<0,002	<0,01	<0,001	0,02

Les résultats des analyses indiquent également que les teneurs en cyanures libres et totaux oscillent respectivement entre 0,002 et 1,209 mg/l et entre 0,003 et 1,143 mg/l (figure 12). Les fortes teneurs de cyanures libres et totaux ont été détectées respectivement aux environs du laboratoire du site minier et du village Petit Bouaké (Gnouzalé). Cette augmentation des teneurs au voisinage de la mine peut être attribuée aux effets des résidus de traitement très riches en CN.

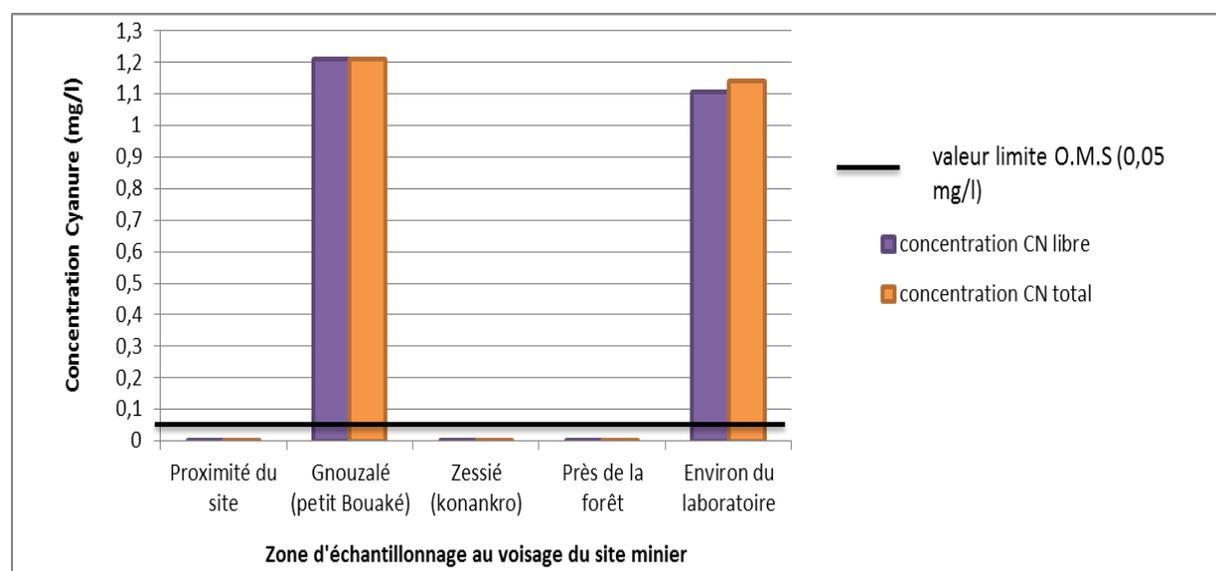


Figure 12: Teneurs en Cyanure libre et total dans les eaux de surface du site minier de Bonikro

Par ailleurs, l'analyse des eaux prélevées présentent des indices d'Aluminium et de Silice avec des valeurs oscillant respectivement entre <0,008 mg/l et 0,361 mg/l et entre 21 mg/l et 29,5 mg/l, celles-ci dépassent les valeurs limites proposées par l'OMS (0,2mg/l pour

Al et 20 mg/l pour SiO₂). La forte teneur en Al est détectée au environ de Petit Bouaké (figure 13a). Ces fortes teneurs s'expliqueraient par la dissolution des minéraux contenus initialement dans les rejets miniers et les phénomènes liés au drainage minier acide (Hakkou et al., 2006).

