

Pollution des eaux par l'arsenic et acceptabilité des procédés de biotraitement

Projet COBIAS, Délivrable D14, version finale

BRGM/RP-57640-FR
octobre 2009

Pollution des eaux par l'arsenic et acceptabilité des procédés de biotraitement

Projet COBIAS, Délivrable D14, version finale

BRGM/RP-57640-FR
octobre 2009

Étude réalisée dans le cadre du projet
COBIAS « ANR-07-ECOT-001 »

N. Manlius
Avec la collaboration de
F. Battaglia-Brunet, C. Michel

Vérificateur :

Nom : Madjid BOUZIT

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : Hervé GABORIAU

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Arsenic, Épidémiologie, Pollution, Rejets, Mines, ICPE, Procédés de traitement biologique, Acceptabilité.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Manlius N., Battaglia-Brunet F., Michel C. (2009) - Pollution des eaux par l'arsenic et acceptabilité des procédés de biotraitement. BRGM/RP-57640-FR, 173 p., 26 fig., 5 tabl., 9 ann.

Synthèse

Le présent rapport a été réalisé dans le cadre du projet COBIAS (projet ANR-07-ECOT-001), dont il représente le livrable D14, initialement intitulé « Évaluation sociologique des bioprocédés pour le traitement de l'arsenic dans les eaux pré-potabilisables et effluents industriels et miniers ». L'objectif du projet COBIAS est d'optimiser des procédés de traitement biologique utilisant des bactéries qui oxydent l'arsenic.

L'arsenic est l'un des éléments métalliques les plus toxiques et le métalloïde le plus fréquent dans les eaux et les sols, du fait de la géochimie ou du fait des activités humaines (principalement les industries et les anciennes mines). L'arsenic est probablement le contaminant environnemental responsable des risques les plus élevés de morbidité et de mortalité à travers le monde, en raison de la combinaison de deux facteurs : son niveau de toxicité et le nombre de personnes exposées. La gravité du problème de l'arsenic dans les ressources en eau justifie les efforts de recherches et développement dédiés à la mise au point de procédés propres, peu coûteux et faciles à mettre en œuvre pour le traitement des eaux contenant de l'arsenic.

Dans un premier temps, nous avons effectué une analyse des données et informations disponibles concernant le problème posé par l'arsenic dans les ressources en eau à l'échelle mondiale. Le nombre de pays où l'on a relevé des concentrations élevées d'arsenic dans les eaux de surface ou les eaux souterraines utilisées comme ressources d'eau potable n'a cessé d'augmenter depuis le début du vingtième siècle. Aujourd'hui, cette problématique est recensée dans plus de soixante-dix pays, répartis sur tous les continents.

Ensuite, un inventaire des points noirs de pollution anthropique à l'arsenic des eaux de surface (non côtières) en France métropolitaine a été réalisé. Cette démarche est une étape préliminaire indispensable à l'établissement d'un inventaire des enjeux socio-économiques qui seraient associés à plus ou moins long terme par la présence d'arsenic dans les ressources en eau. Une série de cartes de France a été dressée grâce au logiciel MapInfo, en utilisant diverses banques de données ainsi que des informations directement collectées auprès des organismes responsables de la gestion et de la surveillance des ressources en eau, afin de déterminer les départements français dont les eaux de surface sont les plus arsénisées. Nous avons également effectué une comparaison de cette répartition des points noirs avec le nombre d'habitants par département, et situé géographiquement les anciens sites miniers rejetant de l'arsenic dans l'environnement. La carte des points noirs confirme bien l'existence d'importants rejets dans le nord, le nord-est et le sud-est, déjà connue à travers des publications antérieures. Mais elle met en évidence, de façon originale, une importante zone de rejets dans le sud de la Bretagne et dans l'ouest du Massif central. Cette carte des points noirs, qui devra être complétée et mise à jour, pourra servir d'outil d'aide à la décision pour les autorités institutionnelles.

Le dernier volet de la présente étude est une enquête sociologique d'acceptabilité préconisée dans le projet COBIAS. Pour que le BRGM et ses partenaires puissent installer de façon pérenne les bioprocédés mis au point dans le cadre du projet COBIAS, il est important de consulter des acteurs concernés pour savoir comment serait perçue l'installation d'un dispositif de décontamination utilisant des procédés bactériens. Une enquête basée sur un questionnaire a été réalisée auprès d'institutionnels (représentants des services de l'État et des collectivités territoriales) et de représentants d'associations de défense de l'environnement. Les résultats de cette enquête font ressortir la nécessité d'entreprendre un travail d'information non négligeable, concernant à la fois la problématique de l'arsenic dans l'eau, l'état des lieux des sites rejetant de l'arsenic et leur localisation géographique, ainsi que le principe des biotraitements. Des études scientifiques prouvant le caractère inoffensif des bactéries utilisées sont demandées, ainsi que des essais de démonstration à grande échelle et des études d'impact. Il est enfin demandé une plus grande consultation, et même, si possible, une plus grande concertation avec les différents acteurs concernés.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. IMPORTANCE DE LA DÉCONTAMINATION	11
1.2. NŒUD DU PROBLÈME	12
1.3. UN BIOPROCÉDÉ MIS EN PLACE PAR LE BRGM	12
1.4. LE PROJET COBIAS.....	13
1.5. INSERTION DE NOTRE ÉTUDE DANS LE PROJET COBIAS	14
2. Généralités sur l'arsenic	17
2.1. ARSENIC, PRÉSENTATION	17
2.1.1. Minéralogie	17
2.1.2. Localisation dans la biosphère	17
2.1.3. Les deux formes d'arsenic As(III) et As (V)	18
2.1.4. Quelques terminologies de base	19
2.2. L'ARSENIC ET L'HISTOIRE DE L'HOMME	20
2.2.1. Découverte	20
2.2.2. Étymologie.....	20
2.2.3. L'arsenic pour guérir.....	21
2.2.4. L'arsenic pour tuer.....	21
2.3. TOXICITÉ	22
2.3.1. L'arsenic cause de mort subite.....	22
2.3.2. L'arsenic, cause de cancers	22
2.3.3. L'arsenic dans le corps.....	23
2.3.4. Symptômes d'une intoxication à l'arsenic.....	23
2.4. RÉGLEMENTATION.....	25
2.4.1. Concentration en arsenic des eaux potables	25
2.4.2. Rejets d'arsenic dans l'environnement.....	26
2.5. POLLUTION	27
2.5.1. Généralités	27
2.5.2. Mécanismes de rejet de l'arsenic minier dans l'environnement	28

3. Intoxications à l'arsenic des populations par les eaux potables à l'échelle mondiale	31
3.1. INTRODUCTION.....	31
3.2. ÉTAT DES LIEUX.....	32
3.2.1. Asie.....	32
3.2.2. Amérique.....	33
3.2.3. Europe.....	35
3.2.4. Afrique.....	36
3.2.5. Océanie.....	36
3.3. CAUSES DE CONTAMINATION DES EAUX POTABLES.....	41
3.4. NOMBRE DE VICTIMES DANS LE MONDE.....	42
3.5. MOYENS DE LUTTE.....	43
3.6. VOIES DE CONTAMINATION AUTRES QUE L'EAU POTABLE.....	44
3.7. CONCLUSIONS.....	45
4. Pollution anthropique à l'arsenic des eaux de surface en France Métropolitaine	47
4.1. INTRODUCTION.....	47
4.2. ÉTAT DES LIEUX DES REJETS INDUSTRIELS D'ARSENIC EN FRANCE MÉTROPOLITAINE.....	49
4.3. BASES DE DONNÉES UTILISEES POUR ÉTABLIR LA CARTE DES POINTS NOIRS DE POLLUTION ANTHROPIQUE À L'ARSENIC DES EAUX DE SURFACE EN FRANCE MÉTROPOLITAINE.....	50
4.3.1. Les bases de données internet du répertoire iREP de l'INERIS.....	52
4.3.2. Les bases de données internet de l'action RSDE.....	53
4.3.3. Les données des DRIRE et des DREAL.....	54
4.3.4. Les données du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable..	54
4.3.5. Les données de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne.....	55
4.4. CONSTRUCTION DES CARTES.....	55
4.4.1. Les données sélectionnées.....	55
4.4.2. Les cartes.....	62
4.5. CONCLUSIONS.....	68
4.5.1. Analyse-synthèse des résultats.....	68

4.5.2. Limites de l'approche.....	69
4.5.3. Utilité de la carte des points noirs.....	69
5. Enquête sociologique	71
5.1. INTRODUCTION	71
5.1.1. Choix du type d'enquête.....	71
5.1.2. Choix du site retenu pour l'enquête.....	71
5.2. LE DISTRICT MINIER AURIFÈRE DU HAUT-BASSIN VERSANT DE L'ISLE	74
5.2.1. Situation géographique.....	74
5.2.2. Contamination des eaux du haut bassin versant de l'Isle	75
5.2.3. Le site de Cheni Les Farges.....	77
5.3. QUESTIONNAIRE DE L'ENQUÊTE	79
5.4. ANALYSE ET SYNTHÈSE DES RÉPONSES DONNÉES AU QUESTIONNAIRE	80
5.4.1. Connaissance des anciennes mines du district minier du haut bassin de l'Isle et de leurs impacts sur l'eau et le sol	80
5.4.2. Perception de l'arsenic comme facteur polluant.....	81
5.4.3. Perception de l'eau potable dans le haut bassin de l'Isle	85
5.4.4. Perception de l'utilisation de bactéries	88
5.4.5. Perception d'un bioprocédé utilisant des bactéries	91
5.4.6. Conditions d'application d'un bioprocédé utilisant des bactéries	94
5.4.7. Résumé-conclusion de l'enquête	96
6. Conclusions générales	99
7. Liste des sigles	101
8. Bibliographie	105

Liste des figures

Figure 1 -	Homme du village de Rajapur (district de Murshidabad, Bengale occidental) présentant des kératoses (augmentation de l'épaisseur des cellules de l'épiderme) dégénérant en mélanomes (cancer des cellules de la peau) sur la paume des mains dues à une intoxication par l'arsenic contenu dans l'eau potable (d'après Rahman <i>et al.</i> , 2005).....	24
Figure 2 -	Carte mondiale montrant les pays nommés dans le tableau 2 dont des populations ont été intoxiquées aux XX ^e et XXI ^e siècles par des eaux potables arsénisées (en rouge) et ceux dans lesquels on a découvert de l'arsenic en forte concentration dans les eaux de surface ou souterraines mais n'ayant pas donné lieu à des intoxications de populations (en orange).....	37
Figure 3 -	Carte d'Asie montrant les régions des pays touchées par des intoxications de populations nommées dans le tableau 2 (en rouge).....	40
Figure 4 -	Carte de France métropolitaine montrant les points noirs de rejets d'arsenic d'origine anthropique (hors agriculture) supérieurs ou égaux à 5 kg/an dans les eaux de surface.	64
Figure 5 -	Carte de France métropolitaine montrant le classement des départements par quantité d'arsenic d'origine anthropique (hors agriculture) rejeté dans les eaux de surface.	66
Figure 6 -	Carte de France métropolitaine montrant les sites d'extractions rejetant de l'arsenic dans l'environnement.....	67
Figure 7 -	Carte de France métropolitaine situant la région du Limousin.	73
Figure 8 -	Carte de la région du Limousin et limite de ses trois départements (Corrèze, Creuse et Haute-Vienne).	73
Figure 9 -	Carte de la Haute-Vienne situant ses trois sous-préfectures (Bellac, Limoges, Rochechouart), la commune de Saint-Yrieix-la-Perche et les rivières Isle, La Loue et Vienne.	74
Figure 10 -	Localisation des neuf sites miniers et de leurs stériles en surface dans le district minier du haut bassin versant de l'Isle (d'après Grosbois <i>et al.</i> , 2006).....	76
Figure 11 -	Localisation administrative des neuf anciennes mines du haut bassin versant de l'Isle.	76
Figure 12 -	Carte du site de CHENI Les Farges datant de décembre 1999 montrant le teruil principal et les chemins empruntés par les coulées de boues ou d'eau météoritiques s'en détachant.	78
Figure 13 -	Digue entourant le teruil principal et la terrasse supérieure (T1) installée en janvier 2000.....	78
Figure 14 -	Choix exprimés à la question 1.....	81
Figure 15 -	Premiers choix exprimés à la question 4.	82
Figure 16 -	Premiers et seconds choix confondus exprimés à la question 4.	83
Figure 17 -	Choix exprimés à la question 5.....	84
Figure 18 -	Choix exprimés à la question 7.....	86
Figure 19 -	Choix exprimés à la question 8.....	87

Figure 20 - Choix exprimés à la question 9.	88
Figure 21 - Choix exprimés à la question 12.	89
Figure 22 - Choix exprimés à la question 13.	90
Figure 23 - Choix exprimés à la question 15.	92
Figure 24 - Comparaison des réponses aux questions 12, 13, 16 et 17.	94
Figure 25 - Choix exprimés à la question 18.	95
Figure 26 - Choix exprimés à la question 19.	96

Liste des tableaux

Tableau 1 - Quelques composés arséniés présents dans l'environnement (d'après Laperche <i>et al.</i> , 2003 ; Michon, 2006).	18
Tableau 2 - Problèmes mondiaux d'intoxication par l'arsenic des eaux potables les plus remarquables survenus chez des populations humaines depuis 1898.	40
Tableau 3 - Nombre de personnes au monde consommant quotidiennement une eau dont la concentration en arsenic est supérieure à 10 µg/l ou à 50 µg/l (d'après Müller, 2004).	43
Tableau 4 - Points noirs de pollution à l'arsenic directement dans les eaux de surface en France métropolitaine.	62
Tableau 5 - Organismes auxquelles appartiennent les personnes interrogées dans le cadre de l'enquête sociologique.	80

Liste des annexes

Annexe 1 - Les cinq volets du projet COBIAS	127
Annexe 2 - Composés d'arsenic cités dans le texte (classés par groupes) et signification des symboles chimiques utilisés	131
Annexe 3 - Unités de mesure et de concentration.....	135
Annexe 4 - Répartition des sites par régions françaises selon BASOL.....	139
Annexe 5 - Liste des anciens sites miniers rejetant de l'arsenic en France métropolitaine et données de rejet quantifiées en kg/an	143
Annexe 6 - Localisation des mines du district minier du haut bassin de l'Isle	147

Annexe 7 - Lettre d'accompagnement du questionnaire, suivie du texte introductif du questionnaire, puis du questionnaire	151
Annexe 8 - Planning des rendez-vous pris à Limoges dans le cadre de l'enquête sociologique	163
Annexe 9 - Tableau synoptique synthétisant les réponses recueillies à l'issue de l'enquête sociologique	167

1. Introduction

1.1. IMPORTANCE DE LA DÉCONTAMINATION

Les problèmes de pollution de l'environnement constituent une préoccupation mondiale qui a débuté à la fin des années 1960 et ne cesse de s'accroître depuis plus de deux décennies. En particulier, les métaux lourds et les métalloïdes sont une source importante de pollution des cours d'eau (Culioli *et al.*, 2008).

L'Europe et la France ont été, au cours des siècles derniers, le lieu d'une activité industrielle intense de production et de transformation de minerais et de métaux. Ces activités, pour la plupart aujourd'hui abandonnées, laissent derrière elles des sites miniers nécessitant la mise en œuvre de mesures de gestion durable des territoires. En particulier, ils présentent pour certains d'entre eux une pollution par des métaux lourds ou des métalloïdes sur des surfaces parfois très importantes. La pollution métallique est particulièrement nocive car les métaux et métalloïdes ne sont pas biodégradables. Il a été constaté une migration de ces polluants vers les eaux souterraines ou de surface et vers les organismes vivants, dans lesquels ils se concentrent pour contaminer l'ensemble de la chaîne alimentaire.

L'arsenic apparaît de plus en plus comme un élément polluant de toute première importance écotoxicologique (Culioli *et al.*, 2008). L'arsenic est en effet l'un des éléments métalliques les plus toxiques et le métalloïde le plus fréquent dans les eaux et les sols, du fait de la géochimie ou du fait des activités humaines (principalement les industries et les anciennes mines). Or, sous certaines conditions physico-chimiques, certains composés arséniés sont particulièrement solubles dans l'eau et deviennent par conséquent très bio-disponibles. Ils constituent alors un réel danger pour la santé humaine, commandant la mise en œuvre de procédés de décontamination les moins polluants possibles dans une perspective de santé publique (Battaglia-Brunet *et al.*, 2008).

Lorsque la pollution est d'origine anthropique, des contrôles sont effectués sur les rejets industriels et ceux des anciens sites miniers. S'il s'avère que ces derniers rejettent des effluents chargés de métaux lourds, des mises en sécurité sont alors entreprises. Mais leurs coûts sont très élevés : ainsi par exemple, le coût de mise en sécurité du site minier de la Combe du Saut (Salsigne, Aude) était estimé à 2,4 millions d'euros en 2004 (La Rédaction, 2007). Les coûts de réhabilitation quant à eux sont énormes : pour reprendre l'exemple de la Combe du Saut, un projet de réhabilitation à l'étude (Jacquemin *et al.*, 2006) était estimé en 2005 à presque quarante millions d'euros (Cour des Comptes, 2005). La mise au point de procédés de décontamination les moins polluants possibles, mais également les moins coûteux possibles, est donc une priorité.

1.2. NŒUD DU PROBLÈME

Il existe deux principales sortes d'arsenic inorganique : l'As(III) [lorsque nous utiliserons cette écriture il sera toujours sous-entendu qu'il s'agit de l'As(+III)] et l'As(V) [en fait, l'As(+V)]. Ces deux sortes d'arsenics sont toxiques mais l'As(III) l'est beaucoup plus que l'As(V). L'absorption par les tissus organiques des composés de l'As(III) et de l'As(V) est de près de 95 %, mais l'As(III) a tendance à s'accumuler dans les tissus alors que l'As(V) et les arsenics organiques sont très rapidement et presque complètement éliminés par les reins (Bertolero *et al.*, 1987). L'As(III) exerce donc plus longtemps une action toxique dans les tissus organiques que l'As(V). L'As(III) est par ailleurs beaucoup moins facilement immobilisé sous forme de déchet solide inerte que l'As(V). Par conséquent, de ces deux principales sortes d'arsenic inorganiques, celui à éliminer en priorité est l'As(III).

Tout traitement de décontamination efficace nécessite donc au préalable une oxydation de l'As(III) en As(V) (projet COBIAS, 2008).

À ce jour, la majorité des traitements visant à éliminer l'arsenic des sols et des eaux sont physico-chimiques et reposent sur l'adsorption de l'As(V) sur des oxyhydroxydes de fer (Lenoble *et al.*, 2002). Or, l'oxydation par voie chimique représente une part importante du coût des procédés de décontamination des eaux et fait appel à des réactifs oxydants (peroxyde d'hydrogène, hypochlorite de sodium, ozone, permanganate de potassium, dioxyde de manganèse, etc.) qui sont non seulement très coûteux mais qui peuvent aussi entraîner la production de grande quantité de sous-produits toxiques (Dictor *et al.*, 2007).

On cherche donc à remplacer les étapes physico-chimiques d'oxydation de l'As(III) en As(V) par un procédé biologique simple, rapide, peu coûteux et peu polluant. On s'est donc tourné vers la catalyse biologique et les organismes naturels. D'autant que les traitements biologiques permettent d'éliminer, en sus de l'arsenic, d'autres polluants inorganiques tels le fer ou le manganèse (projet COBIAS, 2008).

1.3. UN BIOPROCÉDÉ MIS EN PLACE PAR LE BRGM

Le BRGM, qui travaille depuis de nombreuses années dans le domaine de l'oxydation de l'arsenic des effluents miniers, bénéficiant de l'avancée de travaux antérieurs (Leblanc *et al.*, 1996), a isolé en 1997 une bactérie du cycle du soufre de l'ancien site minier de Cheni (Saint-Yrieix-la-Perche, Haute-Vienne). Cette bactérie, appelée *Thiomonas arsenivorans* [anciennement *Thiomonas* sp. CAsO1 (Cheni As-Oxydante 1)] (Battaglia-Brunet *et al.*, 2006), est autotrophe et trouve l'énergie nécessaire à sa croissance en oxydant directement l'As(III) en As(V). Son autotrophie lui permet également d'utiliser le CO₂ comme substrat carboné, ce qui évite l'utilisation de nutriments nécessaires à toute bactérie hétérotrophe et économise donc le coût correspondant. Enfin, *T. arsenivorans* peut oxyder dans un grand intervalle de pH, de température et de concentration en arsenic, et forme très facilement un biofilm qui, sous des conditions optimales (Michel *et al.*, 2007), permet des vitesses d'oxydation de l'As(III) élevées.

En effet, un essai dans un réacteur à lit-fixé contenant de la pouzzolane comme support bactérien en fonctionnement continu pendant trois mois a permis d'atteindre une vitesse d'oxydation de l'arsenic de 166 mg/l/h et un temps de séjour d'1 h à pH proche de la neutralité (Battaglia-Brunet *et al.*, 2002). L'utilisation potentielle de ces bactéries dans une filière de traitement d'eaux a même fait l'objet d'un dépôt de brevet en 2001 (N° PCT/FR-01/03052 déposé le 3 octobre 2001).

1.4. LE PROJET COBIAS

Le projet COBIAS (COmpréhension du rôle du Biofilm bactérien et maîtrise de son développement lors du traitement d'eaux ArSéniées en bioréacteurs à lit-fixe) se propose de développer une technologie utilisant *T. arsenivorans* pour éliminer l'As(III) des eaux destinées à la consommation humaine à faible concentration en arsenic ainsi que dans les aquifères pollués (eaux souterraines) et dans les effluents industriels et miniers à forte concentration en arsenic.

L'objectif de ce projet est d'optimiser puis d'évaluer *in situ* un ou plusieurs bioprocédés (plusieurs bioprocédés pourront en effet être adoptés en fonction des eaux traitées et de leurs concentrations en arsenic) présentant un intérêt technique (qualité finale de l'eau traitée), économique et environnemental par rapport aux procédés chimiques conventionnels. L'intérêt technique consiste en une simplicité d'utilisation et une rapidité de traitement d'eaux contenant des quantités élevées d'As(III) avec relativement peu de fer. L'intérêt économique vient du fait qu'il n'est plus nécessaire d'ajouter un réactif oxydant ni aucun nutriment carboné puisque *T. arsenivorans* est autotrophe ; et, pour les eaux des sites miniers, qu'il n'est plus nécessaire de consommer de l'énergie puisqu'il s'agit d'un filtrage passif à la faveur d'un dénivelé de pente. L'intérêt environnemental tient dans le fait, d'une part que des produits chimiques potentiellement dangereux ne risquent plus d'être rejetés dans le milieu puisque l'on n'en utilise pas, et que d'autre part le piégeage de l'As(V) sur un matériau adsorbant réduit la production de boues par rapport à un procédé chimique, ce dernier aspect étant extrêmement important car le devenir des boues chargées en arsenic pose de gros problèmes de stockage.

Une fois le bioprocédé mis au point, il sera nécessaire pour le traitement des eaux à faible concentration en arsenic en vue de leur potabilisation, d'obtenir une autorisation délivrée par le ministère de la santé au titre de l'article R1321-48 du Code de la Santé publique. Par contre, pour le traitement des eaux brutes de mines, qui sont, elles, à forte concentration en arsenic, une telle autorisation ne sera pas nécessaire puisqu'il ne s'agit pas de rendre l'eau potable et que les bactéries utilisées seront non modifiées génétiquement et donc non potentiellement dangereuses pour l'environnement.

Le projet COBIAS est cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et fait suite à un appel à projet daté de 2007 lancé par le Programme de Recherche sur les Ecotechnologies et le Développement Durable (PRECODD).

La structure de ce projet s'appuie sur un consortium de six partenaires basé sur la complémentarité. L'initiateur et coordinateur de COBIAS est le service Environnement industriel et Procédés Innovants (EPI) du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques

et Minières) qui dispose d'une grande capacité d'expérimentation et d'une quinzaine d'ingénieurs et chercheurs dont l'expérience est internationalement reconnue dans le domaine des bioprocédés pour le traitement des sols pollués. Deux autres organismes de recherche, le Laboratoire de génétique moléculaire, génomique et microbiologie de l'Université de Strasbourg (UDS) et le Groupement de Recherche Eau Sol Environnement de l'Université de Limoge (GRESE) compléteront les travaux de recherche en s'associant à un quatrième partenaire, la PME de biotechnologie Eco-Solution. Deux autres entreprises partenaires effectueront les développements biotechnologiques : la SAUR, troisième traiteur français d'eaux usées, et Solétanche-Bachy, entreprise générale de travaux et de technologie du sol. Le projet COBIAS a obtenu son financement le 13 mars 2008. Il s'étend sur trois années et devra aboutir en mars 2011. Il est organisé en cinq volets détaillés en Annexe 1 :

- Volet 1 : Identification des facteurs limitants sur site ;
- Volet 2 : Étude du biofilm bactérien As-oxydant ;
- Volet 3 : Développement de méthodologies ;
- Volet 4 : Optimisation des bioprocédés au laboratoire et sur site ;
- Volet 5 : Évaluation technique, économique et sociologique du bioprocédé de traitement de l'arsenic dans les eaux pré-potabilisables et effluents industriels et miniers.

1.5. INSERTION DE NOTRE ÉTUDE DANS LE PROJET COBIAS

L'étude donnant lieu à ce rapport s'inscrit dans le cinquième volet et porte plus précisément sur l'évaluation sociologique du ou des bioprocédés qui seront mis au point dans le cadre du projet COBIAS. Pour y répondre, ce rapport se découpe en quatre grandes parties dont le synopsis est ci-dessous exposé.

• Généralités concernant l'arsenic

Cette partie se propose d'exposer quelques généralités sur l'arsenic, de situer son utilisation dans l'histoire de l'humanité, de rappeler la réglementation en vigueur à son sujet en termes de santé publique, de poser les problèmes actuels de pollution et de rappeler ses effets pathogènes.

• Intoxications à l'arsenic des populations par les eaux potables à l'échelle mondiale

Cette partie dresse une revue des intoxications à l'arsenic par les eaux potables ayant affecté des populations entières à l'échelle mondiale et fait le point de leurs conséquences sur la santé de ces populations. L'eau potable, issue d'eau souterraine ou d'eau de surface (non côtières), sera exclusivement considérée car elle constitue le vecteur principal des intoxications à l'arsenic. Elle nous fait comprendre combien la présence d'arsenic dans notre environnement constitue un réel problème de santé publique pour la planète, et combien il importe de rechercher activement des solutions pour la réduire.

• **Pollution anthropique à l'arsenic des eaux de surface en France métropolitaine**

Cette partie recadre notre approche, de l'échelle mondiale à nationale, en réalisant un inventaire des points noirs de pollution anthropique à l'arsenic des eaux de surface (non côtières) en France métropolitaine. Elle se limite à l'arsenic dans les eaux car la problématique du projet COBIAS est axée sur la décontamination des eaux arséniées. De même, seul l'arsenic d'origine anthropique est pris en compte, car il est de loin beaucoup plus polluant que l'arsenic d'origine naturelle en France. Seules les eaux de surface sont considérées car elles sont très vulnérables aux pollutions et donc plus susceptibles d'intoxiquer rapidement des populations que ne le pourraient faire les eaux souterraines. Enfin, seule la métropole fera l'objet de notre attention car il ne semble pas exister de pollution des eaux de surfaces à l'arsenic dans les DOM-TOM. Une série de cartes de France dressées grâce au logiciel MapInfo permettra de déterminer les départements français dont les eaux de surface sont les plus arséniées et d'effectuer une comparaison avec le nombre d'habitants par département ; également de situer géographiquement les anciens sites miniers rejetant de l'arsenic dans l'environnement.

• **Enquête sociologique**

Cette partie consiste en l'enquête sociologique préconisée dans le projet COBIAS à proprement parler. Pour que le BRGM et ses partenaires puissent installer de façon pérenne dans de bonnes conditions de voisinage des dispositifs utilisant les bioprocédés mis au point dans le cadre du projet COBIAS, il est important de connaître l'opinion des acteurs concernés pour savoir comment est perçue l'installation d'un dispositif de décontamination utilisant des procédés de traitements bactériens. Une enquête basée sur un questionnaire est réalisée auprès d'institutionnels (représentants des services de l'État et des collectivités territoriales) et de représentants d'associations de défense de l'environnement. L'analyse et la synthèse de leurs réponses constituent un fondement sur lequel pourront s'appuyer les partenaires du projet COBIAS avant la mise en œuvre de bioprocédé de traitement.

2. Généralités sur l'arsenic

2.1. ARSENIC, PRÉSENTATION

2.1.1. Minéralogie

L'arsenic (de symbole chimique As et de numéro atomique 33) est le vingtième élément le plus abondant dans la croûte terrestre (Matschullat, 2000) et le quarante-septième élément le plus abondant sur Terre parmi les quatre-vingt huit éléments existants (Vaughan, 2006). C'est un métalloïde au comportement chimique intermédiaire entre les métaux et les non-métaux qui présente de fortes analogies avec le phosphore.

2.1.2. Localisation dans la biosphère

L'arsenic est présent dans les trois couches de la biosphère (pédosphère, hydrosphère et atmosphère). Plus de deux cents minéraux contiennent de l'arsenic (ceux qui sont cités dans le rapport sont donnés en Annexe 2) (Smedley & Kinniburgh, 2002), et sa concentration moyenne dans les minéraux de la croûte terrestre est de l'ordre de 1,5 ppm, c'est-à-dire 1 500 µg/l, cf. Annexe 3 (Vaughan, 2006). Sa concentration moyenne dans les océans est de l'ordre de 1 à 8 µg/l. Dans les eaux douces non polluées sa concentration varie généralement de 1 à 10 µg/l (Mandal et Suzuki, 2002). Toutefois, les concentrations observées peuvent être très différentes selon qu'il s'agit d'eaux souterraines, de rivières ou d'estuaires, et selon la nature en arsenic du sol traversé. Par exemple, les eaux souterraines au sud-est du lac Michigan (États-Unis) montrent des variations de concentration en arsenic allant de 0,5 à 278 µg/l (Kim *et al.*, 2002).

L'arsenic est globalement six mille fois plus important dans la croûte terrestre (40 010 x 10⁹ t) qu'il ne l'est dans la biosphère et l'hydrosphère réunis (6,88 x 10⁹ t au plus) alors que sa quantité dans l'atmosphère, provenant des volcans, des activités humaines, des feux de forêt et des embruns, est négligeable en proportion (environ 1 740 t) (Matschullat, 2000). L'arsenic des eaux et des sols (sous-entendus sols sédimentaires) provient surtout de l'activité volcanique et dans une moindre mesure de l'érosion des roches (origine géogène) (Nicolli *et al.*, 1989). Les sulfures d'arsenic sont convertis en oxydes d'arsenic, qui entrent dans le cycle de l'arsenic sous forme de poussières ou par dissolution dans l'eau de pluie et de ruissellement (Mandal & Suzuki, 2002). L'arsenic peut alors soit s'accumuler dans les roches sédimentaires (ce qui explique que sa concentration y soit plus forte que dans les roches magmatiques), soit être recyclé par les végétaux et les animaux et rentrer dans la chaîne trophique.

Dans le premier cas, il se lie à l'oxygène, au chlore ou au soufre, ou avec les métaux pour former les arséniures, et reste sous forme inorganique. Dans le second cas, il se combine avec du carbone ou de l'hydrogène et devient organique.

2.1.3. Les deux formes d'arsenic As(III) et As (V)

L'arsenic peut exister sous diverses formes inorganiques : sous sa forme métallique pure, sans valence et que l'on peut symboliser par As(0), sous sa forme trivalente As(III) ou sous sa forme pentavalente As(V).

L'arsenic peut se trouver sous quatre états d'oxydation, qui sont, du moins oxydé au plus oxydé : As(-III), As(0), As(+III) et As (+V).

La toxicité de l'arsenic varie, du plus toxique vers le moins toxique, comme suit (Laperche *et al.*, 2003) (Tab. 1) :

Composé	Formule	Abréviation	Valence	Toxicité
Arsine Hydrogène arsénié	AsH ₃	-	0	
Monométhylarsine	CH ₃ H ₂ As	MMA	+III	
Diméthylarsine	(CH ₃) ₂ HAs	DMA	+III	
Triméthylarsine	(CH ₃) ₃ As	TMA	+III	
Arsénite Acides arsénieux	H _n AsO ₃ (1 < n < 3)	As(III)	+III	
Arséniate Acides arséniques	H _n AsO ₄ (0 < n < 3)	As(V)	+V	

Tableau 1 - Quelques composés arséniés présents dans l'environnement (d'après Laperche *et al.*, 2003 ; Michon, 2006).

Notons bien dès maintenant que lorsque nous parlerons de l'As(+III) nous utiliserons l'écriture simplifiée As(III), qui ne recouvrera donc pas l'arsenic à l'état d'oxydation -III.

Les formes inorganiques sont essentiellement des composés de l'As(III) et de l'As(V) alors que les formes organiques citées sont le MMA, le DMA et le TMA.

Le fait que l'As(III) [en fait, donc, As(+III)] soit considéré comme étant soixante fois plus toxique de l'As(V) (Jain & Ali, 2000) s'explique en grande partie par sa propension à se complexer avec le soufre de nombreuses protéines et de perturber alors leur fonctionnement, inhibant de la sorte plus de deux cent enzymes humaines (Abernathy *et al.*, 1999), et ce d'autant plus facilement que les cellules endothéliales tapissant les vaisseaux sanguins le reconnaissent plus rapidement que l'As(V) et lui permettent donc d'agir de façon plus importante (Hirano *et al.*, 2003).

Il faut remarquer ici que les composés inorganiques de l'arsenic étaient jusqu'à il y a peu considérés comme cent fois plus toxiques que les composés organiques (Jain & Ali, 2000), telle que l'arsénobétaine [(CH₃)₃AsCH₂CO₂] composé organique non toxique et principale source d'arsenic dans le poisson (Arbouine & Wilson, 1992). Mais de récentes études montrent que les composés méthylés de l'arsenic, en particulier le MMA et le DMA à l'état d'oxydation +III, seraient beaucoup plus toxiques que les

formes inorganiques (Styblo *et al.* 2000 ; Mass *et al.*, 2001). Inversement, le MMA et le DMA à l'état d'oxydation +V seraient moins toxiques que les formes inorganiques (Michon, 2006).

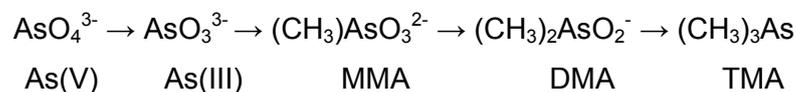
La répartition entre As(III) et As(V) dépend essentiellement du potentiel redox (Eh), du potentiel hydrogène (pH) (Masscheleyn *et al.*, 1991 ; Vink, 1996) et de l'activité biologique (Morin *et al.*, 2003). En particulier, une forte teneur en matière organique du sol (entre 7,5 et 15 %) entraîne une augmentation de l'As(III) au détriment de l'As(V), et une faible teneur en matière organique (entre 0,5 et 5 %) l'effet inverse (Dobran & Zagury, 2006).

2.1.4. Quelques terminologies de base

• Réduction de l'arsenic

Dans le métabolisme des organismes supérieurs, l'As(V) est réduit en As(III) dans le cytoplasme de la cellule par l'enzyme arséniate réductase, puis sécrété. L'As(III) subit alors grâce à l'enzyme méthyltransférase le processus de biométhylation (principalement au niveau hépatique) dans la composition du MMA, qui lui-même donne le DMA, ensuite rapidement éliminé par l'urine (Turpeinen *et al.*, 2002). Jusqu'à il y a encore récemment, la biométhylation des formes inorganiques de l'arsenic était considéré comme un processus de détoxification et donc perçu comme un mécanisme de résistance à l'arsenic (Müller, 2004).

Les champignons et les levures peuvent par ailleurs transformer le DMA en TMA (Laperche *et al.*, 2003). Nous aboutissons à la chaîne de réactions suivante :



Les bactéries réalisent la réduction de l'As(V) selon deux mécanismes. Le premier est équivalent à celui utilisé par les organismes supérieurs, l'As(V) étant réduit en As(III) dans le cytoplasme de la bactérie puis sécrété. Le second est appelé réduction dissimulatrice car l'As(V) est réduit en étant « respiré » par la bactérie : couplé avec l'oxydation d'un composé organique, il est utilisé comme accepteur d'électrons dans la chaîne respiratoire (Müller, 2004 ; Battaglia-Brunet *et al.*, 2008).

• Oxydation de l'arsenic

L'oxydation de l'As(III) en As(V) existe chez certaines bactéries qui utilisent l'enzyme arsénite oxydase (Battaglia-Brunet *et al.*, 2008).

• Adsorption et désorption de l'arsenic

L'adsorption (à ne pas confondre avec l'absorption) est un phénomène par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur un substrat. La désorption est le phénomène inverse (les molécules adsorbées se détachent du substrat).

• Spéciation et solubilité de l'arsenic

La spéciation de l'arsenic est la forme chimique sous laquelle il se trouve (Laperche *et al.*, 2003). La réduction de l'As(V) en As(III) conduit à la solubilisation de l'arsenic car l'As(III) est en général plus difficilement adsorbé que l'As(V) (Manning et Goldberg, 1997). Inversement, l'oxydation de l'As(III) en As(V) conduit à une moins grande mobilité et donc une moins grande solubilité de l'arsenic, ce qui équivaut à une détoxification partielle du milieu. La spéciation de l'arsenic est par conséquent liée à sa solubilité (Battaglia-Brunet *et al.*, 2008).

• Précipitation et dissolution de l'arsenic

Quand les minéraux des roches contenant de l'arsenic se dissolvent, l'arsenic est libéré dans les eaux souterraines. Mais quand les phases solides contenant de l'arsenic précipitent, l'arsenic est éliminé des eaux souterraines. La différence entre l'adsorption-désorption et la précipitation-dissolution est que dans le premier cas seul l'arsenic situé à la surface des phases solides est libéré dans les eaux, alors que dans le second cas tout l'arsenic des phases solides (celui présent à la surface de la phase solide et celui qui est inclus à l'intérieur de la phase solide) est libéré.

2.2. L'ARSENIC ET L'HISTOIRE DE L'HOMME

2.2.1. Découverte

Les traités médicaux des Assyriens (2000 avant JC) mentionnaient déjà les sulfures d'arsenic que sont l'orpiment (trisulfure d'arsenic, As_2S_3) et le réalgar (disulfure d'arsenic, As_4S_4) (Konkola, 1992).

L'arsenic était également connu d'Aristote (384-322 avant J.-C.). Toutefois, Théophraste d'Éressos (371-286 avant J.-C.) est le premier auteur occidental à mentionner l'existence de composés d'arsenic, tel l'orpiment (Hill, 1754).

Il fut isolé en tant qu'élément simple par Albert le Grand vers 1250, mais le premier écrit sur sa préparation est signé Paracelse (1493-1541), médecin et alchimiste suisse que l'on peut considérer comme le père de la toxicologie (Poisson, 1899).

2.2.2. Étymologie

L'origine étymologique du mot arsenic n'est pas connue avec certitude. Deux origines sont plus citées que les autres. La première est le mot grec arsenikos qui signifie « mâle ($\alpha\rho\sigma\eta\nu$: arsen) dompté ($\nu\iota\kappa\omega$: nikao) ». En constatant que les composés soufrés de l'arsenic les plus courants durcissaient le cuivre et le plomb, les alchimistes associèrent cette dureté à la masculinité, et donc utilisèrent le mot arsenikos. La seconde origine serait le mot latin *arsenicum*, qui signifie « colorant jaune ». En constatant que l'orpiment était de couleur jaune citron, les alchimistes auraient associé cette couleur au mot *arsenicum*.

