



**ETAT DES LIEUX DE LA CONTAMINATION DES EAUX
SOUTERRAINES PAR L'ARSENIC DANS LE SUD-OUEST DU
BURKINA FASO**

**Mémoire pour l'obtention du Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
Option : Eau et Assainissement**

Présenté et soutenu publiquement le 15/10/2014 par :
Marcelle Philippe Ammah AHISSAN

Travaux dirigés par : Dr Franck LALANNE
Enseignant chercheur 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : KOITA Mamadou

Membres et correcteurs : Sina THIAM

Promotion 2013/2014

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents monsieur et madame AHISSAN qui ont su me donner le courage et l'attention nécessaire pour que je puisse arriver à ce niveau.

Trouver dans ce travail la fierté et la joie pour moi d'être votre fille et vous d'être mes parents. Puisse Dieu vous apporter le bonheur espéré.

Remerciements

Ce stage de fin d'étude a été réalisé au Laboratoire Eau Dépollution Ecosystème et Santé (LEDES) de l'Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement de Ouagadougou. J'adresse mes remerciements au Professeur Hama Yacouba Directeur de la Recherche à la Fondation 2iE et coordinateur général du projet PIMASO par le biais duquel j'ai intégré le prestigieux institut 2iE.

J'adresse également mes remerciements au Dr Yacouba Konaté, Responsable du LEDES pour m'avoir accepté dans son laboratoire et aussi en tant que responsable de la formation Eau et Assainissement, pour son enseignement et sa disponibilité.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à mes encadreurs le Dr Franck Lalanne et la doctorante Anja Bretzler pour leur encadrement et leur disponibilité malgré leur programme chargé.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de tout le corps enseignant de la filière Eau et Assainissement qui de près ou de loin ont contribué à ma formation.

J'adresse mes remerciements à tous mes parents et amis particulièrement à Kouadio Anselme, Yoni Roseline, N'Goné Cissé, Brou Alexis, Kolia Marius et Amani Kouassi qui ont facilité mon intégration et ont rendu mon séjour au Burkina Faso agréable.

J'adresse un sincère remerciement à mon père Ahissan Ehignan, à ma mère Kouadio Agnès et à ma tante N'Go Nora, merci de m'avoir éduqué et scolarisé afin de m'insérer dans la vie socio-économique et surtout merci pour vos prières et votre soutien.

Résumé

Le Burkina Faso est un pays de l'Afrique de l'ouest dans lequel la ressource en eau est une denrée rare. Le manque de pérennisation des eaux de surface oblige les autorités et les populations à se tourner vers les ressources en eaux souterraines. Cependant ces eaux, qui généralement sont de meilleures qualités, contiennent parfois des polluants très toxiques comme l'arsenic à des concentrations alarmantes. Pour éviter de mettre en péril la santé des populations consommant ces eaux ou de fermer des forages en fonctionnement, il a été proposé de cartographier la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du Burkina Faso, l'une des zones où aucune étude n'a été préalablement menée à ce niveau. Parallèlement à la réalisation de la carte représentant les forages contaminés de la zone, les corrélations entre le taux d'arsenic dans les eaux et la géologie des aquifères, entre l'arsenic et les activités minières, et entre l'arsenic et les paramètres physico-chimiques de l'eau ont été étudiées. Ces travaux ont aussi permis d'étudier la fiabilité d'un nouvel appareil de mesure de terrain (Metalyser) en comparaison avec un appareil reconnu de laboratoire (ICP-MS). Suite à ces travaux il s'est avéré que 10% des forages échantillonnés (n=103) ont des concentrations au-dessus de la norme de potabilité. Les forages contaminés sont logés généralement dans des roches volcano-sédimentaires particulièrement dans les schistes et les andésites et sont situés à proximité d'exploitations aurifères. La corrélation entre l'arsenic et les différents paramètres physico-chimiques s'est relevée faible pour la plupart sauf avec l'antimoine. La fiabilité du Metalyser est différente selon le taux d'arsenic présent dans l'échantillon, il a tendance à surestimer les concentrations.

Mots clés : Arsenic, contamination, eaux souterraines, géologies.

Abstract

Burkina Faso is a country of West Africa in which the water resource is rare. The lack of perpetuation of surface water obliges the authorities and the populations to be turned to the groundwater resources. However this water which generally is better qualities contains sometimes very toxic pollutants like arsenic with alarming concentrations. To avoid putting in danger public health consuming this water or closing drillings under operation, it was proposed to chart the contamination of groundwater by arsenic in the south-west of Burkina Faso one of the areas where no study was undertaken beforehand. Parallel to the realization of the chart representing contaminated drilling of the zone, the correlations between the arsenic rate in water and the geology of the aquifers, between arsenic and the mining activities, and between arsenic and the parameters physicochemical. This work also allowed us to study the reliability of a new instrument of ground in comparison with a recognized instrument of laboratory. Following this work it proved that 10% of sampled drillings (n = 103) had concentrations above the standard. Contaminated drillings are generally placed in volcanogenic rocks particularly in the schist and the andesite and are located near gold bearing exploitations. The correlation between arsenic and the various physicochemical parameters was raised weak for the majority safe with the antimony. The reliability of the Metalyser is different according to arsenic rate's present in the samples, it tends to over-estimate the concentrations.

Key words: Arsenic, groundwater, contamination, geologies

Listes des abréviations et acronymes

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

Al: Aluminium

As: arsenic

As (III): Arsénite

As (V) : Arséniate

BUMIGEB : Bureau des Mines et de la Géologies du Burkina.

Ec : Conductivité électrique

EPA : Agence Américaine pour l'Environnement

Fe : Fer

ICP-MS : Couplage plasma induit par haute fréquence – spectrométrie de masse

IGB : Institut Géographique du Burkina

LEDES : Laboratoire Eau Dépollution Ecosystème et Santé

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

pH : Potentiel d'hydrogène

ppb : Partie par bi-million

RGPH : Recensement Général de la population et de l'Habitation

Liste des figures

Figure 1: Présentation de la zone d'étude	4
Figure 2: carte de la contamination des eaux souterraines dans la région de Ouahigouya (Source : Arsenic in groundwater from mineralized protozoic basement rocks of Burkina Faso, 1074 - 1091p, Smedley et al, 2007).	13
Figure 3: Carte de contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans la région du Séno (Source : Mémoire de fin d'étude master 2 de Vincent Jérémy, 2012).	14
Figure 4: une interface de QGIS	17
Figure 5: kit d'essai <i>in situ</i>	17
Figure 6 : Image Metalyser	17
Figure 7: Corrélation entre As (ICP-MS)- As (Metalyser)	24
Figure 8: Corrélation entre les résultats des deux méthodes pour le cas où la concentration d'As mesurés par ICP-MS supérieur à la norme (10 µg/L)	24
Figure 9: Corrélation entre les résultats des deux méthodes pour le cas où la concentration d'As mesurés par ICP-MS inférieures à la norme (10 µg/L)	25
Figure 10: Corrélation entre l'arsenic et le pH	26
Figure 11: Corrélation entre l'arsenic et la température	26
Figure 12: Corrélation entre l'arsenic et O ₂	27
Figure 13: Corrélation entre l'arsenic et la conductivité électrique	28
Figure 14: Corrélation entre arsenic et antimoine	28
Figure 15: Carte des forages contaminés du sud-ouest du Burkina Faso	30
Figure 16: Position des forages contaminés par rapport aux exploitations aurifères	31

Listes des tableaux

Tableau 1: Paramètres physico-chimiques de l'arsenic	8
Tableau 2: Pourcentage des concentrations d'arsenic dans les forages échantillonnés	23
Tableau 3: Corrélations entre arsenic et les paramètres physico-chimiques	25
Tableau 4: Récapitulatif entre taux d'arsenic ≥ 5 ppb et la géologie	29

Table des matières

Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Listes des abréviations et acronymes	vi
Liste des figures.....	vii
Listes des tableaux.....	viii
Introduction	1
I. Synthèse bibliographique	4
I.1 Présentation de la zone d'étude.....	4
I.1.1 Situation Géographique.....	4
I.1.2 Climat.....	4
I.1.3 Géologie	5
I.1.4 Hydrogéologie.....	6
I.2 Généralités sur l'arsenic.....	7
I.2.1 Propriétés physico-chimiques de l'arsenic	7
I.2.2 Différentes formes de l'arsenic	8
I.2.3 Origines de l'arsenic	9
I.2.4 Paramètres influençant la pollution à l'arsenic	10
I.2.5 Toxicité de l'arsenic.....	11
I.2.6 Quelques carte de contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans d'autres régions du Burkina	12
II Matériel et méthode	16
II.1 Matériel.....	16
II.2 Méthode	19
II.2.1 Choix des points d'échantillonnage	19
II.2.2 Les analyses	19
II.2.3 Analyse statistique	20
II.2.4 Réalisation de la carte de contamination	21

Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du Burkina Faso

III Résultats et discussion.....	23
III.1 Résultats	23
III.1.1 Les taux d'arsenic.....	23
III.1.2 Etude de la fiabilité du Metalyser.....	23
III.1.3 Corrélations entre l'arsenic et les paramètres physico-chimiques.....	25
III.1.4 Cartographie de la contamination par l'arsenic.....	28
III.2 Discussion	31
Conclusion.....	35
Recommandations	36
Références bibliographiques	37

Introduction

L'eau est une ressource indispensable à la vie et non substituable. Chaque être humain devrait en disposer en quantité et en qualité suffisante. Néanmoins en ce début de XXI^e siècle plus d'un milliard de la population mondiale n'a pas accès à l'eau potable (Emmanuel et Vermande, (2003) ; Camdessus et al, (2004)).

Les eaux souterraines constituent plus de 22 % de l'ensemble des eaux douces dans le monde contre moins de 1 % pour les eaux de surface directement disponible (lacs et rivières), et sont utilisées pour environ 20 % des besoins humains (Zektser et Everett, 2004). Dans beaucoup de régions du monde et surtout en milieu rural, l'eau souterraine est la ressource la plus utilisée car elle est généralement moins polluée que l'eau de surface.

Pour atteindre les objectifs du millénaire et dans le souci d'améliorer l'accès à l'eau potable au Burkina Faso, le gouvernement burkinabé avec l'appui de certaines ONGs internationales a entrepris des campagnes de réalisation de forages. Cependant, la contamination des eaux souterraines par la présence de certains polluants naturels comme l'arsenic semble constituer un frein à cet ambitieux programme de fourniture d'eau potable dans un pays caractérisé par un stress hydrique et où l'eau est une denrée rare. Le manque de pérennisation des eaux de surfaces accroît l'importance accordée aux eaux souterraines.

En effet, dans certaines villes du pays comme à Ouahigouya, il a été constaté l'apparition de nombreux cas de maladies dues à des intoxications en arsenic. Suite à ces cas d'intoxications des campagnes d'analyses des eaux ont été effectuées. Elles ont relevé des concentrations d'arsenic dans les eaux de forages allant jusqu'à 1600 µg/L (Smedley et al., 2007). Des teneurs très largement supérieures à la norme admise dans les eaux de boisson qui est de 10 µg/L (OMS, 2006), norme adoptée par le Burkina. Ces taux d'arsenic élevés ont conduit à la fermeture de nombreux forages dans le nord du pays.

Pour prévenir d'éventuelles futures épidémies mais aussi pour éviter la construction de forages qui seront fermés pour cause de pollution, cette étude entreprend d'effectuer l'état des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans l'une des zones où aucune étude n'a encore été effectuée. Ceci permettra de mieux choisir les sites d'implantation de forages, et d'autre part, de contribuer à la compréhension de la présence de ce polluant en fonction de la géologie et des activités minières.

Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du Burkina Faso

L'objectif principal de ce travail est de contribuer une meilleure connaissance de l'étendue de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du Burkina Faso.

Les objectifs spécifiques assignés à ce stage sont :

- Etudier la fiabilité d'un nouvel appareil de mesure d'arsenic de terrain en comparaison avec un appareil éprouvé en laboratoire.
- Mettre en évidence le lien entre l'arsenic et les paramètres physico-chimiques.
- Faire l'état des lieux de la présence de l'arsenic dans les forages de la zone
- Essayer de montrer le lien entre l'arsenic et la géologie et entre l'arsenic et les exploitations aurifères.

Dans ce présent rapport les grandes lignes sont reparties selon le plan ci-après :

Premièrement nous ferons l'état de l'art des recherches par la synthèse bibliographique, ensuite nous présenterons le matériel et les méthodes utilisées suivi des résultats et discussion et nous terminerons par une conclusion.

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

I. Synthèse bibliographique

I.1 Présentation de la zone d'étude

*I.1.1 Situation Géographique

Le Burkina Faso est un pays enclavé de l'Afrique de l'ouest avec pour capitale Ouagadougou. Il est limité au nord et à l'ouest par le Mali, à l'est par le Niger, au sud par le Ghana et le Togo, au sud-est par le Bénin et au sud-ouest par la Côte d'Ivoire. Avec une superficie de 274200 Km², il compte environ une population de 13 730 258 habitants (RGPH, 2006). La zone d'étude est le sud-ouest. Elle recouvre une superficie de 110556,25 Km². Elle est limitée au nord par l'axe Dédougou-Koudougou, au sud par la Côte d'Ivoire, à l'est par le Ghana, à l'ouest par le Mali.

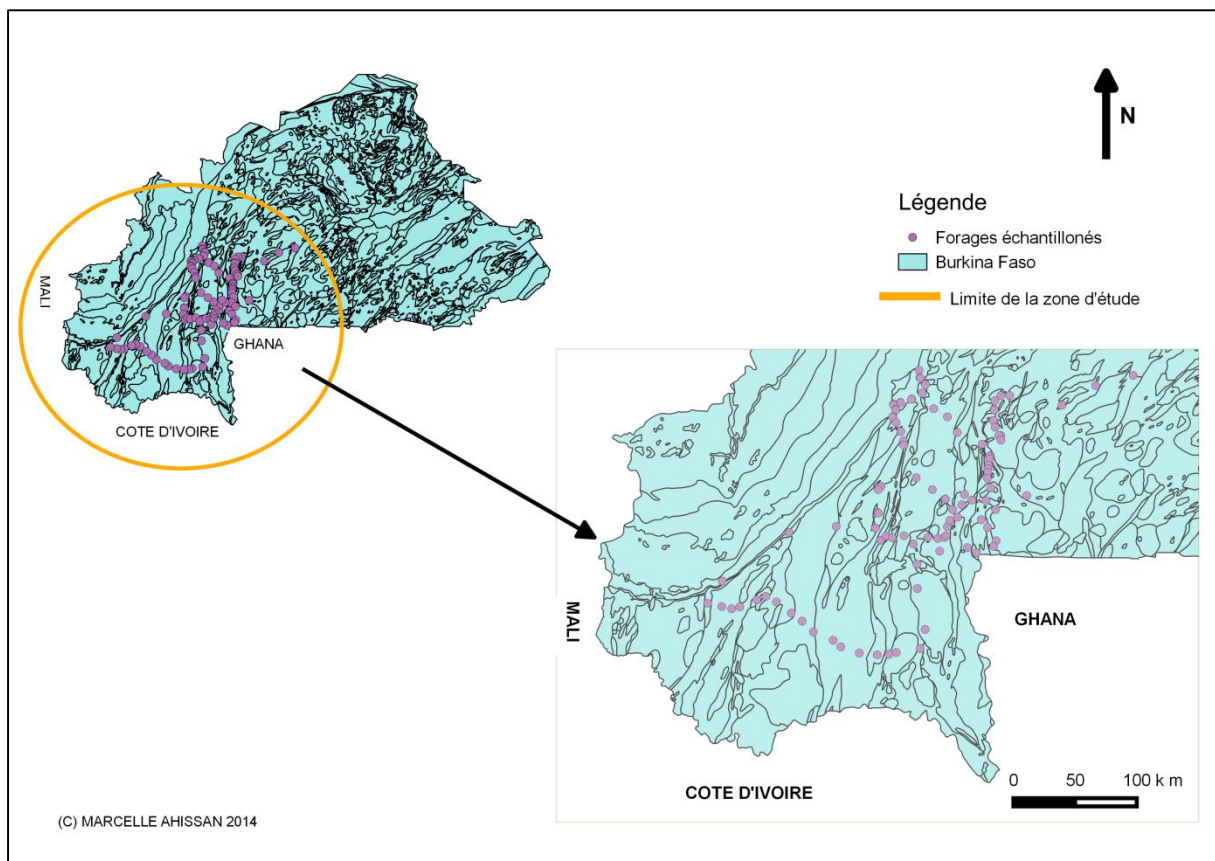


Figure 1: Présentation de la zone d'étude

I.1.2 Climat

Le climat est tropical de type soudanien caractérisé par deux saisons : une saison sèche, qui va d'octobre à Avril et une saison des pluies dite encore " hivernage ", qui est caractérisée par des vents humides s'étend de mai - juin à septembre.

a. Pluviométrie

La zone étudiée a une pluviométrie moyenne de 800 mm répartie sur environ 90 jours en moyenne dans l'année. L'unique saison pluvieuse se situe entre mai et septembre. Elle est du domaine soudanien et forme la bande la mieux arrosée durant la saison pluvieuse (maximum à 1300 mm). Son indice d'aridité est de 0,126 (Schneider et Zunino, 1994)

b. Température

Les températures annuelles moyennes se situent entre 28 et 30°C. Durant les périodes les plus chaudes les températures peuvent atteindre 45°C. Durant les mois de novembre à janvier, période froide de l'année elles peuvent s'abaisser jusqu'à 20°C.

I.1.3 Géologie

Le sud-ouest du Burkina a une géologie variée. La zone appartient au domaine Baoulé-Mossi du craton ouest-africain. Elle est couverte principalement par le socle paléoprotérozoïque. Le socle paléoprotérozoïque comprend des terrains volcano-sédimentaires et plutoniques birimiens disposés en ceintures et envahis par de vastes batholites de granitoïdes éburnéens. La partie sud est constituée principalement de roches granitiques et de roches volcano-sédimentaires avec en certains endroits des roches basaltiques. La partie ouest est quant à elle constituée majoritairement de roches sédimentaires principalement de grès. La ceinture de Houndé est située sur la grande zone de cisaillement NNE-SSO de Houndé-Ouahigouya qui traverse le pays de part en part et correspond à la continuité vers le Nord du cisaillement de Wango-Fitini en Côte d'Ivoire. Les terrains volcano-sédimentaires et plutoniques birimiens constituent à l'Ouest les ceintures orientées NNE-SSO de Loumana, Banfora, Houndé et Boromo. Les ceintures sont constituées de massifs d'ultrabasite, gabbro et diorite, de basalte (prédominant), andésite, rhyolite, rhyodacite, dacite, tuf acide, dispersés en proportions inégales au sein d'une série sédimentaire et tufacée généralement schisteuse et verticalisée. Cette dernière correspond à des formations de schiste noir, schiste grésopélimitique, schiste tufacé, grauwacke, quartzite et chert. La base probable de cette série est localement soulignée par un horizon à lentilles de quartzite ferrugineux noir dont certaines reposent sur le plancher basaltique. Les formations du « Tarkwaïen », constituées de grès arkosiques siliceux conglomératiques, reposent en discordance sur cet ensemble. On rencontre généralement les roches telles que les tonalites, les granites, les schistes, les andésites, les basaltes et les sédimentaires. Ces roches

contiennent naturellement de l'arsenic avec des taux allant jusqu'à 101 ppm. L'examen des âges de ces roches montre un large recouvrement entre les différents groupes pétrologiques, de 2200 à 2070 Ma (Castaing et al, 2003).

I.1.4 Hydrogéologie

Les formations gréseuses et dolomitiques de la couverture sédimentaire du Néoprotérozoïque, à l'Ouest du pays, restent un aquifère primordial aux énormes capacités de renouvellement des réserves. Le sud correspond au socle cristallin fissuré et altéré et son système filonien drainant. Les réserves en eaux souterraines sont réelles à condition de les identifier convenablement.

Les eaux souterraines de ces sites, sont extraites par des puits traditionnels et des forages à pompes manuelles. Ces forages sont relativement profonds (40 m en moyenne) (Ebanga, 2010) et captent les eaux des aquifères du socle cristallin.

Dans son document public intitulé : « Projet réseau SIG-Afrique, carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 Million », Seguin,(2005) présente les aquifères du socle cristallin comme des formations plutoniques, métamorphiques, volcano-plutoniques, parfois associées à des formations de roches volcano sédimentaires, les "ceintures de roches vertes" ("greenstones belts"), d'âge Précambrien (archéen à paléo protérozoïque) à Cambrien. Les roches qui constituent ces formations (granites, syénites, gabbros, diorites, gneiss, migmatites, schistes, ...) sont caractérisées par une porosité très faible (inférieure à 1% en général, au plus de 1 à 2%) ; l'emmagasinement et la circulation d'eau n'y est donc possible que s'il existe :

- une zone d'altération suffisamment épaisse, de bonne porosité, à rôle capacitif ;
- un réseau de fissures ou de fractures non colmatées, à rôle conducteur.

Parmi ces formations, on distingue deux domaines hydrogéologiques :

- un domaine à dominante granito-gneissique ;
- un domaine à dominante schisteuse

➤ Domaines à dominante granito-gneissique.

L'ensemble altérites / socle fracturé se comporte comme un aquifère de type bicouche, dans lequel :

Le substratum rocheux fracturé, à forte perméabilité locale, assure une fonction transmissive qui permet d'obtenir un bon débit instantané. Les altérites sus-jacentes, grâce à

leur capacité de rétention d'eau, permettent l'alimentation à long terme du forage en étant drainées par le réseau de fractures.

Les très nombreux forages réalisés en zones de socle ont confirmé que l'exploitation des eaux souterraines dans ces zones pouvait être significativement améliorée en captant directement les secteurs fracturés de la roche saine avec des possibilités de débits de l'ordre de 5 à 15 m³/h, parfois inférieurs à 5 m³/h, rarement supérieurs à 15 m³/h

➤ Domaines à dominante schisteuse.

Le modèle conceptuel est le même que pour les formations granito-gneissiques mais avec quelques différences :

- la frange altérée est plus épaisse ;
- la perméabilité de la zone altérée est plus faible en raison d'une fraction argileuse plus importante ;
- les fissures affectant la roche saine sont plus nombreuses du fait de la présence des plans de schistosité.

On trouve fréquemment des intercalations grésos-quartzitiques ou volcano-sédimentaires, des filons de quartz.

Ces deux dernières caractéristiques améliorent la qualité du réservoir schisteux, mais les débits restent faibles, et sont généralement inférieurs à ceux du domaine granito-gneissique.

La zone compte plus de 1500 forages.

I.2 Généralités sur l'arsenic

I.2.1 Propriétés physico-chimiques de l'arsenic

L'arsenic (de symbole chimique As et de numéro atomique 33) est le vingtième élément le plus abondant dans la croûte terrestre (Matschullat, 2000) et le quarante septième élément le plus abondant sur la terre parmi les quatre-vingt-huit éléments existants (Losey and Vaughan, 2006). Plus de deux cents minéraux contiennent de l'arsenic (Smedley and Kinniburgh, 2002). C'est un métalloïde possédant trois formes allotropiques : jaune, noire et grise. La forme grise est la forme la plus stable et la plus commune. L'arsenic natif est de couleur grise métallique assez cassant. Sa structure cristalline est rhomboédrique. Il fait partie du groupe Va du tableau périodique des éléments et son comportement chimique est intermédiaire entre

les métaux et les non métaux. Quelques-unes de ses propriétés physico-chimiques sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1: Paramètres physico-chimiques de l'arsenic

Numéro atomique	33
Masse atomique (g.mol⁻¹)	74,9216
Point de sublimation	613°C
Densité	5,73
Configuration atomique	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³
Valences	-3, 0, +3, +5
Rayons ioniques(Å)	
As ³⁺	0,58
As ⁵⁺	0,46

La chimie de l'arsenic est fondée sur les propriétés de ses oxydes et sur leur capacité à former des sels avec de nombreux cations. Ses possibilités d'établir des liaisons covalentes stables avec l'hydrogène et le carbone sont à la base d'une grande variété de composés organiques de l'arsenic d'origine naturelle ou industrielle.

I.2.2 Différentes formes de l'arsenic

a. Arsenic inorganique

Dans l'environnement, l'arsenic se trouve essentiellement sous trois états d'oxydation : 0, +3 et +5, As(0) étant plus souvent rencontré dans les minéraux primaires (arsénopyrite) alors qu'As (III) et As (V) sont rencontrés dans des minéraux d'altération. Les formes chimiques les plus courantes en milieu aquatique sont As(III) et As(V), respectivement sous forme d'acide arsénieux et d'ions arséniates. La proportion relative de ces états d'oxydation dans un environnement donné sera fonction de transformations chimiques spontanées mais dépendra également de biotransformations liées au métabolisme des microorganismes, en particulier au métabolisme bactérien, telles que la réduction de l'arséniate (As(V)) et l'oxydation de l'arsénite (As(III)).

b. Arsenic organique

Les composés arséniés organiques sont présents dans les eaux naturelles (douces ou salines) et dans les sédiments. Ils peuvent provenir de la méthylation de l'arsenic minéral par les algues ou par la dégradation microbienne des composés organiques complexes.

Généralement, les eaux souterraines comme les eaux de mer ne contiennent pas ou peu d'arsenic organique, ce qui n'est pas le cas des eaux de lacs ou d'étangs (Mandal and Suzuki, 2002; Hung et al., 2004). Mais en cas de pollution industrielle, on peut retrouver de fortes concentrations d'arsenic organique dans les eaux souterraines.

Sous forme organique, c'est un oligo-élément, indispensable à l'organisme, participant à de nombreuses réactions notamment pour la formation des os.

I.2.3 Origines de l'arsenic

Les eaux de nombreux pays sont contaminées par l'arsenic. Cette contamination peut être d'origine naturelle ou anthropique.

a. Origines naturelles.

Les contaminations naturelles ont pour la plupart une origine géologique. A la faveur de divers processus biogéochimiques, l'arsenic peut se dissoudre dans l'eau et parvenir dans les aquifères, les sources et les cours d'eau (Hug et al., 2001 ; Mandal et Suzuki, 2002; Smedley et Kinniburgh, 2002 ; Kim et al., 2003). Les sources naturelles d'arsenic dans le monde sont généralement : les sédiments volcaniques, les minéraux sulfurés, les oxydes métalliques et les remontées des sources thermales. La principale source d'arsenic est l'oxydation des minéraux sulfurés. Cependant, la contamination des eaux par l'arsenic n'est pas uniforme dans l'aquifère. Ainsi des concentrations d'arsenic élevées apparaissent localement influencées par des situations hydrogéologiques particulières (Rodriguez et al., 2004). Les sources de pollution par l'arsenic dépendent des formations géologiques et hydrogéologiques en place rencontrées dans un pays.

b. Origines anthropiques.

L'arsenic peut également provenir d'activités humaines. Des procédés industriels tels que : l'exploitation minière, la fonte de minerais et les centrales au charbon contribuent tous à la présence d'arsenic dans l'air, l'eau et le sol. La contamination peut être aussi causée par des pesticides agricoles et par des substances chimiques utilisées dans le traitement du bois qui contiennent l'arsenic, ces composés sont progressivement retirés du marché. Enfin l'arsenic

est couramment utilisé comme agent décolorant dans l'industrie du verre, en tant que composant d'alliage métallique, dans certains traitements médicaux et en électronique (Pichard et al, 2005).

I.2.4 Paramètres influençant la pollution à l'arsenic

Plusieurs paramètres et minéraux notamment les minéraux sulfurés, les oxydes de fer (et les oxydes d'aluminium) et le potentiel redox jouent un rôle dans le cycle de l'arsenic dans les aquifères.

a. Adsorption/désorption

L'adsorption/désorption apparaît comme un des processus majeurs relatifs au piégeage de l'arsenic. Parmi les phases minérales susceptibles de piéger la forme oxydée de l'arsenic (As(V)), on peut citer les oxyhydroxydes métalliques (Fe, Al, Mn,...), les argiles et la matière organique. Dans certaines conditions, cette adsorption pourra être favorisée par la présence d'éléments chimiques tels que le calcium qui vont contribuer à augmenter la charge surfacique positive du minéral et donc l'adsorption de l'arsenic (espèces chargées négativement): formation de ponts calciques. Les réactions d'adsorption/désorption constituent la base d'un grand nombre de méthodes de traitement afin d'abaisser les teneurs en arsenic dans les eaux conformément à la limite de $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Korte et Fernando (1991) rapportent notamment que ces études concernent une large gamme d'adsorbants tels que les phyllo-silicates, la silice, et les hydroxydes amorphes de fer et d'aluminium.

b. Influence du potentiel redox

La mobilité et la biodisponibilité de l'arsenic vont être étroitement liées aux conditions redox du milieu ou à la présence de minéraux tels que les oxydes de manganèse qui vont induire, à leur surface, des transformations redox de l'arsenic. L'analyse de la spéciation de l'arsenic est alors essentielle si l'on veut prévoir le transfert de cet élément dans les systèmes environnementaux. L'arséniate As(V) et l'arsénite As(III) sont les deux formes majoritaires d'arsenic inorganique dans les sols. En condition oxydante, la forme prédominante sera As(V). En condition moyennement réductrice, c'est la forme As(III) qui devient majoritaire. Dans la plupart des eaux de nappe, les espèces principales de l'As(V) sont des oxyanions (H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-}) alors que pour l'As(III) la forme majoritaire est une espèce neutre (H_3AsO_3). Sous sa forme réduite (As(III)), l'arsenic est plus toxique et plus mobile que sous

sa forme oxydée (As(V)). Les conditions redox du milieu vont aussi jouer sur la formation des composés méthylés d'arsenic qui sont plus stables en système réducteur. Du point de vue cinétique, il apparaît dans la plupart des travaux consacrés à ce sujet que les réactions de transformation redox de l'arsenic sont des processus relativement lents (Johnson and Pilson, 1975 ; Andrae, 1979 ; Chery et al, 1979 et Eary and Schramke, 1990; Smedley and Kinniburgh, 2002). Pour Deuel et Swoboda, (1972), l'oxydation d'arsénites en arséniate dans les sols se ferait en quelques jours pour des conditions modérément oxydantes ($E_h > 100$ mV). En sens inverse, la réduction d'arséniate en arsénites serait plus lente et demanderait plusieurs semaines (Takamatsu et al, 1982). Pour des valeurs du pH proches de celles que l'on rencontre généralement dans le milieu naturel, l'As(V) va avoir tendance à être piégé en plus grande quantité sur les phases de type oxyhydroxyde de fer (FeO(OH)) que l'As(III). Ainsi, en milieu réducteur, les teneurs en arsenic dissous seront souvent plus élevées qu'en milieu oxydant du fait de la plus grande mobilité de l'arsenic(III). De plus, le milieu réducteur va entraîner la dissolution des oxyhydroxydes de fer au sein desquels est piégé l'arsenic, ce qui, là encore, se traduit par une libération d'arsenic dans la phase aqueuse. Dans certaines conditions de pH et de potentiel redox, il a toutefois été montré qu'As (III) s'adsorbait en quantité plus importante qu'As(V). Ce cas de figure est par exemple observé pour l'adsorption de l'arséniate et de l'arsénite sur la ferrihydrite, qui montre une adsorption préférentielle de As(V) par rapport à As(III) pour des pH compris entre 4 et 7 alors que pour des pH compris entre 7 et 10, le cas de figure inverse est observé (plus grande proportion de As(III) adsorbée par rapport à As(V) ; Pierce and Moore, 1980 ; Pierce and Moore, 1982). Ces différents rappels soulignent l'extrême dépendance de la mobilité de l'arsenic vis-à-vis des mécanismes redox.

I.2.5 Toxicité de l'arsenic

La principale cause de toxicité arsenicale chez l'homme est la contamination par consommation de l'eau de boisson majoritairement contaminée naturellement plutôt que par inhalation (Ratnaik, 2003). Les signes cutanés caractéristiques constituent les meilleurs indicateurs d'un haut degré d'exposition à l'arsenic. La toxicité des composés de l'arsenic est due à ce que l'élément peut se substituer au phosphate (phosphate et arséniate sont de charge et de taille voisine). Les arséniate sont ensuite plus instables et entraîne des dysfonctionnements. Ils peuvent former des combinaisons avec les dérivés soufrés de

l'organisme. Cela entraîne de nombreuses maladies (peau, foie, troubles nerveux, cancers) voire la mort.

Une exposition aiguë à des concentrations de plusieurs milligrammes par jour entraînera une irritation importante des voies digestives, puis des troubles neurologiques sévères, des troubles cardiovasculaires et enfin une atteinte hépatique et rénale (National Research Council, 1999 ; United States Environmental Protection Agency, 2001). Une revue des cas rapportés dans la littérature indique que la dose létale minimale observée est de 2 mg/kg (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2000).

Les lésions cutanées, notamment l'hyperpigmentation, les verrues et l'hyperkératose des paumes des mains et des plantes des pieds sont les signes cliniques les plus précoces et les plus couramment observés après une exposition prolongée à l'arsenic par l'eau de consommation. Ces effets ont été observés après des périodes d'exposition allant de 5 à 15 ans à des doses de plus de 700 µg/j (équivalant à une consommation de 1,5 l d'eau contenant plus de 400 µg/l). Des neuropathies périphériques, des atteintes cardiovasculaires et vasculaires périphériques ont également été associées à une exposition prolongée à l'arsenic inorganique présent dans l'eau (National Research Council, 2001 ; Santé Canada, 2006). Une incidence de diabète plus élevée chez les personnes exposées à l'arsenic a aussi été rapportée (National Research Council, 2001 ; United States Environmental Protection Agency, 2001 ; Santé Canada, 2006).

I.2.6 Quelques carte de contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans d'autres régions du Burkina

Sur la carte de la figure 2 les forages les plus à risques ayant des concentrations largement supérieures à la norme admise sont logés dans les alluvions (roches sédimentaires). C'est le cas de Tanili, l'une des zone où les plus fortes concentrations enregistrés. On note aussi la présence d'exploitations aurifères à Tanili.

Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du Burkina Faso

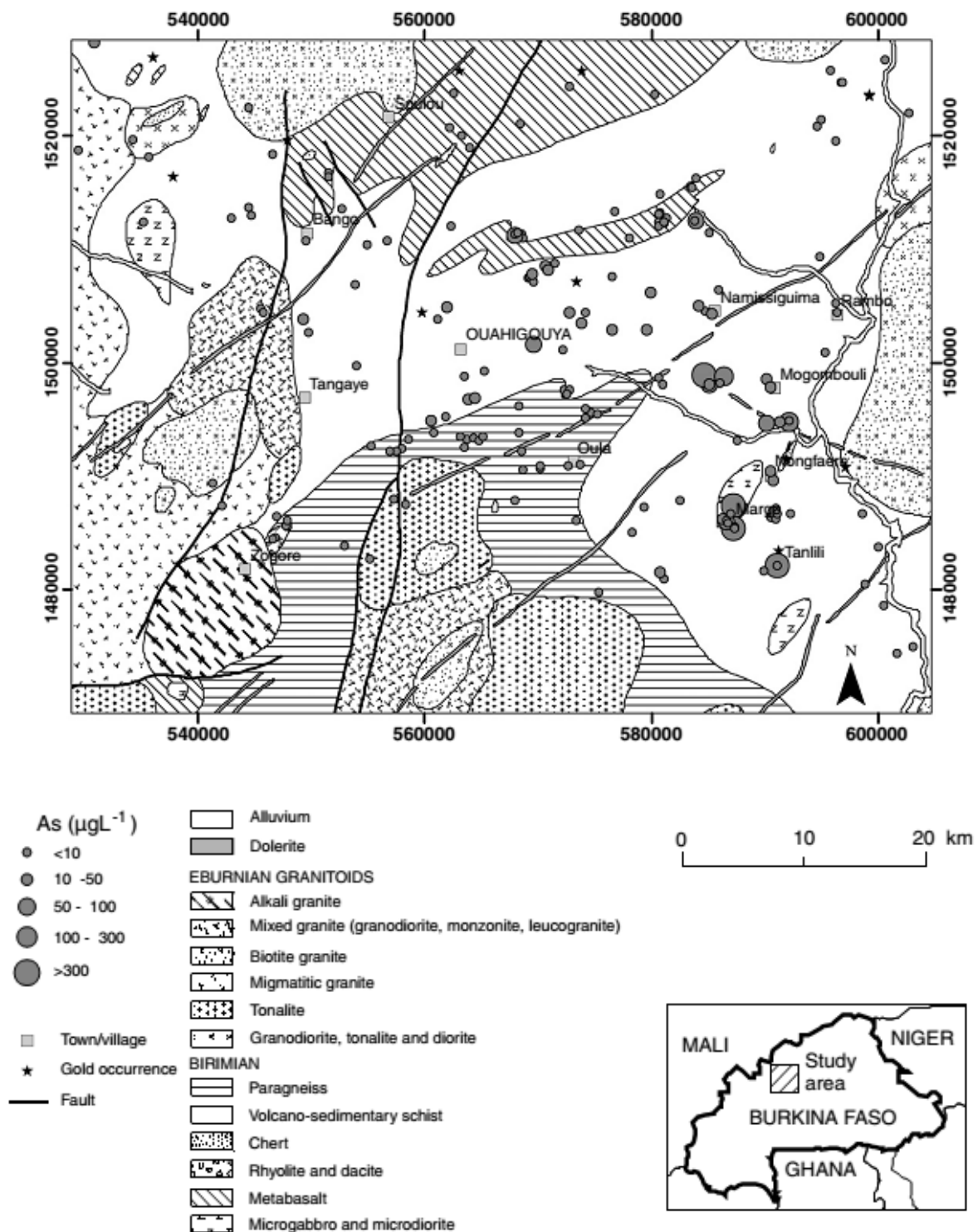


Figure 2: carte de la contamination des eaux souterraines dans la région de Ouahigouya (Source : Arsenic in groundwater from mineralized protozoic basement rocks of Burkina Faso, 1074 - 1091p, Smedley et al, 2007).

Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du Burkina Faso

La carte de la figure 3 montre que dans la région du Seno les plus fortes concentrations en arsenic se retrouvent aux environs du village de Falagountou où la géologie est majoritairement constituée de roche volcano-sédimentaires

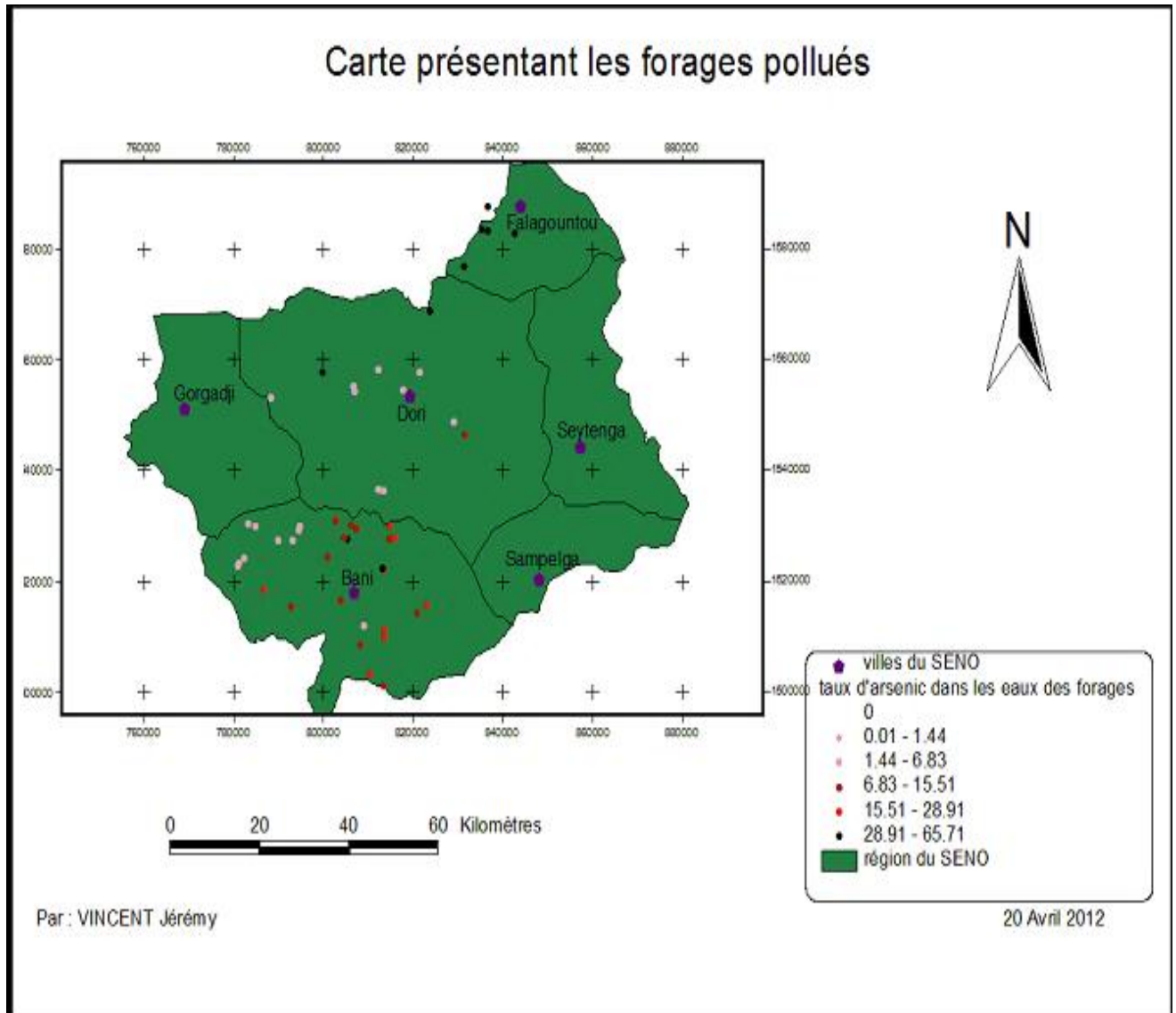


Figure 3: Carte de contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans la région du Séno (Source : Mémoire de fin d'étude master 2 de Vincent Jérémy, 2012).

MATERIEL ET METHODE

II Matériel et méthode

II.1 Matériel

➤ **Les données**

Les données de bases pour ce travail proviennent du Bureau des Mines et Géologies du Burkina (BUMIGEB), de l'Institut Géographique du Burkina (IGB) et de la direction générale de la météorologie. Toutes ces données nous ont servi durant la phase de préparation et de réalisation de la mission de terrain, et l'élaboration des cartes.

➤ **Un GPS**

Il a permis de se déplacer lors de la phase de terrain et de localiser les forages échantillonnés afin de les positionner sur les cartes.

➤ **Le logiciel QUANTUM GIS (QGIS)**

Quantum GIS est un logiciel de cartographie SIG (Système d'Information Géographique) libre multiplateforme publié sous licence GPL. Il a permis de réaliser la carte de la distribution spatiale de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic. l'interface de ce logiciel est représentée par la figure ci-dessous.

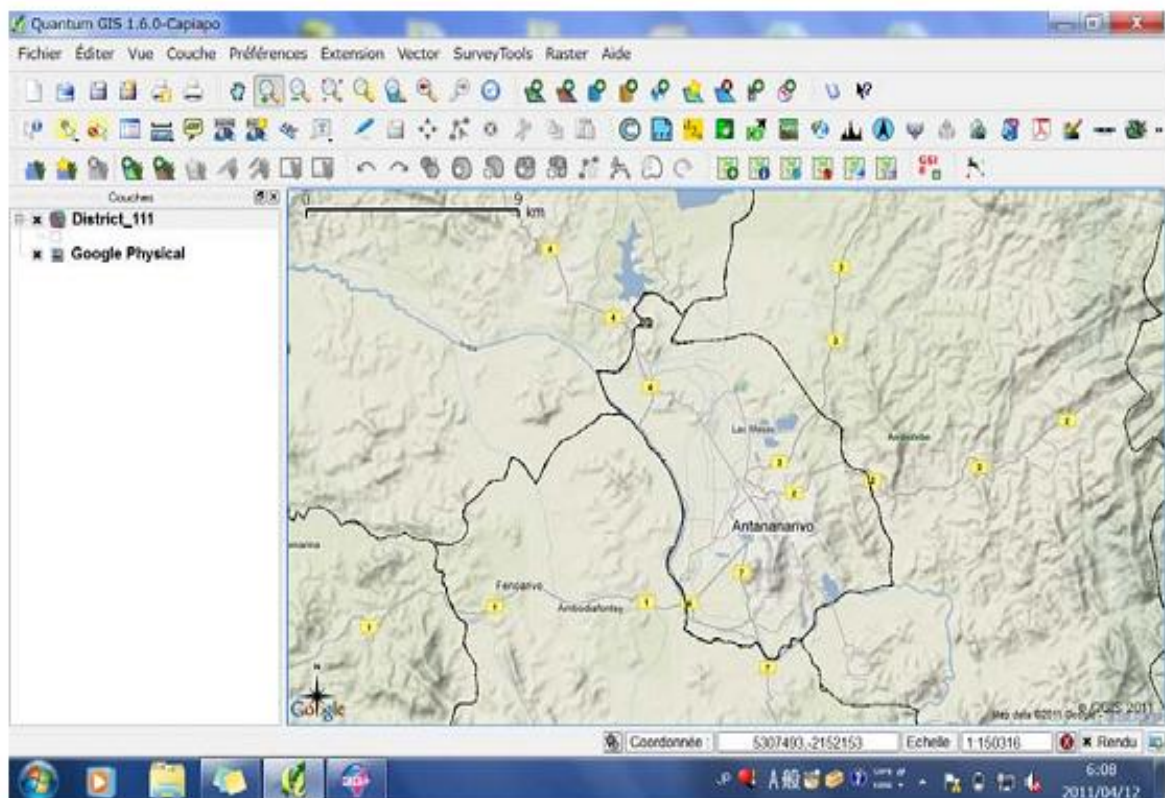


Figure 4: une interface de QGIS

➤ **Le kit d'essai *in situ***

Ce kit de terrain nous a permis de mesurer la température, la conductivité électrique, le pH et la concentration en oxygène dissout.



Figure 5: kit d'essai *in situ*

➤ **Le Metalyser HM 3000**

Appareil de haute technologie, il permet d'analyser les métaux et dérivés comme l'arsenic, aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. Dans cette étude il a permis de mesurer la concentration d'arsenic.



Figure 6 : Image Metalyser

Le Metalyser utilise le principe de la voltamétrie à ré-dissolution anodique et cathodique. La voltamétrie à ré-dissolution ou le décapage voltamétrique est une technique électro-analytique sensible pour la détermination des quantités infimes de métaux et dérivés en solution. La technique se compose de trois étapes. Tout d'abord, les ions métalliques sont déposés sur une électrode qui se tient à un potentiel approprié. La solution est agitée au cours de cette étape pour maximiser la quantité de métal placé. Deuxièmement, l'agitation est arrêtée pour que la solution devienne calme. Troisièmement, les dépôts métalliques sont supprimés de l'électrode en analysant le potentiel. Le courant observé au cours de l'étape du décapage peut être reliée à la quantité du métal dans la solution. L'étape du décapage peut consister en un potentiel négatif ou positif de balayage, créant soit un courant anodique ou cathodique respectivement. Par conséquent, la voltampérométrie de décapage anodique (ASV) et la voltampérométrie cathodique de décapage (CSV) sont deux techniques spécifiques de décapage (Adrian, 1992).

➤ L'ICP-MS

La spectrométrie de masse est une technique instrumentale d'analyse reposant sur la séparation, l'identification et la quantification des éléments constitutifs d'un échantillon en fonction de leur masse. Elle est basée sur le couplage d'une torche à plasma générant des ions et d'un spectromètre de masse quadripolaire (dans le cas de l'ICP—MS Thermoelectron X7) qui sépare ces ions en masse.

L'analyse des échantillons par ICP-MS peut être divisée en quatre étapes : introduction-nébulisation, ionisation, séparation en masse, détection.

Elle s'applique à l'analyse simultanée de nombreux éléments métalliques et métalloïdiques (80 environ).

Dans le but de trouver des corrélations entre l'arsenic et la chimie de l'eau nous avons mesuré les éléments suivant à partir de l'ICP-MS :

Arsenic (As), carbone inorganique total (TIC), fluor (F), chlore (Cl), brome (Br), nitrate (NO₃), sulfate (SO₄), phosphate (PO₄), lithium (Li), bore (B), azote(N), sodium (Na), magnésium (Mg), aluminium (Al), silicium (Si), phosphore (P), soufre (S), potassium (K), calcium (Ca), vanadium (V), chrome (Cr), manganèse (Mn), fer (Fe), cobalt (Co), nickel (Ni), cuivre (Cu), zinc (Zinc), sélénium (Se), strontium (Sr), molybdène (Mo), cadmium (Cd), étain (Sn), antimoine (Sb), baryum (Ba), lanthane (La), tungstène (W), thallium (Tl), plomb (Pb), thorium (Th), uranium (U) et cérium (Ce).

II.2 Méthode

II.2.1 Choix des points d'échantillonnage

Plusieurs facteurs ont permis le choix des points d'échantillonnages.

➤ **La géologie des aquifères**

L'arsenic est généralement présent dans quatre environnements géologiques distincts : les franges externes de certains granites intrusifs, certaines grandes structures tectoniques de plusieurs dizaines de kilomètres d'extension, les niveaux sédimentaires du début du Paléozoïque et les marges sédimentaires de certains massifs cristallins (Laperche et al, 2003). Les aquifères localisés dans les roches volcano-sédimentaires sont les plus susceptibles de contenir des concentrations élevées d'arsenic. Pour comprendre l'impact de la géologie sur la concentration en arsenic l'échantillonnage a été réalisé dans des géologies variées.

➤ **La présence d'exploitation aurifère**

Généralement la présence d'or et d'arsenic dans une roche sont étroitement liées. L'arsenic est un indicateur de présence d'or. L'exploitation de 1g d'or conduit à la libération de 1 kg d'arsenic dans le milieu (Ullmann, 2012). Pour évaluer l'impact des activités aurifères (aussi bien industrielles qu'artisanales) sur le taux d'arsenic des forages, l'échantillonnage a concerné aussi bien les forages situés à proximité des exploitations minières que les forages distants des exploitations.

II.2.2 Les analyses

Les échantillons d'arsenic (n=103) ont été analysés *in situ* à partir du Metalyser HM 3000 selon la méthode des ajouts dosés et aussi à l'ICP-MS (couplage plasma induit par haute fréquence spectrométrie de masse) à l'aide de droite de calibration. Les échantillons ont été analysés à partir de ces deux méthodes afin de comparer leurs résultats et d'étudier la performance du Metalyser en se basant sur la fiabilité des résultats de l'ICP-MS. Pour l'établissement de la carte les valeurs utilisées seront celles de l'ICP-MS.

➤ **La méthode des ajouts dosés avec le Metalyser**

Dans la méthode des ajouts dosés, plusieurs ajouts de concentrations connues sont effectués. A partir de la courbe des concentrations mesurées en fonctions des quantités

ajoutées la concentration de la solution initiale est déterminée. Cette méthode a pour but d'éliminer les effets de matrice, il est possible de mesurer une solution dans des matrices différentes et pouvoir les comparer. Le protocole d'analyse est décrit en annexe1.

II.2.3 Analyse statistique

a- Coefficient de corrélation

La corrélation est une statistique qui caractérise l'existence ou l'absence d'une relation entre deux échantillons de valeurs pris sur un même groupe de sujets. Le coefficient de corrélation permet de quantifier cette relation à la fois par le signe de la corrélation (positive et négative), et par la force de cette corrélation. Le degré de corrélation, se mesure sur une échelle de -1 à 1. Zéro signifie une totale absence de corrélation entre les deux mesures, alors que 1 signifie une corrélation parfaite dans le sens positif, c'est à dire que connaître la valeur d'une mesure nous permet de connaître exactement la valeur de l'autre.

Dans notre étude nous allons déterminer la corrélation entre les concentrations en arsenic des eaux souterraines et les différents paramètres physico-chimiques tels que la température, la conductivité électrique (Ec), le potentiel d'hydrogène (pH), la concentration en oxygène dissout et les éléments chimiques cités dans le paragraphe sur les matériels. La corrélation entre les résultats de quantifications des taux d'arsenic obtenus par le Metalyser et ceux par l'ICP-MS seront aussi étudiées.

Le coefficient de corrélation est :

$$r = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma(x)\sigma(y)}$$

Le logiciel Excel a été utilisé pour effectuer ces calculs.

Soit x : la concentration en arsenic déterminée à l'ICP-MS

y : représente soit la concentration en As du Metalyser ou soit les valeurs des paramètres physico-chimiques étudiés.

$\mu(x)$: moyenne de x

$\mu(y)$: moyenne de y

$\sigma(x)$: racine carrée de la variance de x

$\sigma(y)$: racine carrée de la variance de y

N : le nombre d'échantillons

b- La droite régression linéaire

Elle permet sur un graphique de montrer la forme approximative du nuage de points. A l'aide d'un examen visuel il est possible d'estimer le niveau de corrélation entre deux paramètres.

II.2.4 Réalisation de la carte de contamination

La carte a été réalisée à partir des données de la zone (Burkina Faso), des résultats des analyses des échantillons des forages (ICP-MS) et du logiciel QUANTUM GIS.

L'étape 1 consiste à reporter les données obtenues sur le terrain dans un tableau Excel type CSV (format recommandé pour QGIS).

Dans l'étape suivante, il s'agit de superposer les fichiers contenant les informations utiles avec les données du tableur CSV. Tous ces fichiers doivent être dans le même système de coordonnées. Le Burkina est situé dans le système WGS 84 UTM zone 30 Nord. Après la superposition de ces fichiers les traitements voulus peuvent être appliqués.

RESULTATS ET DISCUSSION

III Résultats et discussion

III.1 Résultats

III.1.1 Les concentrations en arsenic

Dans ce paragraphe, sont présentés les résultats de quantification des concentrations en arsenic obtenues par la méthode de l'ICP-MS. L'arsenic est présent dans tous les forages échantillonnés de la zone (n=103) puisque les concentrations obtenues sont toutes au-dessus de la limite de détection de l'appareil 0,02 µg/L. Dans la majorité des forages la concentration est inférieure à la norme (10 µg/L). On note que dans 90% des forages la concentration d'As est inférieure à la norme (10 µg/L) avec 64% de ceux-ci pour lesquelles la concentration est inférieure à 1 µg/L. Les 10 autres pourcent non moins négligeable ont une concentration d'As supérieure à la norme avec 2% qui ont des taux d'arsenic au-dessus de 50ppb.

Tableau 2: Pourcentage des concentrations d'arsenic dans les forages échantillonnés

Concentration d'As (µg/L)	Pourcentage des échantillons (%)	Concentration d'As (µg/L)	Pourcentage Des échantillons (%)
As < 10	90	As < 1	64
		1 ≤ As < 10	26
As ≥ 10	10	10 ≤ As < 50	8
		As > 50	2

Les résultats des concentrations d'arsenic mesuré par le Metalyser et par l'ICP-MS sont consignés dans l'annexe 1, ils sont accompagnés des mesures de température, de conductivité électrique, de concentration en oxygène dissout et de pH.

III.1.2 Etude de la fiabilité du Metalyser

Avec le nuage de points la corrélation entre les résultats de l'ICP-MS et ceux du Metalyser n'est pas apparente. En revanche la corrélation selon la méthode de Pearson indique une forte corrélation entre les deux méthodes d'analyses (0,91). L'étude de la variation entre les deux séries de résultats permet de dégager deux tendances, la première regroupant les valeurs mesurées à l'ICP-MS inférieures à la norme et la deuxième celles supérieures à la norme.

Dans le premier cas la déviation entre les deux séries de résultats est importante. On peut noter une augmentation moyenne de 90% en passant des résultats de l'ICPMS à ceux du Metalyser. Dans le second cas la déviation est faible, on note une augmentation moyenne de

30% en passant des résultats de l'ICPMS à ceux du Metalyser. Dans les deux cas le Metalyser semble surestimer les résultats.

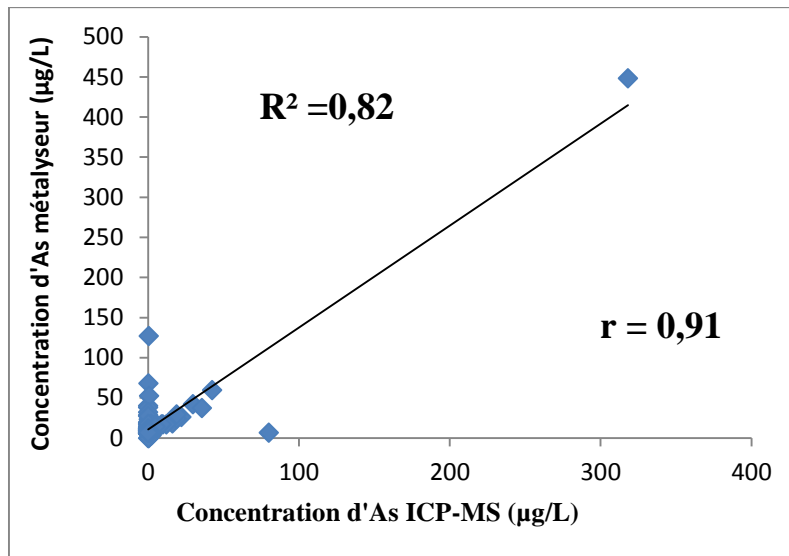


Figure 7: Corrélation entre As (ICP-MS)- As (Metalyser)

➤ Taux d'As par ICP-MS supérieur à la norme (10 µg/L)

Le coefficient de corrélation est très proche de 1 (0,97) avec une droite de régression qui intercepte 90% des points. La corrélation est très forte pour cette série d'échantillon ayant une concentration en arsenic supérieure à 10 ppb (ICP-MS). A ce niveau les résultats du Metalyser sont cohérents avec les résultats de l'appareil de laboratoire comme le présente la figure 7.

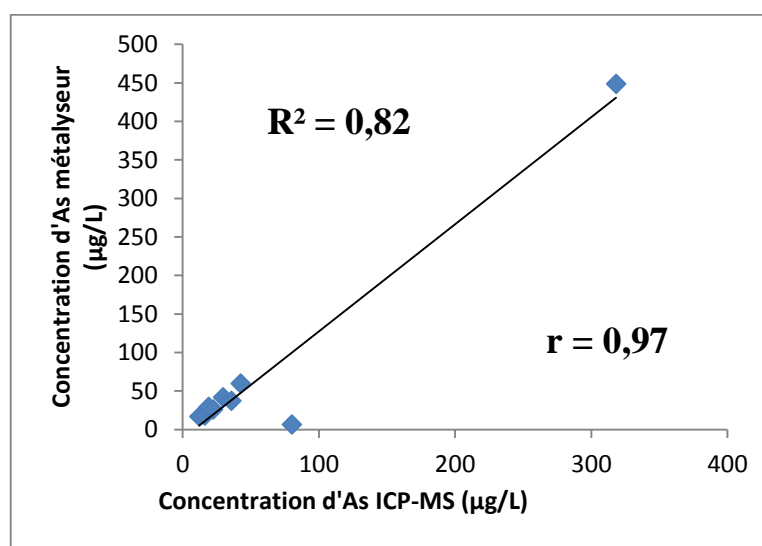


Figure 8: Corrélation entre les résultats des deux méthodes pour le cas où la concentration d'As mesurés par ICP-MS supérieur à la norme (10 µg/L)

➤ **Taux d'As par ICP-MS inférieur à la norme (10 ppb)**

A ce niveau la faible corrélation entre les résultats des deux méthodes met en doute la fiabilité du Métalyseur. La figure 8 permet d'illustrer ce faible rapport de corrélation. Néanmoins il serait intéressant de pousser la compréhension du fonctionnement de l'appareil afin de maîtriser ces limites car il est plus pratique et moins dispendieux et adapté aux mesures de terrain.

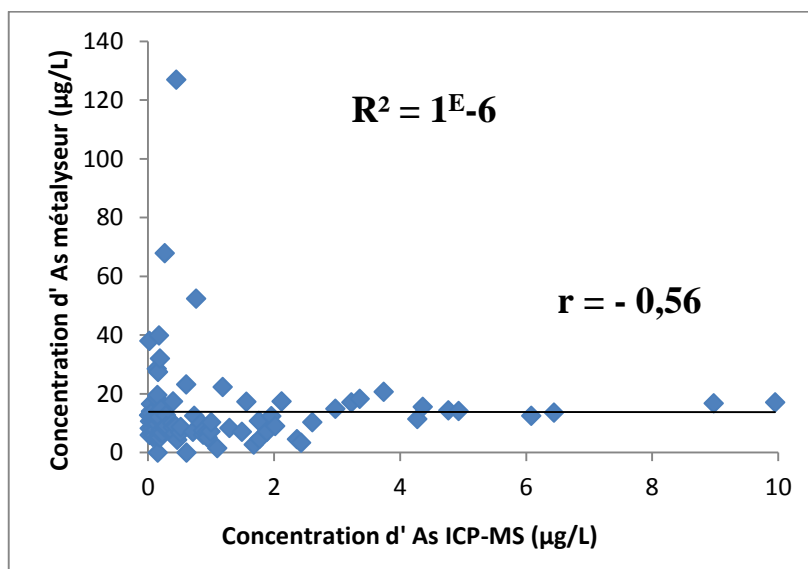


Figure 9: Corrélation entre les résultats des deux méthodes pour le cas où la concentration d'As mesurés par ICP-MS inférieures à la norme (10 µg/L)

III.1.3 Corrélations entre l'arsenic et les paramètres physico-chimiques

Les différentes des coefficients de corrélations sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau 3: Corrélations entre arsenic et les paramètres physico-chimiques

Paramètres	As-pH	As-O₂	As- température	As-Ec	As-Sb
Coefficient de corrélation	0,218	-0,009	-0,067	0,178	0,83

NB : Les corrélations entre l'arsenic et les autres éléments chimiques ne sont pas inclus dans le tableau compte tenu de leur très faible coefficient de corrélation.

➤ **Corrélation entre l'arsenic et le pH**

La concentration d'arsenic est supérieure à la norme lorsque le pH se situe entre 6,7 et 7,5. Le coefficient de corrélation ici est différent de zéro mais très faible ce qui implique qu'il existe une faible relation entre le taux d'arsenic et le pH comme on le constate sur la figure 9. En revanche dans la littérature le lien entre la spéciation de l'arsenic a été largement démontré.

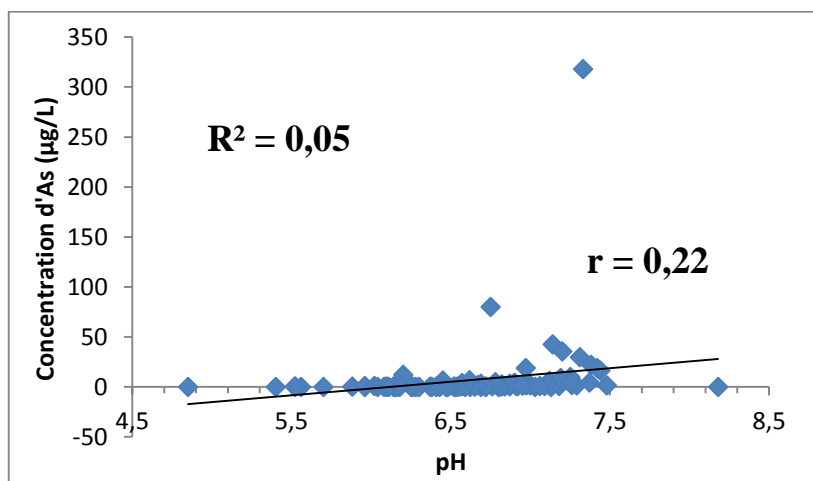


Figure 10: Corrélation entre l'arsenic et le pH

➤ **Corrélation entre l'arsenic et la température**

La courbe de régression est quasi horizontale ce qui implique que la température et la concentration en arsenic sont indépendants. La covariance indique qu'il pourrait avoir une relation entre les concentrations d'As et la température mais le coefficient de corrélation et la droite de régression montre que s'il existe une relation cette relation est négligeable.

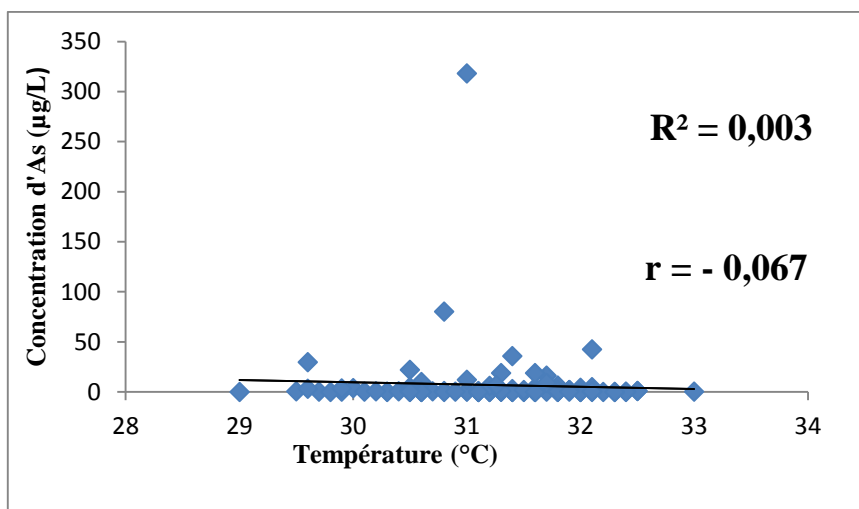


Figure 11: Corrélation entre l'arsenic et la température

➤ **Corrélation entre l'arsenic et la concentration en oxygène dissout**

La concentration de l'arsenic est supérieure à la norme pour des concentrations en oxygène dissout inférieure à 2,7mg /l. La droite de régression est quasi horizontale. Les paramètres sont alors indépendants. Selon la littérature la concentration en O₂ de l'aquifère aurait une influence sur la concentration en arsenic mais dans notre cas vu l'effet du pompage les concentrations en O₂ obtenues ne sont pas représentatives des concentrations des aquifères. Le coefficient de corrélation étant négligeable.

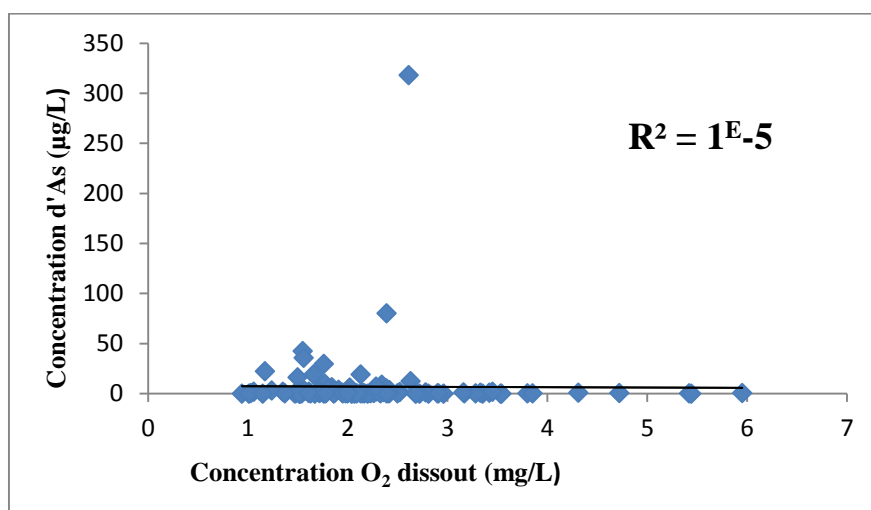


Figure 12: Corrélation entre l'arsenic et O₂

➤ **Corrélation entre l'arsenic et la conductivité électrique**

Le graphique et les résultats de corrélation de Pearson indiquent qu'il n'y a pas de relation entre la conductivité électrique la concentration en arsenic. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'arsenic n'est pas l'un des ions majeurs parmi les ions qui interviennent dans la conductivité électrique.

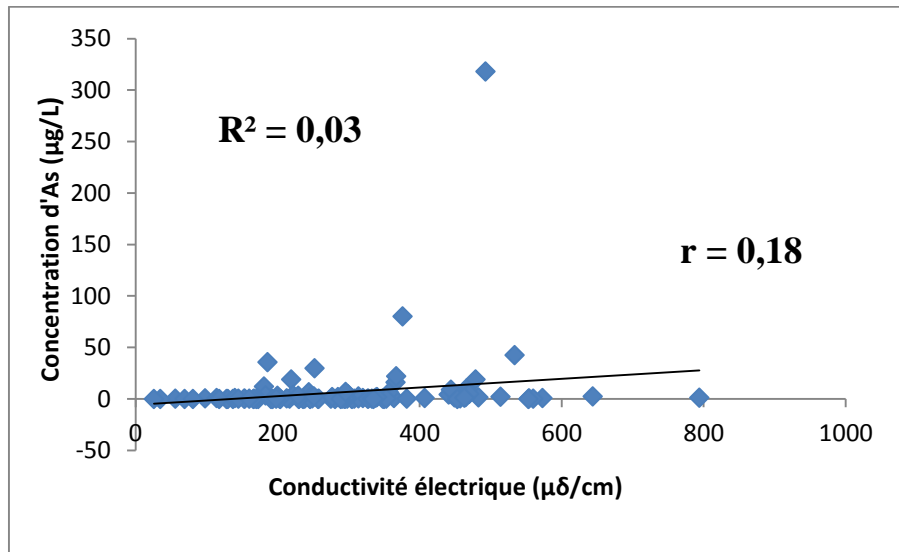


Figure 13: Corrélation entre l'arsenic et la conductivité électrique

➤ Corrélation entre l'arsenic et l'antimoine

La corrélation entre l'arsenic et l'antimoine est forte ($r = 0,83$). Ce sont deux composés du groupe VA du tableau périodique avec des propriétés similaires. Dans la nature il n'existe pratiquement pas d'antimoine à l'état pur il est très souvent combiné à d'autres éléments généralement l'arsenic.

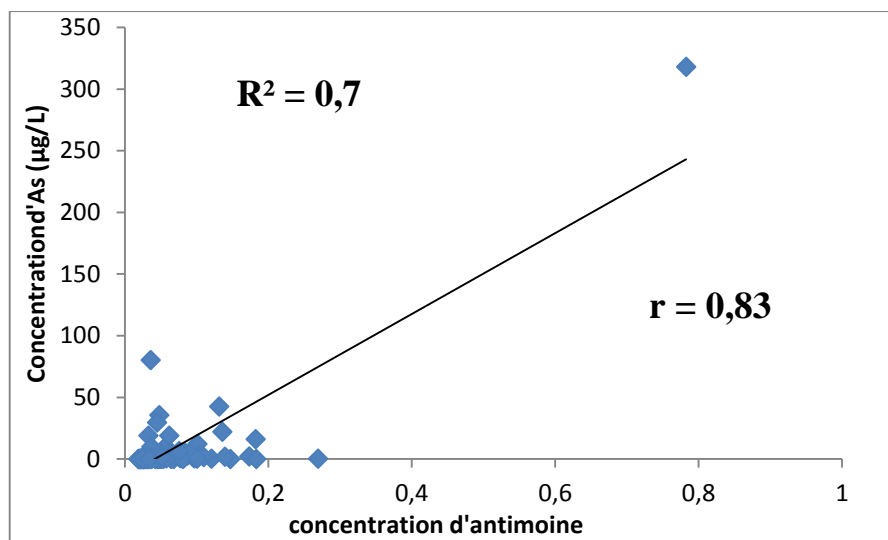


Figure 14: Corrélation entre arsenic et antimoine

III.1.4 Cartographie de la contamination par l'arsenic

➤ Relation avec la géologie

Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du Burkina Faso

L'arsenic est présent dans la totalité des forages échantillonnés, mais 90% de ceux-ci ont des concentrations en arsenic inférieure à la norme. Les forages les plus contaminés ne sont pas confinés dans une localisation géographique particulière, le niveau de contamination dépend de la géologie. La majorité des forages avec des concentrations au-dessus de la norme est logé dans les formations volcano-sédimentaires particulièrement dans les andésites et dans les schistes. Les forages à risques sont localisés à Noumou, Safané (présence de nombreux sites d'orpaillage), Nana, Kahi, Nayerendo, Poura (existence d'une exploitation aurifère fermée et avec plusieurs sites d'orpaillage dans la ville la plus proche), Koper (à proximité d'un abattoir), Boulmoté, Baforo et Labola.

Le tableau ci-dessous concerne les quatorze (14) forages dans lesquels les concentrations d'arsenic sont supérieures à 5 ppb. Il permet de mettre en évidence entre le type de géologie et le niveau de contamination.

Tableau 4: Récapitulatif entre taux d'arsenic ≥ 5 ppb et la géologie

Type de formation	Echantillons avec taux d'As ≥ 5 ppb (%)	Type de roche	Echantillon avec taux d'As ≥ 5 ppb (%)
Volcano- sédimentaire	79	Andésite	36
		Schiste	43
Tarkwaien	14	Grès	14
Granitoïde	7	Granite	7

La carte de la figure 14 montre la distribution spatiale de la géologie dans le sud-ouest du Burkina Faso ainsi que la position des forages échantillonnés et leur niveau de contamination. Elle permet de voir les types de géologie les plus affectés par la pollution.

Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du Burkina Faso

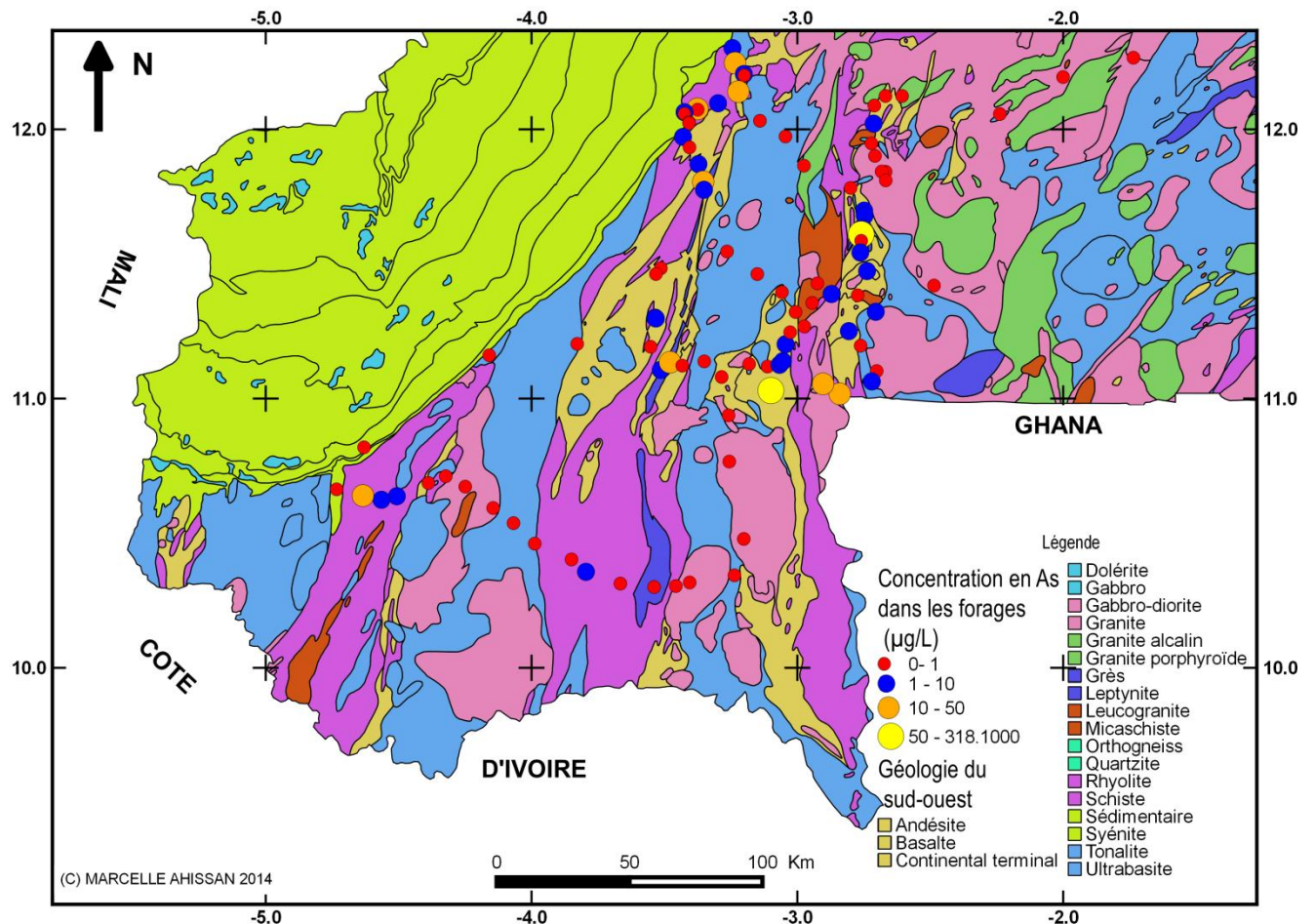


Figure 15: Carte des forages contaminés du sud-ouest du Burkina Faso.

➤ Relation avec la présence de mine

Le sous-sol du Burkina est riche en gisements aurifères, au niveau de la zone d'étude nombre de ces gisements sont en exploitation artisanal. Ces pratiques sont à la base d'un dégagement d'arsenic dans l'environnement. La présence de ces exploitations à proximité des forages pourrait avoir une influence sur leur contamination par l'arsenic car la distance entre les mines et les forages les plus contaminés varie généralement de 1Km à 7 Km. Etant donné la variation de ces niveaux de contamination il serait important de s'interroger sur le rapport entre la durée d'exploitation des minerais et le taux de contamination des forages. La figure 15 permet d'examiner la position des forages par rapport à celle des exploitations aurifères.

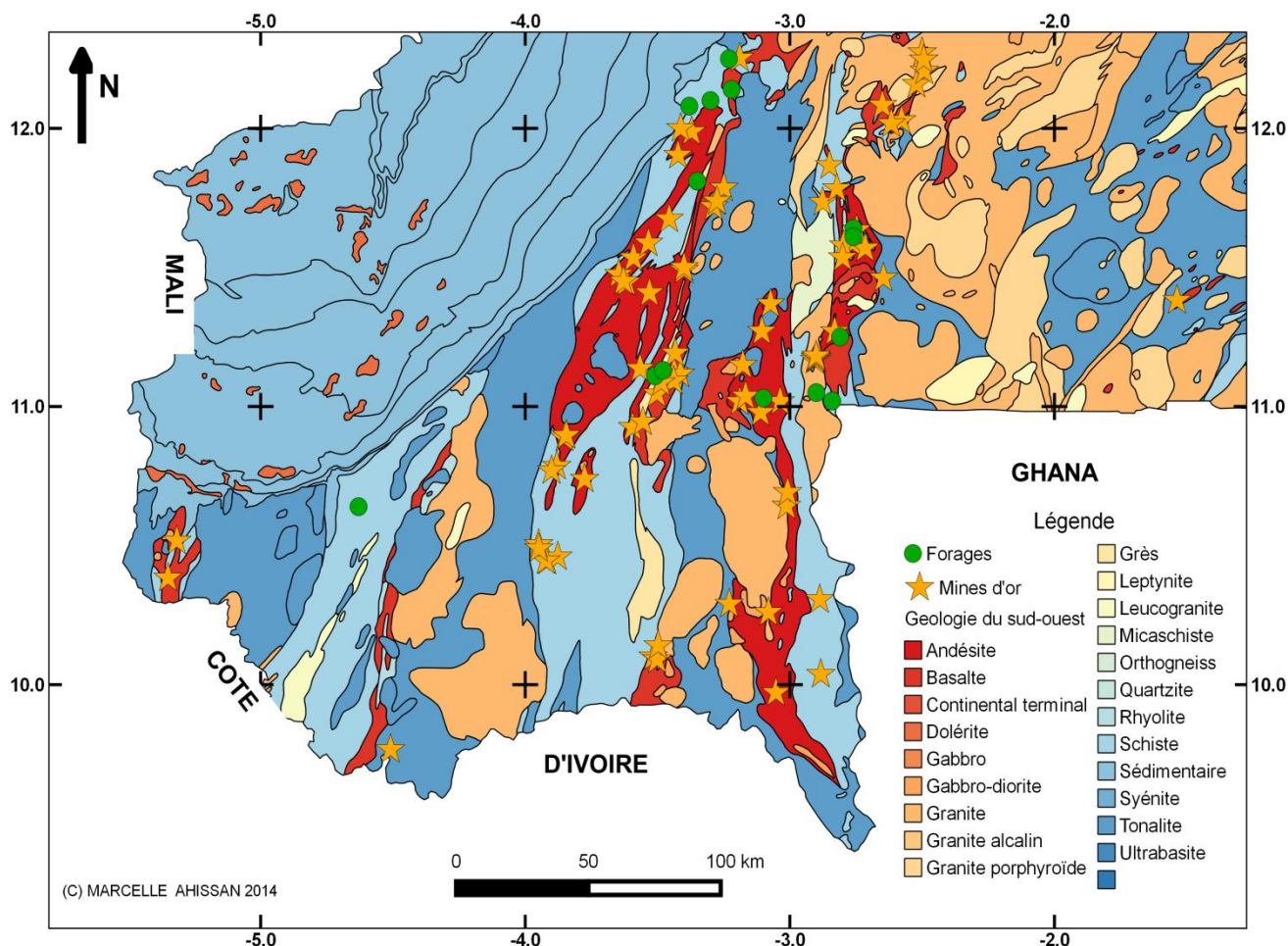


Figure 16: Position des forages contaminés par rapport aux exploitations aurifères

III.2 Discussion

L'arsenic est naturellement présent dans le sous-sol du Burkina Faso sur toute l'étendue du territoire selon les études du BUMIGEB à des concentrations variées et dans différents éléments comme la pyrite, l'arsénopyrite etc... Les forages échantillonnés ont des concentrations allant de 0,01 à 318 $\mu\text{g/l}$ avec des concentrations généralement inférieures à la norme (90%). Par contre les 10% des forages présentant des concentrations supérieures à la norme posent un problème de santé publique pour les populations consommant ces eaux.

Il est souvent difficile de définir les sources minérales des oligoéléments comme l'arsenic dans l'eau en raison de leur présence dans de nombreux minerais, des transferts de masse relativement petits et des complexités liées à la mobilisation et au transport dans des systèmes d'eau souterraines. La mobilisation d'oligoélément est commandée par des facteurs comme le

pH, les conditions redox, la solubilité du minérale, la conductivité électrique et la concentration en oxygène dissout.

Selon de nombreux auteurs (Smedley et Al, 2007 ;Lindberg et al., 2007) le pH alcalin favoriserait une présence de concentration élevé en arsenic comme c'est le cas dans notre étude. Smedley et al (2007) pense que la concentration d'arsenic serait plus élevée dans des aquifère pour lesquels les concentrations en oxygène dissout serrait inférieure à 2 mg/l cependant il est très difficile pour nous d'apporter un jugement à ce niveau puisque les concentrations d'oxygène dissout que nous avons mesurées ne sont pas représentatives des aquifères étudiés vu l'impact du pompage.

Il est difficile de mettre en évidence de façon claire des corrélations entre l'arsenic et les différents facteurs physico-chimiques de l'eau pris individuellement. Cependant la littérature met en évidence les corrélations entre certains paramètres physiques que nous n'avons pas étudiés entre autres le potentiel redox.

Les concentrations élevées d'arsenic sont rencontrées généralement dans le domaine volcano- sédimentaire (particulièrement dans les schistes et les andésites) comme c'est le cas dans la région de Ouahigouya selon les études de Smedley et Al (2007). D'après Welch et al (2000), en général, l'arsenic s'accumule dans les magmas différenciés et est généralement trouvé à des concentrations plus élevées dans les roches volcaniques intermédiaires (andésites) à la composition feldspathique (en rhyolites) que dans les basaltes.

La distance entre les sites d'exploitation minière et les forages a une influence sur la concentration en arsenic de ceux-ci lorsqu'elle est de l'ordre de quelques Km (moins de cinq Km en général). C'est aussi le cas dans les travaux de Barro-Traoré et Al (2008) effectués sur le site d'extraction d'or d'Essakane où les concentrations en arsenic des forages situés sur le site allaient de 60 à 90 ppb tandis que ceux situés à 2 Km du site avaient leur concentration en arsenic en dessous de la norme (10 ppb).

Le Metalyser a tendance à surestimer les résultats ce qui est le plus visible pour les faibles concentrations. Dans ces cas les valeurs du Metalyser sont très élevées par rapport à celles de l'ICPMS et donne parfois des concentrations au-dessus de la norme pour des forages avec des concentrations réelles inférieures à 1 ppb. Ce constat peut être à l'origine de fortes erreurs

dans les interprétations et dans les prises de décisions. D'après notre expérience de l'utilisation du Metalyser plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette surestimation :

- au niveau de la méthode des ajouts dosés plusieurs ajouts au lieu d'un seul effectué auraient pu augmenter le niveau de sensibilité de l'appareil et améliorer les résultats
- le nettoyage des électrodes et du flacon de mesures essentiellement à l'eau conserverait probablement des résidus d'arsenic ce qui expliquerait une surestimation plus grande sur les faibles valeurs.

CONCLUSION

Conclusion

L'étude a permis de montrer que l'arsenic est naturellement présent sur toute l'étendue du sud-ouest du Burkina Faso. Le taux d'arsenic étant généralement faible dans les forages échantillonnés mais atteignant parfois des concentrations alarmantes dans certains forages jusqu'au-delà de 300 µg/L pour une norme de consommation fixée à 10 µg/L.

Les forages les plus contaminés ont leurs aquifères généralement logés dans des roches volcano-sédimentaires particulièrement dans les andésites et les schistes. Les études de corrélation ont montré une corrélation entre la concentration d'arsenic et le pH de l'eau et d'autre part une corrélation entre l'As et concentration d'antimoine. La proximité entre exploitations aurifères et tous les forages ayant des taux d'arsenic au-dessus de la norme ont relevé un impact potentiel de ces activités minières sur les taux élevés de ces forages.

Après les deux tendances obtenues suite à l'étude de comparaison entre les résultats du Metalyser et ceux de l'ICP-MS nous ne pouvons pas conclure avec certitude sur le niveau de fiabilité du Metalyser. Il semblerait que l'utilisation du Metalyser puisse être optimisée par un nettoyage acide des électrodes et du bécher de mesure.

Au terme de notre étude nous pouvons conclure que la problématique de l'arsenic concerne tout le territoire du Burkina, aussi bien le nord-ouest que le sud-ouest.

Recommandations

Au terme de cette étude et après les résultats obtenus nous recommandons :

- ✓ Une Augmentation de la fiabilité du Metalyser en :
 - Optimisant les résultats du Metalyser par un bon nettoyage à l'acide
 - Optimisant le protocole de mesure par plusieurs ajouts
- ✓ Une étude sur le lien entre le niveau de contamination des forages par l'arsenic et la durée d'exploitation des mines les plus proches.
- ✓ Une étude similaire à la nôtre après l'hivernage pour estimer l'effet de l'augmentation du niveau des nappes.

Références bibliographiques

- Barro-Traoré F, Tiendrébéogo S R M, Lallogo S, Tiendrébéogo S, Dabal M, Ouédraogo H (2008) Manifestations Cutanees De L'arsenicisme Au Burkina Faso : Aspects Epidemiologiques Et Cliniques. Mali Medical 2008 Tome Xxiii N°1,7-11
- Camdessus, M., Badré, B., Chéret, I. et Ténrière-Buchot, P.F. ,(2004),. Eau. Edition RobertLaffont, Paris.Jeune Afrique Economie No 360-Février 2005. PP. 40-46.
- Cherry J.A., Shaikh A.U., Tallman D.E., Nicholson R.V. (1979) Arsenic species as an indicator of redox conditions in groundwater - Journal of Hydrology, 43, 373-392
- Deuel, L E, and Swoboda, A R. (1972). Arsenic solubility in a reduced environment. Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 36, 276-278.
- Eary, L E, and Schramke, J A. (1990). Rates of inorganic oxidation reactions involving dissolved oxygen. 379-396 in Chemical Modeling of Aqueous Systems II. ACS Symposium Series. Melchior, D C, and Bassett, R L (editors). 416. (Washington, DC: American Chemical Society.)
- Emmanuel, E. & Vermande, P. 2003. Gestion Intégrée de l'eau en Haïti : Actes du Colloque International réalisé à Port-au-Prince, les 26, 27,28, juin 2002. 310p.
- Ghislaine F (2011), Etude de la faisabilité des techniques membranaires pour le traitement des eaux de consommation contaminées à l'arsenic, Mémoire de MASTER, Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE).
- Hug S.J., Canonica L., Wegelin M., Gechter D., Von Gunten U.(2001) Solar oxidation and removal of arsenic at circumneutral pH in iron containing waters- Environmental Science and Technology, 35, 2114- 2121
- Hung D.Q., Nekrassova O., Compton R.G., (2004), Analytical methods for inorganic arsenic in water: a review – Talanta, 64, 269-277.
- Seguin-J, (2005)- projet réseau SIG-Afrique carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 million.BRGM/RP-54404-FR.13-61p.
- JOHNSON, D., ANDM.PILSON. (1975). The oxidation of arsenic insewater. Environ. Lett.8:157–171.
- Laperche V., Bodénan F., Dictor M.- C., Baranger P. (2003) - Guide méthodologique de l'arsenic appliqué à la gestion des sites et sols pollués. BRGM/RP - 52066- FR, 91 p.

- Lindberg, A.-L., Goessler, W., Grandér, M., Nermell, B., Vahter, M., 2007. Evaluation of the three most commonly used analytical methods for determination of inorganic arsenic and its metabolites in urine. *Toxicology Letters* 168, 310–318.
- Losey, J.E., Vaughan, M., 2006. The economic value of ecological services provided by insects. *Bioscience* 56, 311–323.
- Kim M.J., Nriagu J., Haack S., (2002), Arsenic species and chemistry in groundwater of Michigan - *Environmental Pollution*, 120, 379-390.
- Korte N. E. and Fernando Q. (1991) A review of arsenic(III) in groundwater. *Crit. Rev. Environ. Control* 21, 1±39.
- Matschullat J. (2000) - Arsenic in the geosphere – a review. *Sci. Tot. Environ.*, 249, p.297-312.
- Mandal, B.K., Suzuki, K.T., 2002. Arsenic round the world: a review. *Talanta* 58, 201–235.
- National Research Council (1999) *Arsenic in Drinking Water*, Washington DC, National Academy Press, pp. 27–82
- National Research Council (2001) *Arsenic in Drinking Water. 2001 Update*, Washington DC, National Academy of Sciences, National Academy Press
- Pichard A., Bisson M., Houeix N., Hulot C., Lacroix G., Lefevre J.P., Leveque S., magaud H., Morin A., Cornu L., Gillet C. - 2005 - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Arsenic et ses dérivés. Inéris, 2ème version, 3 février 2005
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry* 17, 517–568.
- Smedley, P.L., Knudsen, J., Maiga, D., 2007. Arsenic in groundwater from mineralised Proterozoic basement rocks of Burkina Faso. *Applied Geochemistry* 22, 1074–1092
- Rodriguez R., Ramos J.A., Armienta A. - 2004 - Groundwater arsenic variations: the role of local geology and rainfall - *Applied Geochemistry*, 19, 245- 250..
- Ullmann Coralie, 2012. Alimentation en eau potable des populations en milieu rural Contamination des eaux souterraines par l'arsenic, Rapport ingénieur Ecole Centrale Nantes
- US Environmental Protection Agency (2001) National primary drinking water regulations; arsenic and clarifications to compliance and new source contaminants monitoring; final rule. *Fed.Regist.*, 66, 6976–7066

Vincent J (2012), Etude de la contamination par l'arsenic dans les eaux de forage: cas de la région du Seno au Burkina Faso, Mémoire de MASTER, Institut Internationale d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement(2iE).

Welch, A. H.; Westjohn, D. B.; Helsel, D. R.; Wanty R. B. *Groundwater* 2000, 38, 589-604

WHO (2006) - Guidelines for drinking-water quality, first addendum to third edition

Zektser I.S. and Everett L.G.(2004). Groundwater resources of the world and their use

UNESCO IHPVI Series on Groundwater No.6. Paris, France, 346 p.

**Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du
Burkina Faso**

ANNEXES

Annexe 1 : Protocole d'analyse pour le Metalyser.....	41
Annexe 2 : Résultats des mesures	42

Annexe 1 : Protocole d'analyse pour le Metalyser

- ✓ Verser la dose de tampon pour l'arsenic
- ✓ Ajouter 70 ml de solution à doser
- ✓ Dans le cas de l'arsenic total ajouter 3 ml d'acide chlorhydrique à 37%
- ✓ Sélectionner As (III+V)
- ✓ Sélectionner conditionner électrode
- ✓ Laisser fonctionner 2 minutes
- ✓ Sélectionner la méthode des ajouts dosés
- ✓ Laisser fonctionner environ 2 minutes
- ✓ Ajouter le standard (280 µl d'une solution d'arsenic de concentration 5ppm)
- ✓ Laisser fonctionner environ 2 minutes, le résultat s'affiche sur l'écran du mini-ordinateur automatiquement.

Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du Burkina Faso

Annexe 2 : Résultats des mesures

N°	Nom du village	pH	O ₂	Tempé-	Conduc-	Lon-	Lati-	Alti-	As tot	As tot
			dissous	rature	tivité	gitude	tude	(mét)	tot	
			mg/l	°C	μδ/cm	degré	degré	m	μg/l	μg/l
1	THEQUI	7,29	2,36	31,9	449	-3,24	12,30	285	17,42	1,558
2	NOUNOU	7,12	2,52	31,9	483	-3,24	12,25	308	2,75	1,673
3	NOUMOU BARRAGE	7,44	1,5	31,7	366	-3,23	12,25	305	18,06	16,26
4	YANKASSO	7,26	1,35	31,9	514	-3,20	12,21	314	9,07	2,017
5	YANKASSO ECOLE	7,09	1,87	32,5	320	-3,20	12,20	320	7,26	0,9883
6	SAFANE	6,47	1,76	32	238	-3,22	12,14	318	6,8	0,2279
7	SAFANEWEETPUMP	7,14	1,55	32,1	534	-3,22	12,14	305	59,65	42,51
8	DA	6,15	2,41	31,1	128	-3,14	12,03	304	5,82	0,1041
9	OURY	6,41	1,52	31,4	257	-3,04	11,97	305	6,06	0,0251
10	SIBY	6,04	2,96	31,5	130	-2,98	11,86	290	5,38	0,0742
11	BOMBOUELA BROUSSE	5,88	2,23	31	98	-3,30	12,10	310	4,42	0,4629
12	BOMBOUELA VILLAGE	6,45	1,84	31,8	244	-3,30	12,10	314	13,68	6,441
13	NANA	7,38	1,17	30,5	367	-3,38	12,08	323	26,23	22,2
14	NANA COURS	5,56	2,17	31	56	-3,37	12,07	305	5,55	0,1603
15	KONA	6,98	1,7	31,8	644	-3,42	12,06	301	4,64	2,362
16	KONA HANDPUMP	6,91	2,04	32,5	573	-3,42	12,06	306	7,52	0,8721
17	ZINA	6,72	1,98	32,4	308	-3,41	12,03	320	12,82	0,2809
18	ZINA MINE	7,13	2,4	32,1	364	-3,41	12,02	328	10,11	0,8341
19	WONA ECOLE	5,96	3,35	32,2	137	-3,43	11,98	359	10,4	0,08975

**Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du
Burkina Faso**

20	WONA HOPITAL	6,78	2,01	32,1	299	-3,43	11,97	361	14,41	4,763
21	BANA ECOLE	5,7	2,81	32,4	69	-3,41	11,93	370	9,64	0,1005
22	MANA	7	1,61	31,7	285	-3,37	11,87	339	10,82	1,757
23	KAHI	6,97	2,13	31,3	219	-3,35	11,81	308	24,15	19,01
24	BANA	6,9	2,37	32	441	-3,35	11,78	308	11,47	4,268
25	HOUNDE ECOLE	5,96	3,33	30,6		-3,51	11,48	325	5,22	0,9409
26	KAMBA	6,82	1,87	31,2	314	-3,54	11,30	324	3,41	2,425
27	KAMBA CSPS	6,57	2,03	32	246	-3,53	11,30	330	7,12	1,488
28	GOMBELEDOUGOU	6,84	5,95	31,2	249	-3,55	11,19	305	6,9	0,5119
29	INKIEDOUGOU	7,25	1,77	30,6	466	-3,51	11,11	271	17,14	9,95
30	NAYERENDO	6,2	2,63	31	181	-3,48	11,13	283	16,98	12,27
31	VESET	6,14	2,9	31,7	167	-3,43	11,12	296	8,61	0,397
32	VEHUT NATURE	6,41	2	30,6	246	-3,35	11,14	290	9,07	0,289
33	KORINGO	6,1	2,23	31,5	154	-3,28	11,08	280	8,98	0,4419
34	VREGA	6,76	1,72	30,7	554	-3,18	11,13	310	8,73	0,5165
35	PONTIABA	6,37	2,15	31,4	292	-3,11	11,12	325	8,54	0,2677
36	DANO LYCEE	6,92	2,78	30,8	794	-3,07	11,13	312	1,61	1,096
37	BAFORE	6,75	2,39	30,8	376	-3,10	11,03	290	6,54	80,19
38	BAKBORA	6,02	3,42	31,8	140	-3,26	10,94	285	6,12	0,8707
39	TANKOURA	6,28	2,04	31,2	204	-3,26	10,77	275	7,36	0,1019
40	LANTAO	6,15	2,04	30,6	191	-3,20	10,48	323	6,77	0,05732
41	SIDAIMOUKA	6,38	2,33	29,7	230	-3,24	10,34	328	12,09	0,1773
42	DIEBANAO	6,8	2,5	29,9	328	-3,41	10,32	337	39,98	0,173

**Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du
Burkina Faso**

43	LAKAR	6,14	1,54	30,3	217	-3,46	10,30	322	14,71	0,1996
44	LOROPENI	6,87	4,72	29,5	304	-3,54	10,30	342	23,3	0,6049
45	LOKOSSO	5,52	3,8	29,8	35	-3,67	10,31	371	28,63	0,1357
46	KIMOGO	6,57	1,91	30	222	-3,80	10,36	324	20,72	3,736
47	OUO	6,09	1,03	30,5	153	-3,85	10,40	339	127	0,4456
48	KWERE	6,26	3,17	30,1	145	-3,99	10,46	354	68	0,2601
49	DANDOUGOU	6,15	0,94	30,3	236	-4,07	10,54	301	38,08	0,02107
50	BANOGO	6,38	1,52	31,2	305	-4,14	10,59	336	16,64	0,044
51	SIDEREDOUGOU	7,03	5,42	31,3	560	-4,25	10,67	319	19,7	0,146
52	DEREDERE	6,43	1,47	30,8	246	-4,32	10,71	320	18,45	0,137
53	GIBERA	6,82	2,15	30,2	457	-4,39	10,69	218	52,45	0,761
54	TIEFORA	6,69	1,24	29,6	200	-4,51	10,64	279	17,16	3,226
55	TIEFORA SORTIE	6,87	2,42	29,9	183	-4,56	10,62	299	18,39	3,358
56	LABOLA	7,31	1,76	29,6	252	-4,63	10,64	315	41,96	29,69
57	BOUNOUNA	4,85	3,53	30,5	81	-4,73	10,66	327	13,45	0,045
58	TOUSSIANA MOSQUE	5,4	5,44	29	26	-4,63	10,82	489	8,3	0,023
59	YEGRESSO	6,81	2,26	30,4	314	-4,16	11,16	360	7,11	0,711
60	MAKANIEREDOUGOU	6,54	1,48	30,9	275	-3,83	11,20	283	32,1	0,184
61	HOUNDE ENTREE	7,18	1,95	31,1	407	-3,53	11,46	335	10,44	0,997
62	PA	6,08	2,2	32	118	-3,26	11,55	309	8,9	0,059
63	BAPORO	6,69	1,86	31,6	350	-2,80	11,78	265	11,53	0,126
64	GOUNGHIN	6,26	3,54	32,3	173	-2,24	12,06	300	10,71	0,030
65	SANKOUNSSI	6,3	2,72	32	230	-2,00	12,19	314	14,1	0,043

**Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du
Burkina Faso**

66	TANGHIN DASSOURI	6,62	2,07	30,6	281	-1,74	12,27	348	12,8	0,014
67	TENADO	6,17	1,86	32,1	170	-2,61	12,12	283	9,53	0,103
68	BAVILA	6,48	1,63	31,6	258	-2,67	12,12	288	0	0,148
69	GUIGUI	6,3	2,91	32,3	193	-2,71	12,09	275	9,63	0,110
70	ZAMO PREFECTURE	6,57	2,42	32,1	213	-2,72	12,03	282	12,54	0,730
71	ZAMO CENTRE	6,96	1,57	31,4	229	-2,71	12,02	276	15	2,970
72	BOUMGA	7,13	1,95	31,8	298	-2,72	11,95	299	9,84	0,145
73	LIA	6,15	2,68	31,8	166	-2,71	11,90	280	10,8	0,077
74	GABOU ENTREE	6,25	3,85	31,1	553	-2,67	11,84	282	7,8	0,123
75	GABOU VILLAGE	6,11	2,13	31,3	160	-2,68	11,84	283	11,46	0,176
76	LABA	8,18	1,51	31,1	203	-2,67	11,81	280	11,6	0,173
77	NIMILAGE	6,52	2,68	31,3	295	-2,74	11,70	254	5,2	0,186
78	NIMILAGE CENTRE	6,56	1,71	31,3	338	-2,75	11,70	253	22,36	1,182
79	KIMPORE	7,48	3,45	31,9	465	-2,75	11,68	259	4,7	1,768
80	DARESSALAM	7,12	2,02	31,2	357	-2,76	11,64	246	12,54	6,078
81	POURA 1	7,33	2,61	31	493	-2,76	11,61	280	448,54	318,1
82	POURA INFANTINE	6,72	2,09	31,8	348	-2,76	11,59	289	27,5	0,154
83	FARA ABATOIR	7,37	1,8	31,6	456	-2,76	11,54	268	15,67	4,357
84	RAIKAI	6,97	2	31,6	277	-2,74	11,47	281	12,51	1,953
85	TONE	6,52	1,76	31,6	295	-2,77	11,38	266	10,07	0,383
86	NAOUYA	6,97	2,29	31,6	295	-2,71	11,32	264	17,52	2,119
87	BOUDANE	7,19	2,34	31,7	444	-2,81	11,25	249	16,86	8,974
88	BON	6,69	3,28	31,8	327	-2,76	11,20	266	17,52	0,396

**Etat des lieux de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic dans le sud-ouest du
Burkina Faso**

89	NIEGO	6,53	1,67	31,4	453	-2,70	11,10	263	11,84	0,072
90	BEKOTENG	6,79	1,72	31,6	251	-2,72	11,06	269	10,4	2,606
91	BOULMOTE	7,42	1,66	31,6	479	-2,84	11,02	253	29,36	19,01
92	KOPPER	7,2	1,56	31,4	186	-2,90	11,05	264	37,13	35,65
93	BAGANE	7,25	2,39	30,5	470	-3,05	11,14	292	14,21	4,925
94	LEFI	6,95	3,16	30,5	463	-3,04	11,20	285	8,43	1,286
95	NIENGOUMA	7,06	4,31	31,3	294	-3,03	11,25	286	7,28	0,936
96	YABGUIN	5,52	2	31,6	294	-2,97	11,27	271	0	0,605
97	FAFO	6,55	1,61	30,5	333	-3,01	11,32	279	6,61	0,422
98	ZANGONE	6,72	2,39	31,6	353	-2,94	11,36	297	6,9	0,190
99	ABA	6,67	1,06	31,5	340	-2,87	11,39	267	7,15	1,881
100	INDINI	6,18	1,78	33	198	-2,92	11,43	281	7,7	0,210
101	GBATARI	6,65	1,37	31,9	382	-2,49	11,42	285	7,55	0,202
102	KOTI	6,59	1,01	31,6	289	-3,06	11,40	311	8,4	0,075
103	KOULOHO	6,47	1,15	31,1	335	-3,15	11,46	273	6,4	0,096