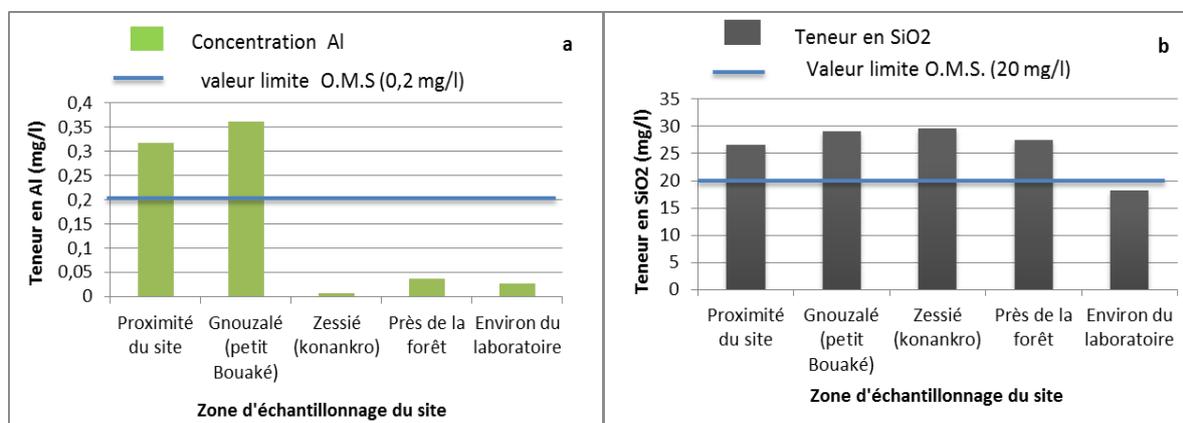


Figure 13: Teneurs en Al (a) et SiO₂ (b) dans les eaux de surface du site minier de Bonikro

Dans la ville de Hiré, les concentrations en cyanure, Arsenic et les ETM (Al et SiO₂) qui étaient en trace à l'état initial du projet (tableau 11, annexe 2) sont supérieures à l'état actuel aux concentrations usuelles pour les eaux naturelles non contaminées, et présentent des teneurs plus fortes avec une différence significative comparée aux valeurs proposées par l'O.M.S. Les eaux de surface au voisinage du centre minier de Bonikro s'avèrent donc nettement polluées.

3.2. Bilan Écologique de la mine

3.2.1. Besoins en eau de la mine

3.2.1.1. Usine de traitement

Après le traitement de 2 Mtpa de minerai dans l'usine, la quantité d'eau de procédé contenue dans les résidus de minerai (eau/solide) est de l'ordre de 1,636 Mtpa soit un volume de 1636363 m³. Ce volume d'eau représente 45% de la quantité totale de résidus de minerai acheminée vers le parc à résidu. Il est à noter que 60% soit 981 817,8 m³ de cette quantité d'eau provenant des résidus de procédé retourne dans le circuit de l'usine pour être recyclée. Pour pouvoir traiter deux millions de tonne de minerai par an, l'usine a besoin annuellement de **654 545,2 m³** d'eau brute (environ 40% des eaux du procédé). Cela représente la quantité d'eau brute qui représente la partie d'eau de procédé à extraire de l'environnement par le biais de la carrière, des barrages et des forages.

3.2.1.2. Routes

Trois types de camion-citerne sont utilisés pour effectuer l'arrosage des voies et pistes du site minier. Les besoins en eau pour l'élimination de la poussière sont actuellement estimés à environ **114 036 m³** (tableau 4), en tenant compte du nombre de jours sec (258), de la capacité de stockage des camions citernes et du nombre de voyage quotidien réalisé par véhicules.

Tableau 4: Besoin en eau pour l'arrosage des pistes du site minier

Camion-citerne	Capacité (m ³)	Nombre de voyage par jour	Nombre de jour sec	Besoin annuel (m ³)
Banlaw Water	4,4	5	258	5 676
Newcrest Water	30	10	258	77 400
Serge Quoniou	15	8	258	30 960
Besoin annuel				114 036

3.2.1.3. Autres installations

La demande en eau pour les besoins domestiques a été estimée à 32 m³/jour. Elle a été déterminée sur la base d'un besoin en eau à usage domestique de 40 litres par jour et par personne pour le personnel sur le site aurifère. En effet, le site accueille environ 800 personnes par jour. Annuellement, la consommation en eau potable avoisine **11 680 m³**.

Il est difficile d'évaluer actuellement les besoins en eau de certaines installations du site minier telles que la cantine, le laboratoire d'analyses et le centre médical à cause du manque de données.

En somme, les besoins en eau du site minier sont évalués à **780 261,2 m³**

3.2.2. Disponibilité des ressources en eau

3.2.2.1. Eaux de surface

• Eaux des rivières (Gnouzalé et Bandamakro)

Les eaux brutes proviennent des eaux d'exhaure de la carrière, des eaux disponibles dans les barrages et des eaux issues des rivières Gnouzalé et Bandamakro (non exploitée). Selon les études hydrologiques réalisées par Kouadio (2011) dans la zone d'étude, le coefficient de ruissellement est 10% selon le relief et le type de végétation. Un bilan hydrologique global des sous-bassins du Gnouzalé et de Bandamakro a été réalisé en s'appuyant sur la pluviométrie moyenne de 2009 à 2011 de la station météorologique du site minier et sur le coefficient de ruissellement.