2.2.3. L'arsenic pour guérir

Les besoins journaliers d'un homme adulte en arsenic inorganique sont de 10 à 50 µg/j (Testud, 1998 ; Abernathy *et al.*, 2003).

Les alchimistes arabes (vers l'an 700) développèrent l'utilisation de l'arsenic pour les traitements de l'asthme, des maladies des poumons, de la peau, et de la dysenterie et furent les premiers à employer l'arsenic pour lutter contre la peste (Konkola, 1992).

L'arsenic fut introduit dans la médecine occidentale par Paracelse (1493-1541) pour le traitement des maladies infectieuses. Il fut parmi les premiers occidentaux à découvrir qu'un produit toxique utilisé à faible dose peut avoir des effets thérapeutiques. Dès le XVIII^e siècle, une solution alcaline d'arsénite de sodium fut utilisée pour traiter les fièvres intermittentes, l'anémie, l'asthme, le psoriasis, le pemphigus et l'eczéma. Au début du XX^e siècle fut mis au point un composé organo-arsénié, le salvarsan, qui resta pendant quarante ans le médicament de référence pour traiter la syphilis avant d'être remplacé par la pénicilline (Müller, 2004).

À la suite de quoi, l'utilisation de l'arsenic à des fins thérapeutiques fut peu à peu abandonnée durant la seconde moitié du XX^e siècle. Seul l'arsenic des eaux thermales continua d'être utilisé pour guérir, et encore de nos jours, l'eau thermale de La Bourboule, particulièrement riche en arsenic (6 à 7 mg/l), est toujours réputée pour le traitement des affections respiratoires, notamment de l'asthme chez l'enfant et l'adulte, et reçoit à ce titre plus de 8 000 curistes par an (Boudène, 2001).

Parallèlement, les scientifiques continuèrent d'explorer les vertus curatives de l'arsenic. Il ressort ainsi d'une étude menée durant vingt ans sur 1 185 personnes que celles buvant de l'eau à faible concentration d'arsenic (entre 2 et 10 µg/l) étaient globalement plus sujettes à dépressions nerveuses que celles buvant des eaux dont les concentrations étaient supérieures à 10 µg/l (Zierold *et al.*, 2004).

Il a également été récemment constaté que l'anhydride arsénieux (As₂O₃) pouvait inhiber totalement la répllication du virus de l'hépatite C (Hwang *et al.*, 2004), et, administré par voie intraveineuse, entraîner des rémissions complètes chez des malades atteints de leucémie aiguë promyélocytaire (Hu *et al.*, 2009).

2.2.4. L'arsenic pour tuer

L'utilisation de composés de l'arsenic contre les insectes ravageurs de culture prit son essor durant la seconde moitié du XIX^e siècle (Calvet *et al.*, 2005).

L'arsenic des empoisonneurs était le plus souvent sous forme d'arséniate de sodium, produit très soluble et caustique à l'état pur et donc très toxique. Les Borgia au XVI^e siècle avaient à ce point coutume de l'employer qu'il fut dénommé « poudre d'héritage » (Nriagu, 2002). Parmi les célèbres empoisonnement attribués à l'arsenic, il faut maintenant exclure le cas de Napoléon I^{er} qui, contrairement à la rumeur, n'aurait pas été empoisonné à l'arsenic (Clemenza *et al.*, 2008).

Pendant la Première Guerre Mondiale, l'arsenic était massivement utilisé dans les armes chimiques, en particulier l'arsine (AsH_3). L'action de l'arsine se manifestait par une irritation des muqueuses respiratoires et les yeux qui ne s'atténuait qu'au bout de quelques heures, rendant les soldats incapables de combattre. Mais l'arsine, qui agit directement sur les hématies, peut provoquer une hémolyse intra-vasculaire massive, et dans les formes suraiguës, entraîner la mort par insuffisance circulatoire aiguë et défaillance multiviscérale.

Pendant la guerre du Vietnam, près de cinq millions de litres d'Agent Bleu, un herbicide contenant de l'acide arsenic diméthyle $[(\text{CH}_3)_2\text{HO}_2\text{As}]$, fut répandu de 1962 à 1971 par l'armée américaine sur le sud du Vietnam dans le but de détruire les racines des plantes et d'affamer le Vietcong (Stellman *et al.*, 2003).

Citons le cas de l'affaire Marie-Besnard, la « Bonne Dame de Loudun » (début de l'instruction : 1949 - dernier procès : 1961), suspectée d'avoir empoisonné treize personnes à l'arsenic. Une enquête menée au cimetière de Loudun et de nombreuses querelles d'experts permirent de démontrer que le traitement des fleurs et les ornements funéraires avaient saturé d'arsenic la terre du cimetière où étaient enterrées ses présumées victimes, dont les corps auraient donc été contaminés par le sol (Favreau-Colombier, 1999). Lorsque Marie Besnard fut acquittée au bénéfice du doute, un autre doute alors grandit : la contamination du sol des jardins et des cultures par des produits phytosanitaires à base d'arsenic.

2.3. TOXICITÉ

2.3.1. L'arsenic cause de mort subite

Une dose orale pour l'homme de 110 mg d'arsenic inorganique, présent par exemple dans une eau de boisson contaminée, correspondant à une concentration de 1 à 2 mg/kg de poids corporel, est potentiellement mortelle (Testud, 1998). Ainsi, la DL50 (dose létale qui entraîne 50 % de décès dans une population) de l'As(III) est de 1 mg/kg chez l'homme et place cette substance dans la classe « Super toxiques » de l'échelle de Gosselin *et al.* (1984). L'arsine, très volatil, est considérée comme le composé d'arsenic le plus toxique : des concentrations supérieures à 250 mg/kg provoquent la mort quasi-instantanée et l'inhalation, même brève, de 100 mg/kg entraîne le décès dans les 30 minutes (Testud, 1998). L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) propose une dose journalière maximale admissible d'arsenic inorganique de 2 μg /kg pour l'homme, avec un maximum de 150 μg /j (Lenoble, 2003).

2.3.2. L'arsenic, cause de cancers

L'arsenic fut l'un des premiers composés chimiques reconnus comme cancérigène par l'OMS et le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), ce dernier l'ayant classé en Groupe 1 cancérigène pour l'homme dès 1980. Or, cette catégorie n'est utilisée que lorsqu'on dispose d'indications suffisantes de cancérogénicité pour l'homme (IARC, 2004).

Selon l'Institut de Veille Sanitaire (InVS), il est démontré que pour de fortes concentrations (plusieurs centaines de $\mu\text{g/l}$), l'arsenic hydrique est impliqué de manière causale dans le développement des cancers cutanés (carcinomes et mélanomes), de la vessie (en particulier du carcinome à cellules transitionnelles) et du poumon, et probablement dans l'apparition du diabète non insulino-dépendant (Ravault *et al.*, 2002). Par contre, pour les faibles concentrations d'arsenic dans l'eau de boisson (inférieures à $50 \mu\text{g/l}$) les études donnent des résultats nuancés, certaines ayant tendance à établir un lien entre les faibles concentrations et l'apparition de cancers de la vessie et du poumon (Ravault *et al.*, 2002).

Les principaux cancers liés à une exposition à l'arsenic sont les cancers de la peau, de la vessie, des poumons, des reins et du foie (INERIS, 2007).

2.3.3. L'arsenic dans le corps

Bien que les composés méthylés de l'arsenic soient aussi toxiques, sinon plus, pour les cellules humaines que les formes inorganiques (Styblo *et al.*, 2000), il n'en reste pas moins que la biométhylation de l'arsenic aide à son élimination car 46 à 63 % est éliminé par les urines 4 à 5 jours après ingestion, 30 % est éliminé avec une demi-vie de plus d'une semaine et le reste avec une demi-vie supérieure à un mois. Par ailleurs, les matières fécales peuvent éliminer jusqu'à 5 % de la dose ingérée (Bisson *et al.*, 2006).

Du fait de la moindre toxicité de certaines formes organiques par rapport aux formes inorganiques, les organismes vivants peuvent contenir de fortes concentrations d'arsenic sans que cela n'affecte la santé des consommateurs (Bisson *et al.*, 2006). Le corps contient naturellement une moyenne de 50 à 150 $\mu\text{g/kg}$ de poids corporel d'arsenic, les concentrations les plus élevées étant retrouvées dans les cheveux et les ongles (Bisson *et al.*, 2006).

Pour savoir si une personne a été intoxiquée à l'arsenic, on analyse le plus souvent des échantillons de ces deux tissus, qui deviennent de facto indicateurs référents d'exposition à l'arsenic. Ainsi, alors que les concentrations normales de l'arsenic dans les cheveux sont de 20-250 $\mu\text{g/kg}$, et dans les ongles de 430-1 080 $\mu\text{g/kg}$ (Mosaferi *et al.*, 2005 ; Rahman *et al.*, 2005), une intoxication à l'arsenic se décèle dans ces tissus respectivement à partir de 1 000 $\mu\text{g/kg}$ et de plus de 1 100 $\mu\text{g/kg}$ (Mazumder, 2001 ; Rahman *et al.*, 2005). Toutefois, pour savoir si une intoxication est récente, il faut examiner les échantillons d'urine : la concentration normale est de 5-50 $\mu\text{g/jour}$ et une intoxication à l'arsenic se décèlera donc dans les urines à partir de 50 $\mu\text{g/jour}$ (Mazumder, 2001 ; Rahman *et al.*, 2005).

2.3.4. Symptômes d'une intoxication à l'arsenic

Les symptômes d'une intoxication chronique par l'arsenic due à une exposition prolongée par le biais de l'eau de boisson sont très différents de ceux apparaissant après une intoxication aiguë.

Les symptômes caractéristiques d'une intoxication aiguë sont typiquement gastro-intestinaux, associant nausées, vomissements, douleurs abdominales et diarrhées sanguinolentes en « eau de riz », décrites sous le nom de « choléra arsenical ». Ces symptômes surviennent dans les dix minutes à quelques heures après l'ingestion (Bisson *et al.*, 2006).

L'intoxication chronique est, le plus souvent, due à la consommation régulière d'une eau riche en arsenic sur une assez longue période. Par exemple, pour une concentration de dix à quelques centaines de $\mu\text{g/l}$, les premiers symptômes ne deviennent apparents qu'après une période de 2 à 10 ans (Ravenscroft *et al.*, 2009). Ces symptômes sont ceux d'une maladie appelée arsénicose (le terme arsenicose est parfois employé). Ils sont nombreux et apparaissent progressivement.

Les effets cutanés sont l'indicateur le plus sensible d'une exposition sub-aiguë ou chronique à l'arsenic, c'est-à-dire constituent le signe clinique le plus précoce d'une intoxication à l'arsenic. Ils apparaissent pour des niveaux d'exposition de l'ordre de 10 à 100 $\mu\text{g/kg/j}$ et se traduisent le plus souvent par une prolifération anormale des cellules de la peau des paumes des mains et de la plante des pieds sous forme de verrues qui peuvent produire des lésions cancéreuses (fig. 1), ainsi que par des hyper ou d'hypo-pigmentation de la face, du cou et du dos (Bisson *et al.*, 2006).



*Figure 1 - Homme du village de Rajapur (district de Murshidabad, Bengale occidentale) présentant des kératoses (augmentation de l'épaisseur des cellules de l'épiderme) dégénérant en mélanomes (cancer des cellules de la peau) sur la paume des mains dues à une intoxication par l'arsenic contenu dans l'eau potable (d'après Rahman *et al.*, 2005).*

Toujours à la suite d'une exposition sub-aiguë ou chronique, l'arsenic inorganique peut avoir des effets cardiovasculaires entraînant des arrêts cardiaques ou des altérations du système vasculaire à l'origine, dans certaines régions du monde, de gangrènes sèches des pieds ou de cyanoses des doigts nécessitant parfois l'amputation ; il peut avoir également des effets hématologiques (anémies et leucopénie), des effets sur le système nerveux (douleurs musculaires, diminution de la motricité) et des effets hépatiques (Bisson *et al.*, 2006).

L'arsenic peut se boire, se manger ou s'inhaler. Par contre, se laver les mains ou se baigner, faire la lessive dans de l'eau contenant de l'arsenic, ne comportent pas de risque pour la santé car la peau absorbe très peu l'arsenic (OMS, 2009b). Le taux d'absorption n'est alors que de 1 à 33 $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$ (Bisson *et al.*, 2006).

2.4. RÉGLEMENTATION

Les normes énoncées ci-dessous considèrent les concentrations en arsenic total et ne font donc pas de distinction en fonction des différentes formes, plus ou moins toxiques, de l'arsenic. Par ailleurs, elles ne tiennent compte que des quantités en solution et non des fines particules de matière en suspension, pourtant parfois très riches en arsenic.

Ces réglementations correspondent aux textes de droit afférents de manière spécifique aux problématiques qui seront abordées dans ce rapport.

2.4.1. Concentration en arsenic des eaux potables

Les premières normes de l'OMS relatives à la qualité de l'eau potable datent de 1958 : elles fixaient pour l'arsenic une concentration admissible de 200 $\mu\text{g}/\text{l}$. Mais dès 1963, cette concentration admissible fut ramenée à 50 $\mu\text{g}/\text{l}$ (OMS, 2009a). Toutefois, des études montrèrent que la concentration moyenne en arsenic pour l'ensemble des eaux de surface du Globe était voisine de 10 $\mu\text{g}/\text{l}$, et plus précisément, variait de 1 à 10 $\mu\text{g}/\text{l}$ dans les eaux douces non polluées (Mandal & Suzuki, 2002). C'est en partie pour cette raison que l'OMS abaissa en 1993 sa valeur limite dans l'eau potable à 10 $\mu\text{g}/\text{l}$ (OMS, 1994).

La directive n° 98/83/CE de l'Union Européenne du 3/11/1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine reprit alors cette valeur guide en droit européen pour l'ensemble des eaux potables, à l'exception des eaux minérales naturelles et des eaux médicinales.

Cette valeur fut ensuite transposée en droit français par le décret n° 2001-1220 du 20/12/2001 (JO du 22/12/2001). Décret qui fut abrogé avant d'être codifié, depuis mai 2003, dans le Code de la Santé publique aux articles de R. 1321-1 à R. 1321-66 (en particulier R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38). Des arrêtés d'application ont ensuite complété le dispositif réglementaire, en particulier l'arrêté du 11/01/2007 (JO du 11/02/2007) relatif aux limites et références de la qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine.

Outre le fait que ce dernier arrêté confirme que la concentration en arsenic de l'eau destinée à la consommation humaine doit être inférieure à 10 µg/l, il stipule également que la concentration en arsenic d'une eau brute potabilisable doit être inférieure à 100 µg/l (on appelle eau potabilisable une eau souterraine ou de surface qui, naturellement ou après traitement, peut devenir une eau potable). En d'autres termes, une eau brute dont la concentration en arsenic dépasse les 100 µg/l ne peut être potabilisée.

Notons que malgré les recommandations de l'OMS, de nombreux pays maintiennent encore l'ancienne norme de 50 µg/l pour les eaux potables : c'est le cas des pays comme le Bahrein, le Bangladesh, la Bolivie, la Chine, l'Égypte, l'Inde, l'Indonésie, le Sultanat d'Oman, les Philippines, l'Arabie Saoudite, le Sri Lanka, le Vietnam et le Zimbabwe. Inversement, le pays qui adopte la norme la plus sévère est l'Australie avec un seuil de 7 µg/l (Petrusevski *et al.*, 2007).

2.4.2. Rejets d'arsenic dans l'environnement

Les rejets industriels sont régis par l'arrêté du 2/02/1998 (JO du 03/03/1998) relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Selon l'article 64, lorsque le rejet d'arsenic et de ses composées dans un cours d'eau dépasse 0,1 kg/j, l'exploitant doit réaliser ou faire réaliser des prélèvements en aval de son lieu de rejet. Le seuil de rejet d'arsenic et de ses composés dans l'eau est donc fixé à environ 36,5 kg/an.

Pour les ICPE, les valeurs limites en arsenic peuvent être abaissées par arrêtés préfectoraux. Pour les anciens sites miniers, ces valeurs limites sont fixées par les Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) dont les prescriptions se réfèrent au Code minier [décret du 16/08/1956 (JO du 21/08/1956) modifié par la suite], et au Code de l'Environnement [décret du 02/08/2005 (JO du 05/08/2005) et décret du 22/03/2007 (JO du 23/03/2007)], et qui préconisent l'utilisation des techniques les meilleures à un coût économiquement acceptable (Battaglia-Brunet *et al.*, 2008).

La directive 2000/60/CE du 23/10/2000, dite Directive Cadre sur l'Eau (DCE), établit un cadre de politique communautaire visant à réduire le rejet de substances dites « prioritaires » et à supprimer le rejet de substances dites « dangereuses prioritaires » dans le milieu aquatique. Cette directive répertorie l'arsenic et ses composés parmi les principaux polluants sans toutefois l'incorporer à la liste des substances dites « dangereuses prioritaires ».

La DCE inspira la mise en place, pour chaque région de France, d'une action de recherche des rejets dans l'eau par les installations classées de substances polluantes notifiée par la circulaire du 4/02/2002 (non parue au JO).

Cette action aboutit à l'arrêté du 24/12/2002 relatif à la déclaration annuelle des émissions polluantes des installations classées soumises à autorisation, dit arrêté GEREP (JO du 07/03/2003). L'article 3 oblige l'exploitant d'une ICPE soumise à

autorisation préfectorale de déclarer sur le site internet GEREP (Gestion électronique du registre des émissions polluantes) les émissions (chroniques ou accidentelles, canalisées ou diffuses) d'arsenic et de ses composés à des seuils beaucoup plus bas que ceux de l'arrêté du 02/02/1998, puisque la masse totale de rejets à partir de laquelle déclaration doit être faite est de 20 kg/an dans l'air, de 5 kg/an dans l'eau et de 5 kg/an dans le sol.

La directive n° 96/61/CE relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution du 24/09/1996 commande la création d'un registre réalisant l'inventaire des émissions polluantes, créé par la Décision de la Commission Européenne n° 2000/479/CE du 17/07/2000 sous la forme du Registre européen des émissions de polluants (EPER). La directive fut modifiée par le règlement n° 166/2006/CE du 18/01/2006 régissant le suivi du rejet de substances toxiques dans l'air, les eaux et le sol, qui remplaça l'EPER par le Registre européen des rejets et des transferts de polluants (E-PRTR). Le fait que ce règlement modifia les règles communautaires en matière de déclaration d'émissions polluantes et de déchets, obligea le droit français, pour pouvoir le transposer, à abroger l'arrêté du 24/12/2002 par l'arrêté du 31/01/2008 relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets (JO du 13/03/2008). Ce règlement et cet arrêté conservent toutefois les seuils de rejets d'arsenic et de ses composés identiques imposés par l'arrêté du 24/12/2002. Les établissements industriels n'ont pas obligation de ne pas émettre au delà de ces seuils, mais ils doivent déclarer leurs émissions s'ils les dépassent. Le but de l'arrêté du 31/01/2008 est d'imposer la création d'un registre français, destiné à alimenter l'E-PRTR, appelé Registre français des émissions polluantes sur Internet, ou iREP, qui sera administré par l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques).

Notons aussi que la DCE fut à l'origine de la circulaire n° 2007/23 du 07/05/2007 (BO du MEDAD du 15/08/2007) définissant les normes de qualité environnementale provisoire (NQE_p) et fixant les objectifs nationaux de réduction des émissions de substances dangereuses dans l'eau. La somme de la NQE_p et du bruit de fond géochimique représente la concentration maximale admissible par le milieu. Pour l'arsenic, la NQE_p est de 4,2 µg/l en France.

2.5. POLLUTION

2.5.1. Généralités

L'arsenic présent dans les sols est majoritairement d'origine géologique. Dans une moindre mesure, il provient de contaminations d'origine anthropique liées à l'agriculture (pesticides à base d'arsenic utilisés en tant qu'herbicides, insecticides, ou dessiccateurs), aux terrils miniers et aux fonderies associées d'or, d'argent, de cuivre, de zinc et de plomb, à diverses autres activités industrielles, et enfin, aux retombées atmosphériques (Smedley & Kinniburgh, 2002). En effet, en 2000, la production industrielle d'arsenic cumulée depuis le début de l'ère industrielle était évaluée à 4,53 x 10⁶ t (Müller, 2004) alors que sa quantité dans la seule pédosphère était au moins estimée à 600 x 10⁶ t (Matschullat, 2000).

Toutefois, l'extraction minière de l'arsenic à l'échelle industrielle, puis sa dispersion par l'homme à la surface de la terre, ont provoqué en certaines régions du monde une surconcentration d'arsenic dans les eaux et les sols rendant impossible son recyclage par les êtres vivants. En effet, alors que la concentration moyenne de l'arsenic pour les sols est évaluée à 6 000 µg/kg (Mandal & Suzuki, 2002), de très importantes variations de concentration peuvent se produire en fonction de la nature du sol et de l'activité humaine. On a par exemple détecté des concentrations de 700 000 à 4 millions de µg/kg dans des sols provenant d'une ancienne exploitation minière à Gasen (Autriche) (Geiszinger *et al.*, 2002), et les eaux de drainage des zones minières peuvent présenter des concentrations en arsenic atteignant les 850 000 µg/l (Smedley & Kinniburgh, 2002). Ce surplus d'arsenic non recyclé se combine avec l'oxygène, le chlore ou le soufre pour donner l'arsenic inorganique.

Toutefois, dès les années 1980, l'extinction progressive des activités minières dues aux difficultés économiques et la mise en évidence médicale du pouvoir carcinogène de l'arsenic firent baisser sa production mondiale et mirent un terme à nombre de ses utilisations dans les pays industrialisés. En effet, alors qu'en 1970 la production mondiale annuelle d'arsenic était de 77 000 tonnes, elle n'était plus que de 29 000 tonnes en 1980, et de 30 000 tonnes en 1990 (Michel, 1993), pour remonter néanmoins à 40 000 t/an en 2000 (Laperche *et al.*, 2003). En 1990, la France était encore l'un des principaux producteurs d'anhydride arsénieux avec une fabrication estimée entre 10 et 12 000 t/an (Michel, 1993).

Si l'élément arsenic est peu utilisé en tant que tel, ses composés présentent de très nombreuses applications. Par exemple, l'anhydride arsénieux (As_2O_3) sert à blanchir le verre, traiter le bois ou conserver les aliments, le trisulfure d'arsenic (As_2S_3), ou orpiment, est employé comme pigment jaune dans les peintures, le disulfure d'arsenic (As_4S_4), ou réalgar, comme pigment rouge-orange, l'arséniat de plomb [$Pb_3(AsO_4)_2$] et le paxite ($CuAs_2$) comme pesticides, et l'arséniure de gallium (GaAs) comme semi-conducteur. Citons encore l'utilisation de composés d'arsenic dans la synthèse de produits pharmaceutiques, vétérinaires ou métallurgiques (Laperche *et al.*, 2003).

2.5.2. Mécanismes de rejet de l'arsenic minier dans l'environnement

Nous venons de voir que l'arsenic d'origine anthropique rejeté dans l'environnement provenait surtout des activités minières. Nous allons brièvement rappeler ci-dessous de quelles manières s'effectue ce rejet.

L'arsénopyrite ($FeAsS$), ou mispickel, est le principal minéral porteur de l'arsenic. Il se rencontre, dans des gisements très variés car il est lié aux métaux que l'on cherche à exploiter (or, plomb, zinc, cuivre, etc.). Bien que l'arsénopyrite soit beaucoup plus répandu que l'or, on a établi dans les années 1960 une association quasi-systématique de l'arsénopyrite avec l'or, à tel point que ce minéral a fini par devenir un marqueur de gisements d'or (Laperche *et al.*, 2003 ; Bonnemaïson, 2005).

Lorsque le minerai brut contenant l'arsénopyrite lié au métal est remonté en surface, il est alors traité par un broyage en poudre fine (dans la gamme 50-150 µm) suivi d'un lavage en vue de séparer le métal de l'arsénopyrite : le métal est bien sûr récupéré,

mais non le résidu. Or, ce type de traitement aboutit à enrichir le résidu en éléments traces métalliques, et en particulier en arsenic (Bril & Floc'h, 2001). Ce résidu riche en arsénopyrite, appelé déchet minier, halde ou encore stérile minier, est rejeté en tas à la surface du sol. Les tas peuvent adopter différentes formes en fonction de la nature du terrain : par exemple la forme d'un terril si le terrain est plat (cas du site de Cheni Les Farges, Haute-Vienne) ou la forme de nappes si le terrain est en pentes (cas du site d'Engualès, Aveyron) (Bril & Floc'h, 2001).

Alors que dans son environnement géologique d'origine l'arsénopyrite était en équilibre chimique, sa mise au contact de l'oxygène de l'air et de l'eau météorique, aussi bien au niveau des haldes que dans les galeries des mines, va lui faire subir des réactions d'oxydation (Fabriol, 2005). Les sulfures de métaux sont en effet des plus instables en conditions oxydantes (Bril & Floc'h, 2001). Le fait que le minerai brut ait été finement broyé a eu pour conséquence d'accroître de façon considérable sa surface totale, et donc les possibilités de contact entre l'oxygène de l'air et les eaux météoriques et les phases solides porteuses de l'arsenic (Bril & Floc'h, 2001).

La réaction d'oxydation subie par l'arsénopyrite d'un stérile minier (donc sous l'action combinée de l'eau et de l'oxygène de l'air) va provoquer la mise en solution d'arsenic et de fer ainsi que de grandes quantités d'ions sulfate (SO_4) dans les eaux météoriques ruisselant à sa surface (Bril & Floc'h, 2001). Plus l'eau de pluie sera acide (pH inférieur à 7), plus elle favorisera l'attaque des minéraux des roches, et donc la mise en solution des contaminants. Avec l'arsenic et le fer seront en effet relâchés d'autres éléments contenus dans les stériles miniers, tels des métaux de base (cuivre, plomb, zinc), des métaux lourds (cadmium, cobalt, nickel, mercure) ou des métalloïdes (sélénium) (Bonnemaison, 2005).

Ces eaux de ruissellement vont alors s'écouler dans des bassins de rétention aménagés en contrebas du stérile minier. Ces bassins vont fonctionner à la manière de bassins de décantation. En condition oxydante (potentiel redox Eh fort), leurs eaux de surface vont rester libres d'arsenic en solution car ce dernier va être piégé sous forme d'As(V) dans les phases minérales des sédiments tapissant le fond des bassins, surtout dans les oxyhydroxydes de fer et de manganèse (Bonnemaison, 2005). Or, ces oxyhydroxydes sont des phases porteuses encore plus instables que l'arsénopyrite. Lorsque les variations des conditions physico-chimiques rendent le milieu réducteur (Eh faible), les oxyhydroxydes de fer des sédiments se dissolvent et libèrent de l'As(III) dans la fraction aqueuse surnageante (Shuvaeva *et al.*, 2000 ; Grosbois *et al.*, 2006). Si le bassin de rétention laisse s'échapper de l'eau sous l'action de pluies torrentielles acides, l'arsenic est alors transporté hors site, gagne les rivières et peut être soit ingéré par les êtres vivants, qui l'intègrent alors dans des composés méthylés, soit se présenter sous diverses formes plus toxiques dans les matières en suspension (associé à des sulfures ou à des argiles) (Shuvaeva *et al.*, 2000 ; Grosbois *et al.*, 2006).

3. Intoxications à l'arsenic des populations par les eaux potables à l'échelle mondiale

3.1. INTRODUCTION

La voie principale d'exposition à l'arsenic pour les populations demeure l'ingestion directe par la consommation d'eaux contaminées, et dans une moindre mesure la consommation d'organismes ayant concentré l'arsenic et l'inhalation (Testud, 1998). De plus, le projet COBIAS s'intéresse exclusivement à l'arsenic hydrique. Nous allons par conséquent uniquement étudier dans ce chapitre les intoxications à l'arsenic par les eaux potables.

Notons, pour resituer le problème, que les intoxications par l'arsenic via l'eau potable ne sont reconnues et étudiées que depuis le XX^e siècle. Auparavant, l'humanité avait surtout connu des intoxications par l'arsenic du fait d'ingestion d'aliments ou d'alcool. En effet, la toute première intoxication à l'arsenic touchant une population entière et qui soit connue des annales historiques eut lieu en 1867 à Wurzburg (Allemagne), où un apprenti boulanger voulant nuire à son patron prépara une farine arsénifiée qui provoqua la mort de 373 personnes. Il fut imité en 1880 par un apprenti boulanger de Saint-Denis (France) qui intoxiqua 270 personnes (Canorel, 2007). La plus célèbre des intoxications alimentaires à l'arsenic reste toutefois celle qui eut lieu en 1900 à Birmingham, Liverpool et Manchester (Angleterre) : à la suite d'une erreur de manipulation, de la bière fut arsénifiée et intoxiqua 6 000 personnes, dont 70 succombèrent (Royal Commission, 1903).

Le nombre de pays où l'on a relevé d'importantes concentrations d'arsenic dans les eaux de surface ou les eaux souterraines destinées à la consommation humaine n'a cessé d'augmenter depuis le début du vingtième siècle et dépasse de nos jours les soixante-dix (Ravenscroft *et al.*, 2009). Toutes ces surconcentrations n'ont cependant pas donné lieu à des intoxications alimentaires. Nous allons nous intéresser ici uniquement à celles ayant donné lieu à des intoxications humaines, c'est-à-dire dont la concentration en arsenic atteignit au moins 100 µg/l.

La plus ancienne intoxication d'une population par une forte concentration en arsenic dans des eaux de consommation que nous ayons pu trouver est celle de personnes vivant près d'une mine d'or en Pologne en 1898. Depuis lors, au moins cinquante et un problèmes majeurs de contamination des eaux potables par des concentrations en arsenic au moins égales à 100 µg/l ayant intoxiqué, à des degrés divers, des populations, ont été comptabilisées aux XX^e et XXI^e siècles sur les cinq continents : Asie, Amérique, Europe, Afrique, et plus récemment Océanie (Tab. 2, fig. de 2 à 7).

Cette liste n'est probablement pas exhaustive car la pollution des eaux potables par l'arsenic n'attira l'attention des instances internationales qu'à partir des années 1980 avec les incidents du Bengale occidental et du Bangladesh. Des incidents majeurs

survenus antérieurement ont donc pu ne pas être répertoriés puisque, à l'époque, on ne cherchait pas à les détecter et que l'on n'avait donc pas élaboré les moyens techniques (dosage) et médicaux (liste des symptômes) de le faire (Ravenscroft *et al.*, 2009).

Ce n'est qu'en 1990 que la contamination des eaux souterraines par l'arsenic sort de l'ombre grâce à l'action des médias s'exerçant essentiellement en Inde et au Bangladesh. Elle va ouvrir la voie à un premier congrès international qui se déroulera en 1995 à Kolkata (c'est-à-dire Calcutta, Inde). Les conclusions et recommandations de ce congrès vont attirer l'attention des associations internationales, des médias du monde entiers et de la communauté scientifique sur cette problématique. Les études donnant lieu à des publications scientifiques vont alors très vite se multiplier de par le monde, initiant la découverte de nouveaux foyers de contamination : 83 % des publications relatives à l'arsenic, et de ses conséquences sur la santé humaine, furent ainsi publiées à partir de l'an 2000 (Ravenscroft *et al.*, 2009).

3.2. ÉTAT DES LIEUX

À l'échelle mondiale, les problèmes d'intoxication par l'arsenic des eaux potables les plus graves recensés depuis 1898 sont décrits par le Tableau 2 et représentés par la Figure 2.

3.2.1. Asie

L'Asie est particulièrement touchée par les problèmes d'arsenicisme (fig. 3). Le cas de contamination par l'arsenic de l'eau destinée à la consommation humaine le plus grave au monde est sans conteste celui touchant la presque totalité du Bangladesh et la moitié est de la province indienne limitrophe du Bengale occidental. Ce fut dans cette province que les 63 premiers cas d'empoisonnement à l'arsenic par les eaux souterraines apparurent dans la région en 1983. L'intoxication se répandit alors très vite car l'on estimait moins d'une vingtaine d'années plus tard, en 2001, pour le Bangladesh et le Bengale occidental réunis, à presque 150 millions le nombre de personnes vivant dans des régions où les eaux étaient contaminées par l'arsenic, et parmi elles, 31 millions buvant une eau dont la concentration dépassait les 50 µg/l (Chakraborti *et al.*, 2002).

Le nombre de personnes manifestant les signes cliniques cutanés d'une intoxication à l'arsenic (arsenicisme) augmenta de façon concomitante puisque, pour le seul Bengale occidental, de 63 personnes en 1983, il passa à 300 000 en 2001 (Chakraborti *et al.*, 2002) et à 530 000 en 2003 (Chakraborti *et al.*, 2004). Cette augmentation s'explique par le fait que les eaux souterraines du Bangladesh et du Bengale occidental se seraient brusquement enrichies en arsenic. On a ainsi pu y mesurer en plusieurs dizaines de puits des concentrations dépassant les 1 000 µg/l (Chakraborti *et al.*, 2002). L'accumulation d'arsenic dans les eaux souterraines aurait pour facteur déclenchant l'accroissement de la population : pour faire face à cet accroissement, dans un premier temps les eaux phréatiques auraient été prélevées de façon excessive pour alimenter la population grandissante et irriguer les champs ; ce

prélèvement aurait facilité le rejet d'arsenic dans les eaux souterraines par la biotite contenue dans les dépôts sédimentaires holocène et pléistocène (Seddique *et al.*, 2008) ; à cet arsenic d'origine géogénique se serait rajouté l'arsenic contenu dans les fertilisants utilisées pour l'agriculture, qui aurait migré depuis les sols jusque dans les eaux souterraines (Anawar & Mihaljevič, 2009).

On a également assisté dans d'autres pays d'Asie à une contamination des eaux potables par des résidus de sites miniers concentrés en arsénopyrites. Ainsi en Thaïlande, dans la province de Nakhon Si Thammarah, ces résidus contenaient des concentrations en arsenic de 5 millions de $\mu\text{g}/\text{kg}$ engendrant une concentration dans l'eau de boisson pouvant dépasser les 5 000 $\mu\text{g}/\text{l}$ (Williams *et al.*, 1996).

L'Asie est le continent le plus touché en termes de population exposée à une intoxication par l'arsenic due à une contamination des eaux potables avec les pays sinistrés que sont le Bangladesh, le Bengale occidental (Inde), la Chine, le Vietnam, le Népal et Taïwan.

Chaque année, de nouveaux cas de contamination par l'arsenic sont signalés dans le sud-est asiatique (Chakraborti *et al.*, 2002). L'arsénicisme y est même devenue endémique et cause un grave problème de santé publique : ainsi, en 2005 dans seize provinces chinoises, près de 582 000 personnes seraient touchées d'arsénicisme (Yu *et al.*, 2007).

On a de plus, ces dernières années, constaté l'apparition de contamination d'eaux souterraines à l'arsenic dans des pays d'Asie autrefois épargnés, tels le Cambodge (Buschmann *et al.*, 2007), le Myanmar (Birmanie) et le Laos (Rahman *et al.*, 2005). Le Pakistan fait partie de ces pays avec un relevé, dans le district de Muzaffargarh (Punjab), de concentrations en arsenic d'eaux souterraines atteignant les 906 $\mu\text{g}/\text{l}$ et qui seraient en grande partie dues à des pollutions anthropiques (entre autre industrielles et agricoles). Toutefois, cet arsenic n'atteindrait pas les eaux potables des zones rurales de ce district (Nickson *et al.*, 2005).

De nombreux cas de pollution des eaux par l'arsenic ont été signalés en Turquie depuis une dizaine d'année, en particulier dans la province de Kuthaya. Dans la plaine de Simav, il semble que l'origine de cette contamination soit multiple (minéraux sulfurés, ancienne mine et eaux géothermales) (Gunduz *et al.*, 2009).

Une étude réalisée en 2003-2004 par l'Institut de santé publique d'Oulan-Bator indique la présence d'arsenic dans quelques puits au sud de la république de Mongolie, mais à des concentrations qui ne sont pas excessives (Ravenscroft *et al.*, 2009).

3.2.2. Amérique

L'Amérique est le second continent le plus touché par des contaminations d'eaux de boisson à l'arsenic.

L'Amérique du sud possède des eaux souterraines fortement contaminées par l'arsenic (Sancho & Castro de Esparza, 2008). En premier lieu, l'Argentine est un des pays dont

les eaux sont les plus contaminées au monde (Navoni *et al.*, 2008). La grande plaine s'étendant du nord (Chaco) au centre (Pampa) du pays avec son million de km² est la plus grande région au monde où les eaux souterraines contiennent des concentrations en arsenic dépassant les 1 000 µg/l (Smedley & Kinniburgh, 2002).

Dans le nord du Chili, les concentrations en arsenic des eaux souterraines comme de surface descendent rarement au dessous des 100 µg/l, et des concentrations de 21 800 µg/l ont pu y être relevées (Cáceres *et al.*, 1992). Il a même été estimé qu'environ 7 % des décès survenus entre 1989 et 1993 à Antofagasta, une ville du nord du Chili, seraient dus à une eau contenant jusqu'à 570 µg/l qui fut consommée vingt ans plus tôt (Smith *et al.*, 1998). Le nord du Chili est en fait inclus dans une zone andine plus vaste englobant une partie des deux pays limitrophes que sont la Bolivie et le Pérou et présentant des eaux de surface et souterraines naturellement riches en arsenic (Castro de Esparza, 2008).

Le cas du Mexique est également inquiétant. Dans la seule province de Comarta Lagunera, dans le centre-nord du pays, des milliers de personnes montrent les symptômes d'un empoisonnement à l'arsenic par l'eau potable et deux millions y seraient exposés (Parga *et al.*, 2005). Mais cette contamination, qui aurait des origines multiples (naturelle, usines chimiques, mines), s'étendrait en réalité à l'ensemble du pays et pourrait toucher une bien plus grande part de la population que ce qui est officiellement estimé puisque 75 % des mexicains boivent de l'eau provenant d'aquifères qui sont, en de nombreuses régions, enrichis en arsenic (Armienta & Segovia, 2008).

L'Amérique latine présente encore quatre autres pays concernés, que sont : le Brésil (région du sud-est du pays dite « Quadrilatère du Fer » où furent relevés des cas d'intoxication dues aux activités minières et aux fonderies) (Deschamps *et al.*, 2004) ; le Nicaragua (Altamirano Espinoza & Bundschuh, 2008) et le Salvador (López *et al.*, 2008), qui seraient assez sévèrement touchés ; et très récemment, l'Uruguay, mais la contamination ne semble pas y être excessive (Manganelli *et al.*, 2007). À elle seule, l'Amérique latine comptabilise un total d'au moins 4,5 millions de personnes exposées à l'arsenic hydrique (Castro de Esparza, 2008).

