

Monitoring des concentrations des ions majeurs et des éléments traces métalliques dans les eaux souterraines d'un site minier aurifère (province du Bam, Burkina Faso).

Sidkeita Aissa NACANABO^{1,2}; Youssouf KOUSSOUBE¹; Nadjibou ABDOULAYE²; Mohamed-Tahar AMMAMI²; Tariq OUAHBI²

¹Laboratoire Géosciences et Environnement, Université Joseph KI-ZERBO de Ouagadougou, Burkina Faso

²Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, Université du Havre Normandie, France

RESUME

Le Burkina Faso vit un boum minier depuis les années 2000 avec l'ouverture de plus d'une centaine de sites miniers. Le développement de l'exploitation minière s'accompagne d'une production de déchets qui sont parfois rejetés dans l'environnement sans prétraitement. Au regard des risques liés à ces rejets et du contexte humain du pays marqué par une population fortement dépendante des eaux stockées et captées, il apparaît nécessaire de suivre l'évolution de leurs caractéristiques physicochimiques.

L'objectif de cet article est de montrer l'évolution des caractéristiques physicochimiques des eaux dans la province du Bam avec le développement de l'activité minière dans un contexte semi-aride, en zone de socle Précambrien. Pour cela, des eaux de surface et souterraines ont été prélevées dans une zone minière, à proximité d'un parc à résidus, analysées puis comparées sur 3 années. Les résultats obtenus ont été organisés dans différents diagrammes. Ils ont ensuite été comparés avec des méthodes de statistiques descriptives. La répartition spatiale de ses eaux couplée à la piézométrie a permis de faire ressortir les foyers potentiels de contamination dans la zone d'étude.

Mots-clés : eau, mine, hydrochimie, parc à résidus.

Modalités de présentation : présentation orale

I. INTRODUCTION

Depuis les années 2000, le Burkina Faso est marqué par le développement de l'activité minière avec l'ouverture de plus d'une centaine de sites artisanaux, semi industriels et industriels (Ministère des mines et de l'énergie du Burkina Faso, 2015). L'or y est très présent aux côtés d'autres minerais tels que le zinc, le manganèse et l'argent. Dans certaines localités, cette « ruée vers l'or » a entraîné, un flux de populations majoritairement jeunes et une redéfinition des activités économiques des

populations (Maradan et al., 2011). Les exploitations minières de types artisanal et industriel ont à la fois des impacts positifs sur les revenus des populations mais également des impacts négatifs sur l'environnement et potentiellement sur la santé des populations (Ayeh, 2022; Bamba et al., 2013). Ces activités s'accompagnent d'une production de déchets qui sont parfois rejetés dans l'environnement sans prétraitement. La forte mortalité des poissons et du bétail enregistrée ces dernières années, sur différents cours d'eau du pays, est très souvent associée à ces rejets (Bazié, 2022; Coulibaly, 2013; Drechsel et al., 2018; Mason et al., 2019).

L'objectif de cet article est d'examiner les conséquences environnementales de l'ouverture de la mine sur la ressource en eau, en distinguant différentes catégories de prélèvements : eaux de surface, eaux souterraines de subsurface issues des puits, eaux souterraines profondes issues des forages, les eaux du réseau piézométrique à différentes profondeurs. La localisation spatiale des sites de prélèvement a été croisée à une carte d'occupation des sols en 2023 établit en utilisant les images satellitaires Sentinel 2 de Novembre 2023 (Copernicus, 2025) et à une carte piézométrique afin d'identifier les foyers de contamination.

II. CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE ETUDIEE

Notre zone d'étude est située dans la région du centre nord, à cheval entre deux provinces : le Bam et le Sanmatenga et couvre les communes rurales de Sabcé, Mané et Guibaré. Le climat est de type subsaharien, situé dans une zone transitoire entre le climat soudanien et le climat sahélien. Il est caractérisé par deux (02) saisons : (i) une saison sèche de 9 mois avec de fortes températures (plus de 40°C); (ii) une saison pluvieuse de 3 mois où l'on retrouve l'ensemble des pluies annuelles (600 – 500 mm) avec un pic au mois d'août. Les fortes températures enregistrées, avec une faible couverture végétative conduit à des évaporations moyennes annuelles de plus de 2000 mm. Ce climat aride est associé à une végétation de type savane arborée et arbustive avec des forêts galeries le long des cours d'eau.

Elle est située dans le bassin supérieur du Nakanbé, sous-bassin de la Volta. Le Nakanbé draine l'un des plus importants bassins hydrologiques du Burkina Faso (40 836 km²). Long de 516 km sur le territoire burkinabé, il prend sa source en zone sahélienne dans le Yatenga à 335 mètres d'altitude. Il passe à la station de Yilou au km 1 413 et à la station de Mané au km 1 379. Il reçoit sur sa rive gauche notamment des petits affluents au débit intermittent, qui sont les petits cours d'eau de la région de Tikaré, puis les exutoires des lacs de Bam, de Sian, de Dem. Entre Yilou et Mané, la pente du Nakanbé est de 0,103 m/km. 15 km en aval de Mané, le Nakanbé prend la direction du sud-sud-est autour de laquelle il va décrire des méandres sur près de 404 km.

La carte (Figure 1) montre les grands ensembles géologiques du permis miniers. Les terrains birimiens se sont déposés et mis en place, entre 2,2 et 2,1 Ga. Le Birimien est sous-divisé stratigraphiquement en deux parties (Milési et al., 1992) :

- Le Birimien inférieur (B1) à dominante sédimentaire (à partir de la base) :
 - Roches volcaniques basiques et plutons tholéitiques ;
 - Dépôts de flyschoides avec intercalations de séries sédimentaires ;
 - Formations de carbonates ;
- Le Birimien supérieur (B2) à dominante volcanique. Des formations fluvio-deltaïques peuvent être intercalées dans ces séries.

Située au nord du plateau Mossi, elle se présente comme une vaste pénéplaine faiblement ondulée. L'analyse du réseau hydrographique montre qu'il est dendritique. La géomorphologie locale indique un relief avec un modelé dendriforme (la mine est sur une crête d'altitude moyenne 350 m – 330 m) localisé entre deux thalwegs (300m), l'un à l'est, le Kolounga et l'autre un bras du Nakanbé à l'ouest. Les cours d'eau y sont temporaires (dépendant des précipitations) et une dizaine de plans d'eau d'extension plus ou moins importants suivant la saison y ont été répertoriés. Ils permettent l'irrigation, l'abreuvement des animaux, certains usages domestiques et aussi de source d'alimentation de la mine après un traitement classique pour l'extraction de l'or.

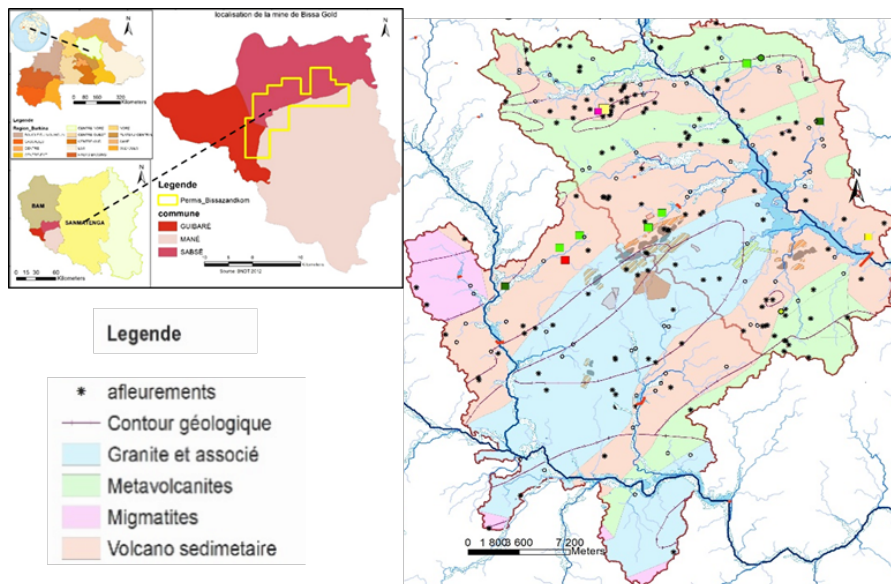


Figure 1: Localisation de la zone d'étude et du contexte géologique local

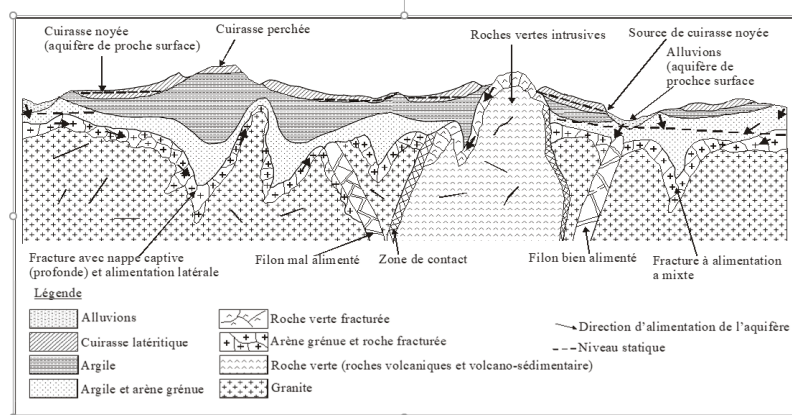


Figure 2 : Coupe géologique et hydrogéologique (Savado, 1984) de la zone d'étude

Les eaux souterraines captées grâce à des forages et des puits sont la principale source d'alimentation en eau des populations. Trois (03) types d'aquifères (Bissa, NordGold, 2019; Savado, 1984) liés aux grands ensembles hydrogéologiques y ont été identifiés. Les deux nappes en subsurface (La nappe phréatique des alluvions dans l'axe des lits des rivières et celle de la base de la cuirasse latéritique, la nappe des altérites arènes plus ou moins argileuses) sont aménagées avec des puisards et des puits à grands diamètres peu profonds (plus d'une centaine de puits ont été recensée par la direction générale des ressources en eau (DGRE) du Burkina Faso). Elles sont

très sensibles aux variations climatiques (pluviométrie et évaporation). La nappe profonde localisée dans la frange fissurée de la roche est captée par les forages équipés nécessairement de pompes hydrauliques.

Dans la zone d'étude, l'extraction artisanale de l'or s'est développée depuis une trentaine d'année, elle représente une source de revenu qui occupe en saison sèche, une bonne partie de la jeunesse et des paysans. Depuis une quinzaine d'année, une mine industrielle s'est implantée avec des conséquences socio-économiques et environnementales importantes. Il s'agit d'une mine à ciel ouvert, où le matériau excavé est traité pour extraire l'or. Le process d'extraction utilisé est la méthode CIL (Carbon in leach) et la lixiviation en tas. L'or étant associé à des sulfures, cela exige un prétraitement (autoclavage, torréfaction et grillage des minerais, fusions et affinages) qui induit des réactions d'oxydation qui sont exothermiques (Blazy and Jdid, 1998).

La carte d'occupation des sols a été construite après le calcul des indices spectraux (NDVI, NDWI, SAVI, NDBI) et la digitalisation d'infrastructures spécifiques (parcs à résidus, zone de lixiviation en tas) de la mine. Elle montre une forte concentration des infrastructures minières industrielles (fosses, haldes à stériles, parcs à résidus, zone de lixiviation en tas) qui côtoient des zones de cultures et des villages (Sabcé, Guibaré, Yimiougou) et des habitats dispersés.

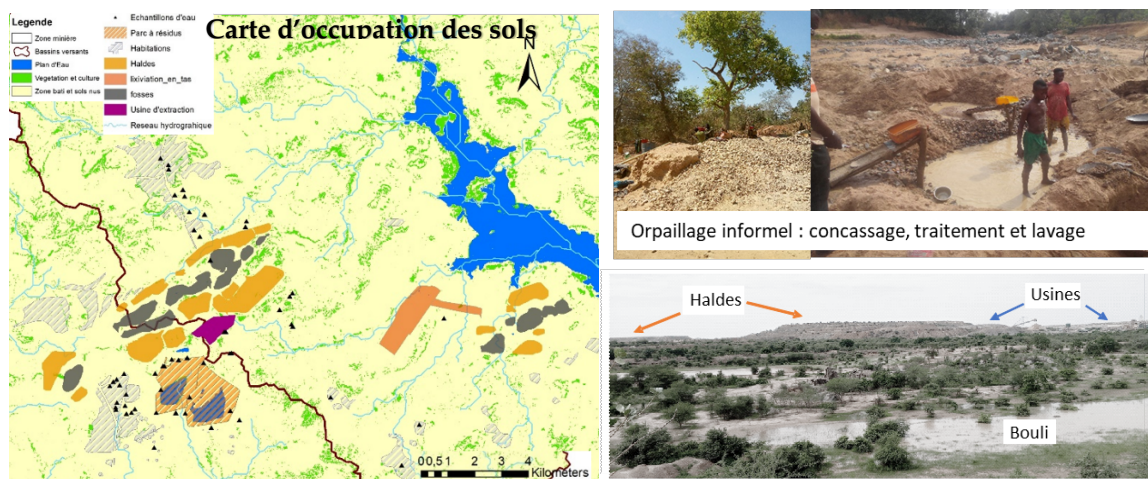


Figure 3 : La mine et ses nombreuses installations et points de prélèvements d'eau- Vue du contexte local mines et orpailages informels

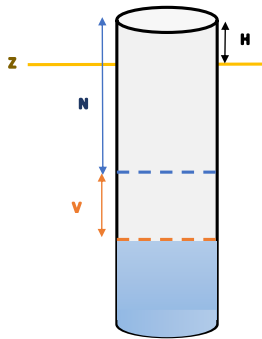
III. METHODOLOGIE

L'analyse du site est faite en examinant la ressource en eau avec d'une part sa disponibilité en fonction des saisons et d'autre part la qualité des eaux.

A. Modélisation isopièzes

La modélisation a également été utilisée pour faire ressortir la direction préférentielle des écoulements des eaux souterraines en hautes eaux et en basses eaux en fonction des périodes sèches et humides. Les données de 80 puits (niveaux d'eau), issues de la base INOH (Inventaire National des Ouvrages Hydrauliques) de la DGRE, ont été extraites du Model Numérique de Terrain du

Model Numérique d'élévation Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 2013 (US Geological Survey, 2025) . Les cotes piézométriques (CHE et CBE) ont été calculées :



$$CHE = \text{Cote Hautes Eaux (m)} ; CHE = Z - (N - H) \quad (1)$$

$$CBE = \text{Cote Basses Eaux (m)} ; CBE = Z - (N - H) - V \quad (2)$$

Z = cote MNT (m) (résolution 30 m) ;

N = Niveau hautes eaux ;

V = Variation maximales des profondeurs des nappes d'eau souterraines ;

H = hauteur de la margelle.

Figure 2: Paramètres piézométriques

Les données piézométriques ont ensuite été interpolées par la méthode du plus proche voisin. Les isopièzes obtenues permettent de déduire le sens des écoulements des eaux souterraines peu profondes et d'identifier les zones potentiellement à risque en termes de pollution.

B. Analyses physico chimiques et bactériologiques

Les résultats des analyses de 150 échantillons d'eaux prélevés dans des barrages (03), des boullis (03), des puits (04), des piézomètres (08), du système de distribution d'eau de la mine (15) et des forages (117) entre 2021 et 2023, ont été exploités. La température, le pH et la conductivité ont d'abord été mesurés in situ. Puis, tous les prélèvements conservés dans des glacières à une température en dessous de 5°C sont transmis au laboratoire pour les nombreuses mesures suivantes : la turbidité, la dureté, la concentration en Bicarbonates, Chlorures, Sulfates, Nitrites, Nitrates, Orthophosphates et Phosphore. En compléments, des métaux lourds, metalloïdes et autres éléments chimiques en lien avec les procédés de traitement de l'or ont également été recherchés. Il s'agit du Cyanure, de l'Arsenic, du Plomb, de l'Aluminium, du Cadmium, du Mercure, du Chrome, du Cobalt, du Zinc, du Manganèse et du Cuivre. L'ICP (Inductively Coupled Plasma ou spectrométrie à plasma à couplage inductif) et la CI (chromatographie ionique), sont les principales méthodes ont été utilisées. Des analyses bactériologiques ont également été réalisées sur certains échantillons de puits, de forage et des eaux traitées.

Les résultats obtenus ont été comparés par rapport aux seuils de potabilité définis par les directives de l'OMS 2017, puis suivis sur plusieurs années pour des points d'eau spécifiques. Un regroupement par type d'eaux (eaux de surface, souterraine de subsurface (puits), profondes (forages) et piézomètres (qui intéressent toutes les nappes) et les eaux traitées pour alimentation de la mine) a permis de relier les paramètres physico-chimiques à travers la matrice de covariance bivariable afin de ressortir les liens entre les différentes variables et éventuellement identifier l'origine de certains paramètres.

La matrice de covariance s'exprime par:

$$C = \begin{pmatrix} V(X_1) & Cov(X_1, X_2) & \dots & Cov(X_1, X_n) \\ Cov(X_2, X_1) & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \dots & & V(X_n) \end{pmatrix} \quad (3)$$

avec X_1, X_2, \dots, X_n avec n : 20 paramètres d'analyses physico chimiques

Finalement, les diagrammes de Piper établis permettent de ressortir les différents faciès physicochimiques et les comparer aux années antérieures. Ainsi les effets des activités minières sur la qualité des eaux sont identifiés.

IV. RESULTATS

A. Occupation des sols et piézométrie

Comme l'indiquent les cartes piézométriques de la figure 3 couplées au réseau hydrographique, le sens d'écoulement des eaux souterraines de subsurface en hautes eaux et en basses eaux avec un écart de 5 à 2 m est similaire à celui des cours d'eau intermittents. On rappelle que la zone d'activités minières est sur une crête et que par conséquent les points d'eau de surface (le barrage de Tiben et un bouli) ainsi que les puits et forages dans les villages situés dans les dépressions sont des zones à risque. Les origines potentielles de pollution des eaux sont dans les zones d'habitations : les eaux usées et les latrines, dans les zones de cultures : l'usage des engrais, pesticides, herbicides et les défécations animales, dans les zones d'exploitation : les rejets d'eaux issus du traitement des procédés d'extraction plus ou moins contrôlés.

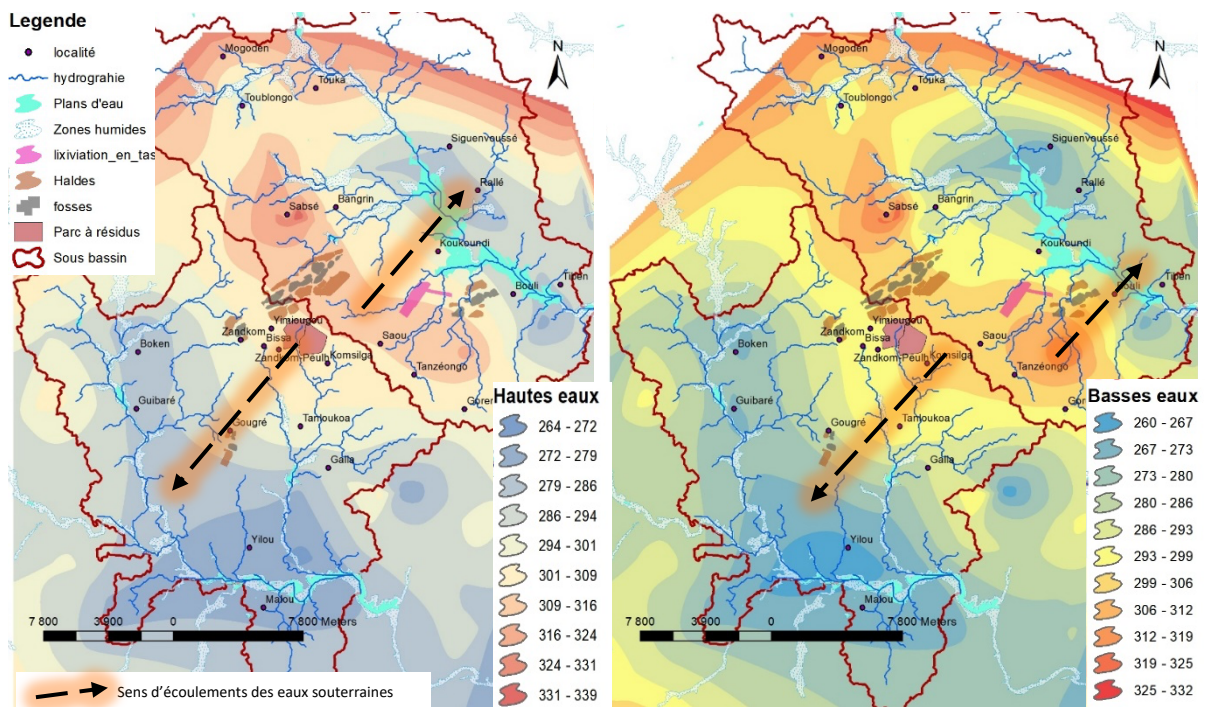


Figure 3: Cartes piézométriques (isopiezés) des eaux souterraines (de subsurface) en hautes eaux et en basses eaux- pente moyenne de 8,5 m/km.

B. Caractéristiques physicochimiques

a. Paramètres in situ (température, pH, conductivité électrique)

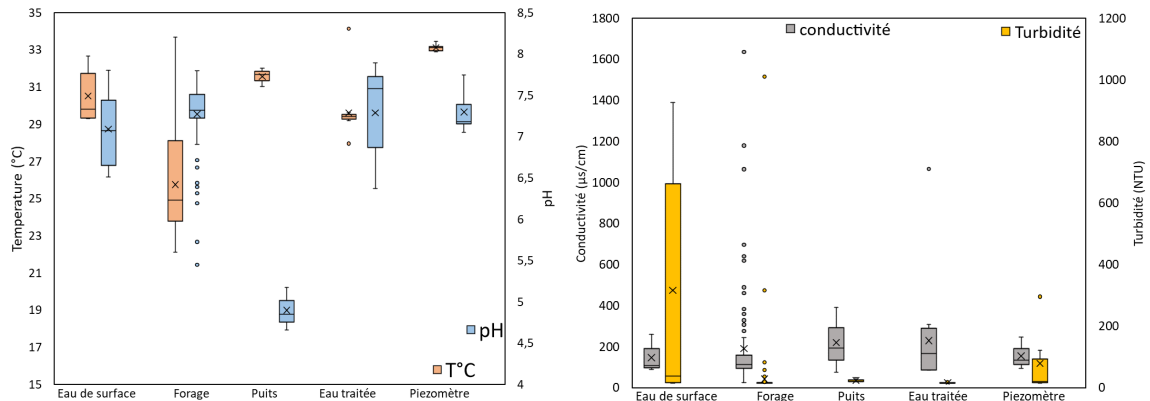


Figure 4: Caractéristiques physiques (T-rouge, pH-bleu, Conductivité-gris, Turbidité-jaune) des eaux 2021-2023

Les températures mesurées pour les eaux de surface, celles des puits peu profonds, les eaux traitées pour l'alimentation de la mine et celles prélevées dans les piézomètres implantés près de la zone de lixiviation et du parc à résidus et dans les différentes nappes sont voisines, autour de 30°C. Elles sont assez proches de la température ambiante. La température des eaux souterraines du forage est un peu plus faible (25°C). Les eaux issues du procédé de traitement minéralurgique sont mélangées et stockées dans le parc à résidus et n'ont pas été mesurées par nos soins.

Le pH est voisin de 7 sauf pour les puits d'alimentation pour les habitants. Il est à noter une forte disparité de la conductivité dans les eaux de forages, les seuls points de prélèvement profonds. Les puits ont quant à eux des pH acides les rendant impropres à la consommation selon les normes OMS ($6,5 \leq \text{pH} \leq 8,5$). Les fortes valeurs de turbidité retrouvées au niveau des piézomètres (parfois décalées par rapport à la saison des pluies) et de certains puits et forages sont surprenantes, pouvant indiquer que les eaux de surfaces influent celles en profondeur. C'est un indicateur potentiel du transfert. De plus, en 2010, les eaux des forages étaient claires avec une faible turbidité (JILBEY Burkina sarl, 2010). La matrice de corrélation bivariante des eaux de forages montre une forte corrélation entre la dureté, la turbidité et la conductivité (0,91 et 0,73). La hausse de ces paramètres est souvent l'indicateur de contamination.

b. Métaux lourds, métalloïdes et cyanures

Les résultats des concentrations en métaux lourds, métalloïdes et cyanures présentent des anomalies (selon les normes de l'OMS) au niveau de certain(e)s :

- Eaux de surface : pour l'arsenic (0,01 mg/l) et l'aluminium (0,2 mg/l). Nous notons également des traces de cadmium, de plomb, de mercure, de zinc et de cuivre ;
- Puits : pour l'aluminium. Les autres métaux lourds s'y retrouvent sous formes de traces à des concentrations dans les normes ;
- Piézomètres pour : l'aluminium, le cyanure (0,07mg/l) et l'arsenic. Il y a été également identifié des traces de mercure et de cadmium ;
- Forages pour : l'aluminium, le cyanure, l'arsenic et le cadmium (0,003 mg/l). Il y a été également identifié des traces de plomb (0,01mg/l), de manganèse et de mercure (0,006 mg/l-inorganique) ;

Les forages réalisés pendant la phase de prospection de la mine ont montré une minéralisation aurifère étroitement associée à des sulfures notamment des pyrites enrichies en arsenic. Le contexte géochimique local est marqué par une anomalie naturelle en metalloïdes et en éléments traces métalliques. A l'installation de la mine, les analyses des eaux souterraines ont mis en évidence des concentrations en Arsenic et en antimoine supérieures aux valeurs guidant de l'OMS-1993-1998a (As-0,01mg/L, Sb-0,005mg/L). Les autres métaux étaient sous la limite de détection de la méthode. La matrice de corrélation bivariante (voir Tableau 1 ci-dessous) des eaux de forages prélevés entre 2021-2023 fait ressortir :

- Une corrélation positive forte entre le cyanure, le manganèse et le zinc ; moyenne avec le plomb, le cadmium, le nickel et l'argent. Au regard de l'origine du cyanure qui est issu de la méthode d'extraction industrielle (cyanuration en cuves, lixiviation en tas), cela pourrait indiquer l'origine de ces métaux lourds dans les eaux souterraines ;
- Une corrélation négative entre l'arsenic et le cadmium, le nickel, le manganèse, l'argent, le zinc, le cyanure. Cela indique l'origine naturelle de l'arsenic (Bretzler et al., 2017) ;
- Une forte corrélation entre l'aluminium et le mercure pourrait indiquer un lien entre leurs origines. Cependant l'aluminium est l'un des éléments métalliques les plus abondants sur la croûte terrestre. Il se retrouve dans de nombreux milieux (naturel, alimentaire, industriel, pharmaceutique) même si une plus grande toxicité est associée aux variantes dissoutes ($AlCl_3$, AlF_3 , $Al(SO_4)_3$) avec des effets critiques sur le neurodéveloppement et l'immunotoxicité pour des concentrations de 0,45 à 0,70mg/l de l'eau de boisson (Gourier-Fréry and Fréry, 2004). Il est difficile d'associer la présence d'aluminium à une activité spécifique.

Tableau 1: Extrait de la Matrice de corrélation bivariante des eaux de forages

| | As | Pb | Cd | Ni | Mn | Hg | Ag | Zn | Al | CN |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| As | 1,00 | 0,05 | -0,39 | -0,43 | -0,51 | 0,56 | -0,04 | -0,30 | 0,28 | -0,23 |
| Pb | 0,05 | 1,00 | 0,16 | 0,67 | 0,30 | 0,07 | -0,17 | 0,52 | -0,25 | 0,37 |
| Cd | -0,39 | 0,16 | 1,00 | 0,56 | 0,59 | 0,38 | 0,53 | 0,58 | 0,24 | 0,56 |
| Ni | -0,43 | 0,67 | 0,56 | 1,00 | 0,53 | -0,25 | -0,25 | 0,68 | -0,11 | 0,50 |
| Mn | -0,51 | 0,30 | 0,59 | 0,53 | 1,00 | 0,09 | 0,33 | 0,86 | -0,15 | 0,87 |
| Hg | 0,56 | 0,07 | 0,38 | -0,25 | 0,09 | 1,00 | 0,42 | 0,08 | 0,81 | 0,20 |
| Ag | -0,04 | -0,17 | 0,53 | -0,25 | 0,33 | 0,42 | 1,00 | 0,25 | 0,09 | 0,39 |
| Zn | -0,30 | 0,52 | 0,58 | 0,68 | 0,86 | 0,08 | 0,25 | 1,00 | 0,04 | 0,97 |
| Al | 0,28 | -0,25 | 0,24 | -0,11 | -0,15 | 0,81 | 0,09 | 0,04 | 1,00 | 0,09 |
| CN | -0,23 | 0,37 | 0,56 | 0,50 | 0,87 | 0,20 | 0,39 | 0,97 | 0,09 | 1,00 |

C. Evolution des caractéristiques physico chimiques des eaux

a. Evolution des faciès hydro chimiques

A l'image des eaux en zone de socle, les faciès hydro chimiques des échantillons d'eaux de surface et souterraines de la zone d'étude étaient initialement de type bicarbonaté calcique et magnésienne (JILBEY Burkina sarl, 2010; Mahamane and Guel, 2015; Ouandaogo-Yameogo et al., 2013).

En 2014, nous constatons que les eaux (traitées, de forage et des piézomètres) (voir

Figure 5) sont majoritairement bicarbonatées calciques et magnésiennes avec des cas isolés à tendance sodiques et potassiques et un cas chloruré, sulfaté, calcique et magnésien. Les eaux spécifiques sont issues de rejets dans le parc à résidus. Elles ont une caractère bicarbonaté sodique et potassique.

Pour la période 2021-2023, le constat est similaire pour la majorité des échantillons, les eaux sont bicarbonatées calciques et magnésiennes. Nous notons cependant deux tendances en termes de changements pour :

- 1- certaines eaux de forages et de puits qui sont chlorurées, sulfatées, calciques et magnésiennes ;
- 2- les eaux des piézomètres qui sont bicarbonatées sodiques et potassiques.

Les changements de faciès sont souvent liés à des apports externes qui changent les équilibres internes préexistants. (Awad, 2011; Freeze and Cherry, 1979; Gartet et al., 2001)

Une première analyse tend à considérer que les composantes des rejets spécifiques ont migré vers les différents aquifères de la zone d'étude.

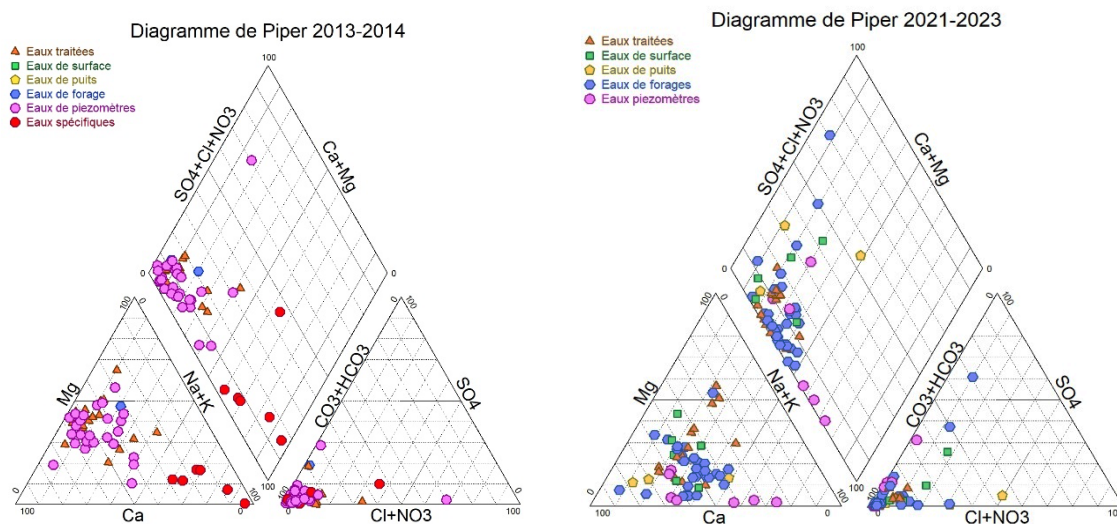


Figure 5: diagrammes de Piper à deux périodes

a. Caractéristiques des eaux de surface et des eaux de puits

En 2010, des métaux lourds ainsi que plusieurs ETM avaient été identifiés dans les eaux de surface mais seuls l'arsenic et l'antimoine étaient à des taux supérieurs à la norme OMS 2017 (As : 10µg/l et Sb : 20µg/l). Ces dernières années, les concentrations en mercure, montre une contamination liée à l'exploitation minière de type artisanal. En effet, parmi les différentes origines potentielles de contaminant, le mercure est principalement utilisé dans le procédé d'extraction artisanale de l'or (Donkor et al., 2006; Esdaile and Chalker, 2018; Mason et al., 2019). Nous notons la présence d'arsenic et de mercure dans les eaux de surface même si une tendance à la baisse est enregistrée de 2021 à 2023.

Les eaux des puits au regard de leurs caractéristiques ne sont pas conformes aux normes OMS pour l'eau potable. Les eaux des puits, très dépendantes des variations climatiques voient la proportion

de germes totaux et fécaux augmentés en saison humide et une baisse de la concentration en métaux lourds. D’une année à une autre, les pH ont tendances à baisser (de 6,6 à 4,5).

b. Caractéristiques des eaux des forages

Entre 2021 et 2023, une tendance à la baisse du pH a été notée comme pour les eaux des puits. Cette baisse s’accompagne d’une augmentation de la conductivité. La concentration en nitrates (50 mg/l) baisse même si les valeurs sont toujours au-dessus des normes de l’OMS. Il en est de même pour certains métaux lourds tels que le plomb. Les concentrations élevées de nitrates peuvent être dues à plusieurs facteurs naturels ou anthropiques (rejets domestiques, agriculture, rejets des sites d’exploitations minières) (Groen et al., 1988; Martin, 2003).

L’évolution mensuelle des caractéristiques des eaux (Figure 8) montre des pics des concentrations ioniques maximales (Arsenic, Cadmium, Nickel, Cobalt, Mercure et Plomb) des eaux de forage à partir du mois de mai. Cette période correspond au début de la saison humide suggérant un transfert des eaux rejetées vers les nappes souterraines. Le pic de concentration maximale du plomb en Aout renforce cette idée. En effet son poids atomique élevé et son rayon atomique plus gros par rapport aux autres éléments traces, requière un temps plus long pour migrer.

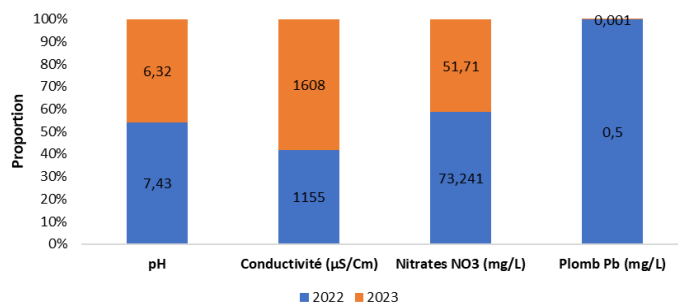


Figure 7 : Evolution des paramètres d’un forage NO₃

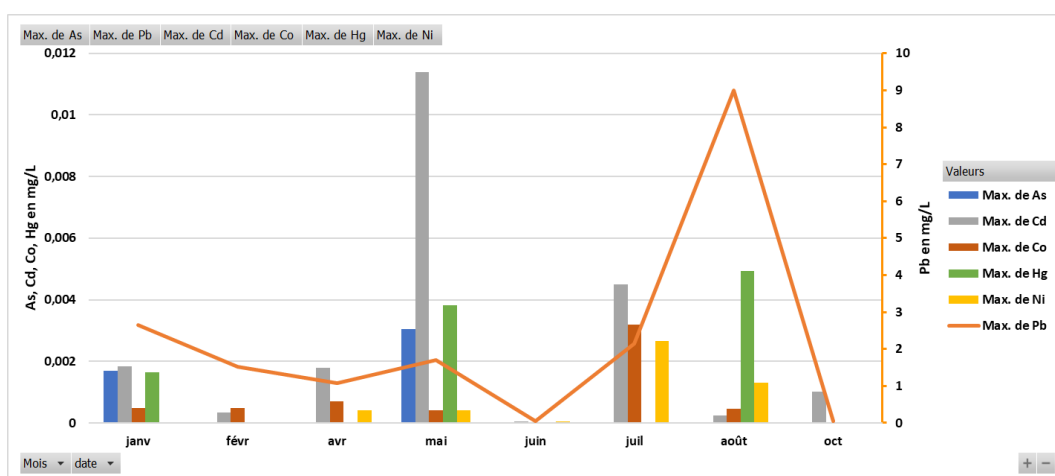


Figure 8: Evolution mensuelle des maximales des concentrations en métaux lourds

c. Eaux traitées

Les paramètres à la sortie de la station de traitement sur plusieurs années présentent une baisse des concentrations en métaux lourds mais présentent par contre une augmentation de la turbidité, de

la dureté totale et de la présence en germes totaux et fécaux (Figure). Ces caractéristiques montrent que même s'il y a une amélioration du processus pour le traitement des métaux lourds, cette eau ne répond pas aux normes de potabilité fixées par l'OMS au bout de la troisième année.

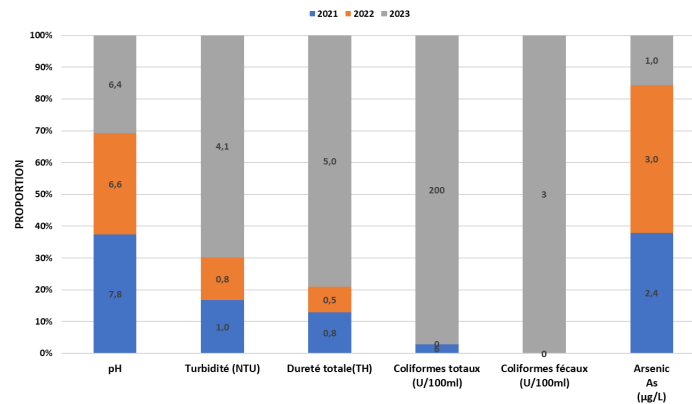


Figure 9 : Evolution des caractéristiques des eaux à la sortie de la station de traitement

CONCLUSION

Cette étude a été conduite dans une zone minière aurifère située à proximité de villages et d'activités agricoles au nord de la capitale Ouagadougou. Elle est exploitée à grande échelle (mine de Bissa) et en orpaillage informel depuis plus d'une vingtaine d'années. Les conditions géologiques rendent critique la disponibilité en eau potable, surtout en cas de contamination et justifie la nécessité d'un suivi des caractéristiques physico-chimiques des eaux de surface et des eaux souterraines afin de prévenir d'une éventuelle exposition (directe et indirecte) des populations à des contaminants. Les résultats des analyses des eaux souterraines de subsurface et profondes ont montré que plusieurs paramètres (pH, turbidité, nitrates, sulfates, fer total, aluminium, arsenic, cadmium, cyanure, coliformes totaux et fécaux) sont non conformes aux normes OMS en termes de potabilité. Les facteurs à l'origine sont entre autres les rejets domestiques et agricoles ainsi que ceux de l'exploitation minière industrielle et artisanale. Deux axes de pollutions se dégagent en fonction des écoulements et sont visibles sur le diagramme de Piper avec des eaux à tendances chlorurées et d'autres à tendance sodiques et potassiques.

L'évolution temporelle des caractéristiques de ces eaux révèle que le développement de l'activité minière contribue à la dégradation progressive de leur qualité. Bien que les concentrations individuelles des contaminants restent globalement faibles, leurs effets cumulés peuvent (lorsque plus de 02 paramètres analysés ne sont pas conformes aux normes), à long terme, avoir des répercussions notables sur l'environnement et la santé des populations. Plusieurs indices, tels que l'indice de pollution souterraine ou l'indice de pollution chimique, ont été développés et appliqués à des sites spécifiques pour permettre la classification des eaux (Subba Rao, 2012; Uddin et al., 2021). L'agrégation, via une formule mathématique, des données relatives aux paramètres physico-chimiques liés à l'activité minière constitueraient un outil spécifique non seulement moins coûteux au regard du nombre réduit de paramètres à analyser mais également d'interprétation plus simple pour évaluer la toxicité potentielle de ces eaux. Un tel indice jouerait également un rôle d'alerte précoce, facilitant la mise en œuvre rapide de mesures correctives sur les infrastructures minières associées.

REFERENCES

- Awad, S., 2011. Hydrochimie et faciès géochimiques des eaux souterraines, Plaine de Bekaa. *Hydrol. Sci. J.* 56, 334–348. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.559331>
- Ayeh, D., 2022. Le droit minier face à l'éthique de l'or. *Rev. Int. Études Dév.* 35–62. <https://doi.org/10.4000/ried.770>
- Bamba, O., Pelede, S., Sako, A., Kagambèga, N., Miningou, M.Y.W., 2013. Impact de l'artisanat minier sur les sols d'un environnement agricole aménagé au Burkina Faso. *J. Sci.* 13, 1–11.
- Bazié, G.B., 2022. Exploitation minière destructrice de l'Environnement : Le cas patent de Kalsaka au Burkina [WWW Document]. Burkina Demain. URL <https://www.burkinademain.com/2022/11/05/exploitation-mini%C3%A8re-destructrice-de-lenvironnement-le-cas-patent-de-kalsaka-au-burkina/> (accessed 1.21.24).
- Bissa, NordGold, 2019. Etude hydrologique et hydrogéologique du site aurifère de Boken-Bissa Gold.
- Blazy, P., Jdid, E.-A., 1998. Métallurgie extractive - Pyrométallurgie. *Élabor. Recycl. Métaux.* <https://doi.org/10.51257/a-v1-m2231>
- Bretzler, A., Lalanne, F., Nikiema, J., Podgorski, J., Pfenninger, N., Berg, M., Schirmer, M., 2017. Groundwater arsenic contamination in Burkina Faso, West Africa: Predicting and verifying regions at risk. *Sci. Total Environ.* 584–585, 958–970. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.147>
- Copernicus, D. sentinelles, 2025. Copernicus Browser [WWW Document]. Copernic. Brows. URL <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> (accessed 1.5.25).
- Coulibaly, G.M.M., 2013. L'évaluation environnementale et sociale et analyse des risques dans le domaine de l'exploitation minière: les conséquences du non-respect des obligations environnementales et sociales. p. 9.
- Donkor, A.K., Nartey, V.K., Bonzongo, J.C., Adotey, D.K., 2006. Artisanal mining of gold with mercury in Ghana. *West Afr. J. Appl. Ecol.* 9. <https://doi.org/10.4314/wajae.v9i1.45666>
- Drechsel, F., Engels, B., Schäfer, M., 2018. Country Report • N° 2 • Décembre 2018 « Les mines nous rendent pauvres » : L'exploitation minière industrielle au Burkina Faso. *Impressum Glocon Ctry. Rep. Ser.*
- Esdaile, L.J., Chalker, J.M., 2018. The Mercury Problem in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *Chem. – Eur. J.* 24, 6905–6916. <https://doi.org/10.1002/chem.201704840>
- Freeze, A., Cherry, J., 1979. Chapitre 7 : Évolution chimique des eaux souterraines naturelles.
- Gartet, A., Gartet, J., Garcia, C.C., 2001. Hydrochimie des eaux, dissolution spécifique et salinité des cours d'eau dans le bassin de l'Oued Lebène (Préif Central, Maroc septentrional). *Papeles Geogr.* 143–161.
- Gourier-Fréry, C., Fréry, N., 2004. Aluminium. *EMC - Toxicol.-Pathol.* 1, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.emctp.2004.04.002>
- Groen, J., Schuchmann, J.B., Geirnaert, W., 1988. The occurrence of high nitrate concentration in groundwater in villages in Northwestern Burkina Faso. *J. Afr. Earth Sci. Middle East* 7, 999–1009. [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(88\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0899-5362(88)90013-9)
- JILBEY Burkina sarl, 2010. Etude d'impact sur l'environnement du projet Bissa-Zandkom, Burkina Faso.
- Mahamane, A.A., Guel, B., 2015. Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 9, 517–533. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i1.44>
- Maradan, D., Ouedraogo, B., Thiombiano, N., Thiombiano, T., Zein, K., 2011. Analyse économique du secteur des mines . *Liens Pauvreté et Environnement.*
- Martin, C., 2003. Mécanismes hydrologiques et hydrochimiques impliqués dans les variations saisonnières des teneurs en nitrate dans les bassins versants agricoles. *Approche expérimentale et modélisation.* HAL Cent. Pour Commun. Sci. Directe.
- Mason, R.P., Baumann, Z., Hansen, G., Yao, K.M., Coulibaly, M., Coulibaly, S., 2019. An assessment of the impact of artisanal and commercial gold mining on mercury and methylmercury levels in the environment and fish in Cote d'Ivoire. *Sci. Total Environ.* 665, 1158–1167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.393>
- Ministère des mines et de l'énergie du Burkina Faso, 2015. *Annuaire statistique 2014.*

- Ouandaogo-Yameogo, S., Blavoux, B., Nikiema, J., Savadogo, A., 2013. Caractérisation du fonctionnement des aquifères de socle dans la région de Ouagadougou à partir d'une étude de la qualité chimique des eaux. *Rev. Sci. L'eau J. Water Sci.* 26, 173–191. <https://doi.org/10.7202/1018784ar>
- Savadogo, A.N., 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de haute volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Grenoble.
- Subba Rao, N., 2012. PIG: a numerical index for dissemination of groundwater contamination zones. *Hydrol. Process.* 26, 3344–3350. <https://doi.org/10.1002/hyp.8456>
- Uddin, Md.G., Nash, S., Olbert, A.I., 2021. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecol. Indic.* 122, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>
- US Geological Survey, 2025. EarthExplorer [WWW Document]. URL <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 2.12.25).