Pour chaque sous bassin, les surfaces utiles (surfaces non dégradées par les installations minières) ont été déterminées. Les volumes d'eau disponibles ont été estimés à **4 299 975 m³** en faisant le produit des surfaces utiles par le coefficient de ruissellement (10%) et la pluie annuelle (1305 mm) mesurée sur le site de la mine (tableau 12, annexe 3)

• Volumes d'eau mobilisables au niveau des barrages

L'ensemble des barrages est alimenté par les eaux de ruissellement provenant de la pluie. Avant d'atteindre la cuvette du barrage, une grande partie de ces eaux s'infiltre dans le sol. Cette quantité peut être évaluée à l'aide du coefficient de ruissellement. L'autre partie de l'eau qui est stockée dans la cuvette subit au cours du temps des phénomènes d'évaporation, d'infiltration et de sédimentation qui réduisent le volume d'eau disponible.

Les pertes par évaporation du site minier sont de l'ordre de 710 mm par an soit 54% de la pluie. L'évaluation du volume perdu par évaporation dans les retenues d'eau se fait en considérant une surface théorique située à 2/3 de la hauteur normale de la retenue (BEM, 2009). Il faut appliquer un coefficient correcteur pour passer à l'évaporation sur le plan d'eau :

- Il varie de 0,5 à 0,68 en conditions sahélienne et tropicale sèche,
- Il varie de 0,70 à 0,80 en régime tropical.

Pour cette étude, la valeur moyenne de 0,75 a été utilisée dans le calcul du volume d'eau évaporé sur les plans d'eau des barrages.

Ainsi le volume d'eau évaporé est évalué à **28 098 m³** (tableau 13, annexe 4).

Les pertes par infiltration sont fonction de l'étanchéité de la cuvette (nature du fond de la cuvette). Pour le site minier de Bonikro, l'on ne dispose pas d'informations sur l'étanchéité des différentes cuvettes. En tout état de cause, ces pertes existent, mais difficilement quantifiable par manque de données sur les matériaux constitutifs des cuvettes. Il est noté que l'étanchéité des cuvettes a tendance à s'améliorer au fur et à mesure que les colloïdes en suspens dans les eaux de la retenue se déposent.

Les pertes par dépôt solide sont évaluées à environ **243 m³** à l'aide de la méthode EIER-CIEH (tableau 14, annexe 5).

Le volume d'eau disponible dans les barrages a été évalué en tenant compte des pertes par évaporation et des dépôts solides et du volume d'eau stockage. Le volume d'eau disponible est d'environ **818 112 m³** (tableau 5).

Tableau 5: Volume d'eau disponible dans les barrages

Barrage	Volume d'eau stockage (m ³)	Pertes (évaporation, dépôts solides) (m ³)	Volumes d'eau disponibles (m ³)
Digue supérieure	450 000	14292	435 708

(Amont)			
Digue Centrale	15 216	5861	9 355
Digue avale (Aval)	380 994	7945	373 049
Volume d'eau disponible dans les barrages			818 112

• Volumes d'eau mobilisables dans la Carrière

Le volume d'eau disponible annuellement dans la carrière peut être évalué en tenant compte de l'emprise de la carrière (341 261 m²), de la pluie (445 346 m³), des arrivées d'eau des nappes souterraines (821 000 m³), de l'infiltration et de l'évaporation. Ainsi, les pertes par évaporation du site minier sont globalement de l'ordre de 710 mm par an soit 54% de la pluie. Au niveau de la carrière, les pertes en eau sont environ **424 859 m³**.

Globalement, la carrière peut stocker environ 1 266 346 m³ par an. Les pertes au niveau de cette quantité d'eau sont estimées à environ 424 859 m³ et elles sont essentiellement dues aux phénomènes d'infiltration (400 811 m³) et d'évaporation (24 048 m³ environ 54% de l'eau écoulée). La quantité d'eau restante est environ **841 487 m³** (Tableau 6) qui constitue le volume d'eau disponible. Ce volume d'eau est acheminé à l'aide de pompes électriques vers un bassin de transition des eaux pour être utilisé comme eau brute dans l'usine de traitement et est utilisé comme eau d'arrosage par les camions citernes ou réinjecté dans le lit de la rivière Gnouzalé.

Tableau 6: Volume d'eau disponible dans la carrière

Apport/Pertes	Apports d'eau		Pertes d'eau	
	Pluie	Nappes souterraines	Infiltration	Evaporation
Valeurs annuelles (m ³)	445 346	821 000	400 811	24 048
Total (m ³)	1 266 346		424 859	
volume d'eau disponible (m³)	841 487			

• Volumes d'eau recyclables dans le parc à résidu

Les apports d'eau dans le parc à résidus proviennent de la pluie, des eaux du procédé et des eaux du bassin de récupération des suintements en aval de la digue. Ainsi, les apports d'eau sont estimés à environ **4,399 Mm³** par an (tableau 15, annexe 6). Par ailleurs, les pertes d'eau sont issues du phénomène d'infiltration et d'évaporation. Les quantités d'eau perdues par infiltration sont difficilement quantifiables à cause du manque de données sur le matériau constitutif de la cuvette du parc à résidus et du bassin de récupération des eaux de suintement de la digue. Quant aux pertes par évaporation, elles ont été évaluées en tenant compte des superficies du parc à résidus, du bassin de récupération des suintements, du coefficient de

correction et de l'évaporation globale de la zone (issue des données de la météorologie nationale de Côte d'Ivoire). La quantité d'eau évaporée dans ces deux entités est estimée à environ **0, 599 Mm³** par an (tableau 16, annexe 7).

Le volume d'eau recyclable provenant du parc à résidus est évalué à environ **3,79 Mm³** par an. Actuellement, seulement 43% de cette quantité d'eau (soit environ **1,6 Mm³**) sont réutilisées dans l'usine de minerai.

Tableau 7: Volume d'eau brute recyclable sur le site minier de Bonikro

Paramètres	Volumes annuels (m ³)
Apports	4 399 077
Pertes	599 221
total	3 799 856

3.2.2.2. Eaux souterraines

En absence de données sur les essais de pompage, il est difficile de réaliser une bonne évaluation des ressources en eau souterraines de la zone aurifère. Néanmoins, les relevés des quantités d'eau pompés dans les forages en 2010 peuvent apporter quelques éléments de réponse sur la part des eaux souterraines au bilan écologique global de la mine.

La disponibilité en eau souterraine a été évaluée sur la base des études antérieures dans la zone aurifère et des relevés de pompage des forages de production. La zone aurifère est fortement fracturée (figure 5) ce qui augure de l'existence d'importantes quantité d'eau souterraine à travers des divers aquifères de fissures. De manière quantitative, la quantité d'eau souterraine mobilisable annuellement dans les quatre forages de production avoisine **0,77 Mm³** (tableau 8). Ceci n'étant qu'une estimation en absence de données liées aux essais de pompage des forages.

Tableau 8: Volumes d'eau prélevés dans les forages

Forage	Débit d'essai (m ³ /h)	Volume annuel pompé (m ³)
BPB 01	48	39 977
BPB 02	72	389 821
BPB 03 (eau potable)	22,5	2 412
BPB 04	72	339 487
Volume total		771 697

La zone aurifère de Bonikro dispose d'une importante quantité en eau brute composée : des eaux de ruissellements des sous-bassins du Gnouzalé et de Bandamakro, des eaux des trois barrages sur les rivières Gnénessi et Lélébiaba, des eaux d'exhaure de la carrière et des

eaux de forages. La quantité d'eau brute disponible au niveau de ces sources d'approvisionnement après avoir déduits les pertes dues à l'évaporation et à la sédimentation est évaluée à environ **6 731 271 m³**. (Tableau 9)

Tableau 9: Volume d'eau brute disponible sur le site minier de Bonikro

Sources d'eaux brutes	Volumes annuels (m ³)
Rivières (Gnouzalé et Bandamakro)	4 299 975
Carrière	841 487
Barrages	818 112
Forages	771 697
Total	6 731 271

3.2.3. Bilan écologique de la mine

Le bilan écologique de la mine à travers le rapport (Disponibilité en eau/Besoins en eau) a été évalué. Ce bilan indique que les besoins actuels en eau pour le traitement des 2 Mtpa sont satisfaits avec un excédent de 5179312,8 m³ dû à une très bonne disponibilité des ressources en eau brute et recyclable du site minier d'eau (tableau 9).

Tableau 10: Bilan écologique de la mine

	Disponibilité des ressources en eau	Besoin en eau de la mine
Volume d'eau (m ³)	6 731 271	780 261,2
Excédent (m ³)		5 951 009,8

CONCLUSION

&

RECOMMANDATIONS

IV. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette étude qui s'est déroulée en milieu rural a permis de faire l'état actuel des ressources en eau dans la zone aurifère de Bonikro située dans la région du Lôh-Djiboua appartenant à la sous-préfecture de Hiré qui relève de la préfecture de Divo (Côte d'Ivoire). En effet, la quantité et la qualité des eaux de surface et souterraines ont été évaluées. De cette caractérisation, il apparaît d'une part que la quantité d'eau mobilisée pour l'exploitation de la mine est admissible vue la disponibilité des ressources en eau avec un excédent de **5 951 009,8m³** dans la zone d'étude. Et d'autre part, l'analyse des paramètres physiques, chimiques et microbiologiques des eaux des forages PB02 et PB04 a montré que la zone minière connaît une pollution en Cyanure total avec des valeurs respectives de 0,865 mg/l et 0,829 mg/l. De plus, certaines eaux superficielles qui drainent la zone minière connaissent également une pollution en cyanure libre et total avec des valeurs maximum respectives de 1,209 mg/l et 1,143 mg/l. Le centre minier a un effet non seulement sur l'esthétique de l'environnement de la région, mais aussi sur les eaux de surface et les sédiments au voisinage de ce dernier, contaminés par les éléments traces métalliques toxiques. Des teneurs élevées des éléments traces Al, As et SiO₂ ont été enregistrées dans les eaux de surface ([Al] = 361,2 µg/l, [As] = 20 µg/l et [SiO₂] = 29,5 mg/l). Les résidus miniers dénudés du site minier constituent une source de polluants. Par ailleurs, la présence de cyanure en concentration élevée a été détectée dans certaines eaux superficielles.

Vu l'importance des impacts environnementaux négatifs et de l'incertitude associée à leur atténuation, il serait intéressant de penser à la gestion adéquate et efficiente des ressources en eau. Ainsi, les recommandations suivantes pourraient être formulées :

- ☞ Utiliser les indicateurs biologiques pour évaluer de façon efficiente l'impact des activités minières sur les eaux et sa diversité biologique.
- ☞ Faire des échantillonnages pendant la saison pluvieuse pour connaître les teneurs des éléments toxiques dans les eaux de surface et souterraines avant la mise en place des mesures d'atténuation.
- ☞ Réaliser des études supplémentaires afin de développer des mesures d'atténuation efficace face aux impacts sur le système aquatique et que des mesures de conservation soient mises en œuvre afin d'atténuer l'impact sur la faune aquatique. Ces mesures

doivent être une combinaison de mesure sur le site et hors du site, entreprises en associations avec d'autres sociétés minières et avec le gouvernement.

- ☞ Mise en oeuvre des dispositifs alternatifs permettant d'obtenir le plus haut degré de certitude que les impacts sur l'environnement aquatique pourront être évités en cas d'effondrement de la halde à stériles. La décision finale quant à la disposition adoptée devrait se fonder sur des études techniques supplémentaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdelhak B., Moulay L., Mohamed H., Mohamed F., Laïla EL F. et Saïd N. (2005), Bulletin de l'Institut Scientifique : Impact d'un site minier abandonné sur l'environnement : cas de la mine de Zeïda (Haute Moulouya, Maroc), 27, Juillet, 8.

Andrée G., David B., Jacques S., et Charles B., (2003), Direction du suivi de l'état de l'environnement : l'impact d'anciens parcs à résidus miniers sur la qualité de l'eau et les communautés benthiques de la rivière massawippi et des ruisseaux eustis et capel, 23.

Atse M'bo A. (2007), Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEFP) : Étude d'impact environnemental du projet aurifère de Bonikro en Côte d'Ivoire, décembre, 12.

Baillargeon S. (2005), Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire de fin d'études, 137.

Baghdâd B., Naimi M., Bouabdli A., Sonnet P., Garcia A., Bounakhla M., et Inigo A. Carlos, (2005), Conférence Inter Régionale ENVIRO WATER : Evaluation de la contamination et évolution de la qualité des eaux au voisinage d'une mine abandonnée d'extraction de plomb, 12, 15.

BEM, (2009). Etude d'Avant-Projet Détaillé du barrage de Baskoudré (Burkina Faso). Rapport Final, 30.

Benzaazoua M., Hakkou R. et Bussière B., (2006), Evaluation de la qualité des eaux de ruissellement dans la mine abandonnée de Kettara (Maroc), 5.

“Bonikro Mine, (2010), Tailing Storage Facility, Pre-feasibility Report”, Knight Piésold Pty Ltd, Ref. PE301-00299/01, January, 6.

BRGM : Bureau de Recherches Géologique et Minière, (2005) ; la gestion de l'eau des mines, 2, Septembre, 6.

Butaré I. et Keita S., (2008), Aspects environnementaux liés au développement du secteur minier en Afrique de l'Ouest, 13.

Dieng B., (1999), Cours d'Hydrogéologie ; Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural de Ouagadougou, 156.

FEPS (Fondation de l'eau potable Sûre), (2008), Exploitation minière et la pollution de l'eau, <http://www.safewater.org>,

Hichem M. (2006), Projet aurifère de Bonikro : Etude d'Impact sur Environnement, Juillet, 263.

Kouadio A., (2011), Dynamique de l'occupation du sol et comportement hydrologique : cas des bassins versants côtiers de l'Agneby et du Boubo (Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 199.

L'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'ouest, (1979), Méthodes d'études et de recherches ; Comité Interafricain d'études hydrauliques (C.I.E.H.), Tome 2 ; 317.

World Bank, (1987), Vetiver Grass Guidelines for the use of.

World Health Organization, (1990), Guidelines for Drinking Water Quality, October.

ANNEXES :

Annexe 1 :

Tableau 11: Résultats de l'analyse des échantillons prélevés dans les eaux souterraines avant l'exploitation de la mine en Mai 2004.

Paramètres analysés		BGP-GW1	BGP-GW2	BGP-GW3	BGP-GW4	BGP-GW5	Normes O.M.S.					
coordonnées GGPS	Nord	6°14.636'	6°12.423'	6°13.474'	6°14.073'	6°13.772'						
	Ouest	5°22.068'	5°22.921'	5°22.289'	5°21.599'	5°23.744'						
paramètres physiques												
Température		28.4	28	28	28.3	31	-					
pH		6.7	7.2	6.9	7.3	6.8	6.5 _ 8.5					
Couleur apparente		<5	<5	<5	<5	<5	-					
Vraie couleur		<5	<5	<5	<5	<5	15					
Turbidité		8.6	0.5	0.2	0.3	0.7	5					
Matière dissoutes		319	164	174	210	289	1000					
matière en suspensions		3.3	0.3	<0.1	0.4	1.1	-					
Conductivité		469	268	231	318	434	-					
Paramètre chimique et nutriments												
Dureté Totale		186.9	108.2	101.2	139.7	184.4	500					
Alcalinité		210	142	116	169	237	-					
Calcium (Ca++)		60	29	22.4	36	44	-					
Magnésium (Mg++)		9	8.7	11	12.1	18.1	-					
Sodium (Na)		31	10.0	9.8	9.4	28	200					
Potassium (K)		0.9	0.4	1.9	3.3	0.6	-					
Chlorure (Cl)		25	8.8	2.9	2.9	6.4	250					
Nitrates (NO3)		1.30	0.01	1.16	<0.01	<0.01	50					
Nitrites (NO3)		0.14	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	3					
Phosphates (PO4)		<0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	-					
Sulfates (SO4)		<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	250					
Cyanures totaux		-	-	<0.01	-	-	-					
Cyanures libres		-	-	-	-	-	0.07					
Cyanures WAD		-	-	<0.01	-	-	-					
BOD5		-	-	-	-	-	-					
COD		-	-	-	-	-	-					
Métaux lourds												
Fe (Total - dissout)		1.29	1.25	0.01	-	0.01	-	0.05	-	0.3		
Mn (Total - dissout)		0.43	0.42	0.03	-	<0.01	-	<0.01	-	0.08	-	0.5
Cu (Total - dissout)		<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	1
Zn (Total - dissout)		0.01	<0.01	<0.01	-	0.06	-	0.01	-	0.02	-	3
Pb (Total - dissout)		<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	0.01
Hg (Total - dissout)		<0.001	<0.001	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	<0.001	-	0.001

Cr (Total - dissout)	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	0.05
Ni (Total - dissout)	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	0.02
As (Total - dissout)	0.055	0.018	0.011	-	0.016	-	0.007	-	0.029	-	0.01
Cd (Total - dissout)	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	0.003
Al (Total - dissout)	0.1	<0.1	0.1	-	0.1	-	0.2	-	<0.1	-	0.2
Mo (Total - dissout)	<0.1	<0.1	<0.1	-	<0.1	-	<0.1	-	<0.1	-	-
Sb (Total - dissout)	<0.1	<0.1	<0.1	-	<0.1	-	<0.1	-	<0.1	-	0.005
Co (Total - dissout)	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	<0.01	-	-
Se (Total - dissout)	<0.00 1	<0.00 1	<0.001	-	<0.00 1	-	<0.001	-	<0.001	-	0.01
Paramètres microbiologiques											
Coliformes totaux à 35°C/24hrs (MPN/100ml)	2		<2	23		80		<2		0(<2)	
Coliformes fécaux à 44°C/48hrs (MPN/100ml)	<2		<2	13		80		<2		0(<2)	
les concentrations sont en mg/l à l'exception du pH, de la couleur (Platine/Cobalt) & de la conductivité (µS/cm) Normes de potabilité de l'OMS WAD: Acide Faiblement Dissociable											

Annexe 2 :

Tableau 12: Résultats de l'analyse des échantillons prélevés dans les eaux de surface avant l'exploitation de la mine en Mai 2004.

Paramètres analysés		BGP-SW1 Gnénessi	BGP-SW2	BGP-SW3	BGP-SW4 Gnouzalé	BGP-SW5	BGP-SW6	Normes B.M.
coordonnées GGPS	Nord	6°13.463'	6°14.397'	6°14.211'	6°15.052'	6°15.049'	6°30.442'	
	Ouest	5°22.518'	5°22.053'	5°23.030'	5°22.334'	5°21.695'	5°18.460'	
paramètres physiques								
Température		26.4	-	27.4	28.8	29	30.4	
pH		6.5	-	7	6.9	6.9	7.8	6_9
Couleur apparente		250	-	200	150	150	<5	-
Vraie couleur		150	-	30	10	30	<5	-
Turbidité		29	-	26	28	1.8	2.3	-
Matière dissoutes		361.0	-	417	432.5	267	57	-
matière en suspensions		14.6	-	41.5	42.1	10.1	6.3	50
Conductivité		518	-	573	630	372	80	-
Paramètre chimique et nutriments								
Dureté Totale		161.8	-	168.3	186.6	117.2	24.5	-
Alcalinité		129	-	171	191	134	35	-
Calcium (Ca++)		44	-	43	48	27	5.7	-
Magnésium (Mg++)		12.6	-	14.8	16.2	12.1	2.5	-
Sodium (Na)		40	-	44	45	41	5.2	-

Potassium (K)	7.4	-	24	14	7.5	3.3	-				
Chlorure (Cl)	60.9	-	64.8	74.6	26.5	4.4	-				
Nitrates (NO3)	0.03	-	0.04	0.03	0.02	0.01	-				
Nitrites (NO3)	0.02	-	0.03	0.02	0.01	0.01	-				
Phosphates (PO4)	0.02	-	0.04	0.02	0.01	0.02	-				
Sulfates (SO4)	8.6	-	5.5	5	4.3	<0.1	-				
Cyanures totaux	-	-	-	0.01	-	-	1				
Cyanures libres	-	-	-	<0.01	-	-	0.1				
Cyanures WAD	-	-	-	<0.01	-	-	0.5				
BOD5	5.2	-	8.6	17.4	4	2.2	50				
COD	44.4	-	83.3	88.9	44.4	5.6	250				
Métaux lourds											
Fe (Total - dissout)	13.0	12.3	-	9.8	10.9	8.67	2.57	-	1.52	-	3.5
Mn (Total - dissout)	0.64	0.63	-	2.99	9.75	9.71	0.85	-	<0.01	-	-
Cu (Total - dissout)	0.01	0.01	-	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	0.5
Zn (Total - dissout)	0.04	0.02	-	<0.01	0.16	0.03	<0.01	-	<0.01	-	2.0
Pb (Total - dissout)	<0.01	<0.01	-	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	0.1
Hg (Total - dissout)	0.004	0.002	-	0.001	0.004	<0.001	<0.001	-	<0.001	-	0.01
Cr (Total - dissout)	<0.01	<0.01	-	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	0.1 (Cr+6)
Ni (Total - dissout)	<0.01	<0.01	-	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	0.5
As (Total - dissout)	0.008	0.007	-	0.030	0.046	0.035	0.003	-	<0.001	-	0.1
Cd (Total - dissout)	<0.01	<0.01	-	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	0.1
Al (Total - dissout)	0.1	<0.1	-	0.1	0.1	<0.1	0.1	-	0.1	-	
Mo (Total - dissout)	<0.1	<0.1	-	0.2	0.2	<0.1	<0.1	-	<0.1	-	
Sb (Total - dissout)	<0.1	<0.1	-	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-	<0.1	-	
Co (Total - dissout)	<0.01	<0.01	-	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	-	<0.01	-	
Se (Total - dissout)	0.017	<0.001	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	<0.001	-	0.1
Paramètres microbiologiques											
Coliformes totaux à 35°C/24hrs (MPN/100ml)	>=1600	-	500	>=1600	500	30	-				
Coliformes faecaux à 44°C/48hrs (MPN/100ml)	2	-	300	500	80	30	<400				
les concentrations sont en mg/l à l'exception du pH, de la couleur (Platine/Cobalt) & de la conductivité (µS/cm) Normes de rejets de la Banque Mondiale (B.M.) pour le secteur minier (Octobre 2003) WAD: Acide Faiblement Dissociable											

Annexe 3**Tableau 13: Volumes d'eau disponibles sur les sous-bassins Gnouzalé et Bandamakro**

Paramètres	Sous-bassin versant Gnouzalé	Sous-bassin versant Bandamakro
Superficie utile (km ²)	17,58	15,37
Pluviométrie annuelle (mm)	1305	1305
Coefficient d'écoulement	0,1	0,1
Ruissellement moyen annuelle (mm)	130,5	130,5
Volume d'eau écoulé (m ³)	2 294 190	2 005 785
Apport annuel global (m³)	4 299 975	

Annexe 4**Tableau 14: Pertes par évaporation au niveau des plans d'eau**

Barrage	Côte située à 2/3 de la crête (m)	Surface du plan d'eau à la côte 2/3 de la crête (m ²)	Coefficient correcteur (-)	Evaporation globale (m)	Evaporation sur le plan d'eau (m ³)
Digue 3 (amont)	206	26700	0,75	0,71	14218
Digue 2 (centrale)	205	10810	0,75	0,71	5756
Digue 1 (aval)	208	14800	0,75	0,71	7881
Total					28 098

Annexe 5**Tableau 15: Estimation des dépôts solides au niveau des retenues d'eau du site minier de Bonikro**

Barrage	Superficie du sous-bassin (km ²)	Pluie annuelle (mm)	Dégradation spécifique (m ³ /km ² /an)	Volume annuelle des dépôts solides (m ³ /an)
Digue (amont)	1,17	1305	86	74
Digue centrale	0,79	1305	83	105
Digue (aval)	1,38	1305	88	64
Total				243

Annexe 6

Tableau 16: Apports au niveau du parc à résidus

Apports	Volumes annuelle (m³)
Eaux de pluie	1 207 513
Eaux de procédé	1 636 364
Eaux du bassin de récupération des suintements	1 555 200
Total (m³)	4 399 077

Annexe 7**Tableau 17: Evaporation dans le parc à résidus et le bassin de récupération des suintements**

Equipement	Surface (m ²)	Coefficient correcteur	Evaporation globale (m)	Evaporation sur le plan d'eau (m ³)
Parc à résidus (TSF)	925 297	0,75	0,71	492721
Bassin de récupération des suintements	200000	0,75	0,71	106500
Total				599221

Annexe 8**Fiche de questionnaire pour les entretiens**

- Données pluviométriques de 2009 à 2011
- Le réseau hydrographique de la zone d'étude
- Résultats des analyses des eaux de surfaces et souterraines échantillonnées
- Les photos de la mine
- Nombre de personne qui travaille sur le site minier par jour
- Sources d'approvisionnement en eau de la mine et leurs caractéristiques (rivières, carrière, parc à résidu, barrages et forages)
- Les produits chimiques utilisés dans la mine
- Les équipements de la mine
- les différentes activités de la mine
- capacité des citernes, nombre de voyage et nombre de jours de travail (jour sec)