L'Environment Protection Agency des États-Unis a évalué à 13 millions le nombre d'américains exposés à l'arsenic présent dans l'eau potable à une concentration supérieure ou égale à 10 µg/l (OMS, 2009a). Parmi eux, près de 2,5 millions seraient alimentés avec une eau potable contenant plus de 25 µg/l d'arsenic (Ortiz-Escobar *et al.*, 2006). La majorité de cet arsenic aurait une origine géogène : il est connu par exemple que l'arsenic géothermal de Yellowstone est la cause d'importantes concentrations d'arsenic (jusqu'à 370 µg/l) dans les rivières Madison et Missouri du Montana et du Wyoming (Nimick *et al.*, 1998). Par contre, le sud-est des États-Unis aurait pu être pollué du fait d'utilisation de produits chimiques à base d'arsenic utilisés pour la culture du coton et des citrons (Ortiz-Escobar *et al.*, 2006). Il existe également de nombreuses régions polluées en arsenic par des effluents miniers pouvant se concentrer, dans certaines eaux souterraines, jusqu'à 48 000 µg/l (Smedley & Kinniburgh, 2001).

Le Canada présente des sites contaminés, comme par exemple le lac Moira, dans l'Ontario (Azcue & Nriagu, 1995), ou les côtes sud de la Colombie Britannique (Boyle *et al.*, 1998). Mais les populations ne semblent pas avoir été intoxiquées.

3.2.3. Europe

En Europe, seuls quatre pays (Finlande, Hongrie, Roumanie et Turquie) auraient récemment été touchés par des incidents graves d'intoxication de populations.

Il n'existe pas de chiffres estimatifs du nombre de personnes intoxiquées ou exposées que pour la Turquie. Pour la Finlande, on avance l'estimation de 12 à 14 % de la population total du pays exposée (Kurttio *et al.*, 1999). La grande plaine hongroise, située dans la moitié orientale de la Hongrie et débordant en partie en Serbie, Slovaquie et Roumaine, semble être la région la plus touchée d'Europe quant aux concentrations d'arsenic dans ses eaux potables, puisque celles-ci pouvaient atteindre le millier de $\mu\text{g/l}$ entre 1941 et 1983 (Varsanyi, 1989). Les aquifères associés dans la partie Roumaine ont des concentrations dépassant les 176 $\mu\text{g/l}$ (Gurzau & Gurzau, 2001). Une étude épidémiologique récente réalisée en Hongrie (quatre régions), Roumanie (deux régions) et Slovaquie (deux régions) tempère toutefois la réputation hongroise puisqu'elle révèle pour la Hongrie une concentration moyenne d'arsenic dans les eaux potables de 17 $\mu\text{g/l}$, avec un pic à 88 $\mu\text{g/l}$, alors qu'en comparaison, la Roumanie ne montre qu'une concentration moyenne de 0,6 $\mu\text{g/l}$ et un pic à 95 $\mu\text{g/l}$, et la Slovaquie une concentration moyenne de 0,8 $\mu\text{g/l}$, et un pic à 39 $\mu\text{g/l}$ (Lindberg *et al.*, 2006).

Dans la région de Lavrion, au sud-est d'Athènes, l'oxygénation de sols riches en sulfures alliée à l'action de bactéries libéra de l'arsenic qui contamina les eaux souterraines, et avec elles les eaux potables (Komnitsas *et al.*, 1995). Dans le nord de la Grèce cette fois-ci, à Thessaloniki, une action géogène fut également à l'origine d'une contamination de l'eau des puits qui présentèrent une concentration moyenne de 46 $\mu\text{g/l}$ avec une pointe à 130 $\mu\text{g/l}$ (Katsoyiannis & Katsoyiannis, 2006). Il semble toutefois que ces problèmes n'aient pas atteint des proportions menaçant réellement les populations.

En Espagne, on a retrouvé de fortes concentrations d'arsenic dans les eaux de boisson de la région de Castille-et-León (Valladolid et Segovia), dans le nord-ouest du pays, mais aucun effet sur la population, très dispersée, n'a été constaté (Garda-Villanova *et al.*, 2005). En 1999, ont été relevés jusqu'à 393 $\mu\text{g/l}$ dans la région de Madrid, mais des mesures ont été prises pour éviter d'éventuelles intoxications (Aragonés Sanz *et al.*, 2001).

Les mines du nord-est du Portugal ont contaminé les eaux souterraines (jusqu'à 800 $\mu\text{g/l}$) et les eaux de surface des régions alentours, mais là aussi il ne semble pas qu'il y ait eu d'intoxications (Peirera & Ávila, 2006).

En France, on a relevé dans des eaux souterraines du Haut-Rhin des concentrations en arsenic atteignant les 6 260 $\mu\text{g/l}$ (Chéry, 2006), et en 1997 sur 44 des 100 départements, on estimait que 200 000 personnes étaient desservies par des eaux

dont la concentration en arsenic dépassait les 10 µg/l (Ravault *et al.*, 2002). Nous allons revenir plus longuement sur le cas de la France dans le chapitre suivant. Il faut juste savoir que, comme pour la Grèce, nous n'avons pas relevé d'incidents graves où de fortes concentrations en arsenic, bien supérieures aux 100 µg/l, auraient provoqué des intoxications de populations et l'apparition de cas d'arsénicisme.

En République Socialiste Fédérative Soviétique de Russie, on a relevé dans les eaux souterraines de l'île de Sakhaline des concentrations en arsenic dépassant les 700 µg/l (Voronov, 2000). Mais aucune population ne serait intoxiquée.

D'autres pays d'Europe n'ayant pas subi des intoxications graves, mais qui possèdent des eaux riches en arsenic, doivent être cités : ce sont l'Allemagne (Heinrichs & Udluft, 1999), l'Autriche, la Bosnie (Midzic & Silajdzic, 2005), la Croatie, l'Italie (Aiuppa *et al.*, 2003), la Serbie (Midzic & Silajdzic, 2005), la Suisse (Pfeifer *et al.*, 1996) et le Royaume-Uni (Thornton & Farago, 1997).

3.2.4. Afrique

Bien que l'on ait relevé entre 1947 et 1992 dans des eaux de surface polluées par les effluents de mines d'or de la région d'Obuasi, province Ashanti, dans le sud du Ghana, jusqu'à 350 µg/l d'arsenic (Smedley, 1996), très peu d'études ont pu montrer un lien de cause à effet entre l'origine minière de l'arsenic hydrique et les pathologies locales (Kumi-Boateng, 2007). On constata uniquement que l'arsenic contenu dans l'eau potable favorisait chez les habitants une ulcération de la peau causée par une bactérie, *Mycobacterium ulcerans* (Duker *et al.*, 2006).

Jusqu'en 2005, aucune région d'Afrique présentant des eaux souterraines surchargées en arsenic n'avait été identifiée, et aucun problème de santé en relation avec l'eau souterraine n'y avait été décelé (Ortiz-Escobar *et al.*, 2006). Cela s'explique par le fait que, comparativement aux autres continents, très peu d'études portant sur les concentrations en arsenic dans les eaux extraites d'aquifères de milieux cristallins ont été réalisées en Afrique ; or, ce sont surtout les milieux cristallins, naturellement riches en arsenic, qui enrichissent les eaux souterraines en cet élément (Smedley *et al.*, 2007). Une étude menée en 2005 au Burkina Faso sur trois villages bâtis sur des minéraux volcano-sédimentaires riches en sulfures a, pour la première fois en Afrique, mis en évidence un cas d'intoxication de populations avec pathologies associées par une eau potable riche en arsenic captée sur des aquifères (Smedley *et al.*, 2007).

Il existe également en Afrique du Sud et au Zimbabwe des pollutions minières localisées d'eau de surface mais dont l'impact sur les eaux souterraines utilisées pour la consommation est mineur (Jonnalagadda & Nenzou, 1996).

3.2.5. Océanie

Avec l'Australie, l'Océanie est depuis peu touchée par une contamination d'eaux souterraines par l'arsenic susceptible d'empoisonner une population. Il s'agit des eaux peu profondes de Gwelup (banlieue de Perth, Australie occidentale) qui, du fait d'un

fort prélèvement pour l'irrigation lié à une diminution des précipitations, ont été exposées à des sédiments pyritiques qui les ont progressivement enrichis en arsenic jusqu'à atteindre les 7 000 µg/l : or, ces eaux souterraines sont directement pompées dans les puits des habitations individuelles situées en périphérie des zones urbaines pour être bues et risquent donc, à terme, d'intégrer le circuit des eaux de consommation urbaines (Appleyard *et al.*, 2006).

En fait, la contamination des eaux et des sols en Australie et surtout d'origine anthropique et touche l'ensemble du pays depuis déjà de longues années. Mais jusqu'à présent, elle avait été négligée (Smith *et al.*, 2003).

Les eaux de surface de Nouvelle-Zélande sont contaminées par de l'arsenic provenant des sources géothermales ou de pollutions anthropiques, mais il n'y a aucun signe d'empoisonnement à l'arsenic dans le pays (Robinson *et al.*, 2004).

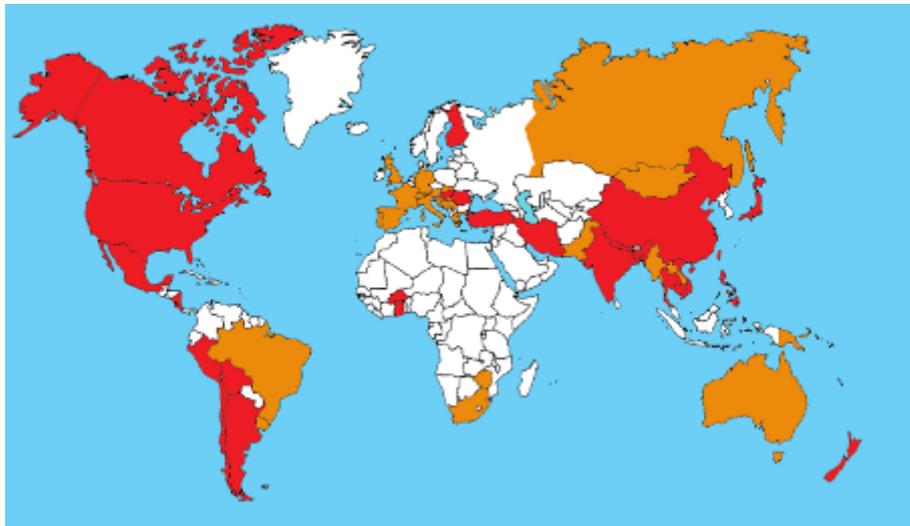


Figure 2 - Carte mondiale montrant les pays nommés dans le tableau 2 dont des populations ont été intoxiquées aux XX^e et XXI^e siècles par des eaux potables arsénifiées (en rouge) et ceux dans lesquels on a découvert de l'arsenic en forte concentration dans les eaux de surface ou souterraines mais n'ayant pas donné lieu à des intoxications de populations (en orange).

La RSFS de Russie est virtuellement séparée au niveau de la chaîne de l'Oural en deux entités que sont sa partie européenne et sa partie asiatique.

Pays (en parenthèse, source bibliographique)	Localisation dans le pays	Date ou période	Origine de la contamination	Nombre de personnes intoxiquées ou exposées	Concentrations mesurées (en µg/l)
Pologne (Geyer, 1977)	<i>Non trouvé</i>	1898	Activité industrielle (mines)	60	< 25 000
Japon (Hotta, 1989)	Miyazaki (Toroku et Matsuo)	1920-1962	Activité industrielle (usine chimique)	217	<i>Non trouvé</i>
Canada (Wyllie, 1937)	Ontario	1937	Formations géologiques	au moins 1 famille	100-410
Hongrie-Roumanie (Varsanyi, 1989)	Sud de la grande plaine hongroise	1941-1983	Formations géologiques	50 000	60-4 000
États-Unis (Milhan & Strong, 1974)	Washington	1944-1960	Formations géologiques	38	< 33 000
Ghana (Smedley, 1996)	Ashanti (Obuasi)	1947-1992	Activité industrielle (mines)	100 000	< 350
Argentine (Astolfi <i>et al.</i> , 1981)	Cordoba (Monte Quemado)	1949-1970	Formations géologiques	< 6 898	200-1 000
Ghana (Smedley, 1996)	Obuasi	1947-1992	Activité industrielle (mines)	< 100 000	< 350
Japon (Terade <i>et al.</i> , 1960)	Niigata (Nakajo)	1959	Activité industrielle (usine chimique)	44	< 4 000
Chili (Zaldivar, 1974)	Antofagasta	> 1959	Formations géologiques	500 000	< 800
Nouvelle-Zélande (Ritchie, 1961)	Taupo-Wairakei (Rivière Waikato)	1961	Formations géologiques	<i>Non trouvé</i>	< 8 500
Taiwan (Chen <i>et al.</i> 1988)	Hsinchu	1961-1985	Formations géologiques	140 000	10-1 820
États-Unis (Goldblatt <i>et al.</i> 1963)	Oregon (Lane County)	1962-1963	Formations géologiques	<i>Non trouvé</i>	50-1 700
Mexique (Del Razo <i>et al.</i> , 1990) (Parga <i>et al.</i> , 2005)	Comarca Lagunera	> 1963	Formations géologiques Activité industrielle (mines)	2 000 000	8-624
États-Unis (Goldsmith <i>et al.</i> , 1972)	Californie (Lessen County)	1970	Formations géologiques	100	50-1 400
Japon (Tsuchiya, 1977)	Shimane (Sasagadani)	1970	Activité industrielle (mines)	1 000	< 125
États-Unis (Robertson, 1989)	Arizona (Basin et Range)	1970-1980	Formations géologiques	350 000	< 1 300
États-Unis (Harrington <i>et al.</i> , 1978)	Alaska (Fairbanks)	< 1976	Formations géologique Activité industrielle (mines)	232	50-14 000
Canada (Grantham & Jones, 1977)	Nouvelle-Écosse (Halifax County)	1976	Formations géologiques	119	> 3 000
Inde (Datta & Kaul, 1976)	Punjab, Haryana, Himachal Pradesh	1976	<i>Non trouvé</i>	Plusieurs villages	< 545
États-Unis (Page, 1981)	New Jersey	1977-1979	Formations géologiques	<i>Non trouvé</i>	< 1 160
États-Unis (Welch & Lico, 1998)	Nevada (Fallon-Carson)	1977-1987	Formations géologiques	8 000	31-2 620
Chine (Ma <i>et al.</i> , 1999)	Mongolie intérieure	> 1978	Formations géologiques	300 000	50-1 800
États-Unis (Matisoff <i>et al.</i> , 1982)	Ohio (Canal Fulton)	< 1980	Formations géologiques	<i>Non trouvé</i>	1-100
États-Unis (Southwick <i>et al.</i> , 1983)	Utah (Millard County)	1980	Formations géologiques	250	180-210

Pays (en parenthèse, source bibliographique)	Localisation dans le pays	Date ou période	Origine de la contamination	Nombre de personnes intoxiquées ou exposées	Concentrations mesurées (en µg/l)
Iran (Mosaferi <i>et al.</i> , 2003)	Kurdistan	> 1981	Formations géologiques	18 villages	< 1 480
Chine (Wang & Huang, 1994)	Xinjiang	> 1983	Formations géologiques	523	40-750
Inde (Samanta <i>et al.</i> , 2001)	Bengale occidental	> 1983	Formations géologiques Agriculture	6 000 000	< 3 882
Bangladesh (Rahman <i>et al.</i> , 2006)	Ensemble du pays	> 1983	Formations géologiques Agriculture	32 000 000	< 10 - > 1 000
Argentine (Nicolli <i>et al.</i> , 1989) (Smedley <i>et al.</i> , 1998)	Plaine de Chaco-Pampa	> 1985	Formations géologiques	2 000 000	< 11 500
États-Unis (Frost <i>et al.</i> 1993)	Washington (Snohomish County)	1985-1988	Formations géologiques	1 ville	< 33 000
États-Unis (Hauptert, 1994)	Wisconsin (Outagamie et Winnebago Counties)	1987	Formations géologiques	1 000 familles	< 1 200
Thaïlande (Williams <i>et al.</i> , 1996),	Nakhon Si Thammarat	> 1987	Activité industrielle (mines)	14 000	< 5 114
États-Unis (Nimick <i>et al.</i> 1998)	Montana, Wyoming (Rivière Madison)	1988-1995	Formations géologiques	<i>Non trouvé</i>	> 370
Pérou (Castro de Esparza, 1989)	Vallée Ilo (rivière Locumba)	1989	Formations géologiques	250 000	< 500
Inde (Chakraborti <i>et al.</i> , 1998)	Calcutta (Behala)	1989-1997	Activité industrielle (usine chimique)	7000	50-23 080
États-Unis (Montgomery <i>et al.</i> , 2003)	New Hampshire	> 1990	Formations géologiques	41 000	< 215
Bolivie (Quintanilla, 1992)	El Alto et Oruro	1991	Formations géologiques	20 000	210- 12 600
Argentine (De Sastre <i>et al.</i> , 1992)	Salta et Jujuy	1992	Formations géologiques	> 5000	470-770
Philippines (Hironaka, 1995)	Ile de Mindanao	1992-1995	Activité industrielle (usine géothermique)	39	< 100
Finlande (Kahelin <i>et al.</i> , 1998) (Sorvari <i>et al.</i> , 2007)	Pirkanmaa (Tampere)	>1993	Formations géologiques	469 000	17-980
Japon (Kondo <i>et al.</i> , 1999)	Fukuoka (dans le sud de la préfecture)	1994	Formations géologiques	<i>Non trouvé</i>	< 293
Nicaragua (Castro, 2006)	Vallée de Sébaco	> 1996	Formations géologiques	55 700	< 1 320
Inde (Pandey <i>et al.</i> , 1999)	Madhya Pradesh (Rajnandgaon)	< 1999	Formations géologiques Activité industrielle (mines)	10 000	< 1 010
Vietnam (Berg <i>et al.</i> , 2001)	Hanoï et provinces proches	>1999	Formations géologiques	> 1 000 000	< 3 050
Népal (Tandukar <i>et al.</i> , 2001)	Terai	2000	Formations géologiques	500 000	< 2 620
Salvador (López <i>et al.</i> , 2008)	Bassin versant du lac Ilopango	> 2000	Formations géologiques	200 000	< 770

Pays (en parenthèse, source bibliographique)	Localisation dans le pays	Date ou période	Origine de la contamination	Nombre de personnes intoxiquées ou exposées	Concentrations mesurées (en µg/l)
Chine (Yu <i>et al.</i> , 2007)	Shanxi, Qinghai, Sichuan, Mongolie intérieure, Jilin, Xinjiang, Gansu, Anhui, Jiangsu, Ningxia, Henan, Heilongjiang, Yunnan, Shandong, Hunan, Liaoning	2001-2005	Formations géologiques	> 583 000	50-1 000
Inde (Chakraborti <i>et al.</i> , 2003)	Bihar	2002	Formations géologiques	5000	< 1 654
Burkina Faso (Smedley <i>et al.</i> , 2007)	Ouahigouya	2006	Formations géologiques	Trois villages	< 1 630
Cambodge (Buschmann <i>et al.</i> , 2007)	Plaine du Mékong (Kandal)	2006	Formations géologiques	100 000 familles	< 1 340
Turquie (Gunduz <i>et al.</i> , 2009)	Simav Plain (Kuthaya)	> 2006	Formations géologiques Activité industrielle (mines)	76 000	< 561,5

Tableau 2 - Problèmes mondiaux d'intoxication par l'arsenic des eaux potables les plus remarquables survenus chez des populations humaines depuis 1898.

La colonne « Nombre de personnes intoxiquées ou exposées » correspond soit aux personnes intoxiquées (en ce cas, les chiffres sont précis à l'unité près), soit aux personnes exposées (en ce cas, les chiffres sont arrondis à la centaine ou au millier). Ces personnes furent par ailleurs intoxiquées ou exposées dans la gamme des concentrations indiquées dans la dernière colonne et au minimum à la concentration de 50 µg/l (d'après Mandal & Suzuki, 2002 ; Smedley & Kinniburgh, 2001, 2002 ; Mukherjee *et al.*, 2006 ; Rahman *et al.*, 2006, modifiés).

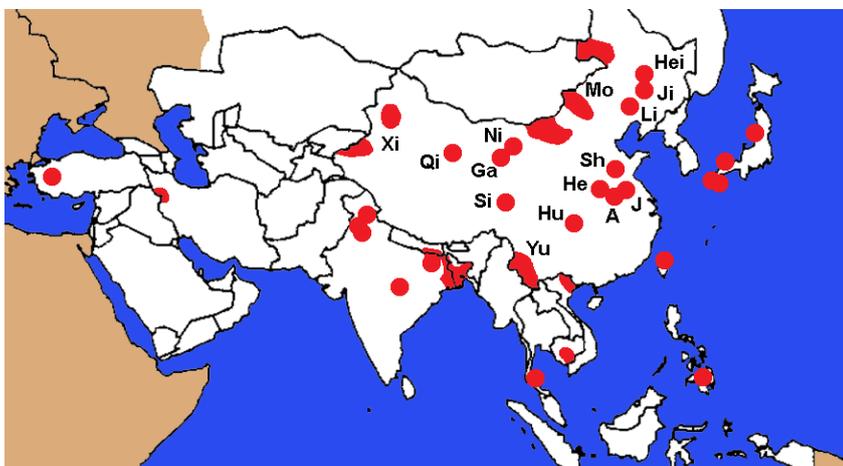


Figure 3 - Carte d'Asie montrant les régions des pays touchées par des intoxications de populations nommées dans le tableau 2 (en rouge).

Légendes d'ouest en est : Turquie (Simav Plain), Iran (Kurdistan). Inde : Punjab, Haryana, Himachal Pradesh (trois états dans le nord-ouest), Madhya Pradesh (état dans le centre), Bihar (état dans le nord-est près du Népal), Bengale occidental et sa capitale Calcutta (état dans l'est). Népal (Terai), Bangladesh (presque les deux tiers du pays), Thaïlande (Nakhon Si Tammarah), Cambodge (Plaine du Mékong), Vietnam (région de Hanoï). Chine : Républiques autonomes : Mo : Mongolie intérieure, Ni : Ningxia, Xi : Xinjiang (Ouzigoure). Provinces : A : Anhui, Ga : Gansu, Hei : Heilongjiang, He : Henan, Hu : Hunan, J : Jiangsu, Ji : Jilin, Li : Liaoning, Sh : Shandong, Si : Sichuan, Yu : Yunnan. Japon : du nord au sud, préfectures de Niigata, Shimane, Fukuoka et Miyazaki. Taiwan (Hsinchu), Philippines (Ile de Mindanao).

3.3. CAUSES DE CONTAMINATION DES EAUX POTABLES

La plupart des eaux potables arsénisées à l'origine des problèmes recensés ici sont des eaux souterraines extraites par forage. La présence d'arsenic dans ces eaux phréatiques peut avoir plusieurs origines (Bonnemaison, 2005).

Il existe une excellente corrélation spatiale entre les anomalies naturelles des sols et la contamination en arsenic des captages d'eau, et il est donc possible qu'un épandage de produits agricoles à base d'arsenic effectué de manière importante et régulière dans les champs ait pu alimenter une percolation de cet arsenic dans le sol jusqu'aux nappes d'eaux souterraines (Bonnemaison, 2005).

La présence d'arsenic dans une nappe phréatique peut également avoir pour origine une variation de son niveau, variation qui peut être due soit à l'action de l'homme (par pompage), soit à des causes naturelles (par exemple, variations de la pluviométrie). Le battement de la nappe subséquent aboutit alors à la mise « hors d'eau » d'une zone ayant maintenu jusque là l'équilibre nécessaire à la stabilité des sulfures contenant l'arsenic. Ces sulfures, en se retrouvant soudainement au contact de l'oxygène, vont être oxydés par celui-ci, et cette oxydation aboutira à la libération de l'arsenic qu'ils contiennent dans l'eau de la nappe (Bonnemaison, 2005).

La réduction bactérienne des oxydes de fer est également une source de contamination des eaux potables. Il a en effet été montré au Bengale occidental que des bactéries ferri-réductrices de sédiments d'aquifères pouvaient dissoudre les oxydes de fer porteurs d'arsenic en réduisant le Fe^{3+} et en libérant alors, avec le Fe^{2+} , l'As(III)-As(V) qui se retrouve en forte concentration dans les eaux souterraines (Islam *et al.*, 2004).

L'arsenic peut également contaminer les nappes phréatiques -tout comme les eaux de surface- par l'intermédiaire des sources chaudes géothermales. Ces sources atteignent facilement les 10 000 $\mu\text{g/l}$ d'arsenic, et souvent les dépassent : ainsi, à Tongonan (Philippines) et à Los Azures (Mexique), l'arsenic dissout dans les eaux thermales présente des concentrations supérieures à 20 000 $\mu\text{g/l}$ (Herdianita & Priadi, 2008). Dans l'ouest de l'île de Java (Indonésie), on a même relevé une concentration d'arsenic supérieure à 50 000 $\mu\text{g/l}$ (Herdianita & Priadi, 2008). Le maximum connu fut mesuré dans le réservoir du système géothermal de Yellowstone (États-Unis) à environ 400 000 $\mu\text{g/l}$ (Fournier *et al.*, 1986).

Une étude de Nadakavukaren *et al.* (1984) réalisée à Lane County (Oregon, États-Unis) montra que les concentrations en arsenic des puits pouvaient varier avec les saisons : ils comptèrent sept puits dont les plus hautes concentrations étaient systématiquement trouvées en été et atteignaient parfois dix fois la valeur de celles relevées, dans les mêmes puits, en hiver. Ainsi, dans le cas de cet exemple précis, la teneur de l'arsenic des eaux oscillait autour de 50 $\mu\text{g/l}$, seuil au-dessous duquel cette teneur n'était pas considérée comme dangereuse pour la santé à l'époque. Par conséquent, en fonction des saisons, une eau devenait donc dangereuse ou pas.

3.4. NOMBRE DE VICTIMES DANS LE MONDE

C'est en Asie, plus précisément dans le sud-ouest de l'île de Taïwan, que fut pour la première fois établie en 1961 une association entre de fortes doses d'arsenic pouvant s'élever jusqu'à 1 000 µg/l dans l'eau issue de puits alimentant les villages et l'apparition de cancers du poumon. Des études ultérieures ont confirmé ce lien de cause à effet (Celik *et al.*, 2008).

Au Bangladesh et au Bengale occidental l'intoxication humaine s'est accrue depuis une soixantaine de personnes en 1983 jusqu'à des dizaines de millions dans les années 2000 du fait d'une certaine passivité de la part du gouvernement, qui ne commença à mettre en place des commissions d'études sur la contamination des eaux par l'arsenic suffisamment efficace qu'à partir de 1992. Les conclusions de ces commissions ne purent cependant être mise immédiatement en application à cause des coûts importants que nécessitaient la mise en place de mesures préventives (Chakraborti *et al.*, 2002). Ce manque de réactivité a pour conséquence, selon certaines estimations, entre 200 000 et 270 000 décès par cancer du à l'arsenic hydrique dans le seul Bangladesh (OMS, 2009a).

Müller (2004) répertoria par pays, pour le début des années 2000, un total d'environ 75 millions de personnes intoxiquées ou exposées à des eaux arséniées (tab. 3).

Nous ne construirons pas, à la manière de Müller (2004), un tableau actualisé 2008-2009, incluant par exemple les nouveaux pays touchés en Amérique latine, comptabilisant par pays le nombre de personnes ingérant de façon régulière une eau dont la concentration en arsenic dépasse le seuil des 10 µg/l préconisé par l'OMS. Tout d'abord parce que le tableau 2 que nous venons d'établir ne nous permet pas de réaliser un tel inventaire dans la mesure où ses chiffres ne correspondent pas à un état actuel mais à des dates échelonnées sur près d'un siècle. Ensuite parce que les publications 2008-2009 fournissent des chiffres qui correspondent toujours à des années antérieures eut égard aux délais éditoriaux inhérents à toute publication. Enfin et surtout, parce que les auteurs eux-mêmes ne donnent pas des chiffres identiques pour un même pays, en particulier lorsque ces chiffres sont élevés et calculés à partir de critères divergents.

Par exemple Yu *et al.* (2007) estiment que dans seize provinces chinoises plus de 500 000 personnes sont touchées d'arsénicose, alors que Sun (2004) évoque pour la totalité des provinces chinoises uniquement 30 000 cas d'arsénicose ; et que penser de la notion d'exposition à l'arsenic hydrique puisque les seuils de concentration admissibles ne sont pas les mêmes pour tous les pays ?

Nous nous contenterons donc de citer les derniers chiffres autorisés, c'est-à-dire ceux de l'OMS. Ainsi en 2001, l'OMS estimait que pour le monde entier environ 130 millions de personnes étaient exposées à des concentrations d'arsenic dans les eaux potables dépassant les 50 µg/l (van Halem *et al.*, 2009).

Pays	Concentration en arsenic	Total par pays (estimations)	Total par continent	Total Mondial	
Asie					
Bengladesh	> 50 µg/l	50 000 000	66 705 000	75 278 000	
Inde	> 50 µg/l	6 000 000			
Chine	> 50 µg/l	6 000 000			
Népal	> 50 µg/l	3 190 000			
Vietnam	> 50 µg/l	1 000 000			
Mongolie	> 50 µg/l	300 000			
Taiwan	> 50 µg/l	200 000			
Thaïlande	> 50 µg/l	15 000			
Amérique					
États-Unis	> 10 µg/l	3 000 000	6 137 000		
Argentine	> 50 µg/l	2 000 000			
Chili	> 50 µg/l	437 000			
Mexique	> 50 µg/l	400 000			
Pérou	> 50 µg/l	250 000			
Bolivie	> 50 µg/l	50 000			
Europe					
Allemagne	> 10 µg/l	1 500 000	2 336 000		
Hongrie	> 50 µg/l	400 000			
France	> 10 µg/l	200 000			
Grèce	> 50 µg/l	150 000			
Espagne	> 50 µg/l	50 000			
Roumanie	> 50 µg/l	36 000			
Afrique					
Ghana	> 50 µg/l	100 000	100 000		

Tableau 3 - Nombre de personnes au monde consommant quotidiennement une eau dont la concentration en arsenic est supérieure à 10 µg/l ou à 50 µg/l (d'après Müller, 2004).
Ce tableau est indicatif car ses chiffres ne sont plus d'actualité en 2009.

3.5. MOYENS DE LUTTE

Il n'existe pas de thérapie contre l'empoisonnement par l'arsenic présent dans l'eau potable (Testud, 1998). Le seul remède consiste à ne plus boire d'eau arsénifiée, la prévention restant donc la seule arme contre ce fléau.

La collecte de l'eau de pluie ou l'exploitation d'eaux souterraines sûres sont deux moyens de se procurer de façon durable des eaux potables exemptes d'arsenic (OMS, 2009a). Pour localiser sans risque d'erreurs une eau souterraine non arsénifiée, il faut entreprendre une interprétation géostructurale des terrains en vue d'estimer le risque de contamination par l'arsenic d'un captage d'eau souterraine (Bonnemaison, 2005), et plus particulièrement prédire les phénomènes d'adsorptions-désorptions et de précipitations-dissolutions de l'arsenic dans les aquifères pour anticiper ses variations de concentration (Smedley & Kinniburgh, 2002). De telles études sont longues et surtout coûteuses.

Aussi, lorsqu'il n'est pas possible d'éviter de boire une eau arsénifiée, il faut la traiter afin d'éliminer l'arsenic. Avant toute chose cependant, les populations doivent être

sensibilisées au risque et recevoir ensuite une bonne éducation sanitaire. Il n'existe en effet pas de techniques avérées pour éliminer l'arsenic dans des points d'eau tels que les puits et les sources (OMS, 2009a) et les habitants doivent donc se montrer particulièrement prudents avec ce type d'eau. On constate encore en effet trop souvent des comportements imprudents, voire irresponsables, et ce aussi bien dans les pays du Tiers monde que dans les pays riches, comme par exemple dans le Nevada (États-Unis) où dans une seule région de cet état une dizaine de milliers de ruraux continuent de boire l'eau de leurs puits arséniés sans utiliser le traitement qui leur a été fourni par les autorités (Walker *et al.*, 2005).

En ce qui concerne les techniques d'élimination de l'arsenic dans les eaux canalisées, il faut savoir que leur coût important et les compétences techniques qu'elles exigent les rendent inapplicables dans certaines zones urbaines de pays en développement et dans la plupart des zones rurales du monde (OMS, 2009a). Ainsi par exemple, alors que le gouvernement indien avait installé au Bengale occidental environ 1 900 dispositifs de filtration de l'arsenic, un grand nombre d'entre eux ne furent pas entretenus et nettoyés et ne purent donc assurer leur fonction (Rahman *et al.*, 2005).

Les habitants peuvent alors essayer d'éliminer l'arsenic de l'eau à domicile. Mais à ce niveau, très peu de techniques simples facilement transposables existent. Certaines études ont montré que, dans un premier temps, des sachets de produits chimiques associant l'élimination de l'arsenic et la désinfection de l'eau avaient donné de bons résultats. Il s'agit d'un composé mis au point par le Centre panaméricain de Génie sanitaire et des Sciences de l'Environnement de Lima (Pérou). Ce composé a, certes, fait ses preuves en Amérique latine, mais il devra être adapté pour être applicable dans d'autres régions du monde (OMS, 2009a).

De nouvelles techniques de traitement, notamment par co-précipitation, échange d'ions et filtration sur alumine activée, sont en cours d'expérimentation sur le terrain (OMS, 2009a). Ils doivent cependant encore être améliorés. On cite en effet le cas du filtre sur sable avec co-précipitation, censé être le traitement le plus efficace utilisé au Vietnam en rapport avec un coût abordable pour ce pays. Le principe consiste à faire passer l'eau contaminée en arsenic sur des couches de sables aérées, afin que les particules de Fe²⁺ sur lesquelles l'arsenic est adsorbé se déposent. Toutefois, ce type de traitement procure malgré tout, du fait de certaines particularités anioniques des eaux souterraines de ce pays, une eau encore trop riche en arsenic (jusqu'à 140 µg/l) par rapport au seuil mondial de 10 µg/l (Nguyen *et al.*, 2009).

3.6. VOIES DE CONTAMINATION AUTRES QUE L'EAU POTABLE

Du fait du thème même de ce rapport, centré sur les pollutions des eaux de surface par l'arsenic, nous ne nous sommes pas intéressés aux deux autres modes d'intoxication à l'arsenic qui touchent moins de personnes : les intoxications par la nourriture et par l'air (Liu *et al.*, 2002).

Ces modes d'intoxications ne sont pas bénins. Un exemple d'intoxication par la nourriture est celui survenu récemment en Corée, où une mine aurifère commença par contaminer les cours d'eau en arsenic. Cette eau ne fut pas bue mais l'arsenic se

concentra dans les cultures, en particulier le riz, engendrant une augmentation des cas de cancer (Lee & Chon, 2008). Un autre exemple : des déchets à base d'arsenic enfouis illégalement dans une région du Japon eurent les mêmes effets sur le riz (Kinoshita & Kaize, 2008).

Une intoxication par l'air peut être due à l'arsenic présent naturellement dans le charbon : lorsque le charbon se consume, l'arsenic s'évapore et de fortes concentrations d'arsenic en suspension dans l'air peuvent être inhalées sous forme de poussières ou de vapeurs. Ils ont alors des effets semblables à ceux associés à une absorption par voie orale. Un exemple connu est celui de la province de Ghuizou (sud-ouest de la Chine), où l'utilisation d'un charbon riche en arsenic destiné à cuire les aliments aurait provoqué, entre 1976 et l'an 2000, 3 000 cas d'arsénicismes et peut-être surexposé 200 000 personnes (Liu *et al.*, 2002).

3.7. CONCLUSIONS

Le nombre de personnes intoxiquées par l'arsenic via les eaux potables ne cesse de croître dans le monde.

Les principaux obstacles qui empêchent d'acquérir une appréhension globale du problème de l'arsenic dans l'eau et d'adopter des résolutions à l'échelle mondiale sont de quatre ordres : ce sont les effets retards sur la santé de l'exposition chronique à l'arsenic (il existe un grand décalage de temps, plusieurs années, entre le début de l'intoxication et l'apparition des symptômes) ; l'absence de définitions communes (c'est-à-dire le manque de coordination entre les pays concernés) ; le peu de sensibilisation locale (les habitants ne s'inquiètent souvent pas de la présence d'arsenic dans l'eau) ; enfin, des lacunes de la notification dans les zones touchées (l'information selon laquelle une région possède des eaux potables riches en arsenic remonte parfois difficilement jusqu'aux autorités) (OMS, 2009a).

Certes, l'ampleur des problèmes pour la santé causés par l'arsenic dans l'eau potable est mal connue et il n'existe par conséquent pas d'estimation fiable de l'étendue du problème dans le monde (OMS, 2009b). Il n'en reste pas moins que la seule contamination par l'arsenic naturel est une cause de préoccupation dans de nombreux pays du monde (OMS, 2009b) et que l'OMS elle-même estimait en 2001 que la contamination de l'eau potable par l'arsenic n'était rien moins que le second plus grand danger mondial pour la santé humaine après la contamination de des eaux par les microorganismes (Johnston *et al.*, 2001 ; van Halem *et al.*, 2009).

Si l'on rajoute au nombre de victimes empoisonnées par les eaux potables celles empoisonnées par de la nourriture ou de l'air chargée en arsenic, l'intoxication par l'arsenic, n'en devient alors que plus préoccupante.

Par conséquent, il apparaît urgent de développer des systèmes efficaces et non polluants, par exemple sous forme de bioprocédés destinés à éliminer l'arsenic des eaux souterraines polluées et des effluents industriels et miniers.

4. Pollution anthropique à l'arsenic des eaux de surface en France Métropolitaine

4.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la problématique de la pollution des ressources en eau par l'arsenic en France métropolitaine. Par manque d'information, les Départements et Territoires d'Outre Mer (DOM-TOM) ne sont pas pris en compte dans cette analyse. Par ailleurs, le projet COBIAS se proposant de ne traiter que les eaux potabilisables, les eaux souterraines et les effluents industriels et miniers, nous avons décidé de ne nous intéresser qu'aux contaminations à l'arsenic des eaux de surface, éventuellement des eaux de transition (eaux saumâtres), mais aucunement des eaux côtières.

• Choix des eaux de surface

Une pollution à l'arsenic d'un site consiste en une pollution à la fois du sol et de l'eau à proximité ou sur le site : en effet, par divers mécanismes de transfert, l'arsenic peut se déplacer d'un compartiment à un autre, comme par exemple du sol vers les nappes souterraines (Dictor *et al.*, 2004). Ainsi, les eaux de surface (ruisseaux, rivière, fleuves) et les eaux souterraines (nappes superficielles ou circulations d'eau le long des grandes fractures) sont fortement interconnectées (Grosbois *et al.*, 2006). Mais les eaux de surface, particulièrement vulnérables aux pollutions, ne transmettent celles-ci que lentement aux eaux souterraines (Appelo & Postma, 2005). Or, les pollutions anthropiques, que ce soit à l'arsenic ou à d'autres contaminants, sont très récentes à l'échelle des temps géologiques. Par conséquent, l'étude des pollutions anthropiques des eaux superficielles primera toujours sur celles des eaux profondes dans la mesure où elles sont en fait annonciatrices de ces dernières. Par ailleurs, l'étude des eaux de surface s'avère d'autant plus prioritaire qu'elles sont très fréquemment mobilisées pour divers usages : domestique, agricole et de récréation (baignade, pêche, etc.).

Il est vrai qu'en France les eaux souterraines contribuent pour 62 % à l'alimentation en eau potable et qu'elles peuvent aussi subir des pressions anthropiques par la migration de l'arsenic ou s'enrichir naturellement en arsenic et atteindre de très fortes concentrations (jusqu'à 1 250 g/l en Alsace, Helynck & Ledrans, 1998). Cependant, nous nous focaliserons ici sur les eaux de surface pour dresser un état des lieux de la pollution par l'arsenic.

• Choix de l'arsenic d'origine anthropique

En France métropolitaine, l'arsenic est présent dans quatre environnements géologiques distincts : les franges externes de certains granites intrusifs, certaines grandes structures tectoniques de plusieurs dizaines de kilomètres d'extension, les

niveaux sédimentaires du début du Paléozoïque, et enfin les marges sédimentaires de certains massifs cristallins (Dictor *et al.*, 2004).

Dans les roches cristallines, l'arsenic est rarement sous forme natif (comme par exemple dans les Vosges). En réalité, il se combine aisément avec les autres éléments chimiques et peut ainsi rentrer dans la composition de plus de deux cent minéraux, dit minéraux arséniés. En particulier, l'arsenic se combine facilement au soufre pour former des sulfo-arséniures (de fer, de nickel, de cobalt, de cuivre). Mais le principal minéral porteur de l'arsenic est, de loin, l'arsénopyrite. Les concentrations en arsenic dans les roches sont par conséquent étroitement en lien avec leur teneur en arsénopyrite (Dictor *et al.*, 2004).

Outre l'arsénopyrite, l'arsenic est contenu dans des minéraux souvent associés aux dépôts d'or (Au), d'argent (Ag), de bismuth (Bi), de cadmium (Cd), de cobalt (Co), de fer (Fe), de mercure (Hg), de molybdène (Mo), de nickel (Ni), de plomb (Pb), de platine (Pt), d'antimoine (Sb), de sélénium (Se), d'étain (Sn), d'uranium (U), de tungstène (W) et de zinc (Zn). C'est l'oxydation de ces minéraux qui aboutit à la libération de l'arsenic dans le milieu naturel, et donc à une pollution géologique à l'arsenic (Dictor *et al.*, 2004).

Les régions connues les plus touchées par l'arsenic d'origine géologique sont le Sud-Ouest (de 10 à 50 µg/l et jusqu'à 200 µg/l) et une partie du Loiret (de 15 à 25 µg/l). Des cas isolés sont observés dans les Vosges (jusqu'à 100 µg/l), le Haut-Rhin, en Meurthe-et-Moselle, dans le Limousin et en Haute-Marne (Charles, 1999).

En France métropolitaine, bien que les teneurs en arsenic enregistrées dans les sols et sédiments soient parfois élevés (jusqu'à plusieurs centaines de grammes par tonne), les eaux de surface en sont généralement dépourvues car, dans un milieu en équilibre ayant atteint sa maturité, l'arsenic reste piégé dans des phases minérales, surtout oxydes et hydroxydes. Les seuls rejets géochimiques importants d'arsenic sont ceux causés par les sources chaudes du volcanisme récent à la suite de l'altération hydrothermale des roches. Une étude récente menée dans le cadre de l'Atlas géochimique européen (2005-2006) du projet FOREGS (FORum of European Geological Surveys) montre qu'en France le fond géochimique en arsenic des eaux de surface n'est que de 0,73 µg/l (Bonnemaison, 2005). Ce fond est très au dessous du seuil de 10 µg/l toléré pour les eaux potables en France et ne peut donc être assimilé à une pollution des eaux par l'arsenic.

En fait, les concentrations importantes d'arsenic dans les eaux de surface correspondent souvent à une activité humaine car les rejets d'origines anthropiques sont de loin bien plus importants que les contaminations géogènes (Bonnemaison, 2005).

• Choix de l'arsenic d'origine industrielle

Il s'avère qu'en France métropolitaine l'origine anthropique des pollutions à l'arsenic des eaux potabilisables en 1997-1998 était due pour 70 % aux activités industrielles, pour 21 % par les décharges et pour seulement 9 % par les pesticides utilisés dans

l'agriculture (Ledrans & Grossier, 1998). Par ailleurs, les pollutions par épandages agricole sont souvent diffuses et donc sont mal localisées. L'utilisation d'arsenic dans les produits agricoles, y compris les pesticides, est désormais interdite dans presque tous les pays occidentaux, dont la France (Harré *et al.*, 2008). Par conséquent, nous focaliserons notre analyse uniquement sur les pollutions anthropiques d'origine industrielle (dont les anciens sites miniers).

4.2. ÉTAT DES LIEUX DES REJETS INDUSTRIELS D'ARSENIC EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

Les secteurs industriels qui rejettent le plus d'arsenic dans les eaux de l'Hexagone sont en premier lieu les industries extractives (environ 2 300 kg/an en 2006), suivies de la sidérurgie, métallurgie, coke (environ 900 kg/an en 2006), la chimie, parachimie, pétrole (environ 500 kg/an en 2006), les déchets et traitements (environ 400 kg/an) et enfin le bois, papier et carton (environ 300 kg/an en 2006) (Gouzy & Brignon, 2008).

Il peut paraître étonnant que les industries extractives soient responsables de presque 50 % des rejets totaux d'arsenic dans les eaux françaises en 2006 alors qu'elles ne correspondent plus sur le territoire de la métropole qu'aux anciens sites miniers. En effet, dès les années 1980, les contraintes économiques entraînèrent la fin presque définitive de l'extraction minière en métropole : la production de tungstène s'arrêta en 1986, celle de bauxite en 1991, celles de plomb et d'argent en 1992, de zinc en 1994, de fer en 1997, d'uranium en 2001, de potasse 2002, et d'or en 2005 (Castello & Bouchi-Lamontagne, 2007). En France métropolitaine, il n'existe donc plus à ce jour aucun site minier susceptible de rejeter des minéraux contenant de l'arsenic qui soit encore en activité ; seules fonctionnent encore quelques mines, principalement de sel (Castello & Bouchi-Lamontagne, 2007). À ce titre, les anciens sites miniers de métropole ne sont plus classifiés comme activité industrielle.

Bien sûr, la France continue d'extraire de son territoire de nombreux minéraux, tels les sables. Mais alors il ne s'agit plus de mines. En effet, les mines sont sous le régime du Code minier et ont donc un aspect légal s'expliquant par le fait que les substances qui en sont extraites revêtent une importance stratégique pour le développement économique du pays. Ainsi sont concernés tous les combustibles (charbon, pétrole, gaz), tous les métaux (Au, Cu, Fe, Zn, Ag...) et quelques autres matières (sel, soufre, potasse, fluorine, uranium...). Pour les produits qui ne figurent pas dans la liste du Code Minier, on ne parle plus de mines mais de « carrières ». Cce sont les matériaux de construction tels le sable, l'argile, le gypse ou le calcaire (Castello & Bouchi-Lamontagne, 2007).

Il reste que certains sites miniers, assez peu nombreux et fermés depuis des années, essentiellement des mines de soufre, de fer, d'or, d'argent, de cuivre, d'antimoine, de nickel et de cobalt, génèrent toujours de très fortes contaminations d'arsenic dans les rivières (Battaglia-Brunet *et al.*, 2008).

Un ancien site minier particulièrement emblématique en France est le site de la Combe du Saut, situé dans la commune de Salsigne (Aude), qui pose de nos jours un des plus graves problèmes environnementaux de contamination à l'arsenic en Europe. En 1997,

des concentrations atteignant plusieurs milliers de $\mu\text{g/l}$ en certains points de la rivière Orbiel, située à proximité du site, ont incité les autorités à interdire la consommation et la vente de légumes feuilles dans la vallée pour une durée d'un an par un arrêté interministériel daté du 30/05/1997 (JO du 01/06/1997). Ce dernier fut périodiquement reconduit et suivi de l'arrêté du 16/08/1999 (JO du 18/09/1999) interdisant ce type de consommation jusqu'au 16 août 2000 (La Rédaction, 2007).

Il existe encore des mines en activité sur le territoire français, mais hors de la métropole. Plus précisément, des mines d'or sont actuellement exploitées en Guyane française. Mais il semble que ces mines n'engendrent pas de contaminations à l'arsenic dans le milieu environnant (Miramond *et al.*, 2006). Ce qui n'est pas le cas s'agissant des rejets de Mercure issues des mines. Le SIG Ressources minérales de la Guyane est un projet BRGM en cours de développement par le BRGM. La mise en ligne des données concernant l'incidence de l'arsenic sur l'environnement n'est pas encore réalisée.

4.3. BASES DE DONNÉES UTILISEES POUR ÉTABLIR LA CARTE DES POINTS NOIRS DE POLLUTION ANTHROPIQUE À L'ARSENIC DES EAUX DE SURFACE EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

Pour mieux illustrer l'état des lieux précédent, nous avons établi une carte de la pollution anthropique à l'arsenic des eaux de surface en France métropolitaine, dite carte des « points noirs ».

Il n'existe pas vraiment de seuil précis pour définir une pollution importante à l'arsenic car tout dépend de la vulnérabilité du milieu. Toutefois, s'appuyant sur l'arrêté du 31/01/2008 (JO du 13/03/2008), le répertoire iREP définit la limite de déclaration d'émission de l'arsenic et de ses composés par les établissements industriels dans l'eau à 5 kg/an. Nous avons donc adopté cette limite et considéré par conséquent que le rejet direct de 5 kg/an dans l'eau sera le seuil minimal à partir duquel est défini un point noir de pollution des eaux de surface par l'arsenic.

Nous avons exploré toutes les pistes existantes pour relever des données ; certaines se sont avérées sans intérêt pour notre étude, d'autres fructueuses. Les bases de données internet du BRGM

BASOL

Le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT), Direction Générale de la Prévention et des Risques (DGPR), présente en accès libre sur Internet la base de données BASOL (Base de données sur les Sites et Sols pollués). Cette base, actualisée tous les trois mois, recense les sites où les pollutions d'origine industrielle des sols sont concentrées, c'est-à-dire où les teneurs en polluant sont élevées sur une surface réduite (quelques dizaines d'hectares au maximum). Elle ne recense donc pas les pollutions diffuses (comme celles dues à certaines pratiques agricoles ou aux retombées de la pollution automobile près des grands axes routiers). Si tous les sites

répertoriés sur BASOL appellent une action des pouvoirs publics (à titre préventif ou curatif) du fait de leur impact sur l'environnement, ils sont cependant classés en cinq catégories décrites dans la légende du tableau de l'Annexe 4.

Sur les 4 184 sites répertoriés au 03/07/2009 dans BASOL, 537 ont pour polluant constaté l'arsenic (seul ou en mélange), soit 12,83 % de l'ensemble des sites. Nous constatons que 58 sites sont pollués au niveau des sols et des eaux de surface. Contrairement à ce que pourrait faire penser son appellation, ce site cible donc d'autres pollutions que celles des sols à proprement parlé. Étant donné que nous ne nous intéresserons qu'aux eaux de surface, nous pouvons déjà avancer qu'au moins 58 sites, tous en France métropolitaine, présentent des concentrations anormales en arsenic dans des eaux de surface.

Pour chacun des sites, il est possible de consulter plusieurs fiches directement imprimables. Une application de cartographie, GEOSIGNAL, permet de situer géographiquement le site. Un lien internet permet de consulter la fiche BASIAS (voir ci-dessous). Toutefois, les quantités de polluants rejetées dans le milieu ne sont pas fournies.

BASIAS

Le BRGM présente également en accès libre sur Internet la base de données BASIAS (Base des Anciens Sites Industriels et Activités de Service) qui recense au niveau national environ 300 000 sites industriels, abandonnés ou non, susceptibles d'engendrer une pollution de l'environnement. Les sites BASIAS ne sont donc pas forcément polluants. Cette base de données a pour but de conserver la mémoire de ces sites et de fournir des informations utiles aux acteurs de l'urbanisme, du foncier et de la protection de l'environnement (notaires, détenteurs de sites) pour retracer leur historique.

Ses données relatives à une pollution par quelque contaminant que ce soit ne sont toutefois pas disponibles aisément, c'est-à-dire que le site ne possède pas de moteur de recherche pour les substances polluantes. Il faut consulter l'unique fiche de chaque site dans sa totalité pour savoir s'il présente une pollution à l'arsenic. Ces fiches ont certes la propriété d'être téléchargeables mais elles sont très longues, parfois difficiles à comprendre, et il en existe près de 300 000. Il paraît donc insensé de consulter les fiches BASIAS les unes à la suite des autres.

Le site BASIAS peut de toute façon être utile dans un sens où il peut confirmer et peut-être compléter les données trouvées dans BASOL.

Il existe cependant un moyen indirect de sélectionner les fiches BASIAS rapportant une pollution à l'arsenic par l'intermédiaire du portail InfoTerre, comme il est expliqué ci-dessous.

InfoTerre

Le portail InfoTerre du BRGM est la transposition cartographique de BASOL et de BASIAS, avec lesquels il possède donc des liens internet permettant d'accéder directement à ces sites. Egalement en accès libre sur Internet, il permet entre autres de situer sur une carte de France les eaux de surfaces, les eaux souterraines, les sites et sols pollués et les ressources minérales. Ce site permet donc d'obtenir la localisation précise sur une carte de France, département par département, commune par commune, des points de pollution à l'arsenic.

Ces trois sites du BRGM, utilisés en interrelation, permettent certes de dresser la liste d'un certain nombre de sites rejetant de l'arsenic dans les eaux de surface et d'obtenir leurs coordonnées géographiques en Lambert II étendu pour les situer géographiquement. Mais ils ne fournissent pas les quantités d'arsenic rejetées dans le milieu.

SIG Mines France

Ce site du BRGM, toujours en accès libre sur Internet, répertorie tous les anciens sites miniers de France métropolitaine. Il délivre, pour chaque site, une fiche d'exploitation, ses coordonnées géographiques en Lambert II étendu, et permet de visualiser grâce à une option cartographie son emplacement géographique.

Nous pouvons donc, grâce à ce site, obtenir assez rapidement la liste et la localisation des mines susceptible de rejeter de l'arsenic dans l'environnement d'autant que ses données sont téléchargeables. Toutefois, à l'instar de ces derniers, le site SIG Mine France ne donne malheureusement pas les quantités d'arsenic rejetées dans le milieu.

En définitive, les données des sites internet du BRGM fournissent les noms et les localisations géographiques des sites de France métropolitaine polluants ou susceptibles de polluer à l'arsenic, mais aucun de ces sites ne permet d'obtenir des informations quantifiées sur les rejets d'arsenic dans le milieu.

4.3.1. Les bases de données internet du répertoire iREP de l'INERIS

Pour connaître les pollutions en arsenic engendrées par les établissements visés par la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets (établissements industriels, élevages, stations d'épuration urbaines, sites d'extraction minière) nous avons consulté le site internet iREP présentant le Registre français des émissions polluantes sur Internet et administré par l'INERIS.

Dans le cadre de l'arrêté du 31/01/2008 relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets, l'exploitant doit télé-déclarer chaque année sur le site internet GEREPE ses émissions polluantes. Le répertoire iREP est constitué de ces données télé-déclarées. Ce répertoire s'intègre ensuite au registre européen E-PRTR accessible par internet.

Le site internet de l'iREP donne les noms de toutes les ICPE soumises à autorisations préfectorales, donc les plus polluantes et les plus dangereuses, et indique de façon précise les quantités de contaminants rejetés dans les différents milieux (air, eau direct, eau indirect, sol) par chacune d'entre elles. Toutes ses données sont téléchargeables. Contrairement aux sites du BRGM précédemment vus, il va donc nous permettre d'obtenir des informations quantifiées sur les rejets directs d'arsenic dans les eaux de surface.

À la date du 10 août 2009, le site internet de l'iREP n'affiche toutefois que les émissions 2007 pour 72 ICPE soumises à autorisations préfectorales. Nous ne pouvons donc pas avancer de chiffres plus récents.

4.3.2. Les bases de données internet de l'action RSDE

L'action nationale de Recherche et de Réduction des Rejets de Substances Dangereuses dans les Eaux, nommée « action 3RSDE » ou, par abus de langage, action « action RSDE », fut initiée par la circulaire du 04/02/2002 (non parue au JO) pour une durée de cinq ans par le ministère de l'environnement de l'époque (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement). Cette circulaire enjoignait à chacune des régions de France, par l'intermédiaire des DRIRE, des Agences de l'Eau et des DIREN (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement), de rechercher une centaine de substances ou familles de substances dans les effluents des installations classées, des stations d'épuration (STEP) et des centres hospitaliers, pour que, lorsqu'un rejet présentant un risque pour l'environnement aquatique est identifié, pouvoir prendre les mesures nécessaires en vue de les réduire ou les supprimer. Cette recherche s'effectua hors contrainte réglementaire, c'est-à-dire en concertation avec les représentants des sites contrôlés. Un comité de pilotage national fut créé pour coordonner les programmes régionaux et gérer les résultats (Barré *et al.*, 2008).

La campagne de prélèvement et d'analyse devait s'achever en 2006 mais des retards dans certaines régions les ont prolongés jusqu'en 2007. Au final, l'action RSDE s'appuie sur des données prélevées sur deux mille huit cent soixante-seize établissements entre le 4 juin 2002 et le 21 août 2007 (Barré *et al.*, 2008). Chaque région a publié un bilan de l'action RSDE puis l'INERIS a traité les résultats et réalisé une synthèse nationale en janvier 2008 et disponible sur son site internet, RSDE.

Toutefois, ce site ne donne pas accès aux mesures effectuées dans chacun des établissements contrôlés car ces informations sont confidentielles et propriétés exclusives des industriels et des agences de l'eau. Nous n'avons pu consulter que les bilans régionaux et le document de synthèse à l'échelle nationale concernant spécifiquement l'arsenic, référencé Gouzy & Brignon (2008). Malheureusement, ces documents ne fournissent pas de données chiffrées détaillées pour chacun des établissements contrôlés.

4.3.3. Les données des DRIRE et des DREAL

Dans le cadre de l'arrêté du 31/01/2008 relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets, l'exploitant doit donc réaliser une autosurveillance de ses rejets toxiques dans des conditions précises et qu'il transmet ensuite à l'inspection des installations classées via le site internet GEREPE. L'autosurveillance présuppose que l'on accorde une certaine confiance à l'exploitant puisqu'il effectue lui-même les mesures définies dans l'arrêté préfectoral d'autorisation. Toutefois, dans le cadre de la réglementation sur les installations classées, l'inspecteur des installations classées, qui est un agent de la DDSV (Direction Départementale des Services Vétérinaires) pour l'élevage et de la DRIRE pour l'industrie [sauf pour la Ville de Paris et les trois départements de la petite couronne, la DRIRE étant alors remplacée par le STIIC (Service Technique d'Inspection des Installations Classées) de la Préfecture de police de Paris] effectue avec ou non l'aide d'un laboratoire indépendant des contrôles réguliers à fréquence variable, des contrôles ponctuels thématiques, et des contrôles inopinés. Les données de ces contrôles ne figurent pas dans le répertoire iREP. Il est donc nécessaire de croiser les données du répertoire iREP avec toutes celles que possède le réseau des DRIRE et de la STIIC.

Il faut ici remarquer que dans le cadre de la réforme de l'État, le Conseil de modernisation des politiques publiques décida en décembre 2007 de fusionner les DIREN, les DRE (Direction Régionale de l'Équipement) et les DRIRE en créant un nouvel échelon régional du MEDAD (Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durable), appelé Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL).

Un décret récent, le n° 2009-235 du 27/02/2009 (JO du 28/02/2009) relatif à l'organisation et aux missions des DREAL, permet la création des DREAL dans huit premières régions, qui sont : la Champagne-Ardenne, la Corse, la Haute-Normandie, le Midi-Pyrénées, le Nord-Pas de Calais, les Pays de la Loire, la Provence-Alpes Côte d'Azur et la Picardie. Douze autres DREAL seront créées au 1^{er} janvier 2010 et les quatre dernières (région IDF) le seront au 1^{er} janvier 2011.

Par conséquent, nous chercherons également des données supplémentaires de pollution des eaux à l'arsenic sur les sites internet nouvellement créés des huit premières DREAL de France.

4.3.4. Les données du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable

Notons qu'un inventaire 2002 des principaux rejets d'eaux résiduaires pour un nombre limité de polluants a été publié en 2004 par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD) (MEDD, 2004). Cet inventaire dresse la liste de trente-six ICPE soumises à autorisation préfectorale. Étant donné que le répertoire iREP ne fournit des chiffres qu'à partir de l'année 2003, nous utiliserons les données du MEDD, si tant est qu'elles ne sont pas reprises par le répertoire iREP (en quel cas les données iREP, plus récentes, prévaudraient sur les données MEDD).

4.3.5. Les données de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne

Xavier Bourrain, spécialiste des questions de pollution des eaux à l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, nous a fourni certaines données mesurées entre 2004 et 2006 par des inspections de sites industriels rejetant de l'arsenic dans les eaux de surface. Ces données correspondent à des sites présents non seulement dans le bassin hydrographique Loire-Bretagne, mais également dans ceux de Seine-Normandie et de Rhône-Méditerranée-Corse. Nous les incluons donc dans notre liste de données.

4.4. CONSTRUCTION DES CARTES

4.4.1. Les données sélectionnées

Nous classons dans un tableau selon l'ordre alphabétique des noms des régions de France les données que nous avons retenus pour réaliser la carte des points noirs des pollutions anthropiques à l'arsenic des eaux de surface (tab. 4).

Conformément à l'arrêté du 31/01/2008, seuls les sites rejetant au moins 5 kg/an d'arsenic sont sélectionnés. Les données décimales sont arrondies à l'unité inférieure ou supérieure à la limite du 0,5. Les dates de mesure ont été fixées au début des mesures de l'action RSDE, c'est-à-dire que les dates les plus anciennes sont 2002. Mais si plusieurs sources renseignent sur les rejets d'arsenic d'un même site, nous choisissons de ne retenir que les données les plus récentes.

Nous aboutissons au tableau de données récoltées suivant :

Régions	Départements	Noms	Activité	Arsenic et ses composés rejetés (kg/an)	Date du relevé	X latitude	Y longitude	Source (pour les rejets)
Alsace	Bas-Rhin (67)	Compagnie Rhénane de Raffinage (Reichstett)	Pétrole et gaz	9	2002	999298	2419579	MEDD (2004)
		Lanxess Emulsion Rubber (La Wantzenau)	Chimie et parachimie	15	2006	1002330	2420807	INERIS DRIRE Alsace
		Stracel (Strasbourg)	Bois, papier et carton	14	2002	1002838	2410178	MEDD (2004)
	Haut-Rhin (68)	Millennium Inorganic Chemicals SA (Thann)	Chimie et parachimie	8	2007	956788	2323048	INERIS DRIRE Alsace
		Mines Amélie (potasse, † 2002) (Wittelsheim)	Déchets et traitements	2170	2006	967743	2324526	INERIS

Régions	Départements	Noms	Activité	Arsenic et ses composés rejetés (kg/an)	Date du relevé	X latitude	Y longitude	Source (pour les rejets)
		Site de neutralisation de l'Ochsenfeld (Thann)	Déchets et traitements	9	2005	958162	2322575	INERIS
Aquitaine	Dordogne (24)	Condat (Le Lardin-Saint-Lazare)	Bois, papier et carton	14	2005	512800	2014320	INERIS
	Pyrénées-Atlantiques (64)	Sobegi Site de Lacq (Lacq)	Déchets et traitements	35	2006	360282	1827916	INERIS
		Sobegi Site de Mourenx (Mourenx)	Déchets et traitements	9	2006	360430	1826480	INERIS
Auvergne	Allier (03)	Adisseo (Commentry)	Chimie et parachimie	22	2007	635725	2140834	INERIS
		Scbv Saint-Yorre (Saint-Yorre)	Eau de boisson	18	2004-2006	686618	2119312	AELB
		STEP (Montluçon)	Station d'épuration	44	2004-2006	620090	2152164	AELB
	Puy-de-Dôme (63)	STEP (Clermont-Ferrand)	Station d'épuration	136	2004-2006	670979	2148946	AELB
Basse-Normandie	Manche (50)	Degussa Texturant Systems (Baupte)	Chimie et parachimie	8	2004-2006	331201	2485031	AELB
Bourgogne	Nièvre (58)	UDEP des Saulaies (Nevers)	Station d'épuration	7	2004-2006	660142	2219084	AELB
		Ugitech (Imphy)	Travail des métaux	5	2004-2006	670134	2215291	AELB
		SNC Carrières et Matériaux (Corbigny)	Industries extractives	65	2007	702075	2251824	INERIS
	Saône-et-Loire (71)	Ugine & Altz (Guegnon)	Travail des métaux	10	2004-2006	732444	2179687	AELB
		Industeel Creusot (Le Creusot)	Travail des métaux	7	2004-2006	759580	2202590	AELB
Bretagne	Finistère (29)	CGPA Peny (Saint-Thurien)	Industrie agro-alimentaire	8	2004-2006	153144	2345386	AELB
		Danisco (Landerneau)	Chimie et parachimie	20	2004-2006	110569	2403325	AELB
		Degussa Texturant Systems France SA (Lannilis)	Industrie agro-alimentaire	249	2004-2006	95184	2418815	AELB
		Mine de Lopérec (or, †) (Lopérec)	Déchets et traitements	16	2005	126181	2383287	Battaglia-Brunet <i>et al.</i> 2005
		Pdm industrie (Quimperlé)	Bois, papier et carton	5	2004-2006	160134	2335586	AELB
	Morbihan (56)	Conserverie Morbihannaise (Lanvénege)	Industrie agro-alimentaire	6	2004-2006	161629	2349612	AELB

Régions	Départements	Noms	Activité	Arsenic et ses composés rejetés (kg/an)	Date du relevé	X latitude	Y longitude	Source (pour les rejets)
		Lydall Filtration Séparation SA (Melrand)	Bois, papier et carton	14	2004-2006	196011	2341786	AELB
Centre	Loiret (45)	Cristal Union (Corbeilles)	Industrie agro-alimentaire	29	2004-2006	615946	2341074	AELB
		Svi (Pithiviers-le-Vieil)	Industrie agro-alimentaire	50	2004-2006	592700	2352157	AELB
Champagne-Ardenne	Ardennes (08)	Kme (Trefimetaux) Usine de Givet (Fromelennes)	Sidérurgie	7	2006	780665	2571502	INERIS
Franche-Comté	Jura (39)	Solvay Electrolyse France (Tavaux)	Chimie et parachimie	123	2007	833185	2230630	INERIS
Haute-Normandie	Eure (27)	Ferroxidure (Evreux)	Chimie et parachimie	16	2002	514497	2447861	MEDD (2004)
	Seine-Maritime (76)	EDF UPT (Le Havre)	Energie	14	2006	440000	2502600	INERIS
		Gpn (Le Grand-Quevilly)	Chimie et parachimie	61	2007	505720	2490781	INERIS
		Millenium Chemical (Le Havre)	Chimie et parachimie	9	2006	440000	2502600	INERIS
		Sgd SA (Le Tréport)	Industries minérales	6	2004	530911	2562885	INERIS
		Yara France (Gonfreville-l'Orcher)	Chimie et parachimie	573	2007	447573	2502959	INERIS
Ile-de-France	Seine-et-Marne (77)	Coved SA (Château-Landon)	Déchets et traitements	66	2006	625704	2349166	INERIS
		EDF Site des Renardières (Moret-sur-Loing)	Divers et services	14	2007	635778	2375547	INERIS
		EDF UPT (Vaires-sur-Marne)	Energie	6	2002	622778	2430645	MEDD (2004)
		Raffinerie de Grandpuits (Mormant)	Pétrole et gaz	20	2007	647739	2398485	INERIS
	Essonne (91)	CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)	Divers et services	5	2004	585032	2409434	INERIS
	Val de Marne (94)	UPT Vitry-sur-Seine (Vitry-sur-Seine)	Energie	7	2002	605677	2421000	MEDD (2004)

Régions	Départements	Noms	Activité	Arsenic et ses composés rejetés (kg/an)	Date du relevé	X latitude	Y longitude	Source (pour les rejets)
	Val d'Oise (95)	Le Joint Français (Bezons)	Chimie et parachimie	27	2007	591144	2436590	INERIS
Languedoc-Roussillon	Aude (11)	Mine de la Combe du Saut (or, † 2004) (Salsigne)	Déchets et traitements	3150	2006	603205	1812929	ADEME Languedoc Roussillon 2009
	Gard (30)	GIE Chimie Salindres (Salindres)	Déchets et traitements	7	2007	750541	1907211	INERIS
		Mine de Carnoulès (plomb, zinc, † 1963) (Saint Sébastien d'Aigrefeuille)	Déchets et traitements	207	2007	732298	1902631	Elbaz-Poulichet <i>et al.</i> , 2006
		Sanofi Synthelabo (Aramon)	Chimie et parachimie	18	2004-2006	788848	1878979	AELB
		Ugine L'ardoise (Laudun-L'Ardoise)	Métallurgie	17	2004-2006	785566	1905467	AELB
Limousin	Corrèze (19)	Iss Environnement (Brive-la-Gaillarde)	Déchets et traitements	10	2005	537477	2018734	INERIS
		UIOM de Brive (Saint Pantaléon de Larche)	Déchets et traitements	6	2007	530016	2015943	DRIRE Limousin 2007c
	Creuse (23)	CET - Siers déchèterie (Grandes Fougères)	Déchets et traitements	7	2007	543879	2136360	DRIRE Limousin 2007c
		Mine du Chatelet (or, † 1955) (Budelière)	Déchets et traitements	6000	2006	610288	2135603	Niemec, 2007
	Haute-Vienne (87)	International Paper France (Saillat-sur-Vienne)	Bois, papier et carton	117	2006	481988	2097411	INERIS
		Mine de Cheni Les Farges (or, † 1944) (Saint-Yrieix-la-Perche)	Déchets et traitements	1000	2006	509200	2062900	Niemec, 2007
		Mine de Gros Galet (or, † 1993) (Le Chalard)	Déchets et traitements	63	2007	502500	2060750	INERIS
		Mine de Laurières (or, † 2000) (Saint-Yrieix-la-Perche)	Déchets et traitements	14	2006	514500	2063500	DRIRE Limousin 2007a
		Smurfit Limousin (Saillat-sur-Vienne)	Bois, papier et carton	6	2002	482111	2098113	MEDD (2004)

Régions	Départements	Noms	Activité	Arsenic et ses composés rejetés (kg/an)	Date du relevé	X latitude	Y longitude	Source (pour les rejets)
		Société des mines du Bourneix, Usine (Saint-Yrieix-la-Perche)	Sidérurgie	60	2003	520279	2056027	INERIS
		STEP (Limoges)	Station d'épuration	108	2004-2006	516392	2091832	AELB
		Valdi Le Palais (Le Palais sur Vienne)	Traitement et revêtement de surface	292	2004-2006	521610	2098060	AELB
Lorraine	Meurthe-et-Moselle (54)	EDF CPT de Blenod (Pont-à-Mousson)	Énergie	49	2004	874760	2440072	INERIS
	Moselle (57)	Arkema (Saint-Avold)	Chimie et parachimie	15	2003	918704	2464626	INERIS
		Ascometal (Hagondange)	Sidérurgie	8	2007	878970	2479271	INERIS
		Centrale de Chambière (Metz)	Energie	308	2007	879979	2464744	INERIS
		EDF CPT de la Maxe (Woippy)	Energie	20	2003	882260	2469000	INERIS
		EDF CPT (Richemont)	Energie	20	2007	878790	2482973	INERIS
Vosges (88)	Norske Skog Golbey (Golbey)	Bois, papier et carton	30	2007	904461	2363589	INERIS	
Midi-Pyrénées	Hautes-Pyrénées (65)	Aluminium Pechiney (Lannemezan)	Sidérurgie	7	2007	440847	1793098	INERIS
Nord-Pas-de-Calais	Nord (59)	Agc France SA (Boussois)	Industries minérales	18	2007	721630	2589547	INERIS
		Ahlstrom Spécialités (Bousbecque)	Bois, papier et carton	55	2006	652905	2642185	INERIS
		Arcelor Mittal Mardyck (Grande-Synthe)	Mécanique, traitements de surfaces	7	2007	596903	2666759	INERIS
		Arcelor Dunkerque (Grande-Synthe)	Sidérurgie	267	2007	596353	2669184	INERIS
		Nyrstar (ex. Umicore) France (Auby)	Sidérurgie	19	2007	651756	2603130	INERIS
		Sea-Bulk (Loon Plage)	Manutention portuaire	46	2007	591840	2666867	DRIRE-DIREN Nord-Pas-de-Calais
		Valdunes (Trith-Saint-Léger)	Travail des métaux	10	2002	682162	2593306	MEDD (2004)
		Ykk (Seclin)	Divers et services	5	2002	649515	2619347	MEDD (2004)

Régions	Départements	Noms	Activité	Arsenic et ses composés rejetés (kg/an)	Date du relevé	X latitude	Y longitude	Source (pour les rejets)
Pas-de-Calais (62)	Pas-de-Calais (62)	Holcim France (Dannes)	Industries minérales	5	2002	548785	2621521	MEDD (2004)
		MacCain Alimentaire (Harnes)	Industrie agro-alimentaire	7	2002	640445	2605644	MEDD (2004)
		Noroxo (Harnes)	Chimie et parachimie	6	2002	640353	2606516	MEDD (2004)
		Outreau Technologie (Outreau)	Sidérurgie	200	2004	547659	2634737	INERIS
		Sita Agora (Metaleuorp Nord) (Noyelles Godault)	Déchets et traitements	24	2007	646869	2603071	DRIRE-DIREN Nord-Pas-de-Calais
		Stora Enso (Corbehem)	Bois, papier et carton	38	2006	650800	2593500	INERIS
		Tioxide Europe SA (Calais)	Chimie et parachimie	7	2007	564919	2661553	INERIS
Pays de la Loire	Loire-Atlantique (44)	EDF UPT (Cordemais)	Energie	38304	2004-2006	281095	2261341	AELB
		DCN Propulsion Indret (La Montagne)	Mécanique, traitements de surfaces	121	2004-2006	295092	2252276	AELB
		STEP (Nantes)	Station d'épuration	70	2004-2006	299757	2251465	AELB
		Total raffinerie (Donges)	Pétrole et gaz	20	2004-2006	265778	2265895	AELB
Picardie	Aisne (02)	Mcd SA (Guny)	Chimie et parachimie	103	2006	667326	2502811	INERIS
		Saint-Gobain Emballage (Cuffies)	Industries minérales	7	2006	671400	2490400	INERIS
	Oise (60)	Saint-Gobain Glass France (Thourotte)	Industries minérales	9	2003	639523	2497749	INERIS
Poitou-Charentes	Charente (16)	SVDM de la Charente (Mornac)	Déchets et traitements	12	2007	439100	2077700	INERIS
	Deux-Sèvres (79)	Ciments Calcia (Airvault)	Industries minérales	6	2004	410350	2206708	INERIS
		Anett et Cie (Sainte-Radegonde)	Traitement des textiles	21	2004-2006	403486	2225135	AELB
Provence-Alpes Côte d'Azur	Bouches-du-Rhône (13)	Aluminium Pechiney (Gardanne)	Sidérurgie	328	2007	853687	1832590	INERIS
		Esso raffinerie (Fos-sur-Mer)	Pétrole et gaz	26	2005	811248	1829164	INERIS
		Lyondell Chimie France SA (Fos-sur-Mer)	Chimie et parachimie	9	2006	802711	1827084	INERIS
		Naphtachimie (Martigues)	Chimie et parachimie	7	2007	818835	1823871	INERIS
	Vaucluse (84)	Eurencio France (Sorgues)	Chimie et parachimie	18	2007	803412	1893162	INERIS

Régions	Départements	Noms	Activité	Arsenic et ses composés rejetés (kg/an)	Date du relevé	X latitude	Y longitude	Source (pour les rejets)
		Socatri (Bollène)	Mécanique, traitements de surfaces	48	2005	792445	1922725	INERIS
Rhône-Alpes	Ain (01)	STEP du Parc industriel de la Plaine de l'Ain (Saint-Vulbas)	Station d'épuration	6	2007	853430	2143275	INERIS
		Trédi (Lagnieu)	Déchets et traitements	103	2006	833678	2104948	INERIS
	Drôme (26)	Comurhex (Pierrelatte)	Chimie et parachimie	9	2007	788099	1933400	INERIS
	Isère (38)	Adisseo (Saint-Clair-du-Rhône)	Chimie et parachimie	137	2004-2006	790421	2051505	AELB
		Adisseo (Saint-Maurice-l'Exil)	Chimie et parachimie	300	2005	790515	2047656	INERIS
		Arkema (Jarrie)	Chimie et parachimie	6	2004-2006	867361	2015790	AELB
		CNPE (Saint-Alban)	Energie	16174	2004-2006	789366	2047800	AELB
		Finorga (Chasse sur Rhône)	Chimie et parachimie	21	2004-2006	792078	2070136	AELB
		GIE Spiral (Pont-de-Claix)	Station d'épuration	163	2004-2006	864499	2019900	AELB
		GIE Osiris (Roussillon)	Station d'épuration	487	2004-2006	793003	2043157	AELB
		Pcas (Bourgoin-Jallieu)	Chimie et parachimie	11	2004-2006	828251	2070336	AELB
		Rhodia Acétol (Le péage de Roussillon)	Chimie et parachimie	14	2004-2006	792399	2043300	AELB
		Rhodia Intermédiaire (Pont-de-Claix)	Chimie et parachimie	11	2004-2006	864920	2020398	AELB
		Rhodia Intermédiaire (Roussillon)	Chimie et parachimie	45	2004-2006	793003	2043157	AELB
		Teris Ron (Roussillon)	Déchets et traitements	17	2007	792533	2041811	INERIS
		Trédi (Salaise-sur-Sanne)	Déchets et traitements	14	2007	794444	2041256	INERIS
		Loire (42)	CET du Vallon de Borde Matin (Roche-la-Molière)	Déchets et traitements	16	2007	755280	2049956
	Rhône (69)	Arkema (Atofina) (Pierre-Bénite)	Chimie et parachimie	195	2007	793400	2081100	INERIS
		Arkema (Saint-Fons)	Chimie et parachimie	8	2004-2006	795010	2079326	AELB
		Arvin Meritor (Saint-Priest)	Traitement et revêtement de surface	11	2004-2006	800796	2080633	AELB
		Gepeif (Saint-Fons)	Déchets et traitements	11	2007	796067	2081885	INERIS

Régions	Départements	Noms	Activité	Arsenic et ses composés rejetés (kg/an)	Date du relevé	X latitude	Y longitude	Source (pour les rejets)
		Rhodia Secteur engineering plastics (Saint-Fons)	Divers et services	6	2006	795500	2079137	INERIS
		Rhodia Organique (Sait-Fons)	Chimie et parachimie	63	2007	796067	2081885	INERIS
		Rhodia Polyamide Belle Etoile (Saint-Fons)	Chimie et parachimie	15	2007	796067	2081885	INERIS
		Rhodia Silicones (Saint-Fons)	Chimie et parachimie	12	2004-2006	795498	2079555	AELB
		Sanofi-Aventis Chimie (Neuville-sur-Saône)	Chimie et parachimie	54	2007	792762	2100791	INERIS
		STEP Bourg-de-Thizy (Bourg-de-Thizy)	Station d'épuration	51	2007	751919	2116886	INERIS
		Teinturerie de Tarare (Tarare)	Traitement des textiles	20	2004-2006	762882	2101610	AELB
		Teintures et Impressions de Lyon (Villefranche-sur-Saône)	Traitement des textiles	10	2004-2006	785893	2112255	AELB
		Total raffinerie (Feyzin)	Pétrole et gaz	6	2007	796518	2077144	INERIS
	Savoie (73)	Alcan abrasifs réfractaires céramique (La Bâthie)	Sidérurgie	216	2007	920479	2078288	INERIS
		Arkema (La Chambre)	Chimie et parachimie	68	2007	910423	2047249	INERIS
		Usine d'incinération (Chambéry)	Déchets et traitements	8	2005	879400	2069600	INERIS

Tableau 4 - Points noirs de pollution à l'arsenic directement dans les eaux de surface en France métropolitaine.

Les coordonnées géographiques sont exprimées en degrés Lambert II étendu. Légendes : † date : fermeture de la mine à la date indiquée ; AELB : chiffres de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne ; INERIS : chiffres iREP 2007 de l'INERIS.

4.4.2. Les cartes

La carte des points noirs

À l'aide du logiciel SIG MapInfo les données du tableau 4 sont reportées sur la carte dite des « points noirs » de pollution à l'arsenic d'origine anthropique (agriculture exclue) des eaux de surface en France métropolitaine (fig. 4).

On observe globalement sur la carte que les points noirs sont concentrés dans le nord du pays (incluant le Bassin parisien), en Alsace-Lorraine, dans le sud de la Bretagne historique (c'est-à-dire Bretagne plus département de Loire-Atlantique), dans le Massif central, dans le couloir rhodanien-Alpes du Nord et le delta du Rhône, et de façon égrenée, en Normandie et le long des Pyrénées. Plus précisément, les plus fortes concentrations de points noirs sont observables dans le département de Loire-Atlantique, dans le Massif central et la haute vallée du Rhône et Alpes associés.

Le département de Loire-Atlantique possède en effet le plus important de tous les points noirs avec la centrale thermique EDF de Cordemais qui rejeta entre 2004 et 2006 jusqu'à 38 304 kg d'arsenic en une année. Mais il y a ici un bémol à apporter car cette centrale est située dans l'estuaire de la Loire à mi-distance de Nantes et de Saint-Nazaire et rejette donc de l'arsenic non dans une eau douce mais dans une eau saumâtre.

Le Massif central présente d'importants points noirs, car il recèle un grand nombre de mines rejetant, entre autres métaux et métalloïdes, de l'arsenic dans les eaux (de surface et souterraines) et le sol. Nous avons vu en effet dans le chapitre précédent que l'extraction minière de métaux et métalloïdes aboutissait à la mise hors contexte géologique (par remonté en surface ou creusement de galeries) d'arsénopyrite riche en arsenic dont l'oxydation avait pour conséquences le rejet, parfois important, d'arsenic inorganique dans l'environnement. La zone haute vallée du Rhône-Alpes du Nord présente une très forte concentration de points noirs essentiellement due à ses industries chimiques et parachimiques et à la centrale nucléaire de Saint-Alban (Isère), qui n'est autre que le second plus important point noir avec un rejet, entre 2004 et 2006, de 16 174 kg d'arsenic en une seule année.

A l'inverse, on observe sur la carte que les points noirs sont pratiquement absents de quatre vastes zones du territoire que sont : la Champagne-Ardenne et le nord de la Bourgogne ; le Centre, l'est des Pays de la Loire et l'ouest de la Basse-Normandie ; le bassin hydrographique Adour-Garonne ; et enfin, les Alpes du Sud et la Corse.

Les synthèses régionales des établissements choisis pour l'action RSDE (qui ne représentent donc pas tous les établissements de la région) nous fournissent des chiffres permettant de mieux appréhender les faibles rejets de ces quatre zones. Ainsi, en région Centre, les ICPE, faisant partie pour l'essentiel du secteur d'activité agroalimentaire, ne rejettent que 85 kg/an d'arsenic et ses composés dans les eaux de surface (DRIRE Centre, 2006). En Champagne-Ardenne, l'arsenic et ses composés sont rejetés dans les eaux de surface par une seule des quinze STEP de la région à hauteur de 0,3 kg/an d'arsenic, et par la totalité des sites industriels choisis seulement à hauteur de 110 kg/an (DRIRE Champagne-Ardenne *et al.*, 2008).

De la même façon, l'arsenic et ses composés rejetés par les ICPE, autres installations et STEP dans le bassin hydrographique Adour-Garonne ont un impact écotoxicologique très réduit (Agence de l'Eau Adour-Garonne, 2008). Enfin, les établissements choisis de la région Provence-Alpes Côte d'Azur (sites industriels et STEP) rejettent certes 387 kg/an, mais ces rejets sont concentrés le long du Rhône et peu s'effectuent dans les Alpes du Sud (DRIRE PACA, 2007). À titre de comparaison,

les sites industriels de Lorraine choisis pour l'action RSDE rejettent dans les eaux de surface 123 kg/an d'arsenic pour l'Alsace (DRIRE Alsace *et al.*, 2007) et 2 783 kg/an d'arsenic pour la Lorraine (DRIRE Lorraine *et al.*, 2007) .

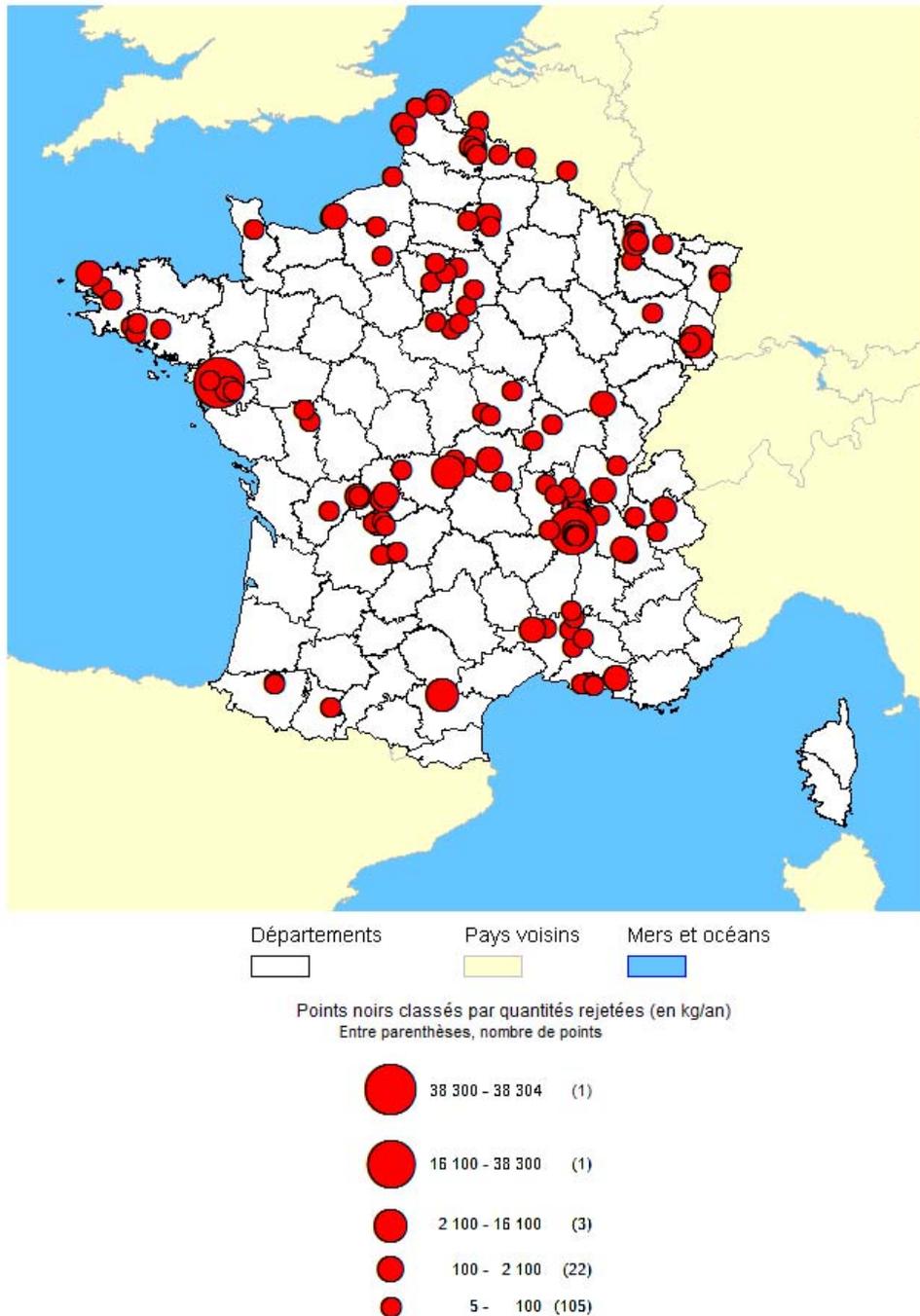


Figure 4 - Carte de France métropolitaine montrant les points noirs de rejets d'arsenic d'origine anthropique (hors agriculture) supérieurs ou égaux à 5 kg/an dans les eaux de surface.

La carte du classement des départements

La gestion de la qualité de l'eau est très importante au niveau départemental. Par les acteurs concernés, la DDASS (Directions Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales) a entre autres pour missions partenariales, la détermination des niveaux de rejet sur les secteurs sanitaires sensibles et contribue à la réalisation d'un état des lieux sur la qualité des eaux et la gestion des déchets polluants (ORE, 2009). Pour mettre en évidence les quantités d'arsenic rejetées à l'échelle des départements, une carte est produite à partir des mêmes données (fig. 5).

À partir de cette carte, nous constatons que les deux départements les plus pollués sont La Loire-Atlantique et l'Isère tout simplement car ils contiennent respectivement le plus important (UPT de Cordemais) et le second plus important (CNPE de Saint-Alban) point noir en termes de quantité d'arsenic rejeté dans les eaux de surface. Nous remarquons que ces départements sont, en fait, pollués par des centrales de production d'électricité (CPE), qu'elles soient thermiques ou nucléaires.

La centrale thermique de Cordemais utilise certes un combustible bitumeux rejetant de l'arsenic (Daniau, 2003). Mais si les CPE ont des rejets très supérieurs à ceux des industries, cela est surtout du au fait qu'elles prélèvent d'énormes quantités d'eau naturelles contenant de l'arsenic géogène, arsenic qu'elles rejettent ensuite sans l'avoir produit elles-mêmes (Harré *et al.*, 2008).

Plus précisément, cette eau -presque exclusivement prélevée dans les eaux de surface- sert au refroidissement, et ce faisant, s'évapore dans les tours de refroidissement. Mais comme l'arsenic ne s'évapore pas, il devient de plus en plus concentré dans l'eau résiduelle. Cette eau résiduelle hautement contaminées est directement purgée dans les eaux de surfaces. L'origine de l'arsenic pourrait ne pas être exclusivement géogène. Ainsi, pour la CPE de Saint-Alban, l'arsenic prélevé avec les eaux de surface pourrait provenir des rejets réalisés en amont par les nombreuses usines chimiques situées le long de l'Isère. Pour la CPE de Cordemais, il proviendrait par contre des pesticides épandus dans le bassin de la Loire (M. Echaubard et F. Ogé, comm. pers.).

Quatre autres départements se distinguent par des quantités élevées d'arsenic. Ce sont le Bas-Rhin, la Haute-Vienne, la Creuse et l'Aude. Ils sont essentiellement pollués par d'anciens sites miniers, respectivement les mines Amélie (2 170 kg/an), la mine de Cheni Les Farges (1 000 kg/an), la mine du Châtelet (6 000 kg/an) et la mine de la Combe du Saut, à Salsigne (3 150 kg/an). Nous avons déjà vu que les mines désaffectées pouvaient relâcher d'importantes quantités d'arsenic dans le milieu.

Les autres départements sont essentiellement pollués par les sites industriels et les STEP.

À l'échelle nationale, notre analyse correspond à celle réalisée à partir des données de l'action RSDE, qui comptabilise les rejets d'arsenic dans l'environnement comme suit : 42 218 kg/an par les CPE, 4 633 kg/an pour les industries et 804 kg/an par les STEP, les rejets d'origine minière n'étant pas comptabilisés (Harré *et al.*, 2008).

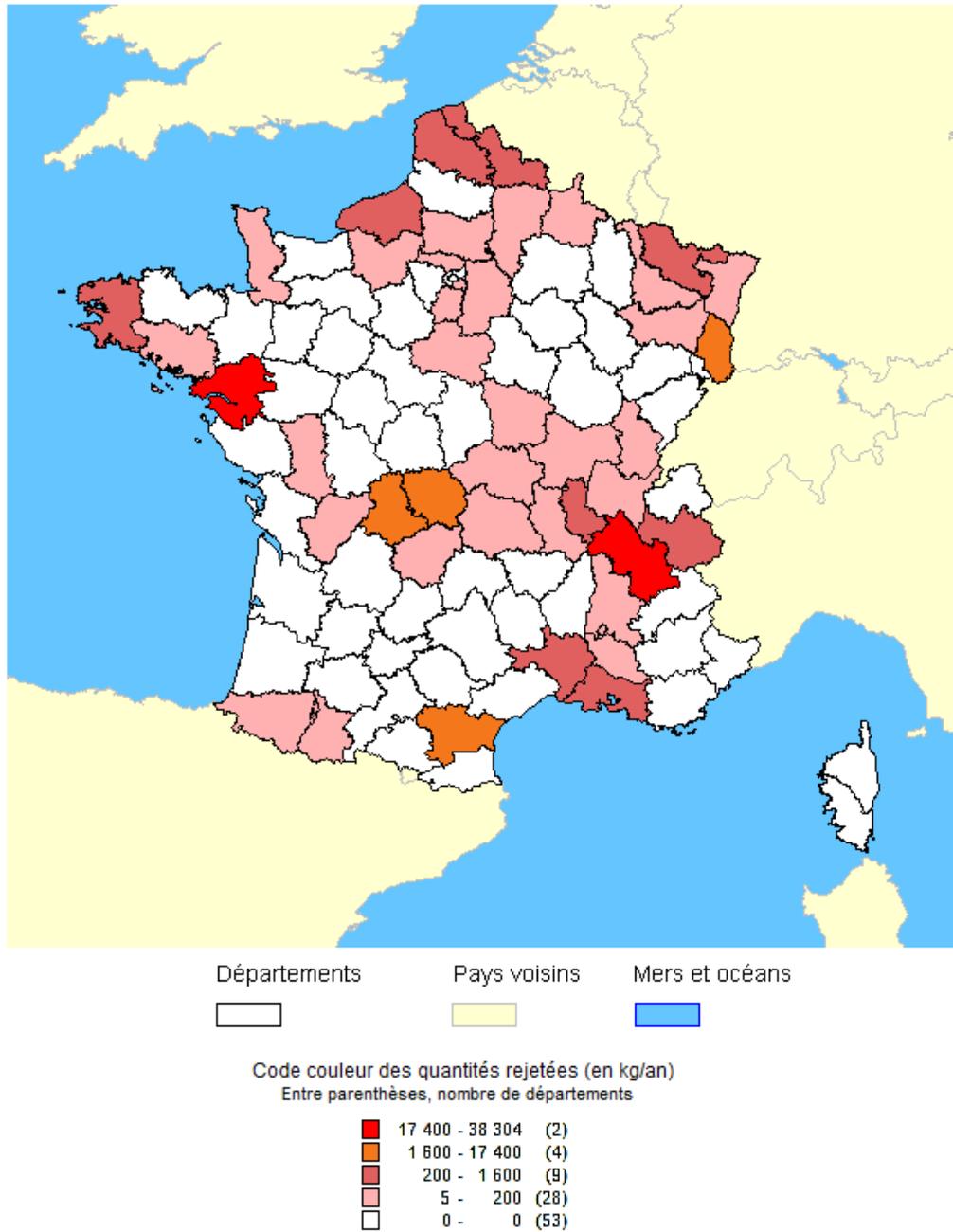


Figure 5 - Carte de France métropolitaine montrant le classement des départements par quantité d'arsenic d'origine anthropique (hors agriculture) rejeté dans les eaux de surface.

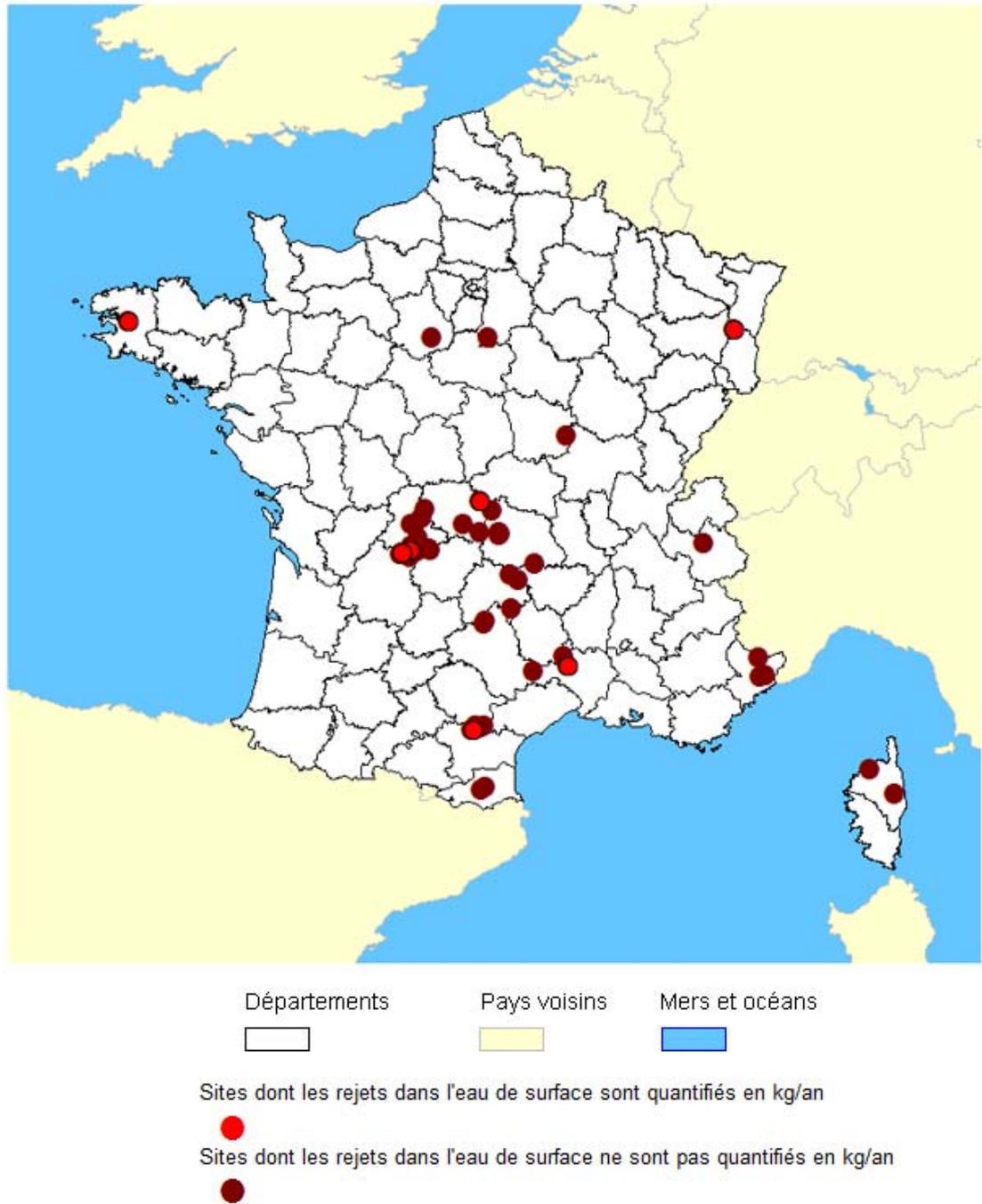


Figure 6 - Carte de France métropolitaine montrant les sites d'extractions rejetant de l'arsenic dans l'environnement.

La carte des anciens sites miniers rejetant de l'arsenic

Nous voyons à la lecture du tableau 4 que nous avons récolté assez peu de données relatives aux quantités d'arsenic rejetées dans les eaux de surface par les anciens sites miniers. Au total, nous n'en comptabilisons que huit. La carte des points noirs reste donc incomplète.

Ce type de données nous intéresse particulièrement dans le cadre du projet COBIAS puisqu'il vise à traiter non seulement les eaux potabilisables mais également les effluents miniers. Or, en ajoutant nos données à celle du BRGM, qui répertorie sur le site internet SIG Mines, nous aboutissons à un total de cinquante-cinq mines (ann. 6, fig. 6). Nous ne possédons donc des données quantifiées en kg/an de rejet d'arsenic dans les eaux de surface que pour 14 % des anciens sites miniers susceptibles d'en rejeter.

Il existe une grande incertitude sur les rejets miniers, qui ne sont pas maîtrisés. En conséquence, il serait utile de poursuivre de façon plus approfondie nos recherches sur les quarante-sept anciens sites miniers pour lesquels nous n'avons pas trouvé de données quantifiables en kg/an, sur les rejets d'arsenic dans les eaux de surface.

4.5. CONCLUSIONS

4.5.1. Analyse-synthèse des résultats

Si l'on ne visualise sur une carte les sites du répertoire iREP, que ce soit la carte de 2006 ou 2007, nous constatons une inhomogénéité des émissions industrielles directes d'arsenic dans les eaux de surface, avec une sur représentation de la moitié est de la France et une sous-représentation de la moitié ouest.

Les données BASOL de juillet 2009 (consultables en annexe 4) nous montrent en effet que plus de la moitié des 58 sites présentant des concentrations anormales d'arsenic dans les eaux superficielles et/ou les sédiments sont surtout situés dans la moitié est de la métropole (Rhône-Alpes, huit sites ; Nord-Pas-de-Calais, cinq sites ; Champagne-Ardenne, cinq sites ; Lorraine, cinq sites ; Picardie, quatre sites ; Ile-de-France, quatre sites).

Contrairement aux données du répertoire iREP, la carte des points noirs, si elle confirme bien les importants rejets dans le nord, le nord-est et le sud-est, montrent également une importante zone de rejets dans le sud de la Bretagne et dans l'ouest du Massif central.

La mise en exergue des CPE en tant que principaux pollueurs à l'arsenic des eaux de surface se doit d'être fortement nuancée, et peut-être remise en question car il est impossible de connaître les quantités réelles d'arsenic produites par ces centrales et rejetées dans les eaux par rapport à l'arsenic géogène, puisé puis rejeté par ces centres- déjà présent dans les eaux.

4.5.2. Limites de l'approche

Si la carte des points noirs montre une importante zone de rejets dans le sud de la Bretagne et dans l'ouest du Massif central, cela peut s'expliquer par le fait que nous avons bénéficié, avec la liste des sites contrôlés que nous a fourni l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, de nombreuses données afférentes au bassin hydrographique Loire-Bretagne qui englobe justement la Bretagne et l'ouest du Massif central.

Nous avons obtenu la liste sus-citée à la suite d'un rendez-vous pris avec un spécialiste des questions de pollution des eaux à l'Agence des Eaux Loire-Bretagne, car cette agence a son siège à proximité immédiate du BRGM d'Orléans. Les données de cette liste ne sont pas accessibles directement à partir du site internet de l'Agence. Un contact direct avec la personne réellement spécialisée permettrait d'obtenir des informations complémentaires.

Il faut ici noter que l'article 1, L-2000-1 de la loi relative au renforcement de la protection de l'environnement n° 95-101 du 2/02/1995 (JO du 3/02/1995), dite loi Barnier, stipule un « principe de participation, selon lequel chaque citoyen doit avoir accès aux informations relatives à l'environnement, y compris celles relatives aux substances et activités dangereuses ». Arguant de cette loi, nous les résultats des contrôles effectués dans chaque département devrait être rendu accessible. Le tableau des points noirs est sans aucun doute incomplet et nécessite des mises à jour.

De même, il faut également signaler le défaut inhérent à toute recherche de données dynamiques ancrée sur une assez longue période de temps : les données anciennes sont forcément caduques. Un exemple : celui de la STEP de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme), pour laquelle un point noir de 136 kg/an est reporté sur la carte en 2004-2006 alors même que cette station dépuratoire n'existe plus de nos jours. La carte des points noirs n'est donc pas un instantané de l'état actuel de la pollution des eaux de surface à l'arsenic mais une construction non actualisée.

Il faut aussi relever que les concentrations en éléments traces métalliques, dont l'arsenic, ne mesurent que les quantités en solution (ce qui est réellement dissout) et une partie de la fraction colloïdale (mélange d'un liquide et d'une suspension de particules solides de si petites tailles qu'elles se répartissent de façon homogène). Elles ne tiennent pas compte de l'exportation par les cours d'eau de fines particules appelées matières en suspension (MES) qui peuvent également contenir de l'arsenic ou des composés d'arsenic (Bril & Floc'h, 2001).

Par conséquent, les données points noirs recueillies sous-évaluent la quantité réelle d'arsenic rejetée.

4.5.3. Utilité de la carte des points noirs

La carte des points noirs peut servir d'outil d'aide à la décision pour les autorités institutionnelles. Il peut par exemple servir d'appui pour préconiser un renforcement des mesures de surveillance de l'arsenic dans les eaux potabilisables de certains départements ou certaines régions.

Il montre que les données du répertoire iREP ne sont pas suffisantes pour estimer les pollutions réelles et qu'elles doivent donc être couplées avec celles provenant de contrôles effectués par les services de l'État. Il serait utile que l'ensemble de ces données soit regroupé dans un site unique combinant des rejets déclarés et des rejets contrôlés.

La finalité d'une carte plus détaillée des points noirs n'est bien sûr pas de « répertorier pour répertorier », mais de cibler les origines des pollutions, en l'occurrence les établissements pollueurs, en vue de proposer des solutions de remédiation aux problèmes actuels ou prévisibles de l'arsenic dans les ressources en eau à l'échelle nationale ou régionale.

Selon le site internet de l'inspection des installations classées (Inspection des Installations Classées, 2009), la réduction des émissions de polluants dans l'eau doit d'abord se faire « à la source » par des procédés piégeant ou transformant les substances polluantes. Ce site conclut en déplorant le fait que la plupart des techniques utilisées pour combattre la pollution à la source aboutissent à la production de déchets (boues, sels, filtres usagés...) qu'il faut également traiter. D'où l'importance de bioprocédés tels ceux qui sont actuellement testés dans le cadre du projet COBIAS.

5. Enquête sociologique

5.1. INTRODUCTION

5.1.1. Choix du type d'enquête

Une enquête sociologique représentative serait une enquête (ou sondage) faisant appel à un très grand nombre de riverains (grand public, au sens large), dépassant la centaine d'interrogés, et non aux seuls principaux acteurs concernés (membres des services de l'État, membres des collectivités territoriales ou membres d'associations de défense de l'environnement).

Toutefois, nous avons craint de ne pas avoir de réponses pertinentes de la part de riverains qui ne sauraient peut-être même pas ce qu'est une bactérie et qui ne pourraient donc remplir la totalité du questionnaire. Par ailleurs, vu la sensibilité du sujet traité, nous ne voulions pas alarmer la population en répandant l'idée qu'il pourrait y avoir des problèmes de pollutions à l'arsenic dans la région. Enfin, nous n'avions ni les moyens financiers ni le temps de réaliser une enquête sociologique étendue. Nous n'avions pas les moyens financiers car pour qu'une telle enquête puisse être faite de façon satisfaisante, il aurait fallu interroger plusieurs centaines de personnes, ce qui ne peut être réalisé que par un organisme spécialisé tel la TNS Sofres Or, les tarifs de la TNS Sofres sont très élevés et le budget dont disposent le BRGM et ses partenaires pour une enquête sociologique dans le cadre du projet COBIAS ne l'aurait pas permis. Nous n'avions pas le temps car nous ne pouvions rester sur le terrain qu'une semaine tout au plus. Or, arpenter au hasard les rues de Limoges ou de Saint-Yrieix-la-Perche en une semaine ne pouvait ramener tout au plus qu'une centaine de questionnaires, dont la représentativité restait par ailleurs à cautionner.

Nous avons donc opté pour une consultation restreinte par questionnaire pour ne recueillir que les opinions des principaux acteurs concernés. La cible de l'enquête dépendant de l'objectif arrêté, il ne s'agira donc pas ici d'une étude d'acceptabilité sociale au sens large du terme mais d'une étude d'acceptabilité technologique et/ou d'appropriation socio-politique d'un nouveau bioprocédé pour la rémédiation des eaux contaminées par l'arsenic.

5.1.2. Choix du site retenu pour l'enquête

Nous venons de voir dans le chapitre précédent que, pour la France métropolitaine, les activités humaines rejetant les plus grandes quantités d'arsenic directement dans les eaux de surface sont, par ordre de pollution, les centres de production d'électricité, les anciens sites miniers et les industries.

Nous avons déjà vu que la pollution à l'arsenic peut contaminer des rivières sur de grandes distances et affecter la santé des populations. Une différence entre les

industries et unités de production d'électricité et les anciens sites miniers tient dans le fait que, pour les premiers, l'arsenic est expulsé de façon régulière alors que pour les seconds il s'accumule à l'air libre en d'énormes quantités de stériles miniers. Or, bien que la neutralisation de l'acidité des eaux minières favorise la précipitation et l'immobilisation de la plupart des métaux et métalloïdes dans les alluvions, les sols et les nappes, la moindre modification survenant dans le système est susceptible de les mobiliser dans les eaux de surface pour donner lieu, de façon assez soudaine, à de fortes contaminations. En effet, dans les sites miniers, les concentrations dans l'eau des éléments traces métalliques peuvent varier en de fortes proportions en fonction de l'environnement naturel, les changements naturels de l'acidité des eaux météoriques pouvant affecter de manière très forte la solubilité des éléments traces métalliques d'un stérile minier) (Bril & Floc'h, 2001). Sur le site de Cheni Douillac, par exemple, on a constaté en un même point des variations de concentration de l'arsenic dans les eaux superficielles d'un facteur cent (Bril & Floc'h, 2001).

Pour que l'enquête que nous avons entreprise soit pertinente et représentative, nous nous sommes focalisés sur d'anciens sites miniers, sources d'une importante pollution à l'arsenic...

Une étude menée par Solétanche-Bachy a montré que parmi les différents types de sites pollués en France, les mines d'or sont les plus polluantes en arsenic, suivies des usines chimiques (projet COBIAS, 2008). Notre choix s'est donc porté sur les anciens sites miniers aurifères.

Le Massif central a été la plus importante région minière de France pour les métaux de base (Bril & Floc'h, 2001). Plus précisément, le Limousin est la principale région de France à vocation aurifère (SIG Mine, 2009). Par ailleurs, nous venons de voir dans le chapitre précédent que la Haute-Vienne était le département français possédant le plus de mines rejetant de l'arsenic (trois des huit mines répertoriées). Nous avons donc choisi, pour notre enquête, un district minier aurifère situé dans ce département.

Il existe deux grands districts miniers aurifères en Haute-Vienne :

- le premier est le district minier nord-limousin qui s'étend sur près de 3 000 km² au nord de Limoges et qui peut se scinder en une première zone à l'ouest avec les anciennes mines de Vaulry et de Cieux et une seconde zone comprenant les anciennes mines de La Petite Faye, de Baugiraud, de Beaune et d'Ambazac ;
- le second est le district minier sud-limousin, qui s'étend sur 2 300 km² au sud de Limoges, également appelé district minier de Saint-Yrieix, du nom de la commune de Saint-Yrieix-la-Perche qui possède le plus grand nombre de mines de ce district (SIG Mines France, 2009).

Notre choix s'est porté sur ce dernier grand district. En terme d'importance, il était classé juste après le district minier de Salsigne, et représentait un total de 27 tonnes d'or produit et de 30 000 tonnes d'arsenic extrait (Grosbois *et al.*, 2006). Ses principales mines sont situées dans ce que l'on pourrait qualifier de « district central » du district minier de Saint-Yrieix, le district minier du haut bassin versant de l'Isle.



Figure 7 - Carte de France métropolitaine situant la région du Limousin.

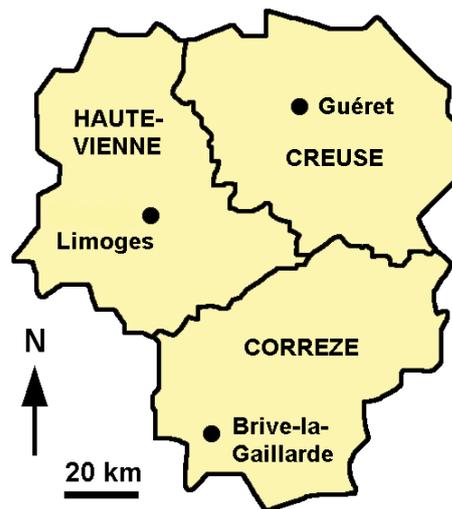


Figure 8 - Carte de la région du Limousin et limite de ses trois départements (Corrèze, Creuse et Haute-Vienne).

Les anciennes mines du district minier de ce bassin sont toutes une source potentielle de pollution de la rivière Isle. Enfin, le choix du site de l'enquête est aussi lié au fait que le BRGM teste dans le cadre du projet COBIAS un bioprocédé de dépollution des eaux arsénifiées sur le site de Cheni Douillac, situé dans la commune de Saint-Yrieix-la-Perche, appelé également site de Cheni les Farges puisque contenant l'usine de traitement des Farges (Leduc 2003 ; Niemec, 2005). Le BRGM ayant été propriétaire par filiale interposée de ce site entre 1965 et 2002 (Leduc, 2003 ; Niemec, 2005) a pu y mener de nombreux travaux de recherche (Lansart & Sauter, 1983 ; Roussel, 1998 ; Baranger *et al.*, 2003 ; Bodénan *et al.*, 2004). Nous avons donc plus facilement accès aux données concernant ce site (fig. 7 à 9).

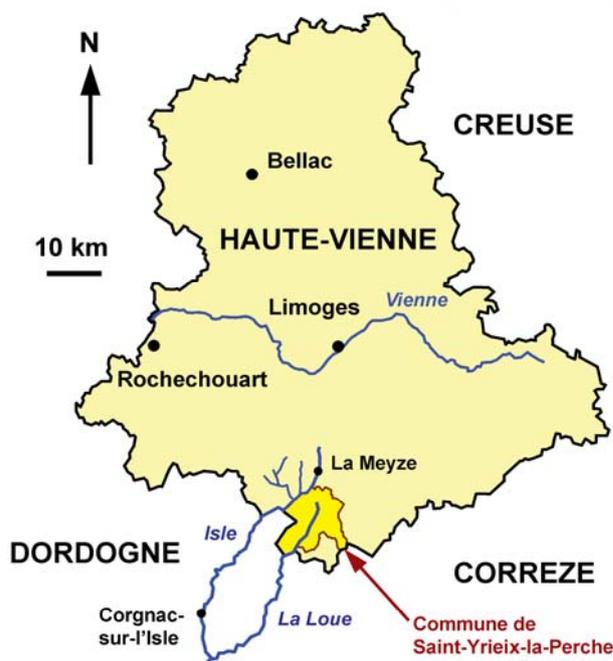


Figure 9 - Carte de la Haute-Vienne situant ses trois sous-préfectures (Bellac, Limoges, Rochechouart), la commune de Saint-Yrieix-la-Perche et les rivières Isle, La Loue et Vienne.

5.2. LE DISTRICT MINIER AURIFÈRE DU HAUT-BASSIN VERSANT DE L'ISLE

5.2.1. Situation géographique

L'Isle est une rivière de 255 km prenant sa source au sud du hameau de Rongeras (commune de Janailhac, Haute-Vienne) à 375 m d'altitude. Le haut bassin versant de l'Isle débute toutefois un peu en aval près du village de La Meyze (Haute-Vienne) et se termine à Cognac-sur-l'Isle (Dordogne) sur un linéaire de cours d'eau de 55 km (Grosbois *et al.*, 2006).

Le district minier aurifère de la partie amont du bassin versant de l'Isle contient une soixantaine de filons (Grosbois *et al.*, 2006). Leur exploitation donna naissance au creusement de neuf mines, aujourd'hui fermées, et autant de stériles miniers répartis en trois zones (fig. 10). Un tableau descriptif est donné en Annexe 6. Huit de ces mines et les huit stériles miniers associés sont situés dans la Communauté de Communes du Pays de Saint-Yrieix (fig. 11).

5.2.2. Contamination des eaux du haut bassin versant de l'Isle

Le bruit de fond géochimique naturel en arsenic dissous dans les eaux de surface de l'Isle a été mesuré à $6 \pm 1 \mu\text{g/l}$ en 2002-2004 (Grosbois *et al.*, 2006). Une station d'étude située à 15 km en aval du dernier site minier (le numéro 9, celui de Fouilloux, sur la fig. 15) et à 5 km en amont de Corgnac a par contre relevé en 2004-2005 des valeurs de concentration en arsenic supérieures avec une moyenne de $11,9 \mu\text{g/l}$ pendant les hautes eaux hivernales à une moyenne de $23 \mu\text{g/l}$ pendant les basses eaux estivales (Grosbois *et al.*, 2006).

Bien que les neuf mines ne rejettent pas toutes de l'arsenic dans leurs effluents, le district minier dans son ensemble pose tout de même un problème puisque ces deux dernières valeurs dépassent la limite en arsenic de potabilité des eaux ($10 \mu\text{g/l}$), problème d'autant plus alarmant que les eaux de surface de l'Isle sont utilisées en tant qu'eau potable par la communauté de communes de Nantheuil (Dordogne) située en amont de Corgnac (Grosbois *et al.*, 2006).

Cet apport d'arsenic ne provient pas des eaux de pluie car dans le district minier du haut bassin versant de l'Isle les eaux météoritiques ne présentent que de faibles concentrations en arsenic ($< 5 \mu\text{g/l}$) (Grosbois *et al.*, 2006). Il ne provient pas non plus de l'arsenic dissout dans l'eau des coulées des stériles atteignant l'Isle, car il est très vite dilué dans la masse d'eau de la rivière.

Cet apport d'arsenic proviendrait en fait des sédiments de fond de la rivière très enrichis en arsenic et qui sont transportés par la force du courant vers l'aval du district minier. Ces sédiments contiennent en effet, à l'échelle du grain, des minéraux riches en arsenic, que ce soient des arsénopyrites avec plus de 30 % d'arsenic, des pyrites arséniés avec 0,4 à 1,1 % d'arsenic, ou des oxy-hydroxydes de fer et de manganèse avec des teneurs variant de 0,01 à 9,8 % d'arsenic (Grosbois *et al.*, 2006). Une fois arrivés au niveau de la communauté de communes de Nantheuil, ces sédiments constituent un stock potentiel d'arsenic qui, par lessivage et perturbation des conditions du milieu, peut facilement être transféré vers la fraction aqueuse et contaminer l'eau potabilisable (Grosbois *et al.*, 2006).

La Communauté de Communes du Pays de Saint-Yrieix est composée de neuf communes, qui apparaissent en gris-sombre dans le médaillon : sept communes sont situées en Haute-Vienne (Coussac-Bonneval, Glandon, Ladignac-le-Long, La Meyze, La Roche-l'Abeille, Le Chalard et Saint-Yrieix-la-Perche) et deux en Corrèze (Saint-Eloy-les-Tuilleries et Ségur-le-Château). Jumilhac-le-Grand, située en Dordogne, n'appartient pas à cette communauté.

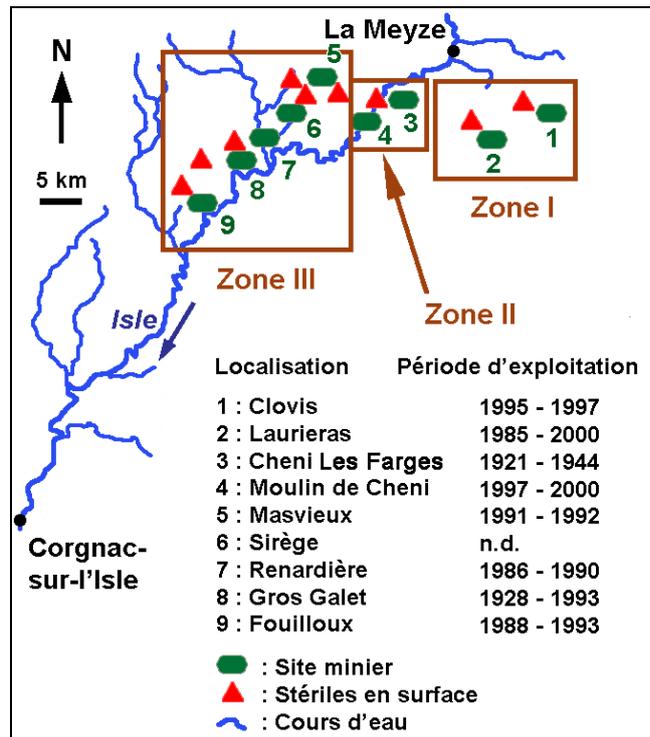


Figure 10 - Localisation des neuf sites miniers et de leurs stériles en surface dans le district minier du haut bassin versant de l'Isle (d'après Grosbois et al., 2006).



Figure 11 - Localisation administrative des neuf anciennes mines du haut bassin versant de l'Isle.

Ces neuf mines sont situées sur quatre communes : Saint-Yrieix-la-Perche, Ladignac-le-Long, Le Chalard et Jumilhac-le-Grand.

5.2.3. Le site de Cheni Les Farges

Le site de Cheni Les Farges est le site pilote pour le traitement d'eau de mine prévu dans le projet COBIAS. Il s'étend sur environ 15 ha et inclut l'usine des Farges, maintenant désaffectée mais qui traita de 1931 à 1951 le minerai brut de la plupart des exploitations aurifères de la Haute-Vienne et de la Creuse, traitement qui rejeta sur le site 650 000 tonnes de résidus pendant cette même période (Niemec, 2005, 2007). La majeure partie de ces résidus composait un terril principal de 30 m de hauteur et de 525 000 tonnes. Ce terril présentait, en contrebas, trois terrasses contenant des bassins de rétention séparés par trois digues (Baranger *et al.*, 2003, fig. 13).

En avril 1993, la rupture d'une digue entraîna des résidus de traitement du minerai chargés en arsenic dans la rivière l'Isle (Niemec, 2005). L'exploitant, la société Cheni SA, mit alors immédiatement en œuvre une démarche d'arrêt définitif des travaux miniers et de remise en état du terril principal : celui-ci fut tout d'abord aplani en son sommet pour réduire l'impact paysager (Niemec, 2005 ; Baranger *et al.*, 2003). Ce terril, muni de plusieurs canyons, présentait en son sommet et sur les parois des canyons un front redox qui se caractérisait par une zone oxydée jaunâtre surmontée d'un matériau verdâtre riche en arsenic (arséniate de fer provenant de l'altération de l'arsénopyrite) : c'est dans ce front redox que fut découverte en 1997 la bactérie *Thiomonas arsenivorans* (Baranger *et al.*, 2003).

En janvier 2000, la société Cheni SA entoura le terril principal et la terrasse 1 d'une digue retenant les eaux de ruissellement et le départ des résidus, qui, depuis, se sont accumulés sur la terrasse 1 sur plusieurs mètres d'épaisseur (Baranger *et al.*, 2003) (fig. 14). Bien que Cheni SA fut mise en liquidation judiciaire en octobre 2002, le liquidateur judiciaire est à même de continuer la poursuite des travaux de mise en sécurité puisque le coût du traitement du site (réaménagement et dépollution) a été entièrement provisionné avant mise en liquidation (Niemec, 2005, 2007 ; DRIRE Limousin, 2007b). Alors que dans les eaux de surface du site, on avait relevé une concentration en arsenic variant de 50 µg/l à 95 000 µg/l (Baranger *et al.*, 2003), l'arrêté préfectoral 2005-2758 limite le rejet après mise en sécurité à une concentration qui devra être inférieure à 100 µg/l. Actuellement, l'étang est asséché, le site ceinturé et le terril est entouré par un réseau de drains et confiné par une couverture géotextile. Par ailleurs, l'installation d'une barrière perméable réactive destinée à traiter les eaux arseniées collectées par les drains avant rejet à la rivière est prévue (DRIRE Limousin, 2007b). Dans le cadre du projet COBIAS, le BRGM travaille à l'optimisation du procédé de traitement en barrière perméable réactive. Cette barrière réactive du site de CHENI Les Farges a en effet été utilisée pour réaliser des tests *in situ*.

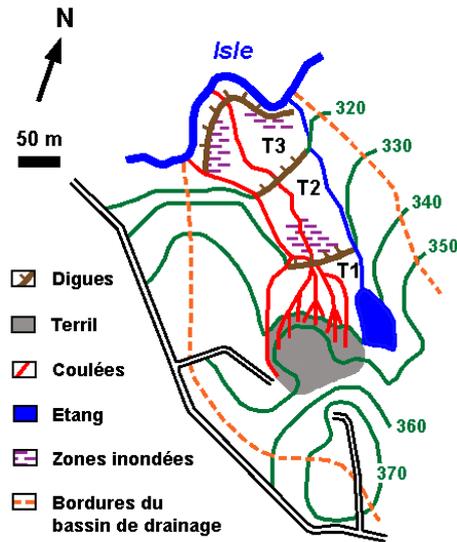


Figure 12 - Carte du site de CHENI Les Farges datant de décembre 1999 montrant le terril principal et les chemins empruntés par les coulées de boues ou d'eau météoritiques s'en détachant.

Il existait trois terrasses de rétention (T1, T2 et T3), dont les deux dernières étaient partiellement inondées par les coulées, disposées en espalier grâce à trois digues (les courbes de niveau apparaissent en vert). Les digues présentaient des brèches empruntées par les coulées, leur permettant d'atteindre l'Isle (d'après Baranger *et al.*, 2003).



Figure 13 - Digue entourant le terril principal et la terrasse supérieure (T1) installée en janvier 2000.

On voit que les coulées étaient retenues dans cette terrasse et ne s'épandaient plus dans T2 et T3. Elles ne pouvaient plus atteindre l'Isle (d'après Baranger *et al.*, 2003).

5.3. QUESTIONNAIRE DE L'ENQUÊTE

Nous avons construit le questionnaire de l'enquête sociologique en en se basant sur les connaissances du site d'étude par le BRGM. Le questionnaire a été testé auprès des partenaires intervenants dans le projet COBIAS. Il est présenté en Annexe 7.

Pour connaître quels principaux acteurs à consulter, une première liste nous a été fournie l'Etablissement public du bassin de la Vienne. Elle est principalement composée de membres siégeant à la Commission locale de l'eau (CLE) du bassin de la Vienne, en charge de l'élaboration du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) du bassin de la Vienne. La CLE est constituée de membres représentant les services de l'Etat, des collectivités territoriales et des usagers.

Cependant, le haut bassin de l'Isle n'est pas inclus dans le SAGE du bassin de la Vienne et à ce titre, les membres de la CLE du SAGE pouvaient de ne pas se sentir directement concernés par les problématiques afférentes au haut bassin de l'Isle. Toutefois, ces acteurs exercent tous des responsabilités dans le cadre d'un domaine régional ou départemental, et il nous a semblé malgré tout pertinent de les consulter sur la problématique des mines du haut bassin de l'Isle.

Cette première liste a par la suite été complétée par d'autres représentants d'organisme locaux qui ne sont pas membre de la CLE (responsable du service environnement, président d'association, chargé de mission eau, etc.).

Les entretiens se sont déroulés entre 8 et 12 juin 2009 (Annexe 8). Au Total, vingt questionnaires ont pu être réalisés. Parmi eux, quatorze ont été conduite sous fromed'entretiens directes en face à face ou par téléphone et six questionnaires sous forme de courriels.

On compte parmi les réponses au questionnaire : quatre issues des services de l'État ayant neuf des collectivités territoriales et sept issues d'associations de défense de l'environnement (Tab. 5).

Services de l'État	
DRIRE du Limousin	Division sous-sol -Environnement Industriel
DDASS de la Haute-Vienne	Service sanitaire
DIREN du Limousin	Service de l'eau et des milieux aquatiques
	Service de la cellule qualité eau
Préfecture de la Haute-Vienne	Service Interministériel Régional de Défense et de Protection Civile
Collectivités territoriales	
Conseil Régional du Limousin	Service environnement, habitat et cadre de vie
Conseil Général de la Haute-Vienne	Service environnement et eau potable
	Service espaces naturels
Conseil Général de la Haute-Vienne	Service tourisme
Chambre Départementale d'Agriculture de la Haute-Vienne	Pôle eau-environnement

Ville de Limoges	Station de traitement des eaux potables
Ville de Limoges	Station de traitement des eaux usées
Municipalité de Ladignac-le-Long	Mairie
Municipalité de Jumilhac-le-Grand	Mairie
Municipalité de Le Chalard	Mairie
Associations de défense de l'environnement	
Conservatoire Régional des Espaces Naturels (CREN) du Limousin	Chargé de projet
Association d'Industriels pour la Protection de l'Environnement	Direction environnement et projet
Limousin Nature Environnement & Sources et Rivières du Limousin	Administrateur & Juriste
Fédération de la Haute-Vienne pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique	Chargée de mission
Association Agréée de Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques de Saint-Yrieix	Président
DROSERA	Président
Société Mycologique du Limousin	Président

Tableau 5 - Organismes auxquelles appartiennent les personnes interrogées dans le cadre de l'enquête sociologique.

Pour chaque organisme, une personne a répondu, à l'exception de binômes pour la DIREN du Limousin et le Conseil général de la Haute-Vienne.

5.4. ANALYSE ET SYNTHÈSE DES RÉPONSES DONNÉES AU QUESTIONNAIRE

Nous présentons les résultats des réponses sous forme d'un tableau synoptique qui permettra une plus grande lisibilité quantitative (ann. 10). Des graphes seront joints à l'analyse et à la synthèse de ces résultats pour faciliter la compréhension quantitative des réponses. Des commentaires recueillis auprès de personnes interrogées nuanciant leurs choix seront parfois cités.

Les fonctions occupées par ces personnes au sein de leur organisme ne sont pas citées. Seul le nom de leur organisme est mentionné, sous réserve de stipuler que les réponses données ne correspondent pas à la position officielle de l'organisme mais juste à l'un de ses membres. Enfin, les personnes ayant répondu ne siègent pas forcément à la CLE du SAGE du bassin de la Vienne.

5.4.1. Connaissance des anciennes mines du district minier du haut bassin de l'Isle et de leurs impacts sur l'eau et le sol

Question 1 : Connaissez-vous les sites des anciennes mines du haut bassin de l'Isle ?

Question 2 : Êtes-vous informé(e) du fait que les anciennes mines ont un impact sur la qualité de l'eau et des sédiments ?

Question 3 : Êtes-vous conscient que la qualité des eaux à long terme dépend de la préservation de la qualité des sédiments ?

La majorité des personnes interrogées (60 %) connaissent peu (10 réponses) ou pas (2 réponses) les sites des anciennes mines d'or du district minier du haut bassin de l'Isle (question 1, fig. 14). Cette tendance apparaît surtout chez les membres des collectivités territoriales (seulement 2/9 connaissent parfaitement les sites).

Toutes les personnes interrogées savent que les anciennes mines d'or ont un impact à la fois sur l'eau et sur les sédiments, surtout les membres des services de l'État (3/4 sont bien informés) mais très moyennement les membres des collectivités territoriales (4/9 sont bien informés) et d'associations (3/7 sont bien informés).

Presque toutes les personnes interrogées (95 %) savent qu'il y a une interrelation eau-sédiment et que si l'un est pollué, l'autre le sera également. Seule une personne estime qu'il peut y avoir un transfert de pollution de l'un à l'autre permettant de maintenir la propreté de l'un au détriment de l'autre ; il n'y a pas transfert passif entre eau et sédiments (l'un étant pollué, l'autre l'est forcément) mais transfert actif (l'un se dépollue en transmettant sa pollution à l'autre).

En conclusion, la connaissance de l'existence des anciennes mines n'est pas répandue. Il paraît donc nécessaire d'effectuer un travail d'information sur l'état des lieux de ces anciennes mines. Par contre, leurs impacts sur les eaux et les sols sont assez bien perçus, ce qui dévoile une conscience des menaces qu'elles peuvent faire peser sur leur environnement, et par conséquent, de la pertinence d'une action à entreprendre pour remédier aux pollutions qu'elles sont susceptibles d'engendrer.

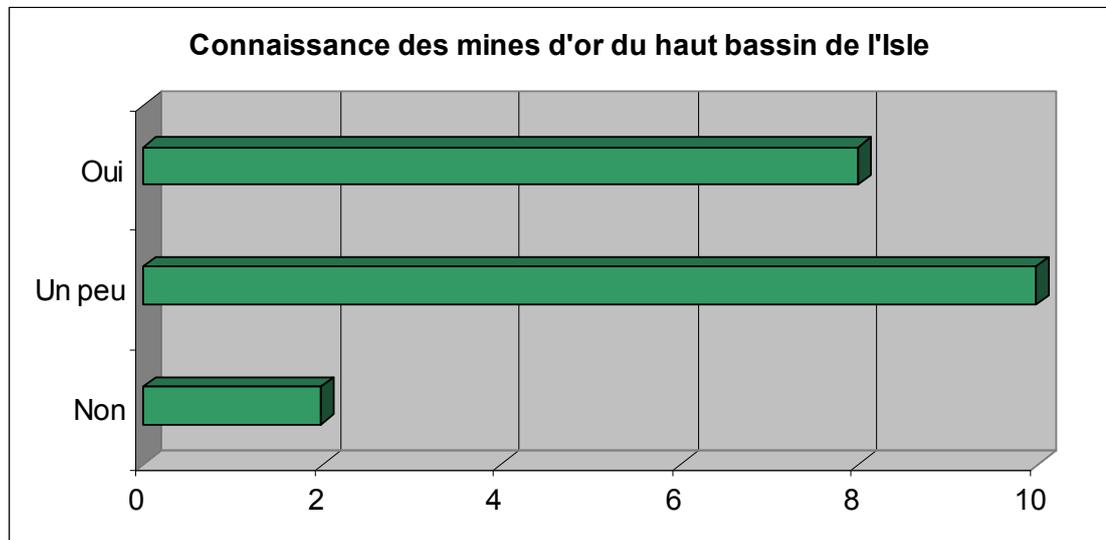


Figure 14 - Choix exprimés à la question 1.

5.4.2. Perception de l'arsenic comme facteur polluant

Question 4 : Indiquez selon vous les pollutions le plus souvent dénoncées dans le haut bassin de l'Isle (classez-les par ordre d'importance).

Question 5 : Avez-vous eu connaissance d'éventuels problèmes environnementaux liés à l'arsenic dans le haut bassin de l'Isle ?

Question 6 : D'après vous, les impacts les plus importants d'une présence de l'arsenic dans le haut bassin de l'Isle porteraient sur...

Ces questions servent à se rendre compte si les personnes interrogées ont conscience des effets néfastes de l'arsenic sur l'homme et sur l'environnement.

La pollution par l'arsenic est considérée comme l'enjeu le plus important (cité en premier) à l'échelle du bassin, mais par seulement six personnes interrogées, soit 30 % (question 4, fig. 15). Parmi ceux-ci on distingue la moitié des représentants des services de l'État (2/4) et près de la moitié des membres d'associations (3/7).

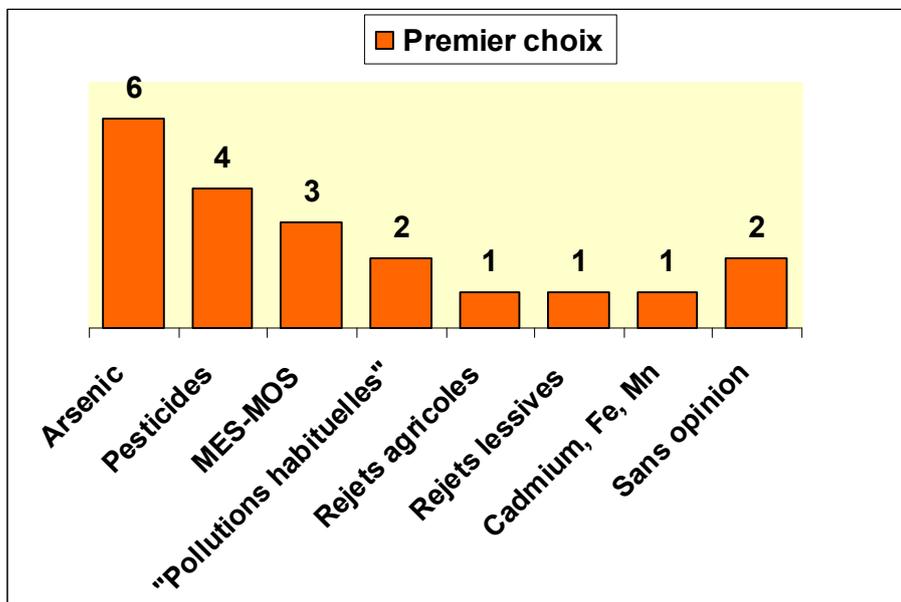


Figure 15 - Premiers choix exprimés à la question 4.

Les deux personnes ayant répondu « Pollutions habituelles » incluaient plusieurs pollutions dans ce terme générique, qu'ils n'ont pas cherché à énumérer.

Par contre, un seul représentant des collectivités estime que l'arsenic est l'enjeu le plus important. Une autre personne des collectivités précise en effet que l'arsenic des eaux ne fait pas partie des impératifs de la région. Selon elle, les seuils d'arsenic seraient discutables et il serait bon de mettre en place des systèmes dérogatoires. Deux autres personnes des collectivités soutiennent que la population locale du district minier est habituée à vivre avec l'arsenic et que ce sont surtout les nouveaux résidents qui s'inquiètent de la présence de cet élément. Ces deux mêmes personnes remarquent d'ailleurs à juste titre que les mines du district minier du haut bassin de l'Isle sont situées en tête du bassin versant de l'Isle et que l'arsenic qu'elles libéreront touchera plutôt les habitants de la Dordogne que ceux de la Haute-Vienne. Deux autres représentants des collectivités confirment ce point de vue en citant un diagnostic établi

par le SAGE de la Vienne (2008) qui ne fait état que de contaminations naturelles à l'arsenic en tête du bassin de la Vienne, c'est-à-dire au centre de la Haute-Vienne.

Si l'on ne comptabilise que les premières réponses de la question 4 (premier choix de la question 4 du tableau de l'annexe 9), l'arsenic est cité en premier. Il est suivi de près par les pesticides (quatre choix) et les Matières en Suspension (MES), et leur fraction organique (MOS), liées à l'hydromorphologie (trois choix).

Toutefois, il faut envisager le fait que certaines personnes interrogées, se trouvant prises au dépourvu au moment où la question leur a été posée, et ne songeant pas immédiatement à une pollution particulière, ont réagi un peu par défaut et peut-être sous l'influence du thème du questionnaire, l'arsenic.

Pour nous faire une idée plus précise, nous avons tenu compte à la fois des premiers et des seconds choix de la question 4. Cette analyse nous a permis de constater qu'en ce cas, l'arsenic n'arrive que premier ex aequo avec les pesticides (huit choix chacun), suivi de près par les pollutions agricoles (7), les nitrates en particulier. Les MES-MOS n'arrivent qu'assez loin derrière avec 4 réponses (fig. 16). Il s'avère donc que l'arsenic n'est pas plus redouté que les pesticides, ou même les pollutions agricoles.

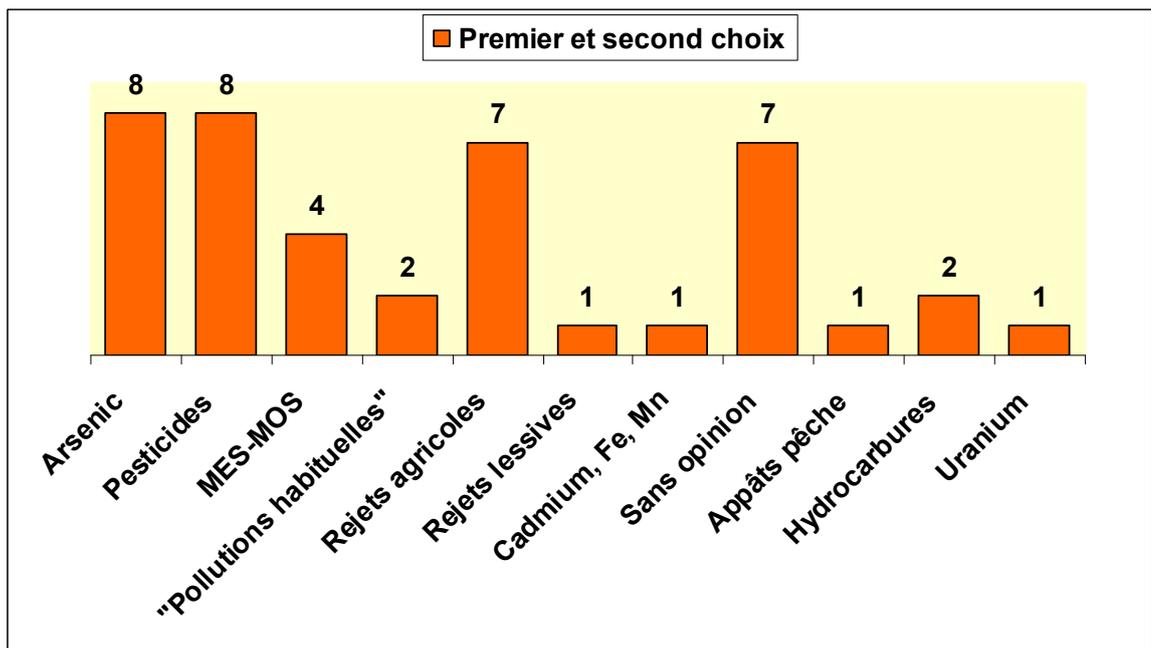


Figure 16 - Premiers et seconds choix confondus exprimés à la question 4.

Il faut souligner le fait que 60 % des réponses pour les pesticides l'ont été par les membres des collectivités territoriales, ceux-ci n'exprimant que 20 % des réponses pour l'arsenic. Ces réponses sont à associer à celles de la question 1 : la majorité des membres des collectivités territoriales, connaissant peu les anciennes mines d'or du haut bassin de l'Isle, n'est pas préoccupée par la présence d'arsenic hydrique.

Pour trois personnes interrogées, dont deux parmi les membres des collectivités territoriales, les MES et MOS sont les premiers facteurs polluants de la région. Un membre d'association souligne à ce titre que les étangs perturbent la continuité écologique de l'Isle dès la commune de La Meyze. En effet, ces étangs ont la particularité de s'égrener sans dérivation le long de l'Isle : or, lorsqu'ils sont envasés, leurs propriétaires les vidangent en une seule fois, ce qui produit un apport massif de MES dans l'Isle, qui impacte alors sur son hydromorphologie en modifiant le contour de ses rives et en perturbant son écosystème. Pour une personne des collectivités, l'hydromorphologie est même un paramètre déclassant pour l'Isle, car il risque de ne pas lui permettre d'atteindre le « bon état » écologique des milieux aquatiques prévu pour 2015 par la DCE (Directive Cadre sur l'Eau).

Les résultats de la question 5 (fig. 17) s'accordent assez bien avec ceux de la question 4 : sur les cinq répondants qui ont largement entendu parler de problèmes environnementaux causés par l'arsenic dans le haut bassin de l'Isle (question 5), quatre placent l'arsenic comme le premier enjeu et un répondant comme le second enjeu le plus important (question 4).

Seule une minorité (5 réponses) est bien informée des problèmes que peut créer l'arsenic dans le haut bassin, et il y a presque autant de personnes interrogées qui sont moyennement informées (40 %) que pas informées de ces problèmes (35 %). L'arsenic n'est donc pas forcément associé à l'idée de pollution.

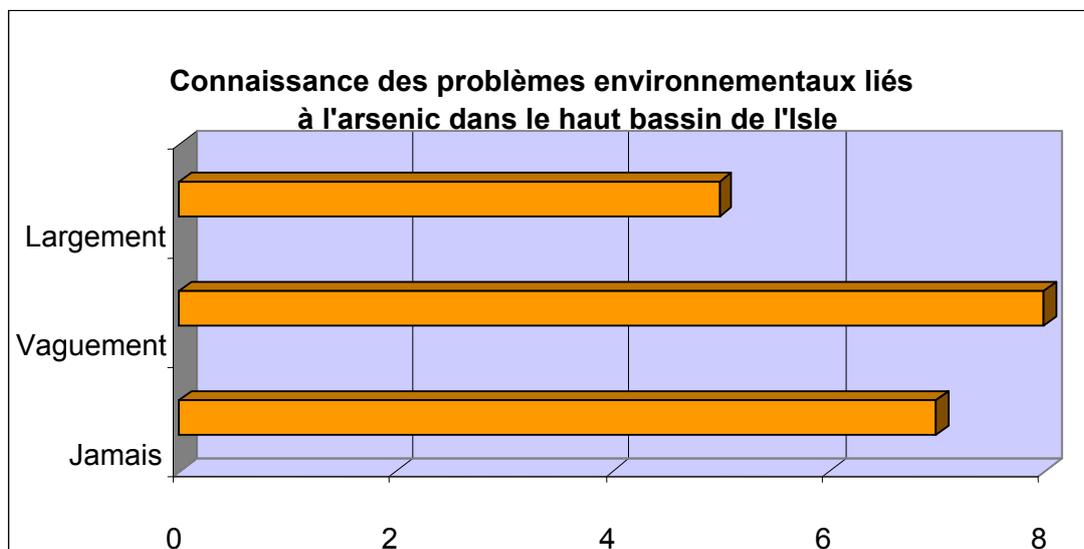


Figure 17 - Choix exprimés à la question 5.

Un représentant d'une des communes du district minier du haut bassin de l'Isle raconte qu'autrefois les gens du pays buvaient consciemment des eaux enrichies en arsenic car ils leur prêtaient, un peu à la façon d'une eau médicamenteuse, la vertu de faire vivre plus longtemps. Une personne des collectivités territoriales précise d'ailleurs que, de nos jours, les rivières limousines sont naturellement chargées en arsenic, et que donc sa présence dans les eaux n'étonne pas outre mesure. Enfin, selon une autre

personne des collectivités, il n'y a pas de problèmes d'arsenic sur le prélèvement d'eau à Limoges et l'arsenic n'y est même pas mesuré car ce n'est pas imposé par la réglementation ; il y a seulement une vigilance, c'est-à-dire que l'arsenic est mesuré uniquement si l'eau est pompée sur des terrains connus pour être riches en arsenic. Le seul site où l'arsenic est constamment surveillé est celui de Beaune-les-Mines, situé au nord de Limoges.

Quatorze personnes interrogées (presque les trois-quarts) estiment, pour des raisons évidentes, que la santé humaine est primordiale (question 6). Aucune n'a opté pour l'agriculture et une personne ne donne pas d'avis. Cinq personnes ont opté pour la pêche, mais sur ces cinq, trois ont expliqué qu'il s'agissait en fait de protéger de façon indirecte la santé humaine et qu'elles choisissaient la pêche pour attirer l'attention sur le fait que les teneurs en arsenic contenues dans les poissons n'étaient pas mesurées et devaient absolument l'être pour éviter toute intoxication alimentaire.

En conclusion, il existe une contradiction entre le fait que la presque totalité des personnes interrogées estime que la santé humaine prime avant tout et le fait que l'arsenic ne soit pas unanimement perçu comme un toxique extrêmement dangereux. Les effets pathogènes de l'arsenic et les doses limites journalières à ne pas ingérer ne sont donc pas bien connues des acteurs concernés par la gestion des ressources en eau du bassin de la Haute-Vienne.

5.4.3. Perception de l'eau potable dans le haut bassin de l'Isle

Question 7 : Quel type d'eau buvez-vous ?

Question 8 : Quelle est, selon vous, la qualité de l'eau du robinet dans le haut bassin de l'Isle ?

Question 9 : Pensez-vous que la facture d'eau du haut bassin de l'Isle soit...

Question 10 : Seriez-vous prêt à accepter une augmentation de la facture d'eau pour limiter la concentration en arsenic dans les ressources en eau du haut bassin de l'Isle ?

Ces questions visent à savoir si la pollution de la ressource en eau par l'arsenic (donc de l'eau potabilisable) inquiète les acteurs.

La majorité des personnes interrogées font confiance en l'eau du robinet car douze (soit 60 %) ne boivent que cette eau et 90 % en boivent quotidiennement (question 7, fig. 18). Il s'agit surtout des membres des collectivités territoriales (7/9) et des associations (4/7). En ce qui concerne les personnes des collectivités, ces réponses sont cohérentes avec la constatation que nous venons précédemment de faire, à savoir qu'ils ne considèrent pas l'arsenic comme une priorité parce qu'ils intègrent et acceptent mieux sa présence dans le département que les deux autres groupes d'acteurs concernés. En ce qui concerne les membres des associations, par contre, ces réponses ne sont pas attendues eu égard au fait que, dans la question 4, ces

membres représentaient à eux seuls la moitié des personnes dénonçant l'arsenic comme polluant majeur des cours d'eaux.

Ces résultats doivent cependant être nuancés, car seules quatre personnes parmi les interrogés habitent dans le haut bassin de l'Isle, et les autres se réfèrent donc pour répondre aux questions de 7 à 9 à d'autres régions de la Haute-Vienne, celles où ils habitent. En ce sens, le questionnaire est biaisé pour ces trois questions.

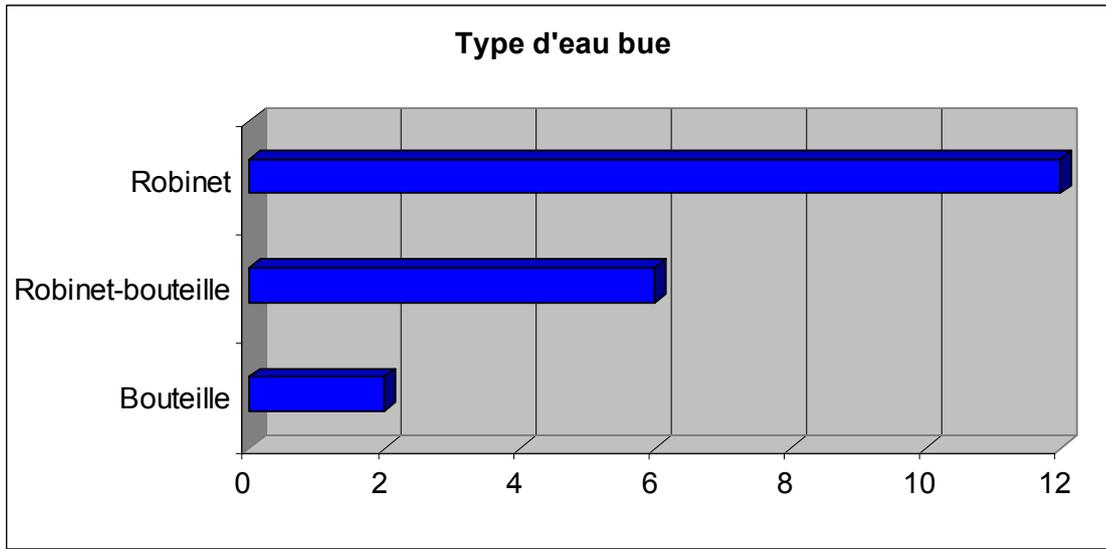


Figure 18 - Choix exprimés à la question 7.

Une bonne illustration apparaît avec les deux refus total de boire de l'eau du robinet. Les deux personnes refusant d'en boire appartiennent à des associations de défense de l'environnement ; plus précisément, elles appartiennent aux deux associations de pêcheurs. On pourrait dans ce cas penser que ces deux personnes sont emblématiques puisqu'elles représentent des pêcheurs, c'est-à-dire ceux parmi les acteurs qui sont les plus en contact direct avec les eaux de l'Isle. Mais en fait il n'en est rien, car leur refus de boire de l'eau du robinet n'est pas en rapport avec les eaux de l'Isle mais avec l'endroit où ils habitent.

Il faut donc avoir conscience que les questions de 7 à 9 ne permettront peut-être pas de mettre en évidence une tendance. Par contre, elles ne pourront qu'apporter des informations qui seront des plus utiles.

La majorité des personnes interrogées (60 %) estime que l'eau du robinet est très bonne (question 8, fig. 19), sans qu'aucune tendance ne se détache. Un représentant des collectivités explique incidemment que beaucoup de captages d'eau potable présentant des risques ont été suspendus dans la région des anciennes mines d'or. Un représentant des services de l'État est plus catégorique. Selon lui : « En Haute-Vienne, depuis 1987 on a supprimé tous les points de captage dont la concentration en arsenic dépasse les 50 µg/l, et depuis 1988, tous ceux dont la concentration en arsenic dépasse les 10 µg/l. On a donc supprimé tous les points à problème ».

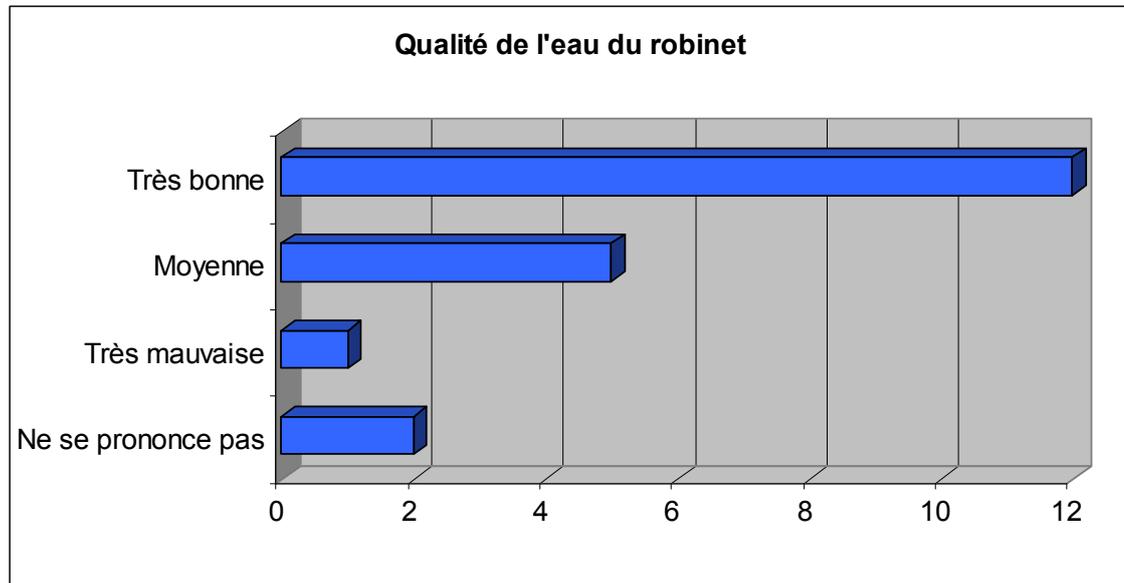


Figure 19 - Choix exprimés à la question 8.

Dix personnes interrogées (50 %) estiment que le coût de l'eau du robinet est peu élevé (question 9, fig. 20). Il faut remarquer que parmi ces personnes, neuf estimaient que l'eau du robinet était très bonne (question 8) et six ne buvaient que de cette eau (question 7). La majeure partie des personnes interrogées est constituée de représentants des collectivités territoriales. Certaines personnes avancent que les dispositifs de captage, de traitement et de distribution d'eau dans les zones rurales sont souvent vétustes et peu sécurisés et nécessitent des travaux de mise aux normes qui justifient un coût de l'eau pouvant paraître élevé pour le consommateur.

Un répondant des collectivités, qui habite le haut bassin de l'Isle, pense que la facture d'eau de sa commune est peu élevée mais précise qu'il y a des différences de coûts entre les communes s'expliquant par le choix d'exploitation fait par la commune : certaines sont autogérées (régie directe) et proposent des prix artificiellement bas, alors que d'autres choisissent la Délégation de Service Public, ce qui coûte beaucoup plus cher au consommateur. Un représentant des services de l'État conclut : « Très globalement, on peut dire toutefois que dans le haut bassin de l'Isle le prix est un peu au-dessus de celui du département, mais qu'il est plutôt bas par rapport à la moyenne nationale ».

En conclusion, malgré le fait que les trois questions de 7 à 9 soient biaisées et ne permettent pas de réaliser des recoupements avec les autres séries de questions, il ressort globalement que, dans l'ensemble de la Haute-Vienne, l'eau du robinet est bue par 90 % des personnes interrogées, qu'elle est considérée comme bonne (25 %) à très bonne (60 %) et plutôt pas chère (50 %). Aucune réticence vis-à-vis de l'arsenic ne nuance les réponses données, c'est-à-dire que les personnes interrogées ne craignent pas la présence d'arsenic dans l'eau du robinet.

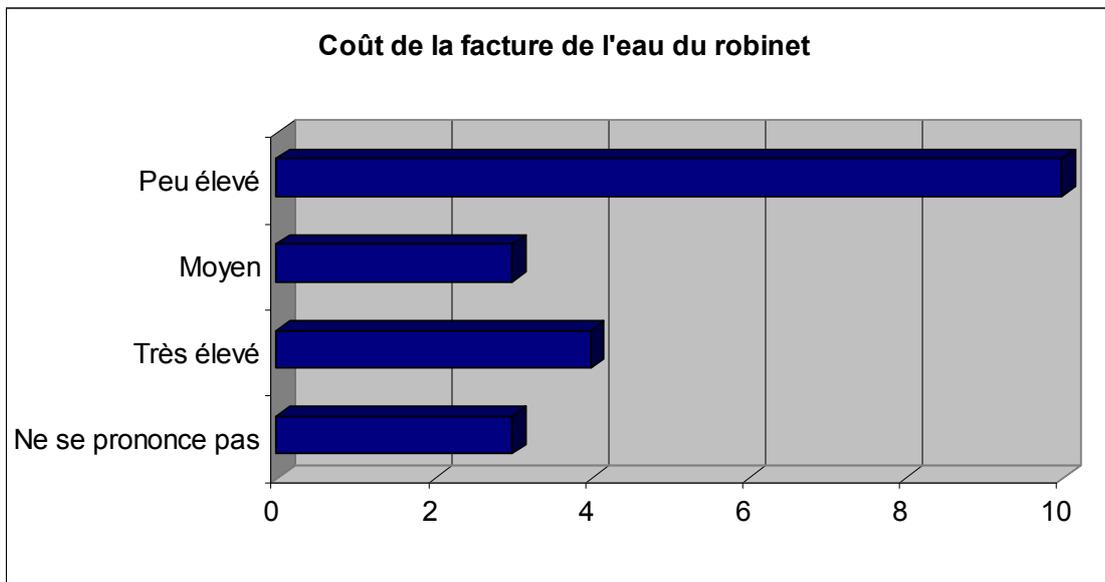


Figure 20 - Choix exprimés à la question 9.

La question 10 révèle que 35 % des interrogés, toutes catégories confondues, ne veulent pas payer un surcoût de l'eau du robinet pour financer une dépollution de son arsenic. Trois ont d'ailleurs spontanément repris le principe du « pollueur-payeur.»

Une personne ne veut pas se prononcer car elle précise que si d'aventure on buvait une eau très chargée en arsenic à la suite d'un accident qui aurait rejeté en une salve de grandes quantités d'arsenic dans l'eau, cela ne poserait pas de problèmes graves de santé puisqu'il n'est pas possible que l'arsenic atteigne une concentration critique dans une rivière telle que l'Isle du fait de la dilution naturelle due au volume et au courant.

5.4.4. Perception de l'utilisation de bactéries

Question 11 : Êtes-vous informé(e)s de travaux de sécurisation menés sur les anciens sites miniers du haut bassin de l'Isle ?

Question 12 : Parmi les facteurs suivants, quels est celui qui, selon vous, présente le plus de risque pour la santé humaine ?

Question 13 : Pensez-vous que les bactéries utilisées puissent générer un risque de dissémination ?

Question 14 : Saviez-vous que de très nombreuses bactéries sont déjà utilisées pour le traitement des eaux (eaux usées, eaux polluées) ?

À la question 11 qui ne propose que deux choix, oui ou non, la moitié des personnes interrogées (11/20) ignore que des travaux de mise en sécurité sont en cours. Cela apparaît très nettement chez les membres des collectivités territoriales (7/9). Même

deux des trois représentants des mairies, tous de communes sur les territoires desquelles se trouvent les anciennes mines d'or, l'ignorent. Parmi ces 11 personnes, trois avaient pourtant répondu lors de la question 1 bien connaître les sites miniers du haut bassin de l'Isle.

Cela confirme les conclusions ressortant de l'analyse de la question 1, à savoir qu'un travail d'information sur l'état des lieux des anciennes mines d'or du district minier du haut bassin de l'Isle semble nécessaire.

Une majorité (13/21) estime que les produits chimiques sont les plus dangereux (question 12, fig. 21). Deux personnes des collectivités insistent sur le fait que la prolifération anormale de bactéries est liée à une augmentation anormale des substances qui les nourrissent, et que cette prolifération n'est qu'une pollution secondaire témoignant d'une autre pollution.

Seulement deux personnes interrogées estiment que les bactéries, du fait des toxines qu'elles rejettent, sont un facteur plus important de risque pour la santé humaine que ne le sont l'arsenic et les produits chimiques. Il est à noter que ces deux personnes ne sont pas des représentants d'associations de défense de l'environnement. Deux personnes dénoncent quant à elles l'arsenic. Quatre n'ont pas voulu se prononcer, avançant le fait que tout dépend des doses et que les trois facteurs ne peuvent être comparés.

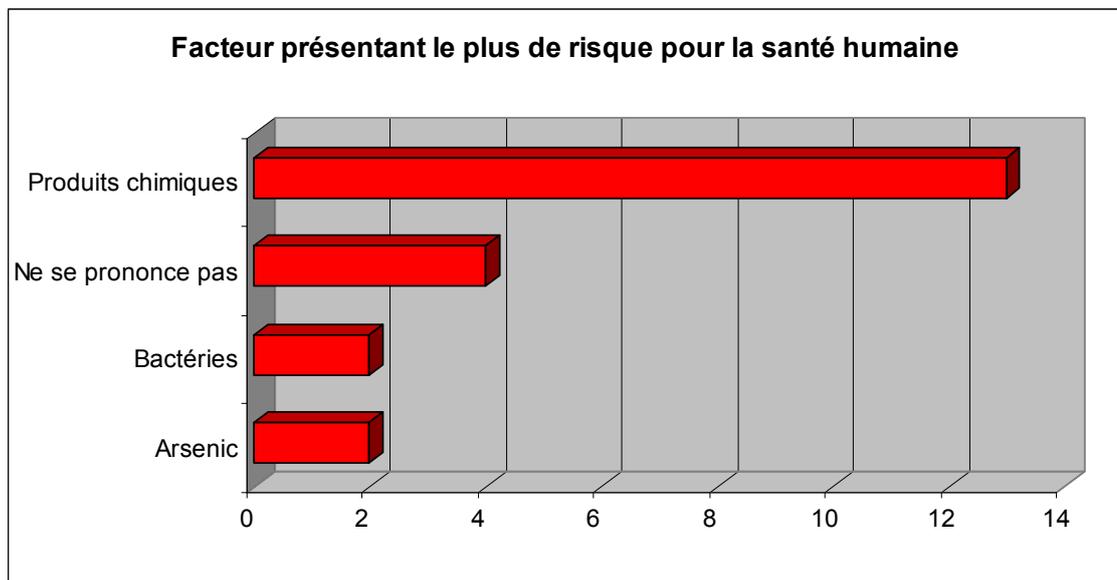


Figure 21 - Choix exprimés à la question 12.

Le calcul se fait sur 21, car les personnes de l'un des deux binômes ont exprimées des opinions divergentes.

Notons qu'une personne des collectivités précise que les produits chimiques sont plus dangereux que l'arsenic car de faibles quantités suffisent en une seule fois à être toxiques, alors que l'arsenic ne devient toxique qu'à la suite d'une exposition à des doses importantes et régulières. Un représentant des services de l'État (qui est une des quatre personnes qui ne se prononce pas) souligne quant à lui que les bactéries

sont plus dangereuses que les métaux car elles peuvent rendre malade en une seule fois, alors qu'il faut un contact prolongé avec les métaux pour que ceux-ci deviennent nocifs.

En définitive, la pollution par les produits chimiques est la plus appréhendée (13/21) ; celle par les bactéries l'est beaucoup moins (2/21) mais reste un peu plus crainte qu'une pollution par les métaux et les métalloïdes, dont l'arsenic, du fait peut-être de la relative prévisibilité de cette dernière.

Une majorité des personnes interrogées (14/20) ne pense pas ou n'appréhende pas que les bactéries utilisées dans le bioprocédé puissent se disséminer. En particulier, aucune personne des associations de défense de l'environnement ne le pense (question 13, fig. 22). L'une d'elle estime même que : « on utilise trop, et de façon subjective par rapport à des raisons objectives, le principe de précaution ».

A priori, il n'y a aucune relation de cause à effet entre les deux personnes qui considèrent que les bactéries sont le risque le plus important pesant sur la santé humaine et celles (5/20) qui craignent la dissémination de bactéries dans le milieu, ou même celles (9/20) qui sont informées des travaux de sécurisation menés sur les anciennes mines. Tout juste peut-on dire que les personnes craignant la dissémination sont essentiellement des membres des collectivités territoriales.

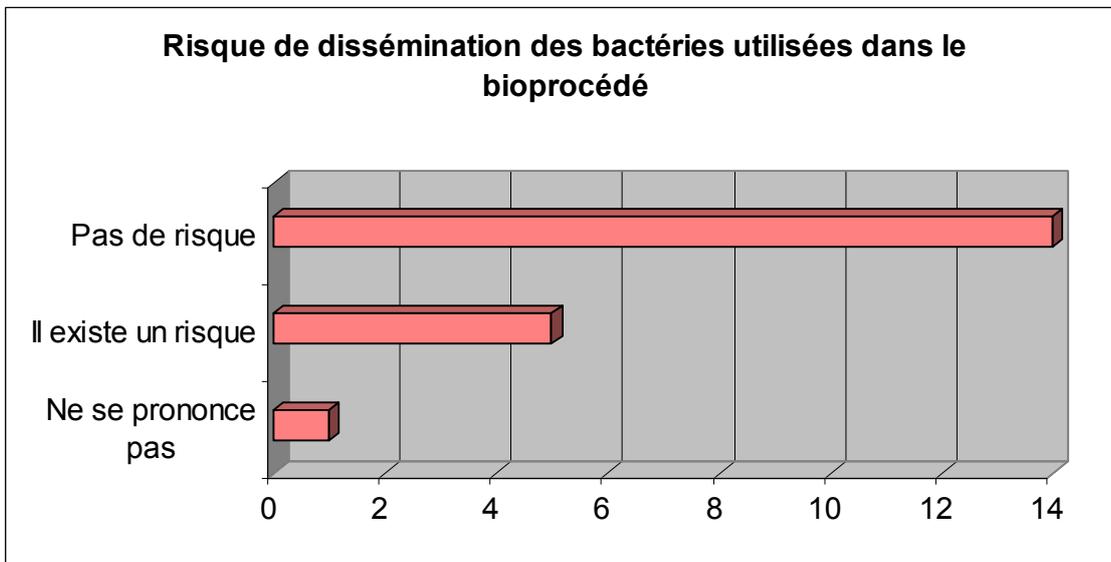


Figure 22 - Choix exprimés à la question 13.

Parmi elles, certaines pensent qu'il est nécessaire de réaliser des études préalables pour statuer sur une nocivité éventuelle de *T. arsenivorans* et savoir comment l'éliminer en cas de dissémination nocive. Une personne des services de l'État qui connaît bien le site de Cheni Les Farges estime à l'inverse qu'il n'y a pas de fuite qui puisse poser problème du moment que *T. arsenivorans* ne possède pas de similitudes avec une bactérie dangereuse ; sur un autre registre, elle pense que des tests seraient

nécessaires pour voir comment cette bactérie se comporte en fonction de différents paramètres, et en particulier de la température.

À l'exception d'un représentant d'une mairie, toutes les personnes interrogées savent que des bactéries sont déjà utilisées pour traiter les eaux (question 14). Un représentant des associations de défense de l'environnement précise même que dans son usine les bactéries sont utilisées depuis 1974 pour traiter les effluents car ce type de biotraitement est la méthode la plus appropriée.

En conclusion, il apparaît que l'utilisation de bactéries pour la dépollution est maintenant bien acceptée par les usagers et que les bactéries bénéficient d'un regard favorable parmi les principaux acteurs concernés.

5.4.5. Perception d'un bioprocédé utilisant des bactéries

Question 15 : Classez dans l'ordre de préférence en les numérotant de 1 à 4 les critères qui vous semblent les plus importants pour choisir le traitement des eaux à mettre en place, pour une efficacité équivalente : le coût (le moins cher), la facilité (le plus simple à appliquer), le plus propre en terme de bilan environnemental (non consommateur d'énergie et de réactifs chimiques), ou autre (précisez).

Question 16 : Cochez dans la liste ci-dessous le type de procédé de traitement de l'arsenic dans l'eau que vous choisiriez : procédé chimique (oxydant chimique tel l'hypochlorite de sodium), procédé physico-chimique (p. ex. lit filtrant de sable et de limaille de fer oxydée), procédé biologique, ou sans opinion.

Question 17 : Quelles seraient vos réticences vis-à-vis de l'utilisation d'un procédé biologique pour traiter l'arsenic de l'eau ?

La majorité des personnes interrogées (15/20) toutes catégories confondues estime que la propreté environnementale est l'objectif premier et classent en premier ce critère (question 15, fig. 23).

Toutefois, deux personnes représentant les collectivités territoriales prennent en compte un critère de facilité de mise en place des procédés de traitement. Deux autres répondants mettent en avant un critère de coût. L'un d'eux précise toutefois que l'objectif inhérent d'un traitement est de réduire au maximum la pollution, ce qui sous-tend un objectif final de propreté environnementale.

À partir de la figure 23, on remarque que ses trois plus hautes colonnes sont disposées dans le sens de la diagonale : première priorité : propreté environnementale / seconde priorité : facilité / troisième priorité : coût de traitement. Cette suite de priorités est celle qui est la plus souvent citée (50 %). Comme le font remarquer plusieurs personnes interrogées, le principal est de préserver l'environnement, de préférence à un coût moindre. Selon les personnes interrogées, la facilité d'utilisation est synonyme de simplicité et engendre généralement un coût moindre, ce qui explique que le critère de facilité passe avant celui du coût.

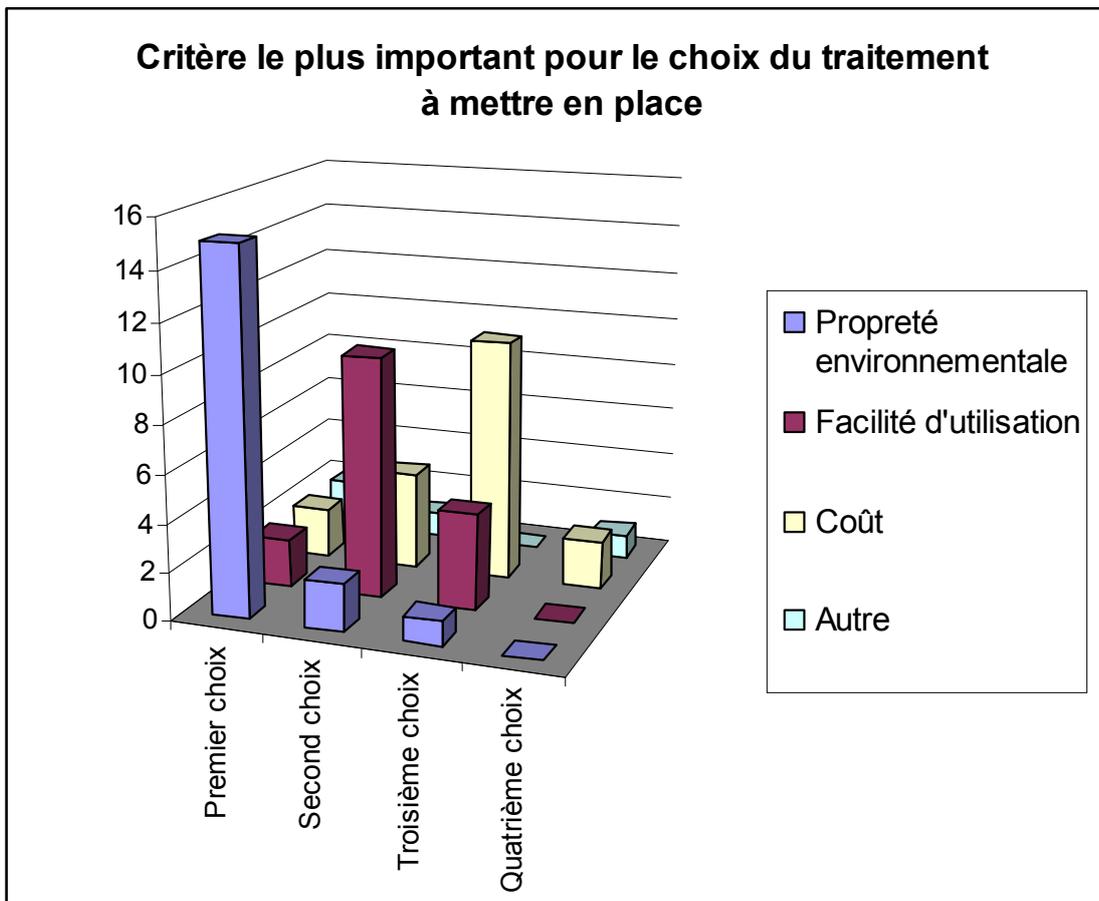


Figure 23 - Choix exprimés à la question 15.

Quatre autres critères sont apparus dans les entretiens :

- la fiabilité et la maintenance du traitement, si le site est abandonné (c'est le cas à Cheni les Farges) il faut avant tout mettre en avant la fiabilité et la maintenance du traitement ;
- qualité des eaux, résultant du traitement et prise en compte des normes sanitaires ;
- sécurité du personnel de maintenance ;
- maintenance du traitement en régie municipale.

En conclusion, la préservation de la qualité des eaux de surface est un critère intégré par tous, mais cette préservation doit être réalisée avec un procédé de traitement qui se doit d'être facile d'application.

La majorité des personnes interrogées (12/20, soit 60 %) optent pour un traitement biologique de la pollution (question 16, fig. 25). À l'exception de deux répondants, tous estiment que les bactéries utilisées pour le bioprocédé ne présentent pas de risque de dissémination dans l'environnement.

Inversement, aucune personne interrogée ne privilégie le traitement chimique. Par contre, 40% des répondants (8/12) estiment que le traitement physico-chimique est préférable. Pour eux, ce type de traitement est idéal car il est le plus passif possible, c'est-à-dire qu'il est celui des trois traitements proposés qui interagit le moins avec l'environnement.

Parmi les personnes refusant le traitement bactérien, deux représentants des collectivités territoriales craignent un risque épidémiologique car, selon eux, les procédés biologiques requièrent une grande technicité qui n'est peut-être pas encore bien maîtrisée. Une autre personne des collectivités évoque également un critère de fiabilité dans la mesure où les bactéries sont sensibles aux changements environnementaux, en particulier au froid. Si leur équilibre vital est rompu, elles risquent d'en mourir, ce qui bien sûr détruit « dans l'œuf » le bioprocédé (confiance attribuée au nouveau procédé). Une personne des services de l'État va plus loin : selon elle, il faudrait que des expérimentations en site clos réalisées par des cabinets indépendants mènent toutes à des conclusions convergentes pour que le choix du procédé soit effectué en toute impartialité (confiance accordée aux porteurs de nouveau procédé).

Étonnamment, alors que pour la question 12 seules 10 % des personnes interrogées pensent que les bactéries représentent le plus grand facteur de risque pour la santé humaine, que pour la question 13 une forte majorité (70 %) estime qu'il n'y a pas de risque de dissémination bactérienne, et que pour la question 16 une majorité (60 %) opte pour un traitement biologique, la question 17 (fig. 24) révèle, au contraire, que 50 % d'entre elles, toutes tendances confondues, émettent la crainte que les bactéries qui seront utilisées puisse subir des mutations qui les rendraient pathogènes et/ou résistantes aux antibiotiques (antibio-résistance). Seule une petite minorité (25 %) craint une défaillance technique.

Il faut remarquer que les réponses aux questions de 12 à 16 sont plutôt à l'avantage des bactéries (l'utilisation de bactéries n'est pas très risquée pour la santé humaine, le risque de dissémination des bactéries est faible, le traitement biologique est choisi en priorité) alors que les réponses à la question 17 sont à leur désavantage (le risque biologique est le plus craint).

Un des représentants des services de l'État ponctue toutefois son choix de risque biologique en faisant remarquer que, pour lui, le risque biologique inclut la défaillance technique et que les deux problèmes sont intimement liés.

Enfin, un certain nombre de personnes interrogées ne se prononce pas, soit par méconnaissance de la problématique, soit pour manifester un point de vue divergent. L'une de ces personnes situe plutôt le problème en termes d'efficacité : le procédé bactérien est une réaction lente et nécessite donc un dimensionnement important, et donc suffisamment de place où l'implanter. De plus selon elle, les procédés biologiques ne fonctionnent pas, ou très mal, à faible température.

Au vu des réponses aux questions 12, 13 et 16, nous pouvons conclure que dans la mesure où l'on considère qu'un risque biologique existe, l'application du principe de

précaution aveuglément appliqué peut amener à des aberrations et à des non actions dommageables. Les réticences apparaissant dans la question 17 et suggèrent qu'il faudrait diffuser plus largement auprès des acteurs concernés des résultats d'études scientifiques prouvant la non toxicité des bactéries utilisées dans le bioprocédé. On perçoit également une demande de tests en conditions réelles qui puissent prouver la fiabilité du bioprocédé sur toute la longueur de l'année.

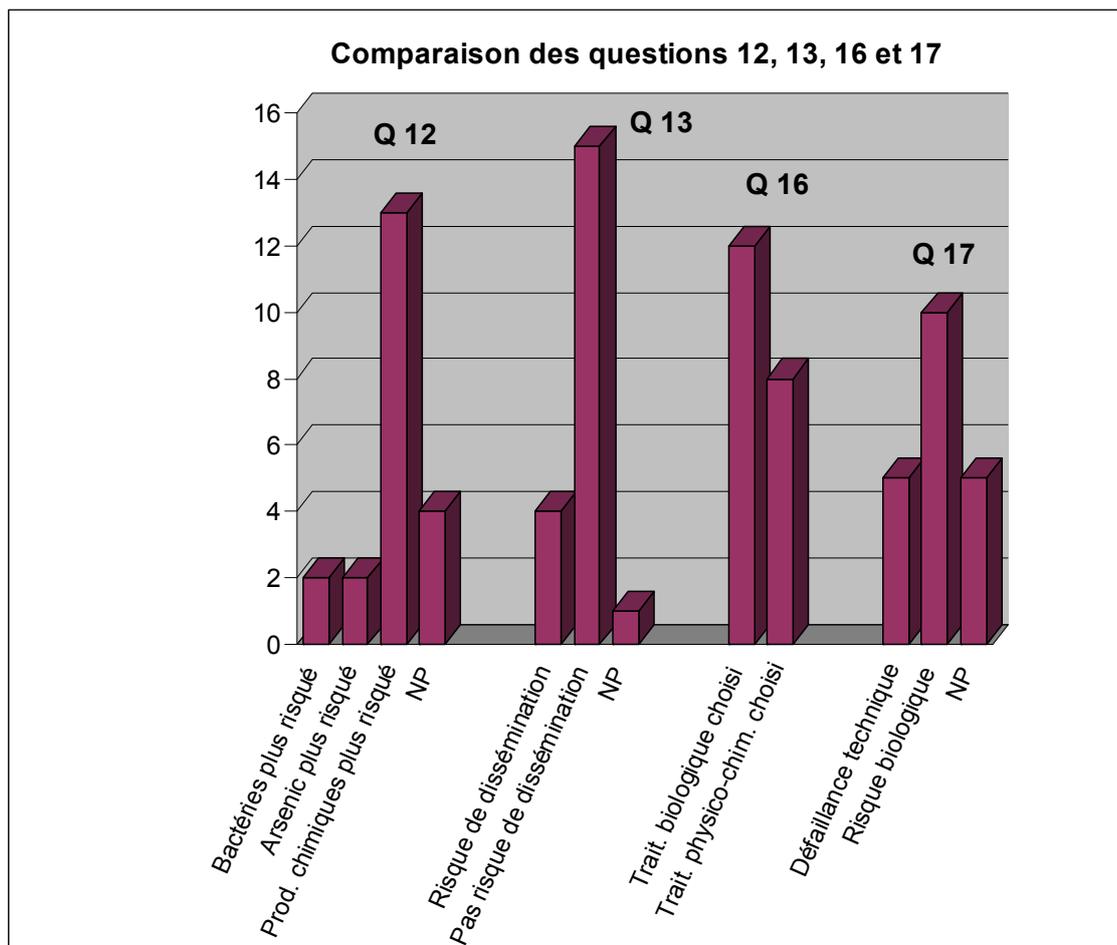


Figure 24 - Comparaison des réponses aux questions 12, 13, 16 et 17.
NP : ne se prononce pas.

5.4.6. Conditions d'application d'un bioprocédé utilisant des bactéries

Question 18 : Pensez-vous que le procédé biologique décrit puisse être intégré à la liste des procédés applicables ?

Question 19 : Si vous pensez que le procédé biologique décrit puisse être intégré à la liste des procédés applicables, sous quelles conditions pensez-vous qu'il devrait l'être ?

Une petite minorité des personnes interrogées estime que le procédé peut être applicable à court terme (7/20) ou à moyen terme (1/20) (question 18, fig. 26).

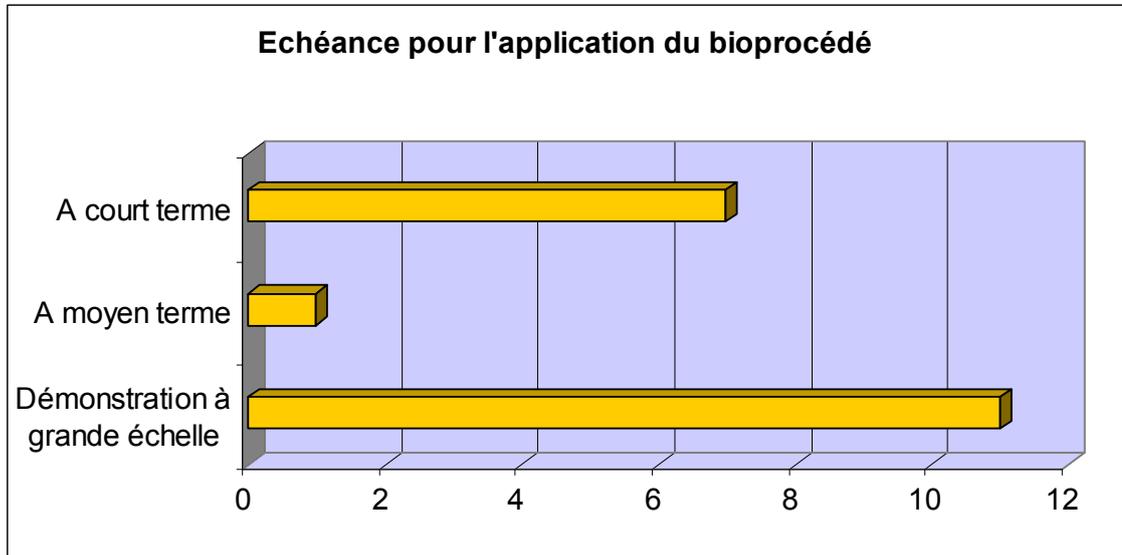


Figure 25 - Choix exprimés à la question 18.

Cette minorité considère que le projet COBIAS soutenu par l'ANR repose sur une base de partenariat scientifique efficace et devrait aboutir à la mise au point de procédés applicables à court ou moyen terme. Sur ces sept personnes, aucune ne pense que les bactéries constituent le facteur de risque le plus important pour la santé humaine (question 12), six estiment qu'il n'y a pas de risque de dissémination (question 13), six ont choisi un procédé de traitement biologique (question 16) et cinq ne craignent pas un risque biologique bactérien (question 17). Les réponses de cette cohorte sont donc cohérentes.

La moitié n'a pas une confiance totale aux travaux des scientifiques. Parmi cette majorité, deux personnes précisent que, étant donné qu'il s'agit de la mise en application d'un procédé innovant, le principe de précaution doit nécessairement commander une démonstration à grande échelle. Par ailleurs, cinq personnes de cette majorité préconisent une étude d'impact. L'une d'entre elles résume ainsi : « La démonstration à grande échelle est un système de prévention de base en matière d'environnement, car il faut démontrer que le système est fiable et envisager toutes les éventualités. Il serait souhaitable parallèlement de faire une étude d'impact d'évaluation environnementale (par exemple, y a-t-il des sites Natura 2000 en aval ?) ».

Une majorité (14/20) demande un suivi et un contrôle régulier (question 19, fig. 26). Peu (3/20) ont pensé à des actions réglementaires. À ce titre, une personne des services de l'État précise que si le bioprocédé fait ses preuves, il sera alors possible de mettre en place une réglementation mais à la seule condition que sa nécessité ait été établie et que l'on puisse par la suite disposer des moyens d'assurer sa police. Un très petit nombre (3/20) demande l'avis d'une tierce organisation. Une personne des

collectivités estime en effet que pour ne pas être juge et partie il faudrait que des organismes indépendants valident le bioprocédé ; selon elle, cela ne pourrait que crédibiliser la démarche du projet de recherche COBIAS. Une autre prétend qu'il est « toujours inquiétant qu'un seul procédé devienne le procédé de référence ». Enfin, le besoin d'informer les élus locaux et les populations est exprimé par trois représentants, dont deux d'associations de défense de l'environnement.

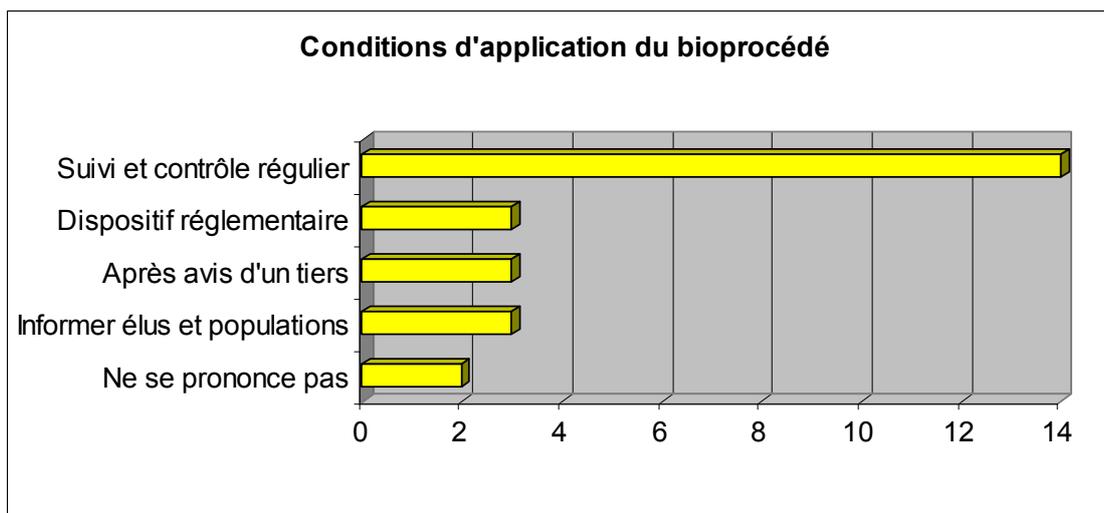


Figure 26 - Choix exprimés à la question 19.

Le calcul se fait sur 25 et ne peut s'exprimer en pourcentage car quatre personnes ont émis deux choix et deux ne se sont pas prononcées.

En conclusion, les réponses font apparaître une demande de suivi et de contrôle réguliers ainsi qu'un besoin d'information et de consultation des élus locaux et des populations vivant aux abords des anciennes mines d'or du haut bassin de l'Isle.

5.4.7. Résumé-conclusion de l'enquête

Les résultats de cette enquête font ressortir la nécessité d'entreprendre un travail d'information non négligeable auprès des acteurs concernés.

Il apparaît tout d'abord que la problématique se doit d'être expliquée, comme nous l'avons fait de manière succincte en envoyant préalablement aux entretiens un texte introductif au questionnaire (ann. 8) exposant le nœud du problème.

Il apparaît ensuite que la localisation géographique et l'état des lieux des anciennes mines sont mal connus malgré leurs impacts sur les eaux de surface. Une sensibilisation à l'impact des anciennes mines semble donc s'imposer en amont du développement des bioprocédés de traitement.

Il apparaît enfin que l'existence même des travaux déjà entrepris dans ces mines en vue de les mettre en sécurité sont mal connus. Pour les futures actions du projet COBIAS, nous recommandons d'informer les institutionnels (membres des services de

l'État, des collectivités territoriales, ou élus locaux), les membres d'associations de défense de l'environnement, et bien sûr les populations, de l'existence d'un projet de dépollution dans leur région.

L'enquête a montré que la toxicité de l'arsenic et ses effets pathogènes sur la santé humaine ne sont peut-être pas bien connus, et s'ils le sont, n'alarment pas outre mesure les acteurs concernés. De la même manière, il est recommandé non seulement d'informer mais aussi de sensibiliser les acteurs concernés sur les effets sanitaires de l'arsenic.

Il apparaît ensuite que l'eau du robinet est appréciée dans le département et que son coût y est globalement peu élevé en comparaison de la moyenne nationale. Il n'en reste pas moins qu'un surcoût potentiel du au procédé d'élimination de l'arsenic hydrique ne serait pas très acceptable pour les usagers. Le bioprocédé développé dans le cadre du projet COBIAS devra donc prendre en compte le critère du coût.

Pour que le bioprocédé soit approprié par les acteurs concernés, il doit aussi être simple de conception comme d'utilisation. Pour les acteurs interrogés, la simplicité est associée à la fiabilité. Elle est également synonyme d'économie dans les investissements. La simplicité de conception et d'application serait donc un autre critère d'acceptabilité du bioprocédé COBIAS.

Bien que l'utilisation de bactéries dans un traitement soit conceptuellement acceptée, il s'avère qu'un doute demeure dès lors qu'il s'agit d'en employer pour dépolluer des phases aqueuses du fait de la crainte d'une contamination des eaux et d'un empoisonnement du milieu, et donc un risque pour la santé humaine. Ce manque de confiance est d'autant plus sensible quand il s'agit d'une souche bactérienne nouvellement découverte. Ce constat démontre qu'il est nécessaire de compléter la connaissance par des études scientifiques prouvant le caractère inoffensif des bactéries qui seront utilisées sur la santé humaine.

Pour lever la méfiance du bioprocédé, un test de fonctionnement en conditions réelles est nécessaire et souvent demandé par les acteurs concernés. Avant qu'il ne soit mis en place, en effet, les acteurs veulent être rassurés quant à l'efficacité du bioprocédé ; en particulier, ils veulent savoir de quelle manière réagissent les bactéries aux changements de température. Ceci nécessite donc un suivi du bioprocédé sur au moins une année. Un suivi et un contrôle régulier sont aussi souvent demandés par les répondants. Selon eux, le bioprocédé doit faire l'objet d'une réglementation. Par ailleurs, une étude d'impact du bioprocédé est mise en avant, ainsi que sa validation par des organismes indépendants, en vue d'un gain de crédibilité. Cette intervention d'organismes extérieurs représente un coût qui devrait être pris en compte lorsque des projets de recherche et développement de nouveaux procédés, tels que le projet COBIAS, sont élaborés.

Il ressort enfin du questionnaire la nécessité d'une plus grande concertation avec les différents acteurs concernés, c'est-à-dire avec les élus locaux et les représentants des populations qui sont impactés par les nuisances en provenance des anciens sites miniers. Les concertations visent à anticiper les conflits entre acteurs et à intégrer

l'environnement aux problématiques de développement du territoire (Alban et Lewis, 2005).

Le projet COBIAS doit chercher à intégrer l'acceptabilité sociologique des bioprocédés, en parfait accord avec cette exigence et les besoins légitimes d'information et de consultation des acteurs concernés. Il répond de la sorte aux exigences de la circulaire du 18/10/2007 relative à la mise en œuvre des dispositions régissant le droit d'accès à l'information relative à l'environnement (non parue au JO). Cette circulaire rappelle en effet que le droit de toute personne d'accéder à l'information relative à l'environnement se traduit pour les autorités publiques par l'obligation de communiquer les informations relatives à l'environnement qu'elles détiennent aux personnes qui en formulent la demande, mais aussi d'informer le public en assurant la diffusion des informations relatives à l'environnement.

6. Conclusions générales

La contamination de millions de personnes par des eaux de boissons arséniées en Inde et au Bangladesh, rendue publique et largement médiatisée dans les années 1990, a attiré l'attention du monde scientifique sur les pollutions par l'arsenic et amené ces dernières au tout premier plan des préoccupations du corps médico-scientifique (Ravenscroft *et al.*, 2009).

Bien qu'il ne soit pas classé dans les substances dangereuses prioritaires par la Directive Cadre sur l'Eau de l'Union Européenne, le principal danger dont l'arsenic menace les populations humaines est, outre l'apparition de l'arsenicose, son puissant pouvoir carcinogène (Testud, 1998). Or, comparé aux autres produits contenant des métaux lourds, les composés contenant de l'arsenic possèdent des durées de vie beaucoup plus courtes (de trente ans pour les bois traités à moins d'un an pour les biocides), ce qui aboutit à son accumulation massive dans la pédosphère en tant que polluant (Muller, 2004). Allié à d'autres rejets d'origine naturelle ou humaine, l'arsenic finit alors par contaminer les eaux potabilisables (Müller, 2004). C'est pourquoi, chaque année, de nouveaux cas de contamination des eaux potables par l'arsenic apparaissent, le nombre de pays touchés ne cesse de s'accroître, et le nombre de personnes exposées ou intoxiquées est en constante augmentation.

Toutes ces raisons rendent nécessaire l'élimination de l'arsenic du milieu naturel. Cette élimination n'étant pas réalisable sur le plan technique, on cherche tout le moins à réduire ses rejets dans l'environnement, escomptant que le surplus d'arsenic s'y trouvant déjà finira par s'intégrer au cycle naturel. La réduction des rejets dans les eaux doit se faire à la source des émissions polluantes, c'est-à-dire essentiellement au niveau des effluents industriels et miniers.

Les bioprocédés qui seront élaborés à l'issue du projet COBIAS pourront s'appliquer aux eaux potabilisables et aux effluents miniers. Leur développement sera particulièrement utile en France, car la métropole possède des zones particulièrement touchées par les rejets d'arsenic dans le milieu. Le présent livrable fournit une carte des points noirs de pollution d'origine anthropique des eaux de surface par l'arsenic. Cette représentation montre que les principaux rejets sont liés aux anciens sites miniers et aux industries. Ainsi, des régions sont hautement polluées, tel le Massif central par les anciennes mines, ou la haute vallée du Rhône par les industries. Sous l'impulsion de l'Union européenne, la France assure un contrôle et un suivi de plus en plus rigoureux des rejets d'arsenic dans le milieu grâce aux différents outils dont elle s'est dotée, comme le répertoire iREP, les contrôles réguliers de la part des DRIRE et des DREAL, et récemment, les résultats d'une vaste campagne de contrôle, l'action RSDE. Jusqu'à présent, une carte des points noirs synthétisant l'ensemble des résultats quantifiés obtenus par ces différentes entités n'avait jamais été réalisée. Cette carte situe les zones prioritaires et montre qu'il est urgent de disposer de bioprocédés efficaces éliminant les rejets d'arsenic à la source. Cette démarche est une étape préliminaire indispensable à l'établissement d'un inventaire des problèmes socio-

économiques qui seraient associés à plus ou moins long terme par la présence d'arsenic dans les ressources en eaux. Cependant, si la carte établie dans le cadre du présent projet apporte déjà des informations précieuses, elle pourrait être complétée et améliorée de la façon suivante :

- par l'intégration des chiffres de l'action RSDE ;
- par l'étude des nombreux sites miniers abandonnés dont l'impact demeure encore non quantifié ;
- par une mise à jour régulière des données ICPE.

L'enquête sociologique que nous avons réalisée auprès d'une vingtaine d'acteurs dans une des ces zones prioritaires, le sud de la Haute-Vienne, nous a montré que la problématique de l'arsenic était mal connue et que sa toxicité semblait sous-évaluée. Concernant les réponses à apporter, l'utilisation d'un traitement utilisant des bactéries, l'enquête montre qu'il est au préalable nécessaire d'informer et consulter les acteurs pour améliorer son acceptabilité sociale. Les opinions exprimées pendant cette enquête sont certes instructives, mais le fait qu'elle ait été réalisée sur un faible nombre de personnes limitent leur extrapolation à l'ensemble des acteurs ou de la population. Il aurait été intéressant d'organiser un focus groupe avec l'ensemble des acteurs interrogés, à l'occasion duquel l'opportunité de compléter notre étude par une enquête dirigée vers le grand public aurait pu être évoquée.

Le volet sociologique du projet COBIAS ne représente donc qu'une première étape dans l'évaluation de la connaissance des problèmes liés à l'arsenic et de l'acceptabilité des procédés biotechnologiques par les membres des services de l'État, des collectivités territoriales et des associations de défense de l'environnement. Il serait extrêmement utile de l'étendre à davantage d'acteurs dans différentes régions. Cette démarche permettrait d'établir un lien entre les deux parties de la présente étude : cartographie des rejets et répartition géographique du niveau de sensibilisation des populations aux problèmes liés à l'arsenic.

7. Liste des sigles

ADEME :	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ADES :	Accès aux Données sur les Eaux Souterraines
AELB :	Agence de l'Eau Loire-Bretagne
AFSA :	Agence Française de Sécurité des Aliments
ANR :	Agence Nationale de la Recherche
BASIAS :	Base des Anciens Sites Industriels et Activités de Service
BASOL :	Base de données sur les Sites et Sols pollués
BO :	Bulletin Officiel
BRGM :	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CAsO1 :	Cheni As-Oxydante 1
CEA :	Commissariat à l'Énergie Atomique
CET :	Centre d'Enfouissement Technique
CG HV :	Conseil Général de la Haute-Vienne
CIRC :	Centre International de Recherche sur le Cancer (équivalent français de IARC)
CGPA :	Compagnie Générale de Produits Alimentaires
CLE :	Commission Locale de l'Eau
CNPE :	Centre Nucléaire de Production d'Électricité
COBIAS :	COmpréhension du rôle du Blofilm bactérien et maîtrise de son développement lors du traitement d'eaux ArSéniées en bioréacteurs à lit-fixe
CPE :	Centres de Production d'Électricité
CPT :	Centre de Production Thermique
CR Limousin :	Conseil Régional du Limousin
CREN :	Conservatoire Régional des Espaces Naturels
DCE :	Directive Cadre sur l'Eau
DCN :	Direction des Constructions Navales
DDASS :	Directions Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
DDSV :	Direction Départementale des Services Vétérinaires
DGPR :	Direction Générale de la Prévention et des Risques
DIREN :	Direction Régionale de l'Environnement

DOM-TOM :	Départements d'Outre-Mer - Territoires d'Outre-Mer Depuis 2003, les DOM sont devenues DROM (Départements et Régions d'Outre-Mer : Guadeloupe, Martinique, Guyane, La Réunion) et les TOM ne correspondent plus qu'aux Terres australes et antarctiques françaises.
DRE :	Direction Régionale de l'Équipement
DREAL :	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DRIRE :	Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
EDF :	Électricité De France
E-PRTR :	European Pollutant Release and Transfer Register (en français, Registre européen des rejets et des transferts de polluants).
EPER :	European Pollutant Emission Register (en français, Registre européen des émissions de polluants).
EPI :	service Environnement industriel et Procédés Innovants du BRGM
FOREGS :	Forum of European Geological Surveys
GEREP :	Gestion Électronique du Registre des Émissions Polluantes
GIE :	Groupement d'Intérêt Économique
GRESE :	Groupement de Recherche Eau Sol Environnement de l'Université de Limoges
IARC :	International Agency for Research on Cancer (équivalent anglais du CIRC)
ICPE :	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IFREMER :	Institut Français de Recherche pour l'exploitation de la Mer
INERIS :	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
INRA :	Institut National de la Recherche Agronomique
InVS :	Institut de Veille Sanitaire
IRC :	International water and sanitation centre
iREP :	site internet du Registre français des Emission Polluantes
JO :	Journal officiel de la République Française
LNE :	Limousin Nature Environnement
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé (équivalent français de WHO)
ONU :	Organisation des Nations Unies (équivalent français de UNO)
MEDAD :	Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durable. Le MEDAD (JO du 01/06/2007) n'exista que 11 mois et fut remplacé par le MEEDDAT (JO du 10/07/2008)

MEEDDAT :	Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire
MEDD :	Ministre de l'Écologie et du Développement Durable. Le MEDD exista de mai 2002 à mars 2004.
MES :	Matières En Suspension
MOS :	Matières Organiques en Suspension
NTF :	Nouvelle Triangulation de la France
PACA :	Provence Alpe Côte d'Azur
PME :	Petite et Moyenne Entreprise
PRECODD :	Programme de Recherche sur les Ecotechnologies et le Développement Durable
RE-CORD :	Réseau Coopératif de Recherche sur les Déchets
RMQS :	Réseau de Mesure de la Qualité des Sols
RSDE :	Recherche et réduction des Substances Dangereuses dans les Eaux
RSFS de Russie :	République Socialiste Fédérative Soviétique de Russie
SAGE :	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE :	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SIG :	Système d'Information Géographique
SNC :	Société en Nom Collectif
SRL :	Sources et Rivières du Limousin
STEP :	Station d'Épuration
STIIC :	Service Technique d'Inspection des Installations Classées
SVDM :	Syndicat de Valorisation des Déchets Ménagers
UDEP :	Unité de Dépollution
UDS :	Université de Strasbourg
UIOM :	Usines d'Incinération d'Ordures Ménagères
UNO :	United Nations Organization (équivalent anglais de ONU)
UPT :	Unité de Production Thermique
WHO :	World Health Organization (équivalent anglais de OMS)

8. Bibliographie

Abernathy C. O., Liu Y. P., Longfellow D., Aposhian H. V., Beck B., Fowler B., Goyer R., Menzer R., Rossman T., Thompson C. & Waalkes L. (1999) - Arsenic: health effects, mechanisms of actions, and research issues. *Environ. Health Persp.*, 107, p. 593-597.

Abernathy C. O., Thomas D. J. & Calderon R. L. (2003) - Health Effects and Risk Assessment of Arsenic. *The Journal of Nutrition*, 133, p. 1536S-1538S.

ADEME Languedoc Roussillon (2009) - La Combe du Saut. Réhabilitation. (<http://www.difpolmine.org/servlet/KBaseShow?catid=10188&id=10188&sort=-1>).

ADEME (2009) - Médiathèque. Glossaire. (<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=12843>).

ADES (2009) - Portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines. À propos d'ADES. Documents. Plaquette de présentation sur la thématique Eaux Souterraines (<http://www.ades.eaufrance.fr/Documentation.aspx>).

Agence de l'Eau Adour-Garonne (2008) - Action de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau. Synthèse des résultats des campagnes de mesure réalisées sur le bassin Adour-garonne. Avril 2008. Agence de l'Eau Adour-Garonne-INERIS, 40 p. (<http://www.eau-adour-garonne.fr/page.asp?page=1987>).

Agence de l'Eau Adour-Garonne (2009) - Accueil. Glossaire. (<http://www.eau-adour-garonne.fr/lexique.asp?mod=alpha&q=&q1=E&q2=&cat=&nbligne=20&ordre=ASC&classer=>).

Agence de l'Eau Loire-Bretagne (2009) - Accueil. Espace documentaire. (http://www.eau-loire-bretagne.fr/espace_documentaire) (http://www.eaufrance.fr/glossaire.php3?id_rubrique=160).

Agence de l'Eau Seine-Normandie (2009) - Accueil. Agriculteur. Outils. Glossaire. (<http://www.eau-seine-normandie.fr/index.php?id=3771>).

Aiuppa A., D'Alessandro W., Federico C., Palumbo B. & Valenza M. (2003) - The aquatic geochemistry of arsenic in volcanic groundwaters from southern Italy. *Appl. Geochem.*, 18, p. 1283-1296.

Alban N., Lewis N. (2005) - Évaluation des processus de concertation et de gouvernance du territoire sur le littoral aquitain. Vertigo - *La revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 6, N° 3. (<http://vertigo.revues.org/index2419.html>).

Alexakis D. (2008) - Geochemistry of stream sediments as a tool for assessing contamination by Arsenic, Chromium and other toxic elements: East Attica region, Greece. *Eur. Wat.*, 21/22, p. 57-72.

Altamirano Espinoza M., Bundschuh J. (2008) - Natural arsenic in groundwater contamination of the sedimentary aquifers of southwestern Sébaco valley, Nicaragua. In *Natural Arsenic in Groundwater of Latin America. Proceedings of the International Congress on Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America, Mexico City, 20-24 June 2006.* Vol. 1. Bundschuh J. (éd.). CRC Press, Boca Raton, Floride (États-Unis), p. 109-122.

Anawar H. M., Mihaljevič M. (2009) - Comment on "Arsenic release from biotite into a Holocene groundwater aquifer in Bangladesh" by A. A. Seddique, H. Masuda, M. Mitamura, K. Shinoda, T. Yamanaka, T. Itai, T. Maruoka, K. Uesugi, K. M. Ahmed, D. K. Biswas. *Appl. Geochem.*, 24, p. 483-485.

ANR - Agence nationale de financement de projets de recherche (<http://www.agence-nationale-recherche.fr>).

Appelo C. A. J. & Postma D. (2005) - *Geochemistry, Groundwater and Pollution.* Balkema, Leiden, 649 p.

Appleyard S. J., Angeloni J., Watkins R. (2006) - Arsenic-rich groundwater in an urban area experiencing drought and increasing population density, Perth, Australia. *Appl. Geochem.*, 21, p. 83-97.

Aragonés Sanz N., Palacios Díez M., Avello de Miguel A., Gómez Rodríguez P., Martíne Cortés M., Rodríguez Bernabeu M.J. (2001) - Nivel de arsénico en abastecimientos de agua de consumo de origen subterráneo en la comunidad de Madrid. *Revista Española de Salud Pública*, 75, p. 421-432.

Arbouine M.W., Wilson H.K. (1992) - The effect of seafood consumption on the assessment of occupational exposure to arsenic by urinary arsenic spéciation measurements. *J. Trace Elem. Elec. Health Dis.*, 6, p. 153-160.

Armienta M. A., Segovia N. (2008) - Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Env. Geochem. Health*, 30, p. 345-353.

Astolfi E., Maccagno A., Fernandez J.C.G., Vaccara R., Stimola R. (1981) - Relation between arsenic in drinking water and skin cancer. *Biol. Trace Element Res.*, 3, p. 133-143.

Atlas Géochimique Européen (2005-2006) - *Geochemical Atlas of Europe. Part 1. Background Information, Methodology, and Maps.* Salminen R (éd.). Part 2. Interpretation of geochemical maps, additional tables, figures, maps and related publications. De Vos W. & Tarvainen T. (éds). Geological Survey of Finland. FOREGS. (<http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas>).

Azcue J.M., Nriagu JO (1995) - Impact of abandoned mine tailings on the arsenic concentrations in Moira Lake, Ontario. *J. Geochem. Explor.*, 52, p. 81-89.

Baranger P., Amraoui N., Azaroual M., Baltassat J.-M., Battaglia-Brunet F., Bodéan F., Cazaux D., Dictor M.-C., Kervéran C., Lassin A., Piantone P. (2003) - Analyse du transfert de l'arsenic sur le site des Farges, commune de Saint-Yrieix, Haute-Vienne : approche bio-hydrogéochimique. BRGM/RP-52504-FR, 185 p.

Barré H, Greaud-Hoverman L., Houeix N., Lepot B., Lehnhoff C., Schneider M. (2008) - Les substances dangereuses pour le milieu aquatique dans les rejets industriels et urbains. Bilan de l'action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau par les installations classées et autres installations. INERIS, Verneuil-en-Halatte (France), 611 p.

BASIAS - Inventaires d'anciens sites industriels et activités de service (<http://basias.brgm.fr>).

BASOL - Base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif (<http://basol.ecologie.gouv.fr> ; <http://basol.environnement.gouv.fr>).

Battaglia-Brunet F., Dictor M.-C., Garrido F., Crouzet C., Morin D., Dekeyser K., Clarens M., Baranger P. (2002) - An arsenic(III)-oxidizing bacterial population: selection, characterization, and performance in reactor. *J. Appl. Microbiol.*, 93, p. 656-667.

Battaglia-Brunet F., Dictor M.-C., Lett M.-C., Bertin N. (2008) - Bioremédiation d'eaux contaminées par l'arsenic. *IN 91 TECHNO*, p. 1-12.

Battaglia-Brunet F., Houlliot A., Bourgeois F., Crouzet C., Itard Y. (2005) - Conception d'un circuit de traitement biologique de l'exhaure minier de Lopérec par piégeage de l'arsenic sur les hydroxydes de fer. *Récents Progrès en Génie des Procédés*, 9, p. 1-8.

Battaglia-Brunet F., Jouliau C., Garrido F., Dictor M. C., Morin D., Coupland K., Johnson D., Hallberg K., Baranger P. (2006) - Oxidation of arsenite by *Thiomonas* strains and characterisation of *Thiomonas arsenivorans* sp. Nov. *Antonie van Leeuwenhoek*, 89, p. 99-108.

Berg M., Tran H. C., Nguyen T. C., Pham H. V., Schertenleib R., Giger W. (2001) - Arsenic Contamination of Groundwater and Drinking Water in Vietnam: a Human Health Threat. *Environ. Sci. Technol.*, 35, p. 2621-2626.

Bertolero F., Pozzi G., Sabbioni E., Saffiotti U. (1987) - Cellular uptake and metabolic reduction of pentavalent to trivalent arsenic as determinants of cytotoxicity and morphological transformation. *Carcin.*, 8, p. 803-808.

Bisson M., Houeix N., Hulot C., Lacroix G., Lefevre J.-P., Leveque S., Magaud H., Morin A. (2006) - Arsenic et ses dérivés inorganiques. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. INERIS, 77 p.

Bodénan F., Baranger P., Piantone P., Lassin A., Azaroual M., Gaucher E., Braibant G. (2004) - Arsenic behaviour in gold-ore mill tailings, Massif Central, France: hydrogeochemical study and investigation of in situ redox signatures. *Appl. Geochem.*, 19, p. 1785-1800.

Bonnemaison M. (2005) - L'eau, facteur de libération de l'arsenic naturel. *Géosciences*, 2, p. 54-59.

Boudène C. (2001) - Sur le risque sanitaire lié à la présence d'arsenic dans l'eau minérale naturelle alimentant les établissements thermaux selon la concentration en arsenic de l'eau et l'orientation thérapeutique pratiquée. *Bull. Acad. Nat. Méd.*, 185, p. 1587-1599.

Boyle D.R., Turner R. J.W., Hall G.E.M. (1998) - Anomalous arsenic concentrations in groundwaters of an island community, Bowen Island, British Columbia. *Environ. Geochem. Health*, 20, p. 199-212.

Brahic A., Hoffert M., Schaaf A., Tardy M. (1999) - Sciences de la Terre et de l'Univers. Vuibert, Paris, 634 p.

BRGM (2000) - Classeur Gestion des sites (potentiellement) pollués - Version 2. BRGM, Orléans. ([http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr/GuidesMethodologiques/GuidesEvaluations/EvaluationSimplifiee/TelechargementESR/ClassGestionSites\(pot\)Pollues-ESR.exe](http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr/GuidesMethodologiques/GuidesEvaluations/EvaluationSimplifiee/TelechargementESR/ClassGestionSites(pot)Pollues-ESR.exe)).

Bril H., Floc'h J.-P. (2001) - Le devenir des métaux provenant des anciennes mines ; l'exemple du Massif central français. *Géologues*, 130/131, p. 233-241.

Buschmann J., Berg M., Stengel C., Sampson M.L. (2007) - Arsenic and Manganese Contamination of Drinking Water Resources in Cambodia: Coincidence of Risk Areas with Low Relief Topography. *Environ. Sci. Technol.*, 41, p. 2146-2152.

Cáceres L., Gruttner E., Contreras R. (1992) - Water recycling in arid regions - Chilean case. *Ambio*, 2, p. 38-44.

Calvet R., Barriuso E., Bedos C., Benoît P., Charnay M.-P., Coquet Y. (2005) - Les pesticides dans le sol. Conséquences agronomiques et environnementales. Editions France Agricole, 637 p.

Canorel F. (2007) - Traquer l'invisible Orfila & le test de March. Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 29 p. (<http://www.toxipedia.org/wiki/download/attachments/1060/Traquer.Orfila.Marsh.pdf?version=1%20->).

Castello M. & Bouchi-Lamontagne M. (2007) - L'après-mine en France. BRGM, Orléans, 48 p. (<http://www.brgm.fr/dcenewsFile?ID=529>).

Castro T.L. (2006) - Arsenic contamination of groundwater in Nicaragua. In Workshop of As distribution in Ibero-America, Centro Atómico Constituyentes, San Martín, Prov. de Buenos Aires, Argentina. November 27-30, 2006. Litter M. I. (éd.). CNEA-AGENCIA-CYTED-UNSAM, p. 115-116.

Castro de Esparza M.L. (2008) - The presence of arsenic in drinking water in Latin America and its effect on public health. In Natural Arsenic in Groundwater of Latin America. Proceedings of the International Congress on Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America, Mexico City, 20-24 June 2006. Vol. 1. Bundschuh J. (éd.). CRC Press, Boca Raton, Floride (États-Unis), p. 17-29.

Celik I., Gallicchio L., Boyd K., Lam T.K., Matanoski G., Tao X., Shiels M., Hammond E., Chen L., Robinson K.A., Caulfield L.E., Herman J.G., Guallar E., Alberg A.J. (2008) - Arsenic in drinking water and lung cancer : A systematic review. *Environ. Res.*, 108, p. 48-55.

Chakraborti D., Mukherjee S.C., Pati S., Sengupta M.K., Rahman M.M., Chowdhury U.K., Lodh D., Chanda C.R., Chakraborti A.K., Basu G.K. (2003) - Arsenic Groundwater Contamination in Middle Ganga Plain, Bihar, India: A Future Danger? *Environ. Health Persp.*, 111, p. 1194-1201.

Chakraborti D., Rahman M.M., Paul K., Chowdhury U.K., Sengupta M.K., Lodh D., Chanda C.R., Saha K.C., Mukherjee S.C. (2002) - Arsenic calamity in the Indian subcontinent. What lessons have been learned? *Talanta*, 58, p. 3-22.

Chakraborti D., Samanta G., Mandal B.K., Chowdhury T.R., Chanda C.R., Biswas B.K., Dhar R.K., Basu G.K., Saha K.C. (1998) - Calcutta's industrial pollution: Groundwater arsenic contamination in a residential area and sufferings of people due to industrial effluent discharge - An eight-year study report. *Curr. Sci.* 74, p. 346-355.

Chakraborti D., Sengupta M.K., Rahman M.M., Ahamed S., Chowdhury U.K., Hossain Md.A., Mukherjee S.C., Pati S., Saha K.C., Dutta R.N., Quamruzzaman Q. (2004) - Groundwater arsenic contamination and its health effects in the Ganga-Meghna-Brahmaputra plain. *J. Environ. Monit.*, 6, p. 74N-83N.

Charles P. (1999) - Bilan des concentrations en nickel et arsenic dans la ressource. *Techniques - Sciences - Méthodes*, 11, p. 68-74.

Chen C.J., Kuo T.L., Wu M.M. (1988) - Arsenic and cancers. *Lancet*, 1: p. 414-415.

Chéry L. (2006) - Guide technique qualité naturelle des eaux souterraines. Méthodes de caractérisation des états de référence des aquifères français. BRGM, Orléans, 238 p.

Chilvers D.C., Peterson P.J. (1987) - Global cycling of arsenic. In: Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the environment. Scope 31. Hutchinson T.C. & Meema K.M. (eds). Wiley & Sons, Baffins Lane (Royaume-Uni), p. 279-301.

Clemenza M., Fiorini E., Guerra L., Herborg C., Labra M., Orvini E., Piazzoli A., Previtali E., Puggioni F., Santagostino A. (2008) - Misure con attivazione neutronica sulla presenza di arsenico nei capelli di Napoleon Bonaparte e di suoi famigliari. // *Nuovo Saggiatore*, 24, p. 19-30.

COBIAS - Le projet COBIAS (<http://www.cobias.brgm.fr>)

Cour des Comptes (2005) - Rapport au président de la République. Suivi des réponses des administrations, collectivités, organismes et entreprises 2005. L'État face aux enjeux industriels et environnementaux : l'exemple des mines d'or de Salsigne, p. 87-94.

Culioli J.-L., Ferrandini J., Ferrandini M., Furt J.-M., Khoumeri B., Mori C., Orsini A., Romani P.-M. (2008) - La mine d'arsenic de Matra et la contamination de la Bravona (Corse). 13th IWRA World Water Congress 2008. 1-4 september, Montpellier, France (<http://www.worldwatercongress2008.org>).

Daniau C. (2003) - Utilisation des facteurs d'émission pour estimer les rejets de la combustion de charbon dans les centrales de production thermique. MEDD, 30 p. (<http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/annexeC.pdf>).

Datta D.V., Kaul M.K. (1976) - Arsenic content of drinking water in villages in Northern India. A concept of arsenicosis. *The Journal of the Association of Physicians of India*, 24, p. 599-604.

De Sastre M.S.R., Varillas A., Kirschbaum P. (1992) - Arsenic content in water in the northwest area of Argentina. In International Seminar Proceedings : Arsenic in the Environment and Its Incidence on Health. Sancha A. M (ed.). Universidad de Chile, Santiago (Chili), p. 91-99.

Deschamps E., Ciminelli V.S.T., Lange F.T., Matschullat J., Raue B., Schmidt H. (2004) - Soil and Sediment Geochemistry of the Iron Quadrangle, Brazil - The Case of Arsenic. *J. Soil. Sed.*, 4, p. 216-222.

Del Razo L.M., Arellano M.A., Cebrian M.E. (1990) - The oxidation states of arsenic in well water from a chronic arsenicism area of northern Mexico. *Environ. Pol.*, 64, p. 143-153.

Dictor M.C., Baranger P., Chéry L., Michel K., Barbier J., Clozel B., Touzé S., Le Gall A C., Brosselin P. (2004) - Synthèse des travaux de R&D en France (1999-2004) sur la thématique Arsenic. BRGM/RP-53252-FR, 130 p.

Dictor M.C., Battaglia-Brunet F., Garrido F., Deluchat V., Michon J., Dagot C., Godon J.-J., Bru V., Deloustal J. (2007) - Décontamination d'arsenic dans l'eau par oxydation biologique a l'aide de Thiomonas « As-thiox ». Compte rendu de fin de recherche d'opération d'une recherche financée par le ministère de la jeunesse, de l'éducation et de la recherche. BRGM, 160 p.

Dobran S., Zagury G.J. (2006) - Arsenic speciation and mobilization in CCA-contaminated soils: Influence of organic matter content. *Sci. Tot. Environ.*, 364, p. 239-250.

DRIRE Alsace. Industrie et Environnement en Alsace (<http://www.industrie-environnement-alsace.fr/eau/pollution-toxique.htm>).

DRIRE Alsace, MEDAD & Agence de l'Eau Rhin-Meuse (2007) - Action régionale de Recherche et de Réduction des Rejets de Substances Dangereuses dans l'Eau par les installations classées. Synthèse 2007 des résultats pour la région Alsace. DRIRE Alsace - MEDAD - Agence de l'Eau Rhin-Meuse-INNERIS, 77 p.

DRIRE Centre (2006) - Valorisation des campagnes substances dangereuses réalisées dans les rejets des installations classées en région Centre : synthèse. Rapport final. IRH Environnement, Vandoeuvre-lès-Nancy, 100 p.

DRIRE Champagne-Ardenne, Agence de l'Eau Seine-Normandie & Agence de l'Eau Rhin-Meuse (2008) - Action régionale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau par les installations classées, d'autres installations et les stations d'épuration urbaines. Synthèse des résultats des deux campagnes de mesure réalisées sur la région Champagne-Ardenne. DRIRE Champagne-Ardenne-Agence de l'Eau Seine-Normandie-Agence de l'Eau Rhin-Meuse-INNERIS, 94 p.

DRIRE-DIREN Nord-Pas-de-Calais. IRE 2008 EAU. Pollution toxique. (http://www.nord-pas-de-calais.drivre.gouv.fr/environnement/ire2008/IREen2007_web/Images/3-Eau/309-PollutionToxique.pdf).

DRIRE Limousin (2007a) - La prévention des pollutions et des risques industriels - Bilan 2007. IV. L'après mines : 44-47. (http://www.limousin.drivre.gouv.fr/environnement/plaquette2007/Apres_mine.pdf).

DRIRE Limousin (2007b) - Rapport d'activité 2007. Objectifs 2008. (http://www.limousin.drivre.gouv.fr/publications/rapp_act_2007/RAPPORT_2008.pdf).

DRIRE Limousin (2007c) - Synthèse des principaux rejets aqueux et atmosphériques en Limousin pour l'année 2007. (<http://www.limousin.drivre.gouv.fr/environnement/ap%20en%20ligne/2T2005/87/AP%20CHENI.pdf>).

DRIRE Lorraine, Préfecture de la Région Lorraine & Agence de l'Eau Rhin-Meuse (2007) - Action régionale de Recherche et de Réduction des Rejets de Substances Dangereuses dans l'Eau par les Installations classées. Synthèse 2007 des résultats pour la région Lorraine. DRIRE Lorraine-Agence de l'Eau Rhin-Meuse-INNERIS, 86 p. (www.eau-rhin-meuse.fr/...dangereuses/Brochure_lorraine_vf_26_02_08.pdf -).

DRIRE PACA (2007) - Action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau par les installations classées et les stations d'épuration urbaines. Rapport d'étape. Région Provence, Alpes, Côte d'Azur 2002-2006. Résultat factuels de la campagne. Décembre 2007. DRIRE PACA, 36 p. (<http://www.paca.drivre.gouv.fr/environnement/index.html>).

DRIRE Picardie. Environnement. Bilan de l'environnement 2008. Glossaire. (http://www.picardie.drire.gouv.fr/environnementV2/New/Publications/Site_bilan2008/html/glossaire.html).

Duker A.A., Stein A., Hale M. (2006) - A statistical model for spatial patterns of Buruli ulcer in the Amansie West district, Ghana. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 8, p. 126-136.

Elbaz-Poulichet F., Bruneel O., Casiot C. (2006) - The Carnoules mine. Generation of As-rich acid mine drainage, natural attenuation processes and solutions for passive in-situ remediation. Difpolmine (Diffuse Pollution From Mining Activities), Montpellier. hal-00184269, version 1. (http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00184269_v1).

E-PRTR. - Registre européen des rejets et des transferts de polluants. (<http://www.eper.ec.europa.eu>).

Fabriol R. (2005) - La gestion de l'eau des mines en phase post-extractive. *Géosciences*, 2 : p. 66-71.

FAO (2009) - Glossaire de la biotechnologie pour l'alimentation et l'agriculture. (http://www.fao.org/biotech/index_glossary.asp?lang=fr).

Favreau-Colombier J. (1999) - Marie Besnard, le procès du siècle. Privat, Toulouse, 448 p.

Fournier R.O., Thompson J.M., Hutchison R.A. (1986) - Fluctuations in composition of Cistern Spring, Norris Geyser Basin, Yellowstone National Park, Wyoming. Variable boiling and mixing 1962-1985. In Proceeding of the 5th Water-Rock Interaction Symposium, Reykjavik (Islande), p. 206-209.

Frost F., Frank D., Pierson K., Woodruff L., Raasina B., Davis R., Davies J. (1993) - A seasonal study of arsenic in groundwater, Snohomish County, Washington, USA. *Environ. Geochem. Health*, 15, p. 209-214.

FUTURA-SCIENCE (2009) - Accueil. Glossaire. (<http://www.futura-sciences.com/fr/sciences/glossaire/alphabetique>).

Garda-Villanova R.J., Rodriguez Torrero P., Fonseca I.T., Gonzales Paramas A.M., Gomez Barez J.A., Marco C.C. (2005) - Arsenic in ground drinking water. The regional monitoring plan of Castilla y León (Spain). *Eur. J. Wat. Qual.*, 36, p. 107-117.

Geiszinger A., Goessler W., Kosmus W. (2002) - Organoarsenic compounds in plants and soil on top of an ore vein. *Appl. Organomet. Chem.*, 16, p. 245-249.

GEODERIS (2009) - (<http://www.geoderis.fr>).

GEREP - Gestion Electronique du Registre des Émissions Polluantes. (<https://www.declarationpollution.ecologie.gouv.fr/gerep>).

Geyer L. (1977) - Ueber die chronischen Hautveränderungen beim Arsenicismus und Betrachtungen. *Archiv für Dermatologie und Syphilis*, 43, p. 221.

Goldblatt E.L., Vandenburg A.S., Marsland R.A. (1963) - The unusual and widespread occurrence of arsenic in well waters of Lane County, Oregon. Oregon Department of Public Health, Portland, 24 p.

Gosselin R.E., Smith R.P., Hodge H.C. (1984) - Clinical toxicology of commercial products. 5th ed. Williams & Wilkins, Baltimore.

Gouzy A., Brignon J.-M. (2008) - Arsenic et composés inorganiques : panorama des principaux émetteurs. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France. INERIS, 64 p. (http://www.ineris.fr/rsde/fiches_technico.php).

Grantham D.A., Jones J.F. (1977) - Arsenic contamination of water wells in Nova Scotia. *J. Am. Wat. Works Ass.*, 69, p. 653-657.

Grosbois C., Bril H., Floc'h J.-P. (2006) - L'arsenic dans le bassin versant de l'Isle amont, de La Meyze (Haute Vienne) à Cognac (Dordogne) : état des lieux et comportement. Université de Limoges, Limoges, 16 p.

Gunduz O., Simsek C., Hasozbek A. (2009) - Arsenic Pollution in the Groundwater of Simav Plain, Turkey : Its Impact on Water Quality and Human Health Water, Air, & Soil Pollution, 202 (sous-presses) doi:10.1007/s11270-009-0055-3.

Gurzau E.S., Gurzau A.E. (2001) - Arsenic in drinking water from groundwater in Transylvania, Romania. In Arsenic Exposure and Health Effects. Chappell W. R., Abernathy C. O. & Calderon R. L. (éds.). Elsevier, Amsterdam, p. 181-184.

Harrington J.M., Middaugh J.P., Morse D.L., Housworth J. (1978) - A survey of population exposed to high concentrations of arsenic in well water in Fairbanks, Alaska. *Am. J. Epid.*, 108, p. 377-385.

Hauptert T.A. (1994) - Arsenic in Drinking Water Supply Wells in Outagamie and Winnebago Counties, WI : Study of Possible Health Effects. Thèse de Master de l'Université Green Bay du Wisconsin. Green Bay, Wisconsin (États-Unis).

Heinrichs G., Udluft P. (1999) - Natural arsenic in Triassic rocks: a source of drinking-water contamination in Bavaria, Germany. *Hydrogeol. J.*, 7, p. 468-476.

Helynck B., Ledrans M. (1998) - Évaluation de l'impact sur la santé de l'exposition à l'arsenic des populations du canton de Ferrette. Agence de l'eau Rhin-Meuse, Rapport d'études n° 22316, 41 p.

Herdianita N.R., Priadi B. (2008) - Arsenic and Mercury Concentrations at Several Geothermal Systems in West Java, Indonesia. *ITB J. Sci.*, 40 A, p. 1-14.

Hill M. (1754) - Traité des Pierres de Théophraste traduit du grec. Herissant, Paris, 287 p.

Hirano S., Cui X., Li S., Kanno S., Kobayashi Y., Hayakawa T., Shraim A. (2003) - Difference in uptake and toxicity of trivalent and pentavalent inorganic arsenic in rat heart microvessel endothelial cells. *Arch. Toxicol.*, 77, p. 305-312.

Hotta N. (1989) - Clinical aspects of chronic arsenic poisoning due to environmental and occupational pollution in and around a small refining spot. *Jap. J. Constit. Med.*, 53, p. 49-59.

Hu J., Liu Y.-F., Wu C.-F., Xu F., Shen Z.-X., Zhu Y.-M., Li J.-M., Tang W., Zhao W.-L., Wu W., Sun H.-P., Chen Q.-S., Chen Q., Zhou G.-B., Zelent A., Waxman S., Wang Z.-Y., Chen S.-J., Chen Z. (2009) - Long-term efficacy and safety of all-trans retinoic acid/arsenic trioxide-based therapy in newly diagnosed acute promyelocytic leukemia. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 106, p. 3342-3347.

Hwang D.R., Tsai Y.C., Lee J.C., Huang K.K., Lin R.K., Ho C.H., Chiou J.M., Lin Y.T., Hsu J.T.A., Yeh C.T. (2004) - Inhibition of hepatitis C virus replication by arsenic trioxide. *Antimicrob. Agents Chemother*, 48, p. 2876-2882.

IARC (2004) - IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 84. Some Drinking-water Disinfectants and Contaminants, including Arsenic. IARC, Geneva, 512 p. (<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol84/index.php>).

IFREMER (2009). IFREMER Environnement. Accueil. Glossaire. (<http://wwz.ifremer.fr/envlit/infos/glossaire>).

INERIS (2007) - Élaboration de nouvelles valeurs toxicologiques de référence pour l'arsenic. Rapport d'étude 01/10/2007, n° INERIS-DRC-07-83451-12360A. DRC-08, 41 p.

Inspection des Installations Classées (2009) - Traitement des rejets. (<http://installationsclassées.ecologie.gouv.fr/5-Traitements-des-rejets.html>).

IREP - Registre français des émissions polluantes sur Internet, de l'INERIS. (<http://www.irep.ecologie.gouv.fr/IREP/index.php>).

Islam F.S., Gault A.G., Boothman C., Polya D.A., Charnock J.M., Chatterjee D., Lloyd J.R. (2004) - Role of metal-reducing bacteria in arsenic release from Bengal delta sediments. *Nature*, 430, p. 68-71.

Jacquemin P., Arguillat M., Tuphé R., Le Guen S., Boisson J., Pottecher G., Ruttens A., Vangronsveld J., Saunal B. (2006) - Réhabilitation du site minier de la Combe du Saut : une combinaison du confinement des déchets et de la phytostabilisation des sols. *Travaux*, 831, p. 56-66.

Jain C.K., Ali I. (2000) - Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques. *Wat. Res.*, 34, p. 4304-4312.

Johnston R., Heijnen H., Wurzel, P. (2001) - Safe Water Technology. In United Nations Synthesis Report on Arsenic in Drinking Water. World Health Organisation, Geneva, 98 p.

Jonnalagadda S.B., Nenzou G. (1996) - Studies on arsenic rich mine dumps: II. Effect on the river water. *J. Environ. Sci. Health, Part A*, 31, p. 2547-2555.

Kahelin H., Järvinen K., Forsell P., Valve M. (1998) - Arsenic in drilled wells - comparison of arsenic removal methods. Geological Survey of Finland, Report of Investigation 141, Espoo, 27 p.

Katsoyiannis I., Katsoyiannis A. (2006) - Arsenic and Other Metal Contamination of Groundwaters in the Industrial Area of Thessaloniki, Northern Greece. *Environ. Monitor. Assess.*, 123, p. 393-406.

Kim M.-J, Nriagu J., Haack S. (2002) - Arsenic species and chemistry in groundwater of southeast Michigan. *Environ. Poll.*, 120, p. 379-390.

Kinoshita K., Kaize T. (2008) - Environmental pollution caused by phenylarsenic compounds related to chemical warfare agents. In Arsenic in the environment. Arsenic from nature to humans. Book of Abstracts. 2nd international Congress, Valencia, 21-23 may 2008, p. 359.

Komnitsas K., Xenidis A., Adam K. (1995) - Oxidation of pyrite and arsenopyrite in sulphidic spoils in Lavrion. *Min. Eng.*, 8, p. 1443-1454.

Kondo H., Ishiguro Y., Ohno K., Nagase M., Toba M., Takagi M. (1999) - Naturally occurring arsenic in the groundwaters in the southern region of Fukuoka Prefecture, *Japan. Wat. Res.*, 33, p. 1967-1972.

Konkola K. (1992) - More Than a Coincidence? The Arrival of Arsenic and the Disappearance of Plague in Early Modern Europe. *J. Hist. Med. Al. Sci.*, 47, p. 186-209.

Kumi-Boateng B. (2007) - Assessing the spatial distribution of arsenic concentration from goldmine for environmental management at Obuasi, Ghana. Thèse de l'International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede (Pays-Bas), 66 p.

Kurtio P., Pukkala E., Kahelin H., Auvinen A., Pekkanen J. (1999) - Arsenic Concentrations in Well Water and Risk of Bladder and Kidney Cancer in Finland. *Environ. Health Persp.*, 107, p. 705-710.

Lansiart M., Sauter M. (1983) - Constat d'impact de la mine d'or de Cheni (Haute-Vienne). BRGM Report 83 SGN 721 ENV.

Laperche V., Bodénan F., Dictor M.-C., Baranger P. (2003) - Guide méthodologique de l'arsenic appliqué à la gestion des sites et sols pollués. BRGM/RP-52066-FR, 91 p.

La Rédaction (2007) - L'après-mine aux mines d'or de Salsigne. *Géologues*, 154, p. 34-43.

Laville-Timsit L., Artignan D., Husson Y., Gandolfi J.-M., Delbos R. (1993) - Cartographie régionale des concentrations en métaux lourds dans les sols. Essai de corrélation avec la qualité des eaux souterraines. Phase III : Interprétation, synthèse. BRGM/R 36862 4S/ENV 93, 12 p.

Leblanc M., Achard B., Ben Othman D., Luck J. M., Bertrand-Sarfati J., Personne J.-C. (1996) - Accumulation of arsenic from acidic mine waters by ferruginous bacterial accretions (stromatolites). *Appl. Geochem.*, 11, p. 541-54.

Ledrans M., Grossier P. (1998) - Contamination des eaux de consommation par l'arsenic. Approche du risque sanitaire en France. Réseau National de Santé Publique, Saint-Maurice (France), 60 p.

Leduc L. (2003) - CHENI SA. - Usine des Farges à Saint-Yrieix-la-Perche - mesures de mises en sécurité. Rapport de l'Inspecteur des Installations Classées du 28 août 2003 à la Préfecture de la Haute-Vienne, DRCL - Bureau de l'Urbanisme et de l'Environnement, 3 p. (<http://www.limousin.drire.gouv.fr/environnement/ap%20en%20ligne/4eme-trim-2004/sub87/RAP-CHENI.pdf>).

Leduc C., Husson Y., Viallefond L. (1996) - Atlas géochimique des éléments métalliques du bassin Loire-Bretagne. BRGM/N 2234.

Lee J.-S., Chon H.T. (2008) - Human risk assessment of arsenic in the vicinity of abandoned Myungbong Au-Ag mine site, Korea. In Arsenic in the environment. Arsenic from nature to humans. Book of Abstracts. 2nd international Congress, Valencia, 21-23 may 2008, p. 415-416.

Lenoble V. (2003) - Élimination de l'Arsenic pour la production d'eau potable : oxydation chimique et adsorption sur des substrats solides innovants. Thèse de l'Université de Limoges, Limoges, 153 p.

Lenoble V., Bouras O., Deluchat V., Serpaud B., Bollinger J.C. (2002) - Arsenic adsorption onto pillared clays and iron oxides. *J. Coll. Inter. Sci.*, 255, p. 52-58.

Lindberg A.-L., Goessler W., Gurzau E., Koppova K., Rudnai P., Kumar R., Fletcher T., Leonardi G., Slotova K., Gheorghiu E., Vahter M. (2006) - Arsenic exposure in Hungary, Romania and Slovakia. *J. Environ. Monitor.*, 8, p. 203-208.

Liu J., Zheng B., Aposhian H. V., Zhou Y., Chen M.-L., Zhang A., Waalkes M.P. (2002) - Chronic arsenic poisoning from burning high-arsenic-containing coal in Guizhou, China. *Environ. Health Persp.*, 110, p. 119-122.

López D.L., Ransom L., Monterrosa J., Soriano T., Barahona F., Olmos R., Bundschuh J. (2008) - Volcanic arsenic and boron pollution of Ilopango lake, El Salvador. In Natural Arsenic in Groundwater of Latin America. Proceedings of the International Congress on Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America, Mexico

City, 20-24 June 2006. Vol. 1. Bundschuh J. (éd.). CRC Press, Boca Raton, Floride (Etats-Unis), p. 129-143.

Ma H.Z., Xia Y.J., Wu K.G., Sun T.Z., Mumford J.L. (1999) - Arsenic exposure and health effects in Bayingnormen, Inner Mongolia. *In* Arsenic Exposure and Health Effects. Chappell W. R., Abernathy C. O. & Calderon R. L. (eds.). Elsevier, Amsterdam, p. 127-131.

Mandal B.K., Suzuki K.T. (2002) - Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 58, p. 201-235.

Manganelli A., Goso C., Guerequiