



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement  
International Institute for Water and Environmental Engineering



# Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

---

**Mémoire de fin d'étude de Master d'ingénierie de l'eau et l'environnement Option  
environnement**

Présenté par : EBANGA Félix Landry  
10/06/2010

Encadreurs :

Angelbert Chabi BIAOU, PhD,

Professeur A.H. MAIGA,

Dr Boukary SAWADO.

Promotion 2009-2010

Mémoire N°

## DEDICACE.

Ce mémoire est dédié à :

- Ma feuè grand-mère **EFOUBA Fidèlia** qui nous a donné toute l'affection de son grand cœur.
- Mon père **EBANGA Félix** qui m'a toujours soutenu et encouragé dans mes études ; et qui a su être présent dans les moments difficiles ;
- Ma mère **NDZIE Barbare** pour toute l'amour qu'elle m'a toujours comblé depuis ma tendre enfance;
- Mes frères et sœurs : **MINTANGA Gèneviève, MINTANGA Gisèle, AKOLO Georges; MENGUE Solange ; BIBJOGO Jeanne ; AVOULA Berthe et MENDJA Lydie** qui me soutiennent financièrement et moralement ;
- Mes neveux et nièces que j'aime énormément.
- Toutes les victimes de l'arsénicisme dans le monde.
- Tous ceux qui ont toujours cru à mon succès et à ma réussite.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

## **REMERCIEMENT.**

Je remercie le Dieu Tout Puissant pour toutes les grâces et bienfaits qu'il m'a toujours accordés. A lui soit toute la gloire pour l'éternité !

J'exprime toute ma reconnaissance au Dr Angelbert Chabi BIAOU (enseignant chercheur en Hydraulique) et à toute l'équipe d'encadrement qui ont accepté la responsabilité de ce mémoire et qui m'ont prodigué de précieux conseils tout au long de celui-ci. Qu'ils soient assurés de mon profond respect.

Je tiens tout particulièrement à témoigner ma plus vive reconnaissance au Dr WETHE Joseph pour l'aide qu'il a eu à m'apporter pendant l'élaboration de ce mémoire.

Je souhaite exprimer ici mes plus vifs remerciements au personnel enseignant du 2iE pour la formation qu'ils ont eu à me donner durant mon parcours scolaire.

J'adresse également ma gratitude à mes précieux amis qui m'ont apporté leur soutien durant mes cinq (5) années de formation au 2iE.

Merci à Mlle OUEDRAOGO Séverine Nikèse pour toute sa gentillesse et son soutien moral.

Mille fois merci à la communauté camerounaise au Burkina Faso qui était en quelque sorte ma seconde famille au Burkina Faso.

Merci à toutes les personnes qui m'ont conseillé durant la rédaction : NGANOAH Victoire Sylvie, Aziz MBENDA, MBENDJI Didier Brice, SANOGO Abdoul Kader.

Aux étudiants de 2ie, en particulier mes camarades de Master 2<sup>ème</sup> année avec qui nous avons partagé de très bons moments.

J'adresse tous mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail.

Tout ceux qui maladroitement j'aurai oublié, vous m'avez été d'un apport non Négligeable.

## **LISTE DES SIGLES ET DES ABREVIATIONS.**

<b>2Ie :</b>	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
<b>As :</b>	Arsenic.
<b>CDI :</b>	Centre de Documentation et d'Information.
<b>DANIDA :</b>	coopération danoise.
<b>DGRE :</b>	Direction Général des Ressources en Eau.
<b>DMA :</b>	Acide Diméthylarsinique.
<b>IDH :</b>	Indice du Développement Humain.
<b>MAHRH :</b>	Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques.
<b>MMA :</b>	Acide Monométhylarsonique.
<b>OMS :</b>	Organisation Mondial de la santé.
<b>PEEN :</b>	Programme Eau et Environnement du Nord.
<b>PNUD :</b>	Programme des Nations Unies pour le Développement.
<b>SODIS:</b>	SOLar water DISinfection.
<b>SORAS:</b>	Solar Oxidation and Removal of Arsenic.
<b>TMAO:</b>	Acide Triméthylarsine.
<b>USD:</b>	Dollar américain.

## TABLE DE MATIERES

DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENT.....	iii
LISTE DES SIGLES ET DES ABREVIATIONS.....	iv
TABLE DE MATIERES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTES DES CARTES ET DES PHOTOS.....	x
LISTE DES EQUATIONS.....	xi
AVANT PROPOS.....	xii
RESUME.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCTION.....	1
Problématique.....	1
Objectif de l'étude.....	3
Objectifs spécifiques.....	3
Approche méthodologique et outils nécessaires.....	4
CHAPITRE I: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ARSENIC (GENERALITES SUR L'ARSENIC).....	5
1.1 Les propriétés physico-chimiques.....	5
1.2 Les différentes origines de l'arsenic.....	6
1.2.1 Origines naturelles.....	6
1.2.2 Origines anthropiques.....	6
1.3 La spéciation et transformation de l'arsenic.....	7
1.3.1 Arsenic inorganique.....	8
1.3.2 Arsenic organique.....	10
1.4 La toxicité de l'arsenic.....	11
1.4.1 Les voies d'expositions.....	11
1.4.2 La distribution de l'arsenic dans l'organisme humain.....	12
1.4.3 Les principaux effets toxiques de l'arsenic pour l'homme.....	13
1.4.4 Les limites dans la détermination des conséquences de la consommation d'eaux contaminées par l'arsenic.....	13
1.5 Les méthodes d'analyses de l'arsenic dans l'eau.....	14

1.5.1	Méthodes d'analyses de l'As(Total). .....	14
1.5.2	Méthodes d'analyses de l'As(III) et l'As(V). .....	15
1.6	La réglementation concernant l'arsenic. ....	15
1.6.1	Eaux destinées à la consommation humaine. ....	15
1.7	L'élimination de l'arsenic dans les eaux destinées a la consommation humaine. ....	16
1.7.1	Prétraitement. ....	16
1.7.2	Traitement des eaux. ....	22
CHAPITREII : LA METHODOLOGIE DE L'ETUDE. ....		24
2.1	Le cadre logique. ....	24
2.2	La recherche documentaire. ....	24
2.2.1	L'interrogation des banques de données. ....	24
2.2.2	La consultation des documents dans les centres de documentation et d'information (CDI). ....	24
2.2.3	La consultation des sites internet. ....	25
2.3	Le traitement des données. ....	25
2.4	La rédaction du rapport final. ....	25
CHAPITRE III: ETUDE DE CAS AU BURKINA FASO, LA CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA ZONE DE OUAHIGOUYA. ....		26
3.1	Présentation de la zone d'étude. ....	26
3.1.1	Cadre physique. ....	26
3.1.2	La géologie. ....	26
3.1.3	L'hydrogéologie. ....	28
3.2	La réglementation sur l'arsenic au Burkina Faso. ....	29
3.3	La présence de l'arsenic dans les eaux souterraines dans la zone de Ouahigouya. ....	29
3.3.1	La situation. ....	29
3.3.2	Les différentes concentrations d'arsenic dans les sites contaminés. ....	30
3.3.3	La localisation des sites à risques potentielles de contamination des eaux souterraines. ....	32
3.4	Les sources de l'arsenic dans les eaux souterraines dans la zone de Ouahigouya. ....	34
3.4.1	Les sources naturelles. ....	34
3.4.2	Les sources anthropiques. ....	34
3.5	Les processus de contamination des eaux souterraines dans la zone de Ouahigouya. ....	35
3.5.1	L'extraction des eaux par pompage (contamination géologique). ....	35
3.5.2	L'utilisation de la terre provenant des sites d'orpaillage (contamination minière). ....	35
3.6	Manifestations cutanées de l'arsénicisme dans la zone de Ouahigouya. ....	35

CHAPITREIV : PROPOSITION DE TECHNIQUES DE TRAITEMENT DE L'ARSENIC POUR LES SITES CONTAMINEES AU BURKINA FASO.....	37
4.1 Le contexte local au Burkina Faso.....	37
4.2 Procédé de traitement par filtration.....	38
4.2.1 La filtration sur charbon actif.....	38
4.2.2 La filtration sur sable enrobé d'oxydes de fer.....	40
4.3 Commentaires/analyses :.....	43
CHAPITREV: LES LIMITES DE L'ETUDE.....	44
LA CONCLUSION GENERALE ET LES RECOMMANDATIONS.....	45
5.1 La conclusion générale.....	45
5.2 Les recommandations.....	45
BIBLIOGRAPHIE.....	47
ANNEXES.....	54

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau 1:</b> Quelques propriétés physicochimiques de l'arsenic. ....	5
<b>Tableau 2:</b> Statistiques sommaires pour les échantillons analysés d'eaux souterraines provenant des forages et des puits (l'échantillon numéroté : 36 forages et 9 puits). ....	31
<b>Tableau 3:</b> Valeurs de concentrations arsenicales dans divers minéraux naturelles. ( sources des données: Stewart, 1963; Baur and Onishi, 1969; Boyle and Jonasson, 1973; Dudas, 1984; Arehart et al., 1993; Fleet and Mumin, 1997; Picler et al., 1999; Paktunc et al.,).....	54
<b>Tableau 4:</b> Valeurs de pKa d'après Smith et Martell (1976-1982), T=25°C et I=0 mol/L Constantes physico-chimiques : Handbook of Chemistry and Physics, 1996-1997. ....	55
<b>Tableau 5:</b> Paramètres analytiques obtenus par différentes techniques de détection de l'arsenic inorganique dans les échantillons d'eau durant les 10 dernières années (source : Hung et al, 2004) .....	56
<b>Tableau 6:</b> normes nationales relatives à la concentration maximale en arsenic dans les eaux destinées à la consommation humaine (source : Yamamura et al, 2001). ....	57
<b>Tableau 7:</b> Comparatif des différentes techniques de traitement pour l'élimination de l'arsenic dans l'eau. ....	58
<b>Tableau 8:</b> Comparaison des concentrations arsenicales ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) de divers puits et forages déterminés à temps différents. Les analyses de 2004 étaient non-filtrées ; 2005 ont été filtrées. ....	59

## **LISTE DES FIGURES**

<b>Figure 1:</b> Principales espèces arséniées détectées dans l'environnement. ....	8
<b>Figure 2:</b> Spéciation de As (V) en fonction du pH. ....	9
<b>Figure 3:</b> Spéciation de As (III) en fonction du pH. ....	9
<b>Figure 4:</b> Diagramme d'équilibre (potentiel, pH), d'après Lombi et al. (1999). ....	10
<b>Figure 5:</b> le métabolisme des différentes espèces arséniées chez l'homme.....	12
<b>Figure 6:</b> Variation de concentration d'As(V) avec l'arsenic total (AsT).....	31
<b>Figure 7:</b> Variation de la concentration arsenicale dans les eaux souterraines avec la profondeur de puits ou de forage.....	32
<b>Figure 8:</b> la composition détaillée du filtre Kanchan.....	42

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

## **LISTES DES CARTES ET DES PHOTOS.**

### **Les cartes :**

**Carte 1:** Carte géologique de la zone de Ouahigouya présentant les concentrations d'arsenic dans les forages et les puits où ont été prélevés les échantillons (Smedley et al. 2007). .....33

**Carte 2:** la répartition mondiale des problèmes arsenicaux dans les eaux souterraines et l'environnement (mis à jour par Smedley et Kinniburgh, 2002). .....61

### **Les photos :**

**Photo 1:** Hyperkératose au niveau de la plante des pieds et de la paume de main chez une femme de 45 ans. ....36

## LISTE DES EQUATIONS.

<b>Equation 1:</b> Couples redox des espèces associées à l'arsenic. ....	17
<b>Equation 2:</b> Equation d'oxydoréduction de l'arsenic en milieu acide (<7). ....	17
<b>Equation 3:</b> rapport stœchiométrique électronique relatif à l'arsenic et à l'oxydant. ....	17
<b>Equation 4:</b> Equation d'oxydation de l'arsenic au le peroxyde. ....	18
<b>Equation 5:</b> Equation d'oxydation de l'arsenic à l'ozone.....	18
<b>Equation 6:</b> Equation d'oxydation de l'arsenic à l'hypochlorite de sodium. ....	19
<b>Equation 7:</b> Equation d'oxydation de l'arsenic au permanganate de potassium. ....	19
<b>Equation 8:</b> Equation d'oxydation de l'arsenic au dioxyde de manganèse. ....	20
<b>Equation 9:</b> Equation d'oxydation de l'arsenic au chlorure ferrique.....	20
<b>Equation 10:</b> Différentes équations mettent en évidence l'oxydation de l'arsenic par la limaille de fer. 21	
<b>Equation 11:</b> Equation d'oxydation de l'arsenopyrite par l'oxygène. où l'arsenic est libéré, avec le fer, le sulfate et l'acide .....	34
<b>Equation 12:</b> Equation d'oxydation de la pyrite par l'oxygène.....	34

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

## **AVANT PROPOS.**

L'institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2iE (ex groupe EIER-ETSHER) est une grande école qui a pour mission de contribuer au développement économique et social des États Africains dans les domaines de l'eau, l'énergie, l'environnement et les infrastructures ([www.2ie-edu.org](http://www.2ie-edu.org)). En cinquième année de formation, fin du cycle master, les connaissances théoriques et pratiques acquises à travers les cours magistraux, les travaux pratiques et les sorties pédagogiques sont couronnées par un travail de mémoire de recherche de quatre (04) mois. C'est dans ce cadre que nous avons eu l'honneur de travailler sur le thème : *la problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement*. Le sujet a été proposé et effectué au 2iE à travers par l'UTER GVEA (Gestion et de la Valorisation de l'Eau et de l'Assainissement).

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

## **RESUME.**

L'occurrence de l'arsenic dans les eaux souterraines est un phénomène grandissant au Burkina Faso. En effet, plusieurs régions dans le pays sont touchées par cette contamination. C'est dans ce contexte qu'intervient la présente étude.

Cette étude décrit l'état des lieux, les modes de contaminations des eaux souterraines ainsi que les effets de l'arsénicisme (maladie liée à l'arsenic) dans la zone de Ouahigouya. Elle propose aussi des solutions de traitement adaptées au contexte local des sites contaminés de Burkina Faso.

Notre étude s'est basée sur une recherche documentaire approfondie afin de mieux cerner tous les contours du problème dans la zone de Ouahigouya. L'interrogation des bases de données, la consultation des documents dans les Centres de documentation et d'information (CDI) des structures de la place et les recherches sur certains sites internet ont constitué des étapes importantes de ce travail.

Les résultats obtenus lors de notre étude nous amènent à faire une série de recommandations pour des études plus poussées sur le sujet.

Mots clés: arsenic; eaux souterraines; contamination; Ouahigouya; arsénicisme.

**ABSTRACT.**

The occurrence of arsenic in groundwater is a growing phenomenon in Burkina Faso. Several regions in the country are affected by this contamination. The present study has been set within this context.

This study describes the current situation, the modes of contamination for groundwater and the effects of arsenicosis (arsenic-related disease) in the area of Ouahigouya. It also offers treatment solutions relevant to local sites contaminated from Burkina Faso.

Our study is based on an extensive literature review to better understand all the scope of the issue in the area of Ouahigouya. The database queries, consultation of documents in the Commission's offices and research on some web sites remain important steps for this work.

The results of our study lead us to make a series of recommendations for further studies on the topic.

Keywords: arsenic; groundwater; contamination; Ouahigouya; arsenicosis

## **INTRODUCTION.**

La Terre est constituée pour l'essentiel d'éléments chimiques, parmi lesquels les métaux occupent une place tout à fait privilégiée, car utilisés très précocement par l'Homme pour chasser, se battre et ensuite travailler. Ce qui fait que les métaux lourds paraissent étroitement liés à la civilisation. L'or, l'argent, le cuivre ont permis de fabriquer les pièces de monnaie, le plomb a servi à la fabrication des canalisations, l'aluminium a permis la fabrication des tôles...

De plus sous leur forme électriquement chargée, dénommées les cations (ions positifs, électroniquement déficients) certains métaux sont indispensables à la vie. Parmi les plus abondants, on trouve le Fer (Fe) et le Zinc (Zn) ; d'autres ne sont essentiels qu'à faible dose, comme le Cuivre (Cu) ou le Cobalt (Co) ce sont des oligoéléments.

Sont considérés comme métaux lourds, tout élément chimique dont la masse volumique est supérieure à  $5\text{g/cm}^3$ . Dans ce sens, certains n'hésitent pas à classer dans les métaux lourds, l'aluminium (Al) dont chacun connaît pourtant la légèreté, le titane (Ti) métal aussi très léger et peu toxique, même le sélénium (Se) et l'arsenic (As) qui ne sont même pas des métaux, car classés dans la catégorie des métalloïdes.

L'homme a utilisé les métaux lourds et, continue à les utiliser. Parfois avec excès, souvent avec inconscience ou pire, en toute conscience. Or cet excès dans les composantes de l'environnement telles que : l'eau, l'air, le sol... s'avèrent être nocifs pour la santé humaine car ces métaux lourds sont aussi des toxiques puissants.

De nos jours, l'arsenic se présente comme un véritable poison dans les eaux de boisson de plusieurs pays dans le monde notamment l'Argentine, le Bangladesh, le Cambodge, le Chili, la Chine, les Etats-Unis d'Amérique, la Hongrie, le Mexique, la Roumanie, la Thaïlande et le Viet Nam. En Asie on estime à 50 millions, le nombre de personnes qui sont exposées à ce risque.

En effet, l'ingestion de l'arsenic dans l'eau représente un problème majeur de santé publique qui affecte plusieurs personnes dans le monde entier car les nappes phréatiques sont utilisées comme source d'eau potable.

Du fait que l'ingestion de l'arsenic soit toxique, l'OMS a donc fixé une valeur limite à ne dépasser pour éviter une intoxication. Cette valeur guide est de  $10\mu\text{g/L}$  et est appliquée dans la majorité des pays touchés par cette contamination.

### **Problématique.**

Au Burkina Faso, pays de l'Afrique de l'ouest, certaines zones se sont révélées être riches en arsenic et ont fait l'objet d'investigations. On peut citer ici : à Ouahigouya dans la région du nord (contamination naturelle) et très récemment dans le barrage de Kouna dans la région du sahel (contamination dite externe), source à mettre. Mais également aussi dans d'autres départements bordant des zones géologiques dites de socle cristallin du Burkina Faso.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Dans ces zones, on a également remarqué l'apparition des maladies liées à une intoxication à l'arsenic : vomissements, douleurs abdominales, diarrhées sanguinolentes, hyperkératose, etc.

C'est la raison pour laquelle ce travail scientifique se propose d'étudier l'ampleur du phénomène à l'échelle nationale, les modes de transformations de l'arsenic de sa forme 3 à sa forme 5, en fonction des formations géologiques et hydrogéologiques. Ce qui est demandé au travail de master en cours est de faire l'état de l'art sur le sujet, de comprendre sommaire les concentrations relatives et proposer un mode sommaire de traitement à l'échelle du ménage.

Il est important de faire remarquer qu'il existe peu d'études sur cette problématique de la gestion de l'arsenic au Burkina Faso. Les études réalisées à ce sujet sont les suivantes :

- « Une particularité bien localisée, heureusement, présence d'arsenic en concentration toxique dans un village près de Mogtédou » (S. J. de JONG et A KIKIETTA). En 1979, Les investigations de cette étude ont montré que les eaux souterraines des trois forages du village, contenaient des fortes concentrations d'arsenic.
- « Les manifestations cutanées de l'arsénisme au Burkina Faso : aspects épidémiologiques et cliniques » de Barro-Traoré, F ; Tiendrebéogo S .R.M ; Lallogo, S ; Tiendrebéogo, S ; Dabal, M ; Ouédraogo, H. cette étude met en exergue les différentes maladies liées à une intoxication chronique à l'arsenic au Burkina Faso. Elle a été faite en 2006 dans la ville d'Essakane.
- « Arsenic in the groundwater from mineralised protozoic basement rock of Burkina Faso », en 2007 de P.L. Smedley; J. Knudsen et de D. Maiga. Cette étude décrit la hydrogéochimie et la distribution de l'arsenic dans les eaux souterraines dans les eaux souterraines des zones nouvelles investiguées au Burkina Faso, en occurrence la ville de Ouahigouya.

Ces études ne sont pas approfondies pour faire un diagnostic détaillé de la gestion de l'arsenic au Burkina Faso mais elles peuvent contribuer à la mise en place de cette gestion par les différentes informations qu'elles fournissent.

Du fait qu'il s'agisse là, d'une première étape de collecte d'informations scientifiques générales sur l'arsenic, les statistiques et informations citées dans le présent rapport peuvent constituer une base de réflexion, au groupe d'experts commis à cette tâche.

De nos jours en principe, le gouvernement Burkinabé dispose d'un comité interministériel chargé de résoudre ce problème (arsenic comité 2005). Le comité de suivi est chargé de suivre les actions liées à une

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

meilleure connaissance de la problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic. De façon spécifique, il est chargé :

De suivre et de contrôler la qualité des eaux souterraines menacées par l'arsenic ;

De superviser les investigations visant à appréhender l'ampleur de cette contamination ;

De veiller à la mise en œuvre de mesures de remplacement dans le cas des forages à teneur élevée en arsenic ;

D'appuyer l'information et la sensibilisation des acteurs ;

De contribuer à la mobilisation des ressources nécessaires aux travaux ;

D'examiner et d'approuver les rapports d'études qui ont été produits.

Afin d'atteindre ses objectifs, le comité a élaboré le présent plan d'action national dont la mise en œuvre accuse certes un retard mais des actions remarquables ont été réalisées.

### **Objectif de l'étude.**

L'objectif général de ce travail est d'étudier les interactions de l'arsenic avec les eaux souterraines afin de proposer des solutions de traitement.

### **Objectifs spécifiques.**

Les objectifs spécifiques qui nous permettront d'atteindre notre objectif principal sont les suivantes :

Faire l'état de lieu de la contamination des eaux par l'arsenic dans la zone de Ouahigouya.

Etudier les modes de transformations d'une forme à l'autre et les facteurs (hydrogéologiques) qui catalysent ces transformations pour le cas du Burkina Faso.

Etudier l'impact des activités anthropiques sur la présence de l'arsenic dans les eaux souterraines au Burkina Faso.

Etudier l'influence des formations géologiques et hydrogéologiques sur la présence de l'arsenic dans les eaux souterraines.

Etudier les interactions (rapports) entre les zones contaminées et les zones présentant les problèmes de santé.

Proposer, en accord avec ce qui se passe ailleurs, des solutions sommaires pour son traitement.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

### **Approche méthodologique et outils nécessaires.**

*Ce travail de recherche consistera essentiellement à dresser l'état du phénomène de contamination à l'arsenic dans le but d'en faire une étude approfondie aboutissant à des solutions de traitement durables.*

*Pour se faire, la méthodologie de ce travail suivra les étapes suivant :*

Revue documentaire.

Etude des modes de transformation d'une forme à l'autre en fonction des formations géologiques et hydrogéologiques en place et apprécier l'impact anthropique (une bonne partie proviendra de l'étude bibliographique ci-dessus) ;

Etude des problèmes de santé que causent ces contaminations et établir les corrélations de ces problèmes de santé observés pour le cas du Burkina avec les zones contaminées ;

Etude des modes de traitement (suivant les résultats de l'étude bibliographie) et proposer une solution de traitement, qui peut être mise en œuvre facilement par les ménages ;

Rédaction du mémoire final.

Le présent document est subdivisé en cinq (04) parties qui sont :

- La revue bibliographique ;
- La méthodologie de l'étude ;
- L'étude de cas au Burkina Faso : la contamination des eaux souterraines dans la zone Ouahigouya;
- La proposition des techniques de traitement de l'arsenic pour les sites contaminés au Burkina Faso.

## CHAPITRE I: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ARSENIC (GENERALITES SUR L'ARSENIC).

### 1.1 Les propriétés physico-chimiques

L'arsenic est un métalloïde qui se présente physiquement en un solide cristallisé ayant une structure hexagonale ou rhombique. Il appartient au groupe 15 de la classification périodique et possède des propriétés communes avec les éléments de cette famille (azote, phosphore, bismuth, antimoine). L'arsenic, 20<sup>ième</sup> élément en abondance dans la croûte terrestre, entre dans la constitution de plus de 245 minéraux (Mandal et Suzuki, 2000).

L'arsenic est une substance naturellement présente dans l'environnement, il existe sous trois formes allotropiques : jaune ( $\alpha$ ) ; noire ( $\beta$ ) et grise ( $\gamma$ ). Sa forme ( $\gamma$ ) est la plus stable et la plus commune. A l'état pur, l'arsenic est un métal gris assez cassant.

Tableau 1: Quelques propriétés physicochimiques de l'arsenic.

Propriétés	Valeurs
Numéro atomique	33
Masse atomique	74.9216
Température de fusion	814°C (36 atm)
Point d'ébullition :	sublime à 613 /615 °C
Degré d'oxydation	-III (arsine) ; 0 (arsenic métallique); +III (arsénite) ; +V (arséniate)
Densité	5,727
Configuration électronique	[Ar] 3d10 4s2 4p3

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

De nombreuses substances contenant de l'arsenic (inorganique et organique) sont d'origine naturelle, mais bien d'autres encore proviennent des activités humaines.

## **1.2 Les différentes origines de l'arsenic.**

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

### **1.2.1 Origines naturelles.**

Les contaminations naturelles ont pour la plupart une origine géologique. A la faveur de divers processus biogéochimique, l'arsenic peut se dissoudre dans l'eau et parvenir dans les aquifères, les sources et les cours d'eau (Kim et al, 2003 ; Hug et al, 2001 ; Smedley et Kinniburgh, 2002 ; Mandal et Suzuki, 2002). Les sources naturelles d'arsenic dans le monde comprennent généralement : les sédiments volcaniques, les minéraux sulfurés, les oxydes métalliques et les remontées des sources thermales. Le tableau dans l'annexe(1) nous présente les divers types de minéraux et leurs teneurs en arsenic.

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. La carte (annexe8) de distribution des cas de contamination des eaux souterraines et de l'environnement, est la suivante :

Les cas plus nombreux sur la carte (annexe8), sont ceux liées à la minéralisation et les activités minières associés. On peut citer parmi ces cas celui du nord du Burkina Faso.

### **1.2.2 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 est aussi imputable à des pesticides agricoles et à des substances chimiques utilisées dans le traitement du bois qui contiennent l'arsenic.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

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).

### **1.3 La spéciation et transformation de l'arsenic.**

La spéciation de l'arsenic est importante dans l'environnement car les effets toxiques de l'arsenic dépendent de son état d'oxydation lors de l'exposition (Jain et Ali., 2000).

L'arsenic existe rarement à l'état pur dans l'environnement. Il se combine souvent à d'autres éléments comme l'oxygène, le chlore et le soufre pour former des composés arsenicaux inorganiques (composés les plus répandus dans l'eau). Il se combine également avec le carbone et l'hydrogène pour former des composés arsenicaux organiques. Les formules des espèces les plus couramment détectées dans l'environnement sont présentées ci après :

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

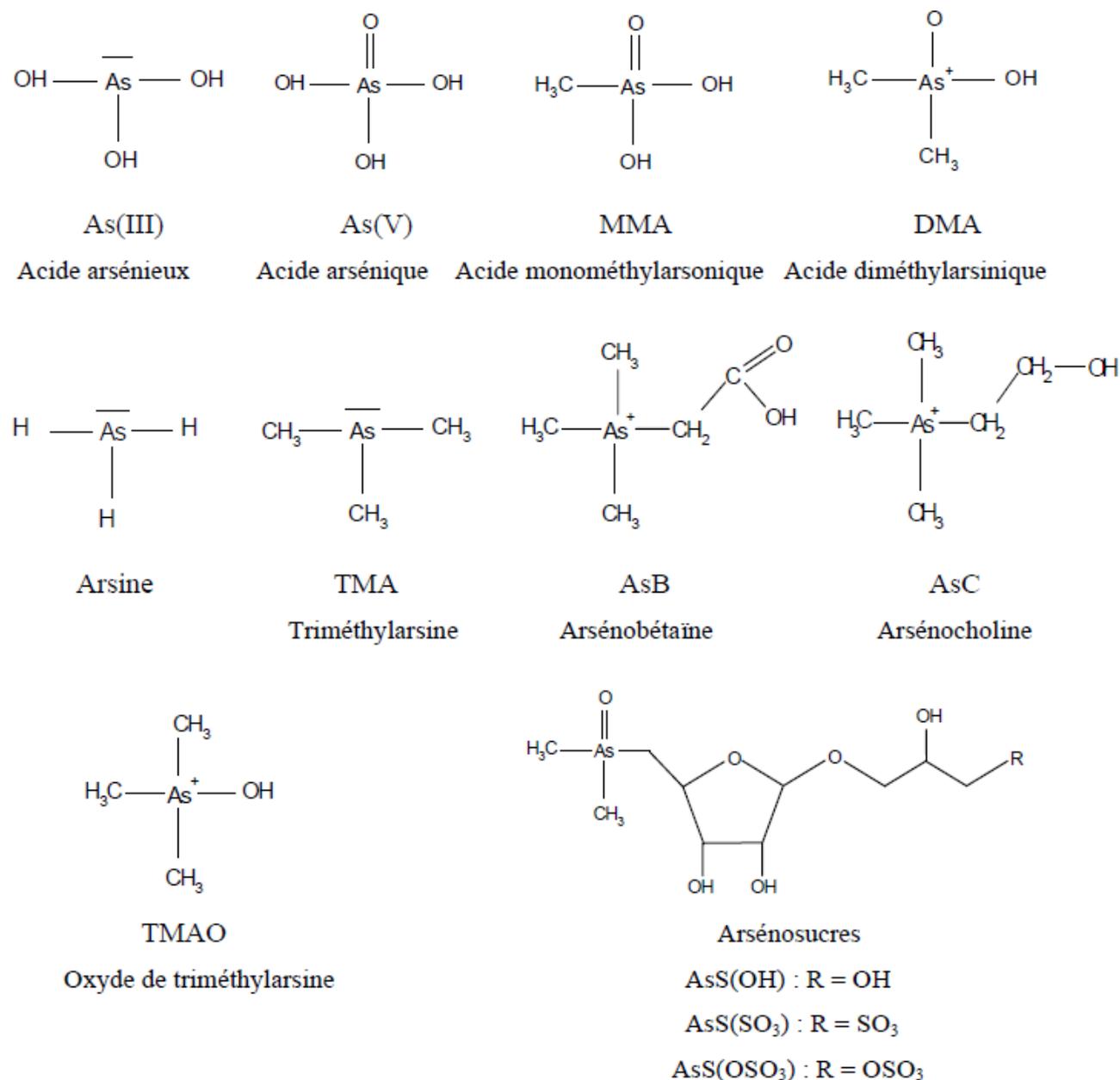


Figure 1: Principales espèces arsénées détectées dans l'environnement.

Plusieurs de ces espèces possèdent un caractère acido-basique. Ces propriétés influencent la spéciation des espèces arsénées dans l'eau. Le tableau dans l'annexe (2) nous montre les propriétés de ces espèces.

### 1.3.1 Arsenic inorganique

La forme inorganique prédominante dans l'eau est déterminée par le pH et les conditions d'oxydoréduction. Par conséquent, si ces conditions changent, la forme change aussi (United States Environmental Protection Agency, 2000).

Le pH et le potentiel redox influent fortement sur la spéciation de l'arsenic (Figure 2, 3 et 4).

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Les données proviennent de Smith et Martell (1976-1982), les diagrammes sont tracés avec SCD Base (Pettit et Powell, 1999).

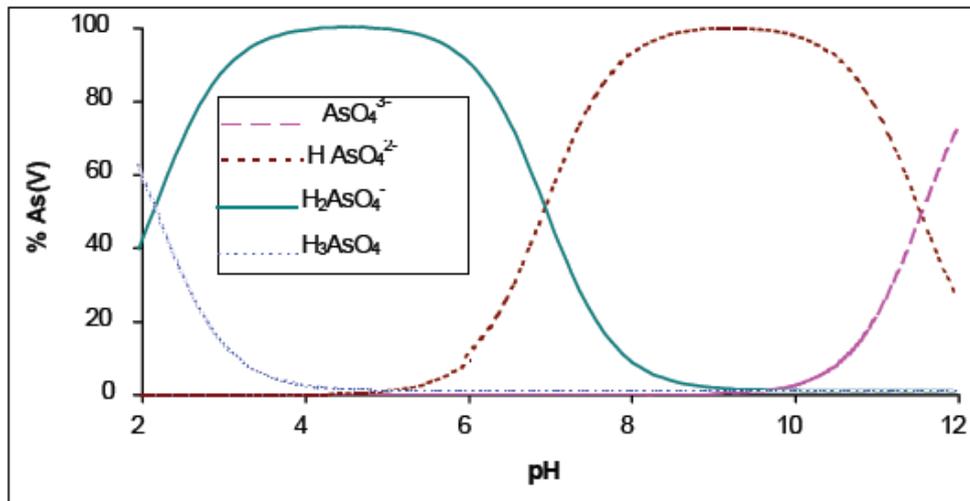


Figure 2: Spéciation de As (V) en fonction du pH.

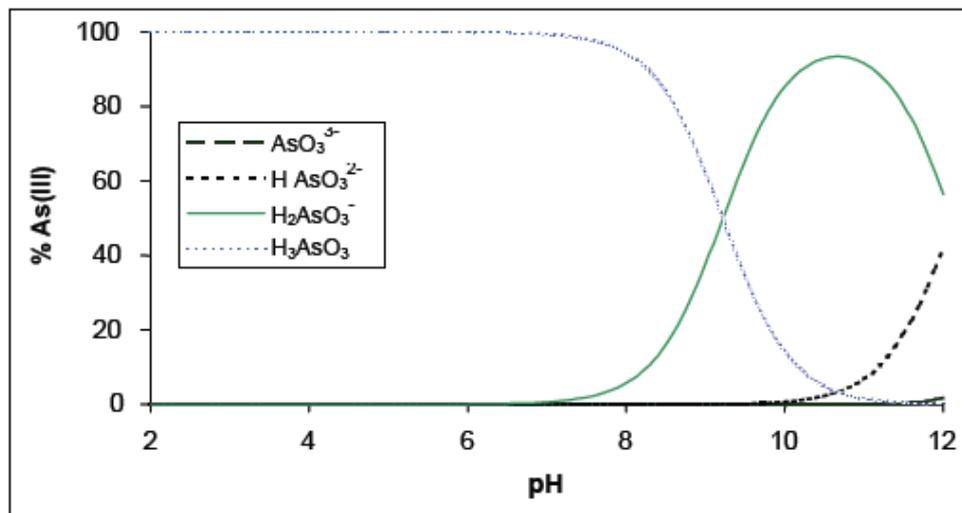


Figure 3: Spéciation de As (III) en fonction du pH.

Dans les eaux bien oxygénées, l'arsenic pentavalent (arséniate) est généralement l'espèce la plus courante (Irgolic, 1982 ; Cui et Lui, 1988). En milieu réducteur, qu'on retrouve souvent dans les sédiments des lacs ou dans les eaux souterraines profondes, l'espèce trivalente (arsénite) prédomine (Lemmo et coll., 1983 ; Welch et coll., 1988).

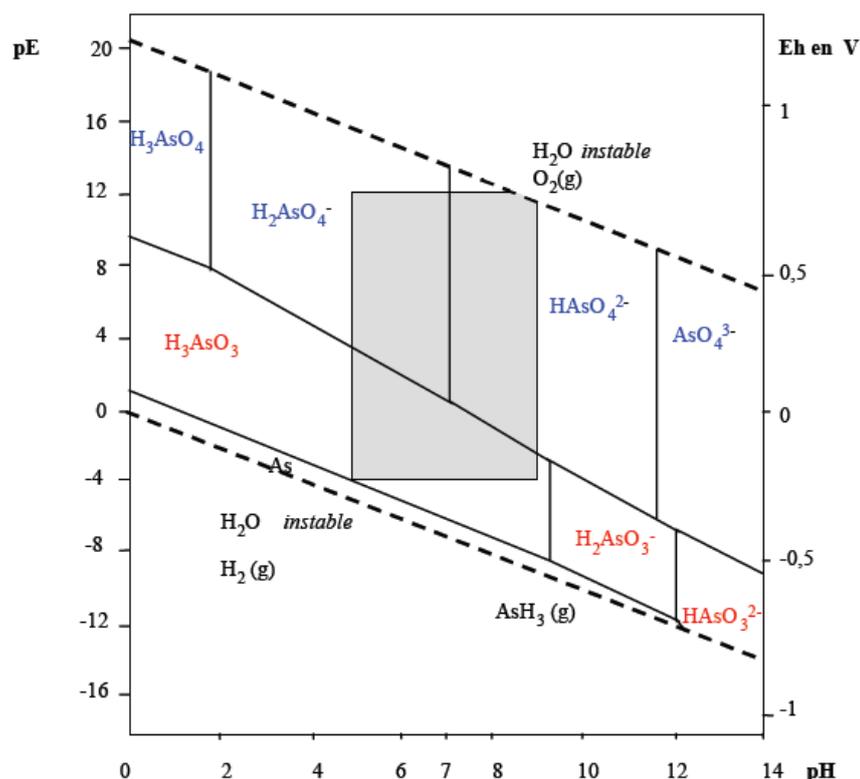


Figure 4: Diagramme d'équilibre (potentiel, pH), d'après Lombi et al. (1999).

Lorsqu'on tient compte du potentiel redox et du pH, dans les conditions naturelles (partie grisée), trois espèces coexistent :  $H_2AsO_4^-$  et  $HAsO_4^{2-}$  et  $H_3AsO_3$ .

Cependant, la présence d'arséniate et/ou d'arsénite n'est pas uniquement dictée par les données thermodynamiques et les constantes cinétiques des réactions d'oxydoréduction, l'activité biologique contrôle également la répartition de l'arsenic inorganique (Sadiq et al, 1983).

### 1.3.2 Arsenic organique

Les composés arséniés organiques (MMA ; DMA et TMAO) 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 et Suzuki, 2002; Hung et al, 2004). Mais en cas de pollution industrielle, on peut retrouver des fortes concentrations d'arsenic dans les eaux souterraines.

Les composés arséniés organiques sont considérés comme étant les moins nocifs pour les humains puisqu'ils sont facilement traités par l'organisme lorsqu'ils sont ingérés. Par contre les composés arséniés inorganiques tendent à s'accumuler dans les tissus humains. Ils sont donc souvent liés aux effets néfastes sur la santé.

#### **1.4 La toxicité de l'arsenic.**

Généralement, les composés d'arsenic(III) sont plus dangereux que les dérivés d'arsenic(V) : ainsi, les arsénites sont 60 fois plus toxiques que les arséniates (Jain et Ali, 2000; Ferguson et Gavis, 1972). Le composé minéral le plus toxique est l'arsine  $AsH_3$ , qui est un gaz à l'odeur alliagée : la dose fatale est de 250  $mg \cdot m^{-3}$  pendant une durée d'exposition de 30 min (Bissen et Frimmel, 2003a). Le classement des différentes formes minérales de l'arsenic en fonction de la toxicité est le suivant :  $AsH_3(g) > As_2O_3(s) > As_2O_5(s) > As(s)$  (Proust *et al.*, 2000).

Pour l'être humain, la dose létale par ingestion de trioxyde d'arsenic ( $As_2O_3$ ) est comprise entre 70 et 180  $mg(As) \cdot kg^{-1}$  (Grossier et Ledrans, 1999).

On constate que la toxicité de l'arsenic dépend :

- Du composé arsénié entrant en jeu pendant l'exposition (composé organique ou inorganique) ;
- De la durée de l'exposition à l'arsenic ;
- De la concentration reçue ou ingérée lors de l'exposition.

Les principaux symptômes et pathologies observés chez l'homme suite à une intoxication par l'arsenic peuvent survenir dans les minutes ou les heures suivant l'ingestion (Pichard *et al.*, 2005).

##### **1.4.1 Les voies d'expositions.**

La principale voie d'absorption est la voie orale. Les arséniates et les arsénites sont bien absorbés par voie orale et par inhalation. Chez l'homme, l'absorption de l'arsenic est estimée à 95 % par voie orale et à 30 à 34 % par inhalation. La voie cutanée est une voie mineure d'absorption.

### 1.4.2 La distribution de l'arsenic dans l'organisme humain.

Lors de l'absorption par voie orale, l'arsenic se distribue dans tous les organes. Il n'y a pas d'organe cible ; mais en cas d'intoxication aiguë, les taux les plus importants sont retrouvés dans le foie et le rein (Copeman et Bodenstern, 1955 ; North, 1992).

Les concentrations sont de l'ordre de 0,05 à 0,15 ppm. Les concentrations les plus élevées sont retrouvées dans les cheveux et les ongles.

Le métabolisme de l'arsenic est surtout constitué par une méthylation. Si l'arsenic est sous forme pentavalente, il doit d'abord être réduit en arsenic trivalent (Uthe et Reenke, 1975).

La méthylation conduit à la formation de l'acide monométhylarsornique puis de l'acide diméthylarsinique. Ce processus tend à rendre l'arsenic moins réactif et plus facilement éliminé (Buchet *et al*, 1981 ; Vahter, 1983). La toxicité aiguë est réduite mais cela n'est pas

exact pour la toxicité chronique et l'effet cancérigène (Mc Kinney, 1992 ; Thomas *et al*, 2001).

L'arsenic sous forme inchangée et les métabolites méthylés sont éliminés dans les urines par le rein après filtration glomérulaire, sécrétion tubulaire, et réabsorption active (Tsukamoto *et al*, 1983 ; Vahter et Gustafsson, 1980).

Le schéma ci dessous retrace le parcours du de l'arsenic dans l'organisme.

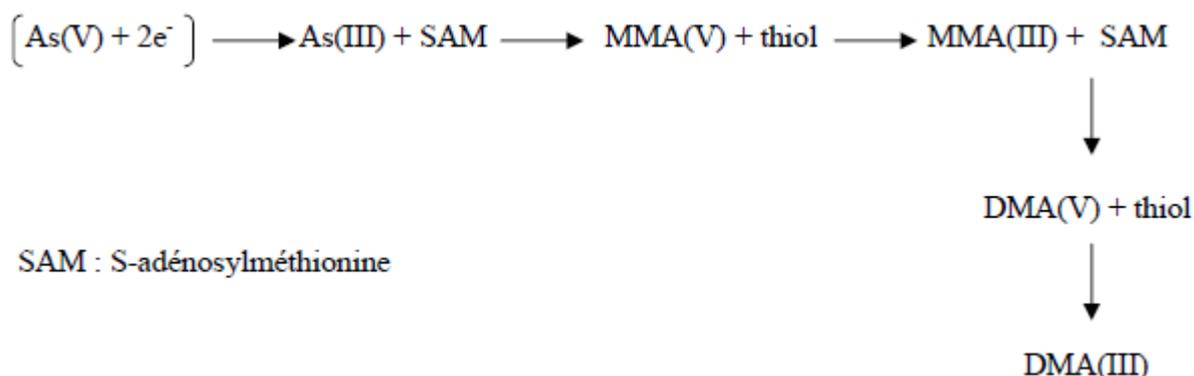


Figure 5: le métabolisme des différentes espèces arsénisées chez l'homme.

### **1.4.3 Les principaux effets toxiques de l'arsenic pour l'homme.**

#### **1.4.3.1 Intoxication aiguë**

On a signalé l'apparition de symptômes d'intoxication aiguë par l'arsenic après l'ingestion d'eau de puits contenant des concentrations d'arsenic de 1,2 et 21,0 mg/L (Feinglass, 1973;

Wagner et coll., 1979). Les premiers symptômes cliniques de cet empoisonnement sont des douleurs abdominales, des vomissements, une diarrhée, des douleurs dans les extrémités et les muscles et de la faiblesse avec rougeur de la peau. Ces symptômes sont souvent suivis d'engourdissements et de picotements au niveau des extrémités, de crampes musculaires et d'érythème papuleux après deux semaines (Murphy et coll., 1981). Après un mois, les symptômes peuvent inclure des paresthésies brûlantes des extrémités, une hyperkératose palmo-plantaire, l'apparition de lignes de Mee sur les ongles et une détérioration progressive des réponses motrices et sensorielles (Fennell et Stacy, 1981; Murphy et coll., 1981; Wesbey et Kunis, 1981).

#### **1.4.3.2 Intoxication chronique.**

Lors d'une intoxication chronique, l'un des organes cibles des dérivés inorganiques de l'arsenic est la peau. On décrit des lésions d'hyperkératose des paumes de mains et de la plante des pieds associées à des excroissances en forme de verrues ou boutons. Cette hyperkératose est associée à une alternance de zones d'hyperpigmentation et hypo-pigmentation sur la face, le cou et le dos. Ces hyperkératoses et ces excroissances peuvent être à l'origine de lésions cancéreuses. Ce phénomène n'est pas retrouvé au niveau des zones d'hyper pigmentation.

Lors d'exposition à l'arsenic à de très faibles concentrations par ingestion d'eau de boisson, ces effets cutanés sont l'indicateur le plus sensible de l'exposition. Ces effets cutanés apparaissent pour des niveaux d'exposition de l'ordre de 0,01 à 0,1 mg As/kg/j.

### **1.4.4 Les limites dans la détermination des conséquences de la consommation d'eaux contaminées par l'arsenic.**

Plusieurs facteurs empêchent de déterminer précisément les conséquences de la consommation d'eau de boisson contaminée par l'arsenic : apparition tardive de la maladie, absence de définitions communes

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

jusqu'à une époque récente, méconnaissance locale du problème et insuffisance de la notification (Le gouvernement du Canada, 2006). De plus, dans de nombreux pays, les méthodes analytiques pour déceler les concentrations nocives pour la santé dans l'eau de boisson ne sont devenues accessibles que récemment. L'inexistence d'un test simple, facile à mettre en œuvre sur le terrain et peu onéreux continue d'être un obstacle important à une meilleure compréhension de l'étendue et de la gravité de la contamination de l'eau de boisson par l'arsenic et au développement des analyses locales de la qualité de l'eau dans les communautés. Les informations de l'OMS ont suscité une vigilance accrue et une reconnaissance du problème de la contamination naturelle par l'arsenic dans plusieurs pays, notamment l'Argentine, le Bangladesh, le Cambodge, le Chili, la Chine, les Etats-Unis d'Amérique, la Hongrie, le Mexique, la Roumanie, la Thaïlande et le Viet Nam.

## **1.5 Les méthodes d'analyses de l'arsenic dans l'eau.**

L'arsenic n'a ni goût ni odeur, les consommateurs ne peuvent donc pas déceler sa présence dans leur eau potable. La présence d'arsenic dans l'eau ne peut être détectée que par une analyse chimique de l'eau.

### **1.5.1 Méthodes d'analyses de l'As(Total).**

Plusieurs méthodes d'analyse de la concentration d'arsenic total ont été approuvées par certaines institutions scientifiques telles que : US EPA...

On entend par arsenic total la concentration d'arsenic présente dans les fractions dissoutes et en suspension d'un échantillon d'eau. Dans ces méthodes, on oxyde l'arsenic et on l'analyse sans tenir compte de sa forme chimique (inorganique ou organique) ni de son état d'oxydation c.-à-d. As(III) ou As(V).

Dans un article de Thomas (2002), les méthodes les plus utilisées en selon les critères (protocole d'analyse ; référence de la norme, limite de détection, difficulté de mise en œuvre, durée d'analyse, coût et fonctionnement...) sont :

- La colorimétrie (ou spectrométrie d'absorption moléculaire) ;
- La polarographie (DPASV) ;
- L'activation neutronique instrumentale (INAA) ;
- La spectrométrie d'absorption atomique flamme (FAAS) ;

- La spectrométrie d'absorption atomique four (GF-AAS) ou spectrométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique (ET-AAS) ;
- La génération d'hydrures suivie d'une détection par spectrométrie d'absorption atomique (HG-AAS) ou par fluorescence atomique (HG-AFS) ;
- La spectrométrie d'émission atomique dans un plasma d'argon (ICP-AES) ;
- La spectrométrie de masse dans un plasma d'argon (ICP-MS).

### **1.5.2 Méthodes d'analyses de l'As(III) et l'As(V).**

Concernant l'analyse des deux formes de l'arsenic inorganique, As(III) et As(V), une synthèse des méthodes analytiques existantes de détermination des concentrations en arsenic inorganique dans les eaux a été écrite par Hung *et al.* (2004). Ils répertorient toutes les techniques analytiques de détermination de l'As(III) et de l'As(V) dans les eaux comme le montre le tableau dans l'annexe (3).

## **1.6 La réglementation concernant l'arsenic.**

### **1.6.1 Eaux destinées à la consommation humaine.**

Etant donné le degré de toxicité de l'arsenic pour l'homme, les normes internationales relatives à l'arsenic dans les eaux de boissons sont sévères (WHO, 2006). Les premières normes de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) relatives à la qualité de l'eau de boisson datant de 1958 fixaient une concentration de 200 µg/L comme concentration maximale admissible d'arsenic. En 1963, la norme fut révisée et ramena la concentration maximale admissible à 50µg /L<sup>-1</sup>. En 1984, cette valeur a été maintenue comme « valeur guide» par l'OMS et de nombreux pays l'ont conservée comme norme nationale ou comme cible intermédiaire.

Depuis 1994, l'arsenic inorganique est reconnu cancérigène et une valeur guide provisoire de 10 µg/L a été établie. Cette valeur a été reprise dans la directive européenne 98/83 du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, qui fixe l'objectif de 10 µg/l à l'horizon 2013.

Cette dernière valeur est définie comme une « valeur guide provisoire » car elle est conditionnée par les limites de détermination des appareils de mesure utilisés dans les laboratoires d'analyses. Le tableau dans l'annexe (4) récapitule les normes appliquées dans plusieurs pays.

## **1.7 L'élimination de l'arsenic dans les eaux destinées à la consommation humaine.**

Au moment d'établir une recommandation concernant la présence d'une substance donnée dans l'eau potable, il faut tenir compte de la possibilité de mesurer et de réduire la concentration de cette substance dans les approvisionnements d'eau potable. Il est possible de mesurer de façon fiable une concentration d'arsenic de 5 µg/L. Le choix d'une méthode de traitement qui convienne à un approvisionnement d'eau potable donné dépend des caractéristiques de l'approvisionnement en eau brute et de nombreux autres facteurs; il est donc important de déterminer, le cas échéant, le type de prétraitement qui s'impose. Comme l'arsenic est cancérigène pour les humains, il faut déployer tous les efforts possibles pour maintenir sa concentration dans l'eau potable au niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre.

La réduction de la concentration d'arsenic à un niveau inférieur à celui de la recommandation (soit 10 µg/L) peut se faire dans les grandes et petites installations municipales de traitement de l'eau, à l'aide de plusieurs méthodes bien établies, lesquelles englobent habituellement une étape de prétraitement et une étape finale d'affinage.

La réduction de l'arsenic à un niveau inférieur à 10 µg/L peut également se faire à l'aide de dispositifs certifiés de traitement de l'eau à l'échelle résidentielle. Ces dispositifs peuvent, dans bien des cas, abaisser la concentration d'arsenic à bien moins de 10 µg/L, mais la certification garantit uniquement que les concentrations finales obtenues seront égales ou inférieures à 10 µg/L.

### **1.7.1 Prétraitement.**

Un prétraitement peut être nécessaire :

- Pour supprimer les ions en compétition tels que le fer, le sulfate et le silicate, ainsi que les solides totaux dissous;
- Pour régler le pH;
- Pour oxyder l'As(III) en As(V).

Dans l'eau où le pH varie de 4 à 10, les espèces As(III) prédominantes ont une charge neutre tandis que les espèces As(V) portent une charge négative. À cause de la charge neutre de l'As(III), l'efficacité de son élimination est médiocre comparativement à celle de l'As(V) (U.S.EPA, 2001a). Il est donc important

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

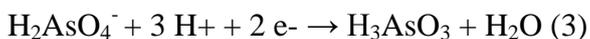
d'oxyder As(III), présent sous la forme neutre ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ), en As(V) présent sous forme anionique mono ou divalente ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  et  $\text{HAsO}_4^{2-}$ ).

D'après les valeurs de pKa correspondant à As(III) et As(V), les couples redox des espèces associées à l'arsenic s'écrivent :



*Equation 1: Couples redox des espèces associées à l'arsenic.*

Le pH dans les eaux souterraines étudiées étant généralement inférieur à 7, le couple redox considéré est celui de la relation (1). La demi-équation d'oxydoréduction est donc la suivante (Pourbaix, 1963) :



$$E = 0,666 - 0,0887\text{pH} + 0,0295 \log [\text{H}_2\text{AsO}_4^-] / [\text{H}_3\text{AsO}_3] \quad (4)$$

*Equation 2: Equation d'oxydoréduction de l'arsenic en milieu acide (<7).*

L'oxydation de l'As(III) en As(V) constitue la méthode de prédilection pour éliminer l'arsenic inorganique, car elle garantit la réduction de l'arsenic total de manière efficiente.

Il est possible de convertir l'As(III) en As(V) en recourant à une étape de pré-oxydation. Le chlorure ferrique, le permanganate de potassium, dioxyde de manganèse, la limaille de fer ; l'ozone et le peroxyde d'hydrogène sont efficaces pour oxyder l'As(III) en As(V).

On va noter ici que le chlore fait parti des oxydants de l'As(III) en As(V) mais cette pré-oxydation au chlore peut toutefois créer des concentrations indésirables de sous-produits chlorés de désinfection (U.S. EPA, 2000).

On définit pour chaque oxydant testé, un rapport stœchiométrique électronique correspondant au nombre de moles d'électrons consommés par l'oxydant par mole d'électron fournie par As(III). Le rapport stœchiométrique électronique relatif à l'arsenic et à l'oxydant est défini par la relation (5) suivante :

$$r = \frac{n \times [Ox] \times V_{ox}}{2 \times [As] \times V_{As}}$$

*Equation 3: rapport stœchiométrique électronique relatif à l'arsenic et à l'oxydant.*

Où  $n$  : électrons impliqués par le couple Ox/Red de l'oxydant utilisé,  $[Ox]$  et  $V_{ox}$  sont respectivement la concentration molaire et le volume de la solution d'oxydant,  $[As]$  et  $V_{As}$  la concentration molaire et le volume de la solution d'As(III) utilisés lors du dosage redox de

As(III).

### 1.7.1.1 Oxydation à l'air.

As(III) peut s'oxyder en As(V) en présence de l'oxygène de l'air mais cette réaction est longue (Cherry *et al.* 1979; Hug et Leupin, 2003). Cette réaction est trop lente pour être utilisée dans une unité de traitement des eaux. Même l'oxydation à l'oxygène pur n'améliore que peu le rendement d'oxydation de l'As(III) (Kim et Nriagu, 2000; Bissen et Frimmel, 2003b).

### 1.7.1.2 Oxydation au peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

Le peroxyde d'hydrogène est un oxydant peu réactif vis-à-vis de l'As(III). L'équation d'oxydation est la suivante :



*Equation 4: Equation d'oxydation de l'arsenic au le peroxyde.*

Cette oxydation nécessite un très fort excès stœchiométrique de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> par rapport à As(III). Teixeira *et al.* (1990) ont ainsi démontré que même un très fort excès de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (supérieur à 10000%) ne permet d'oxyder que 50% d'une solution d'As(III) de concentration 74 µg/L. En outre, plus la concentration en As(III) est faible et plus H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> doit être en excès. Molnar *et al.* (1994) ont démontré que l'oxydation est plus efficace pour des pH basiques, les formes anioniques de l'arsénite étant plus réactives que les formes neutres.

### 1.7.1.3 Oxydation à l'ozone (O<sub>3</sub>).

L'ozone est l'oxydant le plus puissant (Tozawa et Nishimura, 1984; US EPA, 2003). La réaction d'oxydation est la suivante :



*Equation 5: Equation d'oxydation de l'arsenic à l'ozone.*

Néanmoins, l'ozone est un oxydant trop onéreux pour être utilisé dans les petites stations de potabilisation ainsi que dans les pays en voie de développement (Jiang, 2001).

#### 1.7.1.4 Oxydation à l'hypochlorite de sodium (NaOCl).

L'hypochlorite de sodium est très utilisé pour l'oxydation de l'As(III) en As(V), principalement en raison de son faible coût. La réaction est la suivante :



*Equation 6: Equation d'oxydation de l'arsenic à l'hypochlorite de sodium.*

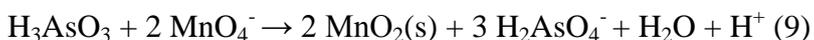
L'hypochlorite de sodium permet l'oxydation complète de l'As(III) (McMullin *et al*,

1995). Malgré son fort pouvoir oxydant, l'utilisation de l'hypochlorite de sodium en pré-oxydation dans les petites unités de production d'eau potable n'est pas conseillée à cause de la production de trihalométhanes (THM) en présence de matières organiques (Lenoble, 2003; US EPA, 2003).

Cependant, NaOCl peut être utilisé pour l'oxydation de l'As(III) dans le cas des eaux souterraines, qui ont des concentrations faibles en carbone organique.

#### 1.7.1.5 Oxydation au permanganate de potassium (KMnO<sub>4</sub>).

Le KMnO<sub>4</sub> est très utilisé comme oxydant vis-à-vis de l'As(III) (Borho et Widerer, 1996; Subramanian *et al*, 1997; Chiu et Hering, 2000; Bissen et Frimmel, 2003b; Lenoble, 2003). La réaction d'oxydation est la suivante :



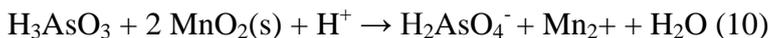
*Equation 7: Equation d'oxydation de l'arsenic au permanganate de potassium.*

D'après Lenoble (2003), l'oxydation complète par le KMnO<sub>4</sub> ne suit pas la stœchiométrie puisque dès que ce rapport vaut 0,9, l'oxydation de l'As(III), pour une concentration comprise entre 7,4 et 74 mg.L<sup>-1</sup>, est totale en 5 minutes, alors qu'un excès de 3 permet d'oxyder plus de 95% d'As(III) (50 µg.L<sup>-1</sup>) en 15 secondes, à pH 7,3 (Ghurye et Clifford, 2001). En outre, la réaction est indépendante du pH quand il est compris entre 6,3 et 8,3.

Le KMnO<sub>4</sub> est donc un oxydant efficace vis-à-vis de l'As(III) mais il présente l'inconvénient d'être difficile à manipuler (très corrosif, coloration violette persistante).

#### 1.7.1.6 Oxydation au dioxyde de manganèse (MnO<sub>2</sub>(s)).

Les propriétés oxydantes du dioxyde de manganèse solide vis-à-vis de l'As(III) ont fait l'objet de nombreuses études (Oscarson *et al.*, 1981a et b; Moore *et al.*, 1990; Driehaus *et al.*, 1995; Nesbitt *et al.*, 1998; Badjpai et Chaudhuri, 1999; Manning *et al.*, 2002b). La réaction d'oxydation est la suivante :



*Equation 8: Equation d'oxydation de l'arsenic au dioxyde de manganèse.*

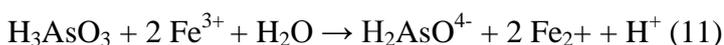
La capacité oxydante du MnO<sub>2</sub>(s) solide vis-à-vis de l'As(III) est très faible et d'importants excès stœchiométriques sont nécessaires (Lenoble, 2003).

L'inconvénient de ce procédé est que le MnO<sub>2</sub>(s) a un faible pouvoir désinfectant, et qu'il est nécessaire d'utiliser un autre oxydant ou désinfectant dans la filière de traitement (Johnston et

Heijnen, 2001; US EPA, 2003).

#### 1.7.1.7 Oxydation au chlorure ferrique (FeCl<sub>3</sub>).

Le chlorure ferrique fait l'objet de nombreuses études concernant l'oxydation de l'As(III) (Brewster et Laschinger, 1992; Meng *et al.*, 2000 et 2002; Lenoble, 2003). L'équilibre redox impliquant Fe<sup>3+</sup> est le suivant:



*Equation 9: Equation d'oxydation de l'arsenic au chlorure ferrique.*

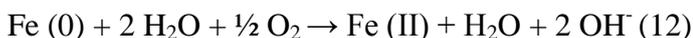
Des rapports stœchiométriques de 0,20 et 0,18 permettent l'oxydation totale de l'As(III) par le FeCl<sub>3</sub> pour des concentrations respectives de 7,4 et 74 mg.L<sup>-1</sup> d'As(III) (Lenoble, 2003). Cette oxydation n'est pas immédiate et dépend du volume de FeCl<sub>3</sub> ajouté.

Le faible rapport stœchiométrique, la stabilité de ce produit ainsi que son faible coût font du FeCl<sub>3</sub> l'oxydant le plus performant, du point de vue de l'oxydation de l'As(III) en As(V). Cependant, la présence d'ions interférents (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> ou NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) est un problème, de même que la génération de boues arséniées qui doivent être retraitées (Meng *et al.*, 2000 et 2002).

### 1.7.1.8 Oxydation par la limaille de fer.

L'oxydation de l'As(III) par la limaille de fer est observée en parallèle d'une oxydation du fer(II) par l'oxygène (Hug et Leupin, 2003; Leupin et Hug, 2005).

Le mécanisme mis en évidence est le suivant :



*Equation 10: Différentes équations mettent en évidence l'oxydation de l'arsenic par la limaille de fer.*

Le principal avantage de l'utilisation de la limaille de fer réside dans le fait qu'elle contient trois fois plus de fer en poids que n'importe quel sel de fer, alors que l'inconvénient de ce support réside dans la compétition existante entre les phosphates et l'As(V) lors de la phase d'adsorption.

### 1.7.1.9 Oxydation photochimique.

A part l'oxydation de l'As(III) en As(V) grâce à des additifs chimiques dans la filière de traitement des eaux, il existe aussi l'oxydation photochimique. En effet l'As(III) peut être oxydé par le rayonnement naturel en présence d'oxygène (Bissen *et al*, 2001). Cette réaction, très lente, est accélérée par l'utilisation d'un rayonnement artificiel d'Ultra-violet (UV) en présence d'oxygène (Ghurye et Clifford, 2001). Selon Bissen et Frimmel (2003b), 90% d'une solution d'As(III) à  $74 \mu\text{g.L}^{-1}$  est oxydé en moins de 90 secondes, en utilisant une lampe à vapeur de mercure haute pression.

Le rayonnement UV est assuré à une longueur d'onde comprise entre 190 et 240 nm et l'énergie nécessaire est de 3 à 4 kWh .m<sup>-3</sup>.

L'utilisation de lampe à vapeur de mercure basse pression ne permet pas d'obtenir une oxydation de l'As(III) en As(V) (Welté, 2002). La photo-oxydation peut également être utilisée en tant que complément à l'ajout d'un réactif chimique.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Les deux procédés de traitements, SODIS (SOLar water DISinfection) et SORAS (Solar Oxidation and Removal of ArSenic), développés par l'EAWAG et applicables aux pays en voie de développement, utilisent la photo-oxydation par les rayons UV-A pour oxyder As(III) en As(V). Les eaux à traiter sont placées dans des bouteilles en polyéthylène téréphtalate dans lesquelles l'eau est additionnée de citrate ou de jus de citron.

Les différents oxydants chimiques de l'As(III) en As(V) et leurs performances associées sont présentés dans un tableau. Voir annexes(5)

### 1.7.2 Traitement des eaux.

Les procédés de traitements des eaux font appel à 4 mécanismes principaux, de façon unique ou combinée :

La précipitation qui est le mécanisme par lequel l'arsenic dissout va former un précipité » insoluble lors d'une réaction chimique avec une ou plusieurs autres espèces chimiques initialement en solution également. Le rendement de ce type de procédé est contraint par la constante d'équilibre de dissolution/précipitation du solide ainsi formé.

L'oxydoréduction qui génère un changement de spéciation de l'arsenic modifiant sa toxicité et sa capacité de sorption et/ou de précipitation.

La sorption : l'arsenic présent dans la solution se piège sur un matériau sorbant après un certain temps de mise en contact. Le matériau et l'arsenic sorbé sont ensuite séparés de la solution. Le rendement de ce type de procédé est contraint par l'équilibre de sorption entre l'arsenic et le produit sorbant.

La filtration consiste en une séparation physique des phases susceptibles de contenir de l'arsenic et selon la nature de la filtration (du diamètre de coupure), l'eau sera ou moins bien épurée.

Ainsi, les traitements d'élimination de l'arsenic des eaux sont nombreux (Thomas *et al*, 2002). On citera notamment :

- L'absorption.
- La coagulation – floculation et précipitation.
- La décarbonation à la chaux.
- Les techniques membranaires.
- Les résines échangeuses d'ions.
- L'électrocoagulation.
- L'électrodialyse.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

- L'immobilisation in situ.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

## **CHAPITRE II : LA METHODOLOGIE DE L'ETUDE.**

L'approche méthodologique pour mener à bien cette étude, s'est déroulée en quatre (4) étapes suivantes : l'élaboration du cadre logique ; la recherche documentaire ; le traitement des données et la rédaction du rapport final.

### **2.1 Le cadre logique.**

Les activités à mener pendant de notre étude et le traitement de données rattachées aux objectifs spécifiques qui nous ont permis d'atteindre l'objectif général de notre étude, ont consignéés dans le tableau appelé cadre logique.

### **2.2 La recherche documentaire.**

Cette étape a consisté à prendre connaissance des travaux et études effectués sur la problématique de l'arsenic dans le monde, en Afrique et particulièrement au Burkina Faso. Trois (3) méthodes de collecte de données ont été utilisées pour ce travail : l'interrogation des banques des données ; la consultation des Centres de documentation et d'information de certains structures de la place et la consultation des sites internet.

#### **2.2.1 L'interrogation des banques de données.**

Inist : <http://redoc-info.inist.fr/c2/refoc.html> , mot clé : arsenic.

Ird : <http://www.documentation.ird.fr> , mot clé: arsenic.

Agence Bibliographique de l'enseignement Supérieur (abes) : <http://corail.abes.fr> (thèses françaises), recherche avancée : arsenic...

Scirus (moteur de recherche scientifique) : avec les mots clés suivants : arsenic + Burkina Faso.

Google (moteur de recherche général) : avec les mots clés suivants : arsenic ; arsenic + Burkina Faso.

Yopdf (moteur de recherche des fichiers PDF en ligne) : avec le mot clé suivant : arsenic.

Les archives de certains quotidiens comme : le faso.net, aqueduc.info...

#### **2.2.2 La consultation des documents dans les centres de documentation et d'information (CDI).**

Cette étape a consisté à faire une lecture des documents disponibles et une prise de note des informations disponibles dans ces CDI. Les centres de documentations consultés sont :

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Le CDI de la fondation 2iE ;

Le CDI du ministère de l'agriculture, de l'hydraulique et des ressources halieutiques ;

### **2.2.3 La consultation des sites internet.**

Plusieurs sites ont été consultés pendant cette étude. Ceux les plus fréquentés et qui se sont avérés importants sont les suivants :

Site officiel du ministère de l'environnement et du cadre de vie : [www.environnement.gov.bf](http://www.environnement.gov.bf)

Site officiel du ministère de la santé : [www.sante.gov.bf](http://www.sante.gov.bf)

Site officiel du ministère de l'agriculture, de l'hydraulique et des ressources halieutiques : [www.agriculture.gov.bf](http://www.agriculture.gov.bf)

Programme des nations unies pour le développement : [www.undp.org/french](http://www.undp.org/french)

Organisation mondiale de la santé (OMS) : [www.who.int/en](http://www.who.int/en)

L'Unicef : [www.unicef.fr](http://www.unicef.fr)

Programme international de la sécurité chimique (IPCS) : [www.inchem.org](http://www.inchem.org)

US Environmental Protection Agency (US EPA): [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

### **2.3 Le traitement des données.**

Les informations collectées ont été traitées par des logiciels de traitement de texte et de calcul en occurrence Microsoft Office Word 2007 et Microsoft Office Excel 2007.

Les informations provenant des sites ont été utilisées après vérification de leur fiabilité.

### **2.4 La rédaction du rapport final.**

Le rapport final est rédigé en fonction des informations recueillies durant la recherche documentaire.

## **CHAPITRE III: ETUDE DE CAS AU BURKINA FASO, LA CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA ZONE DE OUAHIGOUYA.**

### **3.1 Présentation de la zone d'étude.**

#### **3.1.1 Cadre physique**

Ouahigouya est le chef lieu de la région du Nord et de la province de Yatenga situées dans le sahel et la partie septentrionale du Burkina Faso. La ville de Ouahigouya (Figure 1.3) se trouve à 180 km au Nord de Ouagadougou sur l'axe reliant Mopti (Mali). Le site de la ville correspond au point de coordonnées géographiques 2.30° longitude Ouest et 13.35° latitude

Nord. Le climat, de type soudano sahélien, est caractérisé par deux saisons principales : (i) une courte saison de pluie, de juin à octobre (août est le mois le plus pluvieux), avec une pluviométrie variant entre 600 mm et 700 mm par an ; (ii) une longue saison sèche, allant de novembre à mai, et comportant une période sèche et froide (novembre à janvier) et une période sèche et chaude de février à mai. La pluviométrie est faible et très irrégulière ; Ouahigouya se situe entre les isohyètes 600 et 700 mm. La température moyenne annuelle est de 28.4°C ; le mois de mai est le plus chaud (moyenne de 42.8°C) et janvier est le mois le plus frais (moyenne de 25.7°C). L'évaporation moyenne journalière des eaux dans la zone est estimée à 5.5 mm. Ces saisons sont réglées d'une part, par les vents d'harmattan soufflant d'Est en Ouest de novembre à avril et d'autre part, par la mousson qui souffle du Sud-Ouest au Nord-Est, de juin à septembre. Ouahigouya est situé dans le bassin supérieur du fleuve Nakambé ; les principales ressources hydrauliques proviennent de deux barrages des eaux souterraines exploitées à l'aide des puits et forages.

#### **3.1.2 La géologie**

Dans la zone de Ouahigouya les formations cristallines et leur couverture d'altération particulièrement les schistes (y compris les formations volcano-sédimentaires) et les granites ont une extension prédominantes.

La subdivision des différentes formations peut être résumée comme suit:

- Formations sédimentaires
- Roches vertes
- Volcano-sédimentaire
- Méta sédiments argileux
- Granites récents : granites leucocrates ; migmatites birrimiennes

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

- Granites anciens : granites indifférenciés
- Granites syntectoniques : granites gris ; granodiorites orientés

### Les roches volcaniques

Elles sont représentées par les tufs et brèches acides. Ces faciès affleurent à l'ouest de Irbou (Yéribou) en contact avec les schistes argileux et schistes tufacés indifférenciés. Le secteur de Mogombouli prend ses assises dans ces formations. C'est une bande large (Est-Ouest) de plusieurs kilomètres qui s'étend vers le Nord dans la région de Namissiguima et de Rambo.

### Les roches volcano-sédimentaires et méta sédiments argileux

*Les schistes argileux, schistes tufacés indifférenciés:* Ces sont les faciès les plus dominants. En dehors des pointements de granitoïdes de Margo, de Bassanga et des faciès déjà cités.

*Les schistes acides:* C'est un faciès peu étendu. Ils affleurent également en bandes allongées N10 concordantes à la schistosité entre Tanlili et Gourongo et à l'Est de cette dernière localité. Ces bandes présentent la particularité d'encaisser les quartzites, jaspilites et cherts. Ces schistes occupent également l'extrémité Sud-Est de la zone de Pellé.

*Les quartzites, jaspilites et cherts :* Ils apparaissent en bandes allongées au sein des schistes acides, concordant à la schistosité. Ils ont été cartographiés à l'Est de Tanlili et au Sud de Gourongo.

### Les roches plutoniques

Ce sont les granites (granites leucocrates, granites gris et granites indifférenciés) et granodiorites (annexe 4). Sur la carte géologique, la granodiorite se présente au Sud Ouest de Margo. C'est un faciès peu ou pas déformé.

À l'Est de Bassanga, Mogom et Ramsé, ce faciès décrit par Gamsonré présente une grande extension. Tout comme à Margo, le développement de la latérite empêche toute observation sur le terrain.

### Géologie Structurale

Sur la majorité de la zone d'étude, la schistosité est orientée N10 à N15 et redressée au voisinage des filons de quartz, sensiblement orientés Nord-Sud. Au coin Sud-Est de la zone, elle varie entre N30 et N40. Le pendage général est vers l'Ouest. Les granitoïdes sont peu ou pas affectés par la schistosité.

### 3.1.3 L'hydrogéologie.

Les eaux souterraines de ces sites contaminées, sont extraites par des puits traditionnels et des forages à pompes manuelles. Ces forages sont relativement profonds (40m en moyenne) 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 », J.J. Seguin 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'emménagement 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

#### a. 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 m<sup>3</sup>/h, parfois inférieurs à 5 m<sup>3</sup>/h, rarement supérieurs à 15 m<sup>3</sup>/h.

### **b. 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 grésio-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.

### **3.2 La réglementation sur l'arsenic au Burkina Faso.**

Dû à l'absence actuelle de norme nationale pour l'arsenic en eau potable au Burkina Faso, la limite acceptable pour arsenic dans l'approvisionnement d'eaux souterraines n'a pas été définie. La plupart des pays en voie de développement continuent à employer l'ancienne (avant 1993) valeur de directive d'OMS pour arsenic en eau potable de 50 µg/L comme le Bangladesh (pays le plus exposé au monde).

En 2004 une valeur guide de 10µg/L a été établie pour l'arsenic, d'après la dernière version des directives de l'OMS portant sur la qualité de l'eau de boisson (**COWI, 2005**). Le gouvernement du Burkina Faso a adopté cette valeur limite d'arsenic dans les eaux de boisson sur le plan national (MAHRH/SG/DGRE, 2006).

### **3.3 La présence de l'arsenic dans les eaux souterraines dans la zone de Ouahigouya.**

Naturellement l'arsenic est présent dans l'eau sous deux formes : l'arséniate (As V) et l'arsénite (As III), 10 fois plus toxique. La concentration moyenne à laquelle il est dosée, est d'environ 10µg/L dans les eaux souterraines, plusieurs villages dans la ville de Ouahigouya et ses environs sont particulièrement concernées par des contaminations plus importantes : Margo, Nonfaïrée, Tanlili, Birrdinga, Tougou, Pellé et Boulango (COWI, 2005).

#### **3.3.1 La situation**

Suite à une étude menée dans la zone du PEEN (zone couvrant la province du yatenga et la province du Lourom) au cours de la période allant de janvier 2003 à septembre 2004, les différentes analyses d'eau

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

prélevée ont montré des taux d'arsenic importants, dépassant considérablement en certains endroits les normes admises par l'OMS. Les habitants de certaines localités présentent déjà des signes visibles d'intoxication à l'arsenic.

Le rapport d'étude sur l'arsenic dans la zone du PEEN, rédigé par l'ONG DANIDA et le ministère des affaires étrangères, a identifié 10 forages (dans 8 villages) présentant une concentration d'arsenic supérieure à 50 µg/l. (COWI, 2005).

Dans l'étude de Smedley *et al*, 2007 sur la ville de Ouahigouya, il a été reporté que plusieurs échantillons parmi les 45 échantillons prélevés avaient des concentrations d'arsenic plus élevées que la valeur limite de l'OMS (10µg/L). On a constaté que les fortes concentrations ont été trouvées exclusivement dans les forages et les concentrations obtenues dans les échantillons provenant des puits étaient inférieure à 10µg/L. Il faut signaler que lors de cette étude, 36 forages à pompes manuelles et 9 puits traditionnels peu profonds ont été utilisés pour le prélèvement de ces échantillons.

### 3.3.2 Les différentes concentrations d'arsenic dans les sites contaminés.

Les concentrations d'arsenic dans les eaux souterraines des forages qu'on retrouve dans la zone de Ouahigouya varient entre 0,5µg/L et 1630µg/L. la médiane de ces concentrations est 15µg/L. on constate que les concentrations d'arsenic dans les eaux souterraines des forages peuvent atteindre plus de 100 fois la valeur guide de l'OMS.

En ce qui concerne les puits, les concentrations varient entre 0,5 µg/L et 6,1 µg/L. La médiane ici est de 1,5µg/L d'où les eaux provenant des puits ne présentent pas grand danger pour les populations par rapport à celle des forages. Le tableau ci-dessous présente le résumé des différentes concentrations de certains constituants chimiques présents dans les échantillons d'eaux souterraines analysés.

Paramètre	Unités	Forages			Puits			Valeur guide d'OMS 2004
		min	max	médiane	min	max	médiane	
Temp	°C	29.7	34.9	31.4	27.5	31.6	30.3	
pH		5.77	7.78	7.14	5.18	7.03	5.69	
DO	mg/L	<0.1	5.8	0.75	1.4	4.5	3.3	
Eh	mV	97	447	302	142	440	325	
SO <sub>4</sub>	mg/L	<0.2	657	6.76	<0.2	33.4	0.38	
NO <sub>3</sub> -N	mg/L	<0.05	21.7	1.05	<0.05	5.54	2.1	11

Mn	µg /L	0.196	98.9	1.12	1.47	1450	18	400
Fe	mg/L	<0.005	0.69	0.008	0.01	0.11	0.035	
As(III)	µg /L	<1	254	<1	<1	4.5	<1	10
As(V)	µg/L	<1	1590	17.1	<1	7.8	<1	
As <sub>T</sub>	µg/ L	<0.5	1630	15.1	<0.5	6.14	1.45	

Tableau 2: Statistiques sommaires pour les échantillons analysés d'eaux souterraines provenant des forages et des puits (l'échantillon numéroté : 36 forages et 9 puits).

D'après les valeurs, qu'on a dans le tableau ci-dessus les espèces As(v) sont les espèces majoritaires dans les eaux des forages des sites contaminés. Smedley et al (2007), mettent en évidence cette prédominance des espèces As (V) dans son étude faite sur les eaux souterraines dans la zone de Ouahigouya. Ils établissent une relation entre la concentration de l'arsenic totale et la concentration des espèces As (V).

Cette relation est représentée dans la figure ci après

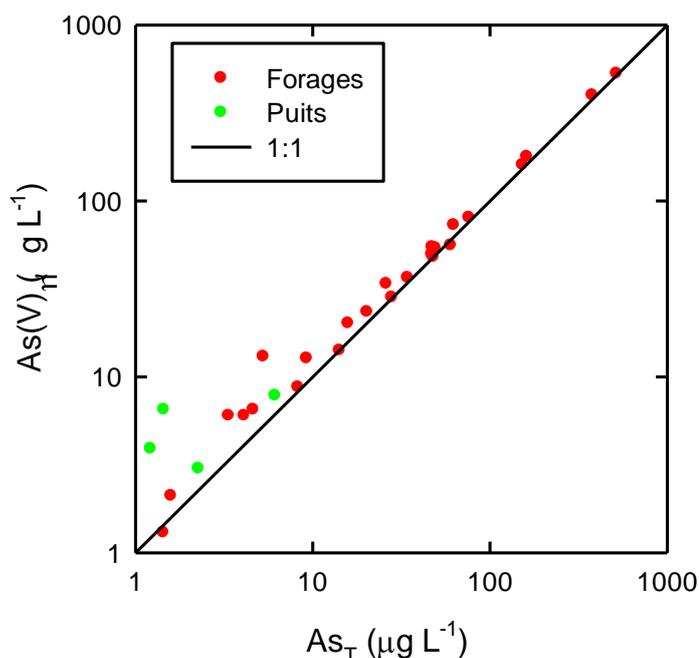


Figure 6: Variation de concentration d'As(V) avec l'arsenic total (As<sub>T</sub>).

Comme dans beaucoup d'autres zones ayant des problèmes d'arsenic, la variabilité spatiale dans les concentrations As des eaux souterraines entre les forages dans la zone de Ouahigouya est grande et les variations par rapport à la profondeur sont évidentes (rapport COWI 2005). La figure. 2 nous montre qu'en général, des concentrations arsenicales plus élevées sont trouvées dans les eaux souterraines des forages plus profonds.

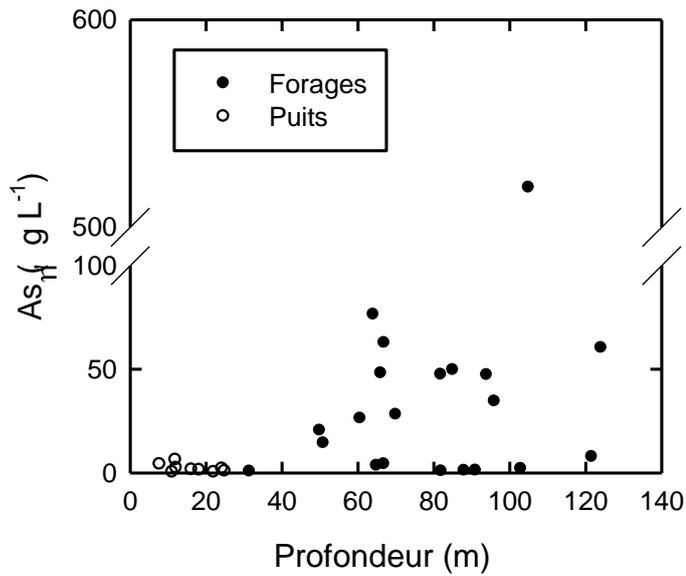
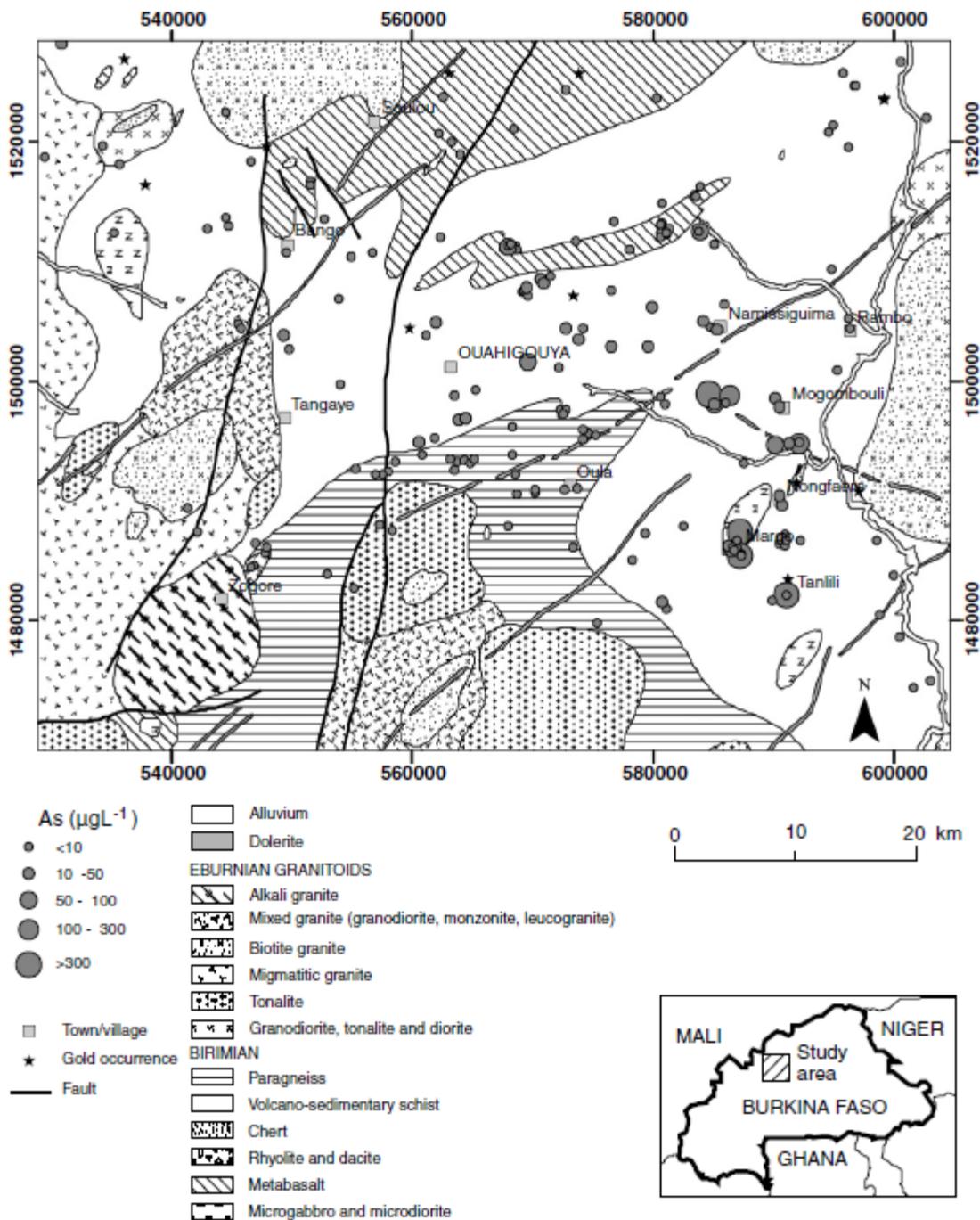


Figure 7: Variation de la concentration arsenicale dans les eaux souterraines avec la profondeur de puits ou de forage.

### 3.3.3 La localisation des sites à risques potentielles de contamination des eaux souterraines.

Les sites de la zone de Ouahigouya dans lesquelles on a une forte probabilité d'avoir une contamination par l'arsenic des eaux souterraines lors de l'implantation d'un forage, sont représentées dans la carte ci dessous :

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.



Carte 1: Carte géologique de la zone de Ouahigouya présentant les concentrations d'arsenic dans les forages et les puits où ont été prélevés les échantillons (Smedley et al. 2007).

On constate que les sites où l'on a des fortes concentrations d'arsenic sont : Mogombouli- Nongfaere- Margo- Tanlili (ce sont les plus gros points représentés sur la carte).

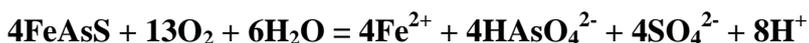
### 3.4 Les sources de l'arsenic dans les eaux souterraines dans la zone de Ouahigouya.

#### 3.4.1 Les sources naturelles.

L'arsenic présent naturellement dans les eaux souterraines de Ouahigouya provient : des roches volcaniques, volcano-sédimentaires et sédimentaires du protérozoïde inférieur (birrimien) ou le précambrien C. Cet ensemble contient l'essentielle des ressources minérales du Burkina Faso notamment l'or avec aussi les minéraux sulfurés associés.

Les minéraux sulfurés qu'on rencontre généralement sont : la pyrite, la chalcopryrite, la pyrite arséniée. Ces minéraux sulfurés ont fortement et invariablement d'où ils apparaissent visiblement comme des couvertures rouge-jaunes oxydées sur le quartz.

L'oxydation de ces minéraux sulfurés s'effectue souvent en présence d'oxyde de fer (Pauline. L. Smedley, 2006). C'est le cas de l'oxydation de l'arsénopyrite (FeAsS) par l'oxygène (atmosphérique ou dissous dans la nappe phréatique) peut être décrite par la réaction suivante:



*Equation 11:Equation d'oxydation de l'arsénopyrite par l'oxygène.*

où l'arsenic est libéré, avec le fer, le sulfate et l'acide

L'oxydation de la pyrite, FeS<sub>2</sub>, par l'oxygène peut être décrite par la réaction suivante:



*Equation 12:Equation d'oxydation de la pyrite par l'oxygène.*

Ce qui peut décharger des quantités substantielles d'arsenic dans la solution. La mobilité de l'arsenic dans l'eau suivant son dégagement des minéraux de sulfure dépend du pH ambiant, des conditions redox et des processus d'adsorption.

En plus les associations entre l'arsenic, le molybdène et le tungstène dans les eaux souterraines de la zone de Ouahigouya soutiennent la fait que l'arsenic est dérivé des minéraux riches en arsenic dans les zones aurifères (COWI, 2005).

#### 3.4.2 Les sources anthropiques.

Les activités socio-économiques exercées dans la zone de Ouahigouya, sont :

- Le maraîchage est une activité de contre saison fortement rémunératrice qui se pratique dans la plupart des villages.
- L'élevage ;

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

- La pratique de l'orpaillage, la zone de Ouahigouya regorge de sites aurifères.

La principale activité pouvant provoquée la présence de l'arsenic dans les eaux souterraines est : l'extraction minière artisanale.

### **3.5 Les processus de contamination des eaux souterraines dans la zone de Ouahigouya.**

Il existe deux possibilités de libération de l'arsenic dans les eaux souterraines dans la zone de Ouahigouya qui sont: l'extraction des eaux par pompage et l'utilisation de la terre provenant des sites d'orpaillage.

#### **3.5.1 L'extraction des eaux par pompage (contamination géologique).**

Les eaux souterraines de ces sites contaminées sont extraites par des forages à pompe manuelle. Or lors d'un pompage, le rabattement de la nappe peut aboutir à la mise « hors d'eau » d'une zone ayant maintenu jusque là l'équilibre nécessaire à la stabilité des sulfures.

Le déséquilibre produit par cette mise hors d'eau va rapidement provoquer l'oxydation de ces minéraux sulfurés et la libération de l'arsenic contenu principalement dans l'arsénopyrite. Il est important de noter que ce processus prendra un certain temps, et que la contamination ne sera effective que quelque temps (mois ou années) après le début du pompage (Michel bonnemaïson, 2005).

Lors de l'étude de S.J. de Jong et A. Kikietta à Mogtéo en 1987, il a été montré qu'une pompe en activité pendant 24h aurait plutôt une légère tendance à l'élévation du taux d'arsenic dans les eaux d'un forage.

#### **3.5.2 L'utilisation de la terre provenant des sites d'orpaillage (contamination minière).**

La pratique de l'orpaillage est assez répandue dans la plupart dans la zone de Ouahigouya ; les sites aurifères sont parfois éloignés des villages, mais les orpailleurs ramènent de la terre ou des blocs de terre qu'ils écrasent et font décanter à proximité ou pratiquement au bord de certains puits traditionnels. Ceci a été constaté sur le terrain, et l'analyse de l'eau de ces puits traditionnels a révélé de fortes concentrations d'arsenic (contrairement aux autres puits où cette pratique n'existe pas), une indication que la terre ramenée pourrait être fortement chargée en arsenic qui se retrouverait dans les puits par les eaux de ruissellement. Un grand travail d'information et sensibilisation reste à faire à ce propos. (COWI, 2005).

### **3.6 Manifestations cutanées de l'arsenicisme dans la zone de Ouahigouya.**

Compte tenu que les effets d'une intoxication aigue a l'arsenic se confondent aux symptômes de plusieurs autres maladies comme : le paludisme, c'est les manifestations cutanées dues a une intoxication chronique qui sont pris en compte car elles sont les preuves d'une exposition prolongée à l'arsenic présent dans l'eau de boisson.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Les résultats obtenus lors d'une étude menée par l'ONG DANIDA et le ministère des affaires étrangères (COWI, 2005) sur les manifestations cutanées de l'arsenicisme dans la zone de Ouahigouya, sont les suivants :

- Une très faible proportion de personnes affectées par des lésions cutanées au niveau des villages ciblés par l'étude (1,2 %).
- Les points d'eau dont la teneur d'arsenic était comprise entre 10 et 50  $\mu\text{g/litre}$ , aucun signe suspect n'a été constaté.
- Pour les points d'eau où la teneur en arsenic était supérieure à 50 $\mu\text{g/litre}$ , quelques manifestations cutanées pouvant être liées à une intoxication à l'arsenic dans l'eau de boisson, ont été révélés. Ces manifestations sont : les démangeaisons, l'hyperkératose ; l'hyperpigmentation.



*Photo 1:Hyperkératose au niveau de la plante des pieds et de la paume de main chez une femme de 45 ans.*

Le rapport entre les zones contaminées et les zones présentant les problèmes de santé ne peut pas être établie à cause de certains facteurs telles que : l'apparition tardive de la maladie chez certaines personnes, la connaissance des concentrations nocifs...

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

## **CHAPITRE IV : PROPOSITION DE TECHNIQUES DE TRAITEMENT DE L'ARSENIC POUR LES SITES CONTAMINEES AU BURKINA FASO.**

La majorité des puits ou forages contaminés par l'arsenic sont généralement fermés par les autorités administratives car les populations ne disposent pas de dispositif de traitement de l'arsenic à l'échelle du ménage comme certains pays en voies de développement comme : le Bangladesh, le Népal, le Vietnam...

Certaines méthodes de traitement ont été proposées mais n'ont pas abouties à une mise en application. Ces méthodes sont les suivantes :

La filtration sur sable enrobé d'oxydes de fer préconisé par l'écologiste, Monsieur Tidjane Zougouri qui s'oppose à la fermeture des puits contaminés à l'arsenic dans la région du nord ([www.afrik.com/article10965.html](http://www.afrik.com/article10965.html)).

La filtration sur charbon est susceptible aussi de donner de bons résultats en milieu rural. Il a été préconisé par S.J. de Jong et A. KIKIETTA dans leur étude sur la contamination des eaux par l'arsenic à Mogtédou.

Il faudrait mentionner que les techniques de traitement proposées doivent être adaptées aux conditions locales et tenir compte des aspects institutionnels, techniques et sociaux propres à chaque situation. Cependant il n'existe vraiment pas d'études approfondies sur la problématique sur les techniques de traitement de l'arsenic au Burkina Faso donc aucune méthode de traitement n'a été développée selon le contexte local.

### **4.1 Le contexte local au Burkina Faso.**

Soumis à un environnement défavorable, le Burkina Faso est classé parmi les pays les moins avancés de la planète. Selon le classement du PNUD en octobre 2009, il occupe la 177<sup>ème</sup> place sur les 182 pays membres des nations unies avec un IDH (indicateur de développement humain) de 0,389. Le revenu moyen par habitant est estimé à 460 dollars (<http://siteressources.worldbank.org/EXTIDAFRENCH/Resources/2010.BurkinaFaso.pdf>). On constate aussi que plus de 44,8% de la population vivent avec moins de 1 USD par jour ce qui du Burkina l'un des pays les plus pauvres au monde ([www.oecd.org/dataoecd/4/31/40568810.pdf](http://www.oecd.org/dataoecd/4/31/40568810.pdf)). C'est la raison pour laquelle les dispositifs de traitement de l'arsenic doivent être moins onéreux afin qu'ils soient accessibles pour les ménages pauvres.

Dans ce cas, les procédés de traitement tels que : les techniques membranaires, les résines échangeuses d'ions, la précipitation/ co-précipitation ne sont appropriés car elles sont trop coûteuses.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Le procédé pouvant s'adapter au contexte burkinabé, est celui de la filtration de l'eau. En effet lors de la seconde étude de la COWI en 2005 dans la zone de Ouahigouya, l'utilisation d'un filtre simple de 0,2 µm a diminué considérablement les concentrations de certains échantillons prélevés des puits qui avaient montré des concentrations arsenicales élevées dans des aperçus précédents en 2004. Voir le tableau dans l'annexe (7).

La filtration de l'eau avec des matériaux absorbant a aussi prouvé procédé son efficacité dans la plupart des pays en voie de développement comme : le Népal, le Bangladesh, le Cambodge...

## **4.2 Procédé de traitement par filtration.**

### **Hypothèse :**

Il faudrait considérer que les eaux des sites contaminées au Burkina Faso ne contiennent pas d'ions en compétition avec l'arsenic car avant d'installer un dispositif de traitement, il faut analyser l'eau de puits pour en déterminer les caractéristiques chimiques générales et la concentration en arsenic. L'analyse doit également comprendre la détermination de la présence et de la concentration d'ions en compétition (p. ex., fluorure, fer, sulfate, silicate) et de matières organiques dans l'eau, qui pourraient nuire à l'élimination de l'arsenic.

Cette condition étant admise, le choix de notre solution de traitement de l'arsenic dans les eaux souterraines sera basé sur les deux méthodes proposées par d'une part Mr Tidjane Zougouri écologiste et d'autre part S.J. Jong et A. Kikietta.

### **4.2.1 La filtration sur charbon actif.**

Le charbon est une substance qui depuis longtemps est utilisé pour adsorbés les impuretés. Une cartouche de charbon actif peut adsorber des milliers de différents produits chimiques. C'est un carbone qui a une légère charge électrique positive le rendant attirant aux produits chimiques et aux impuretés. Pendant que l'eau traverse le charbon actif, les ions négatifs des contaminants sont attirés sur la surface des granules de carbone.

Les filtres de charbon actif utilisés pour la filtration de l'eau à la maison contiennent typiquement l'un ou l'autre charbon actif: granulaire ou charbon en bloc. Bien que tous les deux soient efficaces, les filtres de charbon en bloc ont généralement un rapport plus élevé de suppression des contaminants. Les deux facteurs les plus importants affectant l'efficacité de la filtration de charbon actif sont la quantité de charbon dans la cartouche et le nombre d'heures que le contaminant est en contact avec elle. De même, plus le débit de l'eau

est faible, plus les contaminants seront en contact avec le carbone plus longtemps, et plus aura lieu le phénomène d'adsorption. La quantité de particulaire affecte également le taux de déplacement (particules à être aspirées par le charbon actif).

Ils sont habituellement évalués par la taille des particules qu'ils sont capables d'enlever, mesuré en microns, et généralement en gamme de 50 microns (moins efficace) jusqu'à 0.5 micron (plus efficace). Un système typique de filtration sous évier a des cartouches de charbon filtrantes de 12 à 24 pouces de charbon actif. Toutes les matières carbonées peuvent être utilisées pour créer du charbon actif, mais différents critères économiques réduisent le choix aux : bitume, tourbe, houille de bois, coque de noix de coco. Le charbon de noix de coco coûte 20% plus chère mais il est considéré comme le plus efficace.

#### ➤ **Le fonctionnement d'un filtre à charbon actif.**

Il y a deux principaux systèmes par lesquels le charbon actif enlève des contaminants de l'eau ; par adsorption, et par réduction catalytique, un processus impliquant l'attraction des ions négatifs des contaminants par les ions chargés positivement de charbon actif. Des composés organiques sont enlevés par adsorption et des désinfectants résiduels tels que le chlore et les chloramines sont enlevés par réduction catalytique.

#### ➤ **L'utilisation d'un filtre à charbon actif.**

La filtration de l'eau par charbon actif est très commune dans un certain nombre de systèmes de traitement de l'eau à la maison. Elle peut être employée comme filtre autonome pour réduire ou éliminer de mauvais goûts et odeurs, chlore, et beaucoup de contaminants organiques dans les approvisionnements en eau (traités préalablement ou chlorés) municipaux pour produire une eau potable sensiblement améliorée. Elle est également très utilisée généralement comme pré traitement en tant qu'élément d'un système d'osmose inverse pour réduire le nombre de contaminants organiques, chlore, et d'autres particules qui pourraient encrasser la membrane d'osmose inverse.

#### ➤ **Les contaminants supprimés par un filtre charbon actif.**

Les filtres de charbon actif enlèvent/réduisent beaucoup de produits chimiques organiques volatils, pesticides et herbicides, comme le chlore, le benzène, le radon, les dissolvants et d'autres produits chimiques synthétiques trouvés dans l'eau de robinet. Quelques filtres de charbon actif sont modérément efficaces pour enlever ce qui est métaux lourds. En outre, les filtres charbon actif en bloc enlèvent des particules autour de 0.5 micron, y compris le Giardia et le Cryptosporidium (parasites microscopiques qui peuvent être retrouvés

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

dans l'eau), la turbidité. Mais il est conseillé d'utiliser des systèmes spécifiques pour retirer tout ce qui est métaux lourds.

Les filtres de charbon ne parviennent généralement pas à enlever les contaminants inorganiques ou les métaux dissous tels que des minéraux/sels (dureté de l'eau), l'arsenic, l'amiante, le chrome, le cuivre, le fluore, le mercure, le nickel, les nitrates/nitrites, le sélénium, le sulfate, le thallium... L'élimination de ces contaminants exige un système de filtre d'eau par osmose inverse ou un distillateur adapté.

Les filtres charbon actifs n'enlèvent pas les sédiments et autres particulaires très bien, ainsi ils sont souvent précédés par un filtre de sédiment. Les préfiltres de sédiment prolongent également la vie de la cartouche de charbon actif en éliminant les contaminants bruts qui obstrueraient le charbon actif et réduirait de ce fait la superficie disponible pour l'adsorption.

Source : ([www.une-eau-pure.com/purification-de-l-eau/filtration-charbon-actif.html](http://www.une-eau-pure.com/purification-de-l-eau/filtration-charbon-actif.html)).

#### **4.2.2 La filtration sur sable enrobé d'oxydes de fer.**

On distingue dans ce cas, deux types de filtres selon la conception :

Le filtre à sable conçu avec du sable enrobé d'oxydes de fer provenant des usines de traitements d'eaux riches en fer (le filtre de l'IHE);

Le filtre à sable conçu avec des pointes de fer servant à produire des oxydes de fer (le filtre Kanchan).

##### **4.2.2.1 Le filtre de l'IHE.**

L'oxyde capte l'arsenic contenu dans l'eau que l'on fait couler au travers de ce sable. Cette technique n'est pas nouvelle mais la production de ce sable ex nihilo revient assez chère. Le génie de la solution de l'IHE est de récupérer ce sable dans les usines de traitement des eaux, nombreuses en Europe. Au bout de quelques années, le sable utilisé dans ces usines se retrouve enrobé de ce fameux oxyde. «Avant on le jetait, rappelle Branislav Petrusovski, directeur du projet (filtre à eau anti arsenic) de l'Unesco, or son efficacité est comparable au sable artificiel.»

##### **➤ Composition du filtre.**

Ce filtre de l'IHE est composé :

Un simple tube de PVC,

D'un diamètre de 30 cm pour 1 mètre de long,

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Du sable enrobé d'oxyde de fer.

➤ **Mode de fonctionnement.**

Il suffit juste remplir le filtre avec de l'eau contaminée par l'arsenic pour obtenir de l'eau traitée. Le sable et les hydroxydes de fer éliminent l'élément toxique lors de son passage dans le tube en PVC.

Ce filtre de type «familial» est donc suffisant pour fournir cent litres d'eau de boisson et de cuisine pour vingt personnes par jour. Une douzaine de ces filtres ont été testés à Khulna, dans le sud du Bangladesh, depuis février 2004. L'ONG Christian service society (CSS) réalise les tubes sur place en association avec l'IHE : ils annoncent un coût de revient de 35 euros par filtre.

Une fois saturé en arsenic, au bout d'environ deux ans, le sable pourrait être utilisé pour faire des tuiles ! Selon l'IHE, ce sable serait incapable de relarguer l'arsenic.

Source : ([www.acme-eau.org/pollution-L-Unesco-a-presente-un-filtre-qui-capte-l-essentiel-du-poison-l-Arsenic-du-sable-usage-pour-laver-l-eau\\_a371.html](http://www.acme-eau.org/pollution-L-Unesco-a-presente-un-filtre-qui-capte-l-essentiel-du-poison-l-Arsenic-du-sable-usage-pour-laver-l-eau_a371.html)).

#### **4.2.2.2 Le filtre Kanchan.**

Au Népal, dans le cadre d'un projet d'eau, un nouveau filtre a été développé pour lutter contre la consommation de l'arsenic dans les ménages. Il est basé sur les filtres SONO, développés au Bangladesh. L'arsenic est absorbé par l'hydroxyde ferrique.

➤ **La composition du filtre.**

Le filtre Kanchan est composé :

Des pointes en fer,

Des morceaux de briques,

Du sable.

La figure ci-dessous illustre ce filtre Kanchan.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

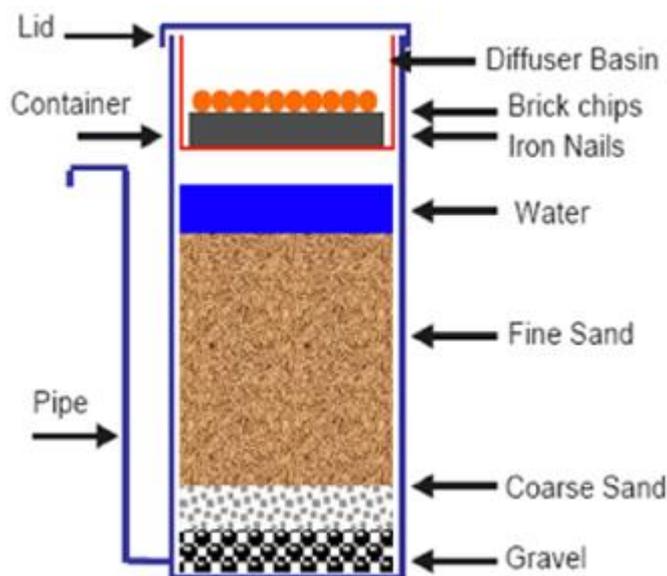


Figure 8: la composition détaillée du filtre Kanchan.

#### ➤ Le mode de fonctionnement.

Il fonctionne sur un principe simple : lorsque les pointes sont exposées à l'air et à l'eau, elles se rouillent rapidement, produisant des particules ferriques d'hydroxyde. Quand l'eau contaminée à l'arsenic est versée dans le filtre, l'élément toxique est rapidement adsorbé à la surface des particules d'hydroxyde de fer. Les particules de fer chargées d'arsenic sont alors chassées vers la couche de sable en dessous. La couche de sable fin capture les particules de fer chargées d'arsenic à quelques centimètres au dessus, éliminant de ce fait, efficacement l'arsenic.

Ce filtre a beaucoup d'avantages :

Il n'exige pas l'addition d'aucun produit chimique.

Seulement les clous en fer doivent être remplacés après environ 2 ans.

Le filtre est fait de matières localement disponibles et coûte seulement 20\$ canadien (les filtres sont habituellement vendus à moins de 5\$ et sont donnés gratuitement aux familles extrêmement pauvres).

Le débit est de 15L/h, fournissant assez d'eau pour une grande famille.

Il filtre aussi les microbes produisant ainsi une eau sûre pour la consommation.

Source : ([www.fr.ird.nl/page/34372](http://www.fr.ird.nl/page/34372) et [www.filtersforfamilies.org](http://www.filtersforfamilies.org)).

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

#### **4.3 Commentaires/analyses :**

Après comparaison de ces types de filtre, on constate que le filtre Kanchan pourrait bien s'adapter au contexte burkinabé car comme le filtre est réalisable. Tous les matériaux entrant dans la composition de ce filtre, sont disponibles ici au Burkina Faso.

En ce qui concerne le filtre de l'IHE, le prix de vente aux ménages en milieu rural risque être élevé car le sable enrobé provient des stations de traitements d'eaux européennes. Mais il existe une possibilité de trouver du sable riche en fer vu qu'on a la présence d'une classe des sols des sols à sesquioxydes de fer et de manganèse (sols ferrugineux) au Burkina Faso (G. Aubert, 1989).

Pour le filtre à charbon actif, le problème réside sur le fait qu'il faut utiliser un osmoseur après traitement pour que l'élimination des métaux lourds, l'arsenic soit sûre. La manipulation ne sera pas facile et le prix de vente sera coûteux pour les ménages en milieu rural.

Le problème qui peut exister pour que ce filtre ne s'adapte pas au Burkina Faso, est la présence des ions en concurrence dans les eaux souterraines.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

### **CHAPITRE V: LES LIMITES DE L'ETUDE.**

Les limites de notre étude sont les suivantes :

Il n'y a pas eu de site d'accueil pour une étude de cas spécifique à une région contaminée dans le Burkina Faso.

L'analyse des eaux souterraines afin de connaître la concentration de l'arsenic total et les espèces majoritaires au Burkina Faso, n'a pas été faite. Les valeurs présentes dans ce rapport sont celles des études antérieures réalisées au Burkina Faso. Le paramètre de la variation de ces différentes concentrations avec le temps n'a pas été pris en compte donc ces valeurs ne sont à jour.

L'insuffisance des données sur l'arsenic au Burkina Faso est à noter. Quelques études ont été faites à ce sujet et les données statistiques, les cartes sont presque inexistantes. Dans le cas où il y'en a, on a le problème de toute une série de tracasseries administratives à suivre car certains documents ne pas consultables par le public.

L'étude est essentiellement basée sur la revue documentaire.

La solution proposée n'a pas été testée sur le terrain afin de voir son efficacité et son adaptation au contexte burkinabé. Ce qui aurait été mieux c'est un essai auprès d'un certain nombre de ménages volontaires pour cette expérience.

## **LA CONCLUSION GENERALE ET LES RECOMMANDATIONS.**

### **5.1 La conclusion générale.**

Eu égard de tout ce qui précède, la contamination des eaux souterraines au Burkina Faso est un phénomène réel et à ne pas négliger car on enregistre dans plusieurs régions des concentrations allant jusqu'à 100 fois la valeur guide (10µg/L) fixée par l'OMS. Cette contamination est d'une part d'origine géologique et d'autre part d'origine anthropique liée aux activités minières.

Les populations exposées à l'arsenic par le biais de l'eau de boisson des puits et des forages au Burkina Faso, sont généralement affectées par des maladies telles que : la brûlure conjonctivale, le purpura, la fièvre, la diarrhée, l'hyperkératose palmo-palmaire et l'hyperpigmentation. Ces maladies sont des manifestations des intoxications aiguë et chronique à l'arsenic.

Le traitement des eaux contaminées par l'arsenic est une tâche ardue au Burkina Faso, le manque de connaissances et d'études à ce sujet, l'existence d'une gestion pour ce genre de pollution en sont les causes de cette difficulté. Bien que le tour de jardin ne soit pas encore fait sur le sujet, certaines méthodes de traitement en occurrence la filtration peuvent être la solution à ce problème d'arsenic dans les eaux de boisson des ménages.

La filtration de l'eau à l'aide d'un filtre à sable enrobé d'oxydes de fer (filtre kanchan) semblerait s'adapter au contexte du Burkina Faso c'est-à-dire peu onéreux, fabriquer avec des matériaux locaux (clous, briques, sable) et facile à manipuler pour les ménages ruraux.

Notre mémoire «*la problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement* » se présente comme une première étape de collecte d'informations scientifiques générales sur ces substances. De ce fait les statistiques et informations citées dans le présent rapport peuvent constituer une base de réflexion, au groupe d'experts commis à cette tâche.

### **5.2 Les recommandations.**

L'état de lieux fait sur la contamination des eaux souterraines par l'arsenic au Burkina Faso dans notre rapport, nous montre clairement qu'il y a urgence compte tenu des risques sanitaires encourus par les populations. De ce fait, le danger que représente l'arsenic dans les eaux de boisson doit être pris en compte par les autorités administratives.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

L'étude que nous venons de mener pourrait contribuer à la mise en place d'un système de gestion de pollution par l'arsenic des eaux souterraines au Burkina Faso. Ainsi nous proposons que d'autres études soient menées dans ce sens et cette fois-ci il faudrait pousser très loin les recherches, nous pouvons donc recommander :

L'établissement de la carte à risques mettant en évidence les zones potentiellement menacées par une contamination à l'arsenic au Burkina Faso.

La réalisation des études de cas sur les sites où on a décelé la présence de l'arsenic et surtout les sites aurifères.

Une étude sur la géochimie de l'arsenic dans les eaux souterraines.

L'analyse du comportement et la quantification des différentes espèces arsénées As(V) et As(III) dans les eaux souterraines.

Le renforcement des laboratoires d'analyses en équipement de dosage de l'arsenic total et des différentes espèces arsénées présentes dans les eaux souterraines.

Le développement des techniques d'analyse fiable et précise de l'arsenic dans les eaux souterraines.

La sensibilisation des ménages sur les effets nocifs de la présence de l'arsenic dans les eaux de boisson.

Une étude sur la toxicité de l'arsenic organique au Burkina Faso.

Une étude sur les manifestations cancérigènes de l'arsenic.

L'apport des méthodes de potabilisation adaptées à la réalité du terrain dans les régions touchées.

Le domaine de recherche sur l'arsenic étant vaste et pas encore bien exploré au Burkina Faso, plusieurs recommandations et perspectives peuvent s'ajouter à cette liste que nous avons proposée ci-dessus.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

## **BIBLIOGRAPHIE.**

### **SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.**

*Les références citées dans cette partie, sont les travaux de nombreux scientifiques qui ont fait des recherches sur la problématique de l'arsenic dans le monde.*

#### B

Badjpai S., Chaudhuri M. - 1999 - Removal of arsenic from ground water by manganese dioxidecoated sand - *Journal of Environmental Engineering*, 125, 782-784.

Bissen M., Frimmel F.H. - 2003a - Arsenic - a Review. Part I: Occurrence, toxicity, speciation, mobility - *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 31, 9-18.

Bissen M., Frimmel F.H. - 2003b - Arsenic - a Review. Part II: Oxidation of arsenic and its removal in water treatment - *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 31, 97-107.

Bissen M., Viellard-Baron M.M., Schindelin A.J., Frimmel F.H. - 2001 - TiO<sub>2</sub>-catalyzed photooxidation of arsenite to arsenate in aqueous samples - *Chemosphere*, 44, 751-757.

Bohro M., Widerer P. - 1996 - Optimized removal of arsenate(III) by adaptation of oxidation and precipitation processes to the filtration step - *Water Science and Technology*, 34, 25-31.

Brewster M.D., Laschinger M.N. - 1992 - Arsenic removal using electrochemically generated iron in conjunction with hydrogen peroxide addition, 46th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings, pp. 339-346.

#### C

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

Chiu V.Q., Hering J.G. - 2000 - Arsenic adsorption and oxidation at manganite surfaces. Method for simultaneous determination of adsorbed and dissolved arsenic species – *Environmental Science and Technology*, 34, 2029-2034

#### D

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Driehaus W., Seith R., Jekel M. - 1995 - Oxidation of arsenate (III) with manganese oxides in water treatment - *Water Research*, 29, 297-305.

## F

Ferguson J.F., Gavis J. - 1972 - A review of the arsenic cycle in natural waters – *Water Research*, 16, 1259-1274.

## G

Ghurye G., Clifford D. - 2001 - Laboratory study on the oxidation of arsenic III to arsenic V.

EPA/600/R-01/021. Cincinnati, Ohio

Grossier P., Ledrans M. - 1999 - Contamination par l'arsenic des eaux de distribution en France : une première approche de l'exposition de la population - *Techniques Sciences et Méthodes*, 2,-32.

## H

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.

Hug S.J., Leupin O.X. - 2003 - Iron-catalysed oxidation of arsenic (III) by oxygen and by hydrogen peroxide: pH-dependent formation of oxidants in the Fenton reaction - *Environmental Science and Technology*, 37, 2734-2742.

Hung D.Q., Nekrassova O., Compton R.G. - 2004 - Analytical methods for inorganic arsenic in water: a review – *Talanta*, 64, 269-277.

## J

Jain C.K., Ali I. - 2000 - Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques - *Water Research*, 34, 4304-4312.

Jiang J.Q. - 2001 - Removing arsenic from groundwater for the developing world, a review - *Water Science and Technology*, 44, 89-98.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Johnston R., Heijnen H. - 2001 - Safe technology for arsenic removal, In: Ahmed M.F., Ali M.A. and Edeel Z. (Eds.), Technologies for arsenic removal from drinking water, Bangladesh university of engineering and technology and United Nations university, pp. 1-22.

## K

Kim M.J., Nriagu J. - 2000 - Oxidation of arsenite in groundwater using ozone and oxygen - *Science of the Total Environment*, 247, 71-79.

Kim M.J., Nriagu J., Haack S. - 2002 - Arsenic species and chemistry in groundwater of southeast Michigan - *Environmental Pollution*, 120, 379-390.

## L

Lenoble V. - 2003 - Elimination de l'arsenic pour la production d'eau potable: oxydation chimique et adsorption sur des substrats solides innovants. Thèse de doctorat d'université-Laboratoire des Sciences de l'Eau et de l'Environnement, Université de Limoges

Lombi E., Wenzel W.W., Sletten R.S. - 1999 - Arsenic adsorption by soils and iron-oxide-coated sand: kinetics and reversibility - *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 162, 451-456.

## M

Mandal B.K., Suzuki K.T. - 2002 - Arsenic round the world: a review - *Talanta*, 36, 976-981

Manning B.A., Fendorf S.E., Bostick B., Suarez D.L. - 2002b – Arsenic (III) oxidation and arsenic (V) reactions on synthetic birnessite - *Environmental Science and Technology*, 36, 976-981

McMullin M., Winchester E., Hoyer W. - 1995 - Arsenic removal from ground water using a simple oxidation/filtration process, American Water Works Association, 112th Annual Conference in Anaheim, Californnie, pp. 937-945, ISSN: 0360-814X.

Molnar L., Vircikova E., Lech P. - 1994 - Experimental study of As (III) oxidation by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> - *Hydrometallurgy*, 35, 1-9.

Moore J.N., Walkers J.R., Hayes T.H. - 1990 - Reaction scheme for the oxidation of As (III) to As (V) by birnessite - *Clays and Clay Minerals*, 38, 549-555.

## N

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Nesbitt H.W., Canning G.W., Bancroft G.M. - 1998 -XPS study of reductive dissolution of 7A birnessite by  $H_3AsO_3$ , with constraints on reaction mechanism - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 2097-2110.

## O

Oscarson D.W., Huang P.M., Defosse C., Herbillon A. - 1981a - Oxidative power of Mn(IV) and Fe(III) oxides with respect to As(III) in terrestrial and aquatic environments - *Nature*, 291, 50-51.

Oscarson D.W., Huang P.M., Liaw W.K. - 1981b - Role of manganese in the oxidation of arsenite by freshwater lake sediments - *Clays and Clay Minerals*, 29, 219-225.

## P

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

Pourbaix. - 1963 - Atlas des équilibres électrochimiques à 25°C, Gautier-Villars, Paris.

## R

Rodriguez R., Ramos J.A., Armienta A. - 2004 - Groundwater arsenic variations: the role of local geology and rainfall - *Applied Geochemistry*, 19, 245-250.

## S

Sadiq M., Zaidi T.H., Mian A.A. - 1983 - Environmental behavior of arsenic in soils: theoretical - *Water, Air, and Soil Pollution*, 20, 369-377.

Smedley P.L., Kinniburgh D.G. - 2002 - A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters - *Applied Geochemistry*, 17, 517-569.

Smith R.M., Martell A.E. - 1976-1982 - Critical Stability Constants, Vol. 3-5, Plenum Press, New York and London.

Subramanian K.S., Viraragavan T., Phommavong T., Tanjore S. - 1997 - Manganese Greensand for removal of arsenic in drinking water - *Water Quality Research Journal of Canada*, 32, 551-561.

## T

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Teixera L.A., Monteiro A.G., Kohler H.M. - 1990 - The detoxification of effluents containing arsenic with iron sulfate and hydrogen peroxide, EPD Congress, pp. 189-207.

Thomas P. - 2002 - Les micropolluants minéraux dans les eaux de distribution. L'arsenic :

Méthodes d'analyses - *Techniques Sciences et Méthodes*, 5, 26-33.

Tozawa K., Nishimura T. - 1984 - .Oxidation of As (III) to As (V) in aqueous solutions -

*Metallurgical review of the Mining and Metallurgical Institute of Japan*, 1, 76-77.

## U

US EPA. - 2000a - Arsenic removal from drinking by ion exchange and activated alumina plants, EPA/600/R-00/088. Cincinnati, Ohio

US EPA. - 2003 - Arsenic treatment technology evaluation handbook for small units. EPA/816/R- 03/014. Cincinnati, Ohio-Office of Water (4606M).

## W

Welté B. - 2002 - Les micropolluants minéraux dans les eaux de distribution. L'arsenic :

Traitement - *Techniques Sciences et Méthodes*, 5, 36-42.

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

[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq0506.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq0506.pdf).

## ETUDE DE CAS ET LES PROPOSITIONS DE SOLUTIONS.

*Les documents et les sites web cités dans ces parties, sont ceux qui ont été consulté lors de notre étude.*

Les documents :

Agenda 21 national du Burkina Faso.

Annette Johnson et al : Eawag New 65f/ 2008, Pollution d'origine géogène. 48p.

Barro-Traoré, F ; Tiendrebéogo S .R.M ; Lallogo, S ; Tiéndrébéogo, S ; Dabal, M ; Ouédraogo, H (2006) : Les manifestations cutanées de l'arsénicisme au Burkina Faso : aspects épidémiologiques et cliniques.

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

Code de l'environnement du Burkina Faso.

COWI-2005- Rapport final d'étude approfondie dans 8 villages de la région Nord ayant des forages à taux d'arsenic élevés. Ministère des affaires étrangères et l'ONG DANIDA. 171p.

G. Aubert, (1989) : les sols des savanes de basse et moyenne altitude en Afrique Occidentale. 4-11p.

Halidou Koanda: vers un assainissement urbain durable en Afrique subsaharienne: approche innovante de planification de la gestion des boues de vidange. Thèse de doctorat, section des sciences et ingénierie de l'environnement, école polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne 2006. 52p

Idrissa Semdé, (2005) : contribution du Burkina Faso à l'étude sur le plomb et le cadmium. 25-26p.

J.J ; Seguin, (2005)- projet réseau SIG-Afrique carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 million. BRGM/RP-54404-FR. 13-61p.

Le gouvernement du Canada : Arsenic- recommandation pour la qualité de l'eau potable au Canada. Document technique. 2006. 40p.

M.C. Dictor, synthèse des travaux de R&D en France (1999-2004) sur la thématique de l'arsenic. BRGM/RP. 53252-FR. 2004. 130p.

Michel Bonnemaïson- Géoscience, numéro 2 : l'eau, facteur de libération. 6p. rapport du secrétariat du conseil exécutif de l'OMS, réduction des concentrations d'arsenic et sécurité de la nappe phréatique. EB118/14. Mai 2006.

P.L. Smedley et al, (2007) Arsenic in groundwater from mineralized protozoic basement rocks of Burkina Faso. 1074 - 1091p.

P.L. Smedley (2006) Arsenic in groundwater – A world problem. 16 – 18p.

S. J. de JONG et A KIKIETTA (1979) : Une particularité bien localisée, heureusement, présence d'arsenic en concentration toxique dans un village près de Mogtédou. Bulletin de liaison du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques. 36-37p.

Les sites internet consultés sont :

[www.afrik.com/article10965.html](http://www.afrik.com/article10965.html);

<http://siteressources.worldbank.org/EXTIDAFRENCH/Resources/2010.BurkinaFaso.pdf>;

Problématique de la contamination des eaux souterraines par l'arsenic, cas de Ouahigouya au Burkina Faso : état des lieux et propositions de traitement.

[www.oecd.org/dataoecd/4/31/40568810.pdf](http://www.oecd.org/dataoecd/4/31/40568810.pdf);

[www.une-eau-pure.com/purification-de-l-eau/filtration-charbon-actif.html](http://www.une-eau-pure.com/purification-de-l-eau/filtration-charbon-actif.html);

[www.fr.ird.nl./page/34372](http://www.fr.ird.nl./page/34372);

[www.filtersforfamilies.org](http://www.filtersforfamilies.org).

## ANNEXES.

### ANNEXE 1

Tableau 3: Valeurs de concentrations arsenicales dans divers minéraux naturelles. ( sources des données: Stewart, 1963; Baur and Onishi, 1969; Boyle and Jonasson, 1973; Dudas, 1984; Arehart et al., 1993; Fleet and Mumin, 1997; Picler et al., 1999; Paktunc et al.,).

Mineral	Arsenic concentration range (mg/kg)
<i>Sulphide minerals</i>	
Pyrite	100–120,000
Pyrrhotite	5–100
Marcasite	20–276,000
Galena	5–10,000
Sphalerite	5–17,000
Chalcopyrite	10–5000
<i>Oxide minerals</i>	
Haematite	up to 29,000
Iron(III) oxyhydroxide	up to 76,000
Magnetite	2.7–41
Maghemite	up to 186,000
<i>Silicate minerals</i>	
Quartz	0.4–1.3
Feldspar	<0.1–2.1
Biotite	1.4
Amphibole	1.1–2.3
Olivine	0.08–0.17
Pyroxene	0.05–0.8
<i>Carbonate minerals</i>	
Calcite	1–8
Dolomite	<3
Siderite	<3
<i>Sulphate minerals</i>	
Gypsum/anhydrite	<1–6
Barite	<1–12
Jarosite	34–1000
<i>Others</i>	
Apatite	<1–1000
Halite	<3–30
Fluorite	<2

## ANNEXE 2

Tableau 4: Valeurs de pKa d'après Smith et Martell (1976-1982),  $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $I=0\text{ mol/L}$  Constantes physico-chimiques : *Handbook of Chemistry and Physics*, 1996-1997.

Composés	Degré d'oxydation	pKa et constantes physico-chimiques
<b>Acide arsénieux</b>	(+III)	9,29/ 12,1/13,4
<b>Acide arsénique</b>	(+V)	2,24 / 6,96 / 11,5
<b>Acide monométhylarsornique (MMA)</b>	(+V)	4,19 / 8,77 Point de fusion : $160,5^{\circ}\text{C}$
<b>Acide diméthylarsinique (DMA)</b>	(+V)	1,78 / 6,14 Point de fusion : $195^{\circ}\text{C}$ Solubilité : 66,7/100mL
<b>Arsine</b>	(-III)	Point d'ébullition : $-62,5^{\circ}\text{C}$ Densité : 3,42 g/L
<b>Triméthylarsine (TMA)</b>	(-III)	Point de fusion : $-87,3^{\circ}\text{C}$ Point d'ébullition : $52^{\circ}\text{C}$
<b>Arsénobétaïne</b>	(+V)	4,7
<b>Arsénocholine</b>	(+V)	
<b>Oxyde de Triméthylarsine (TMAO)</b>	(+V)	3,6

### ANNEXE 3

Tableau 5: Paramètres analytiques obtenus par différentes techniques de détection de l'arsenic inorganique dans les échantillons d'eau durant les 10 dernières années (source : Hung et al, 2004)

Espèces	Pré concentration/séparation	Dérivation	Détection	Limite de détection ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )
<b>Spectrométrie atomique</b>				
As (III)		HG	AAS	0,6
As (V)				0,5
As (III)	FI-SE	HG	AAS	0,05
As (V)				2
As (III)	FI	HG	AAS	0,037
As (III)	FI-KR: PDC	HG	AFS	0,023
As (III)		HG	AFS	0,67
As (III)	IC	HG	AFS	4
As (III)	SPE		GFAAS	0,11
As (V)				0,15
As (III)	PDC		GFAAS	0,02
As (III)	AE-resin: PDC		GFAAS	6,6
As (III)	SPE		GFAAS	0,04
<b>Techniques ICP</b>				
As (III)		HG	ICP-AES	0,7
As (III)	FI-KR		ICP-MS	0,021
As(V)				0,029
As (V)	SPE		ICP-MS	0,008
As (III)	HG		ICP-MS	0,003
As (III)	HG-GF		ICP-MS	0,002
As (III)	HPLC		ICP-MS	0,02
As (III)	HPLC		ICP-MS	0,06
<b>Techniques nucléaires</b>				
As (III)	PDC		NAA	0,001
As (V)				
As (III)	CE		NAA	0,02
<b>Electrochimie</b>				
As (III)			CSV	0,52
As (III)			CA	0,15
As (III)			CCSA	3
As (V)				0,5
As (III)			ASV	0,19
As (III)			SWCSV	0,0045
As (III)			ASV	0,32

**HG** : génération d'hydrures; **AAS** : spectrométrie d'absorption atomique; **FI** : injection à flux constant; **SE** : extraction solide; **KR** : réacteur fermé; **PDC** : complexe pyrrolidine dithiocarbamate; **AFS** : spectrométrie de fluorescence atomique; **IC** : chromatographie ionique; **SPE** : extraction en phase solide; **GFAAS** : spectrométrie d'absorption atomique four; **AE** : échange d'anions; **ICP** inductive plasma d'argon; **AES** : spectrométrie d'émission atomique; **MS** : spectrométrie de masse; **GF** : four graphite; **HPLC** : chromatographie liquide haute performance; **NAA** : activation neutronique instrumentale; **CE** : échange de cations; **CSV**: polarographie par redissolution cathodique; **CA** : chrono ampérométrie; **CCSA** : polarographie impulsionnelle à courant constant; **ASV** : polarographie par redissolution anodique; **SWCSV** : polarographie par redissolution cathodique à impulsions carrées.

#### **ANNEXE 4**

*Tableau 6: normes nationales relatives à la concentration maximale en arsenic dans les eaux destinées à la consommation humaine (source : Yamamura et al, 2001).*

<b>Pays dont la norme est de 50µg/L</b>	<b>Pays dont la norme est comprise entre 10 et 50µg/L</b>	<b>Pays dont la norme est de 10µg/L</b>	<b>Pays, dont la norme est inférieure à 10µg/L</b>
Bahreïn (-)	Canada 25µ/L (1999)	Union européenne (1998)	Australie (1996) 7µg/L
Bangladesh (-)		Japon (1993)	
Bolivie (1997)		Jordanie (1991)	
Chine (-)		Laos (1998)	
Egypte (1995)		Mongolie (1998)	
Inde (-)		Namibie (1994)	
Indonésie (1990)		Syrie (1994)	
Oman (1978)			
Philippines (1978)			
Arabie Saoudite (1983)			
Sri-Lanka (1983)			
Viet Nam (1989)			
Zimbabwe (1986)			
Etats-Unis (1986)			

(-) indique l'année de mise en valeur de la norme.

## ANNEXE 5

Tableau 7: Comparatif des différentes techniques de traitement pour l'élimination de l'arsenic dans l'eau.

Procédé d'oxydation chimique	Quantité d'oxydation nécessaire.	Facilité de mise en œuvre sur le terrain	Toxicité /risque sanitaire	Coût	Observations
Peroxyde d'hydrogène	Très fort	0/+	0	++++	Réaction accélérée en présence de Fe(II)
Ozone	r=3	0	0	++++	Réaction accélérée en présence de Fe(II)
Hypochlorite de sodium	r=3	++++	+++	+	Risque de formation de THM
Permanganate de potassium	r=0,9	+++	0	+	Formation de manganèse sous forme particulaire. (MnO <sub>2</sub> (s))
Dioxyde de manganèse	Très fort excès	+++	++	+	Pas de manganèse relargué.
Chlorure ferrique	r=0,2	+++	0	+ / ++	Interférences liées à SO <sub>4</sub> , Cl et NO <sub>3</sub> ; formation de boues.
Limaille de fer	?	+++	0	++	Interférences liées à PO <sub>4</sub>
Photochimique	?	+++	0 / +++	+ / ++	Lampe à vapeur de Hg basse pression, pH acide.

**Légende :** +++++ : très élevé ; +++ : élevé ; ++ : moyen ; + : faible ; 0 : aucun ; ? : informations insuffisantes ; r : rapport stœchiométrique

## **ANNEXE 6**

*Tableau 8: Comparaison des concentrations arsenicales ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) de divers puits et forages déterminés à temps différents. Les analyses de 2004 étaient non-filtrées ; 2005 ont été filtrées.*

<b>Échantillon</b>	<b>Type</b>	<b>Location</b>	<b>Juin 2004</b>	<b>Dec 2004</b>	<b>Jan-Fev 2005</b>
OG1	Forage	Youba école	53	70	62.6
OG2	Forage	Youba école Bilingue		3.8	5.28
OG3	Forage	Youba Tangsaka B		13	4.12
OG4	Forage	Pellé Bendogo + Tengadin		25	26.1
OG5	Forage	Pellé Toguini		48	47.3
OG7	Forage	Pellé Nayiri		6.1	0.62
OG10	Forage	Margo Koyogo	79	80	76.3
OG13	Forage	Margo Koyogo		19	20.3
OG14	Forage	Margo Boutoulo	560	540	519
OG17	Forage	Margo école		7.4	8.29
OG18	Forage	Tougou CSPTS	2.4	1.5	0.93
OG19	Forage	Tougou Sandogo	7.4	1.1	1.03
OG20	Forage	Tougou Ytaoré	2.3	1.8	1.9
OG21	Forage	Tougou Rakoumnisaka A	5	6.3	7.61
OG22	Forage	Tougou Magrougou		2	1.59
OG23	Forage	Tougou Nayiri		2.6	0.72
OG24	Forage	Tougou Nayiri		5.2	4.63
OG25	Forage	Tougou Nayiri école		6.2	0.9
OG26	Forage	Tougou Tambégdin		0.8	<0.5
OG27	Forage	Tougou Pelma	14	50	60.2
OG29	Forage	Tougou Pemanema Yiri		0.8	<0.5

Tableau 9(suite): Comparaison des concentrations arsenicales ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) de divers puits et forages déterminés à temps différents. Les analyses de 2004 étaient non-filtrées ; 2005 ont été filtrées.

Échantillon	Type	Location	Juin 2004	Dec 2004	Jan-Fev 2005
OG30	Forage	Nongfaéré CSPA	35	7.2	28
OG31	Forage	Nongfaéré Mossin	49		48
OG32	Forage	Irbou Mossin école		140	162
OG33	Forage	Irbou Mossin école	57	11	3.36
OG34	Forage	Irbou Sandogo		15	15.9
OG35	Forage	Mogombouli Yombo		28	34.4
OG36	Forage	Mogombouli CSPA	12	32	47.1
OG37	Forage	Boulounga école	51	55	49.5
OG38	Forage	Boulounga Yarcé		400	379
OG40	Forage	Birninga Peulh		170	153
OG8	Puits	Pellé Keglsin		55	1.9
OG9	Puits	Pellé Keglsin well		3.4	0.72
OG11	Puits	Margo Koyogo well		<0.8	<0.5
OG15	Puits	Margo Boutoulo well		<0.8	1.45
OG16	Puits	Margo Boutoulo well 2		6	1.22
OG39	Puits	Boulounga Baughin		150	2.27

**ANNEXE 7**

*Carte 2: la répartition mondiale des problèmes arsenicaux dans les eaux souterraines et l'environnement (mis à jour par Smedley et Kinniburgh, 2002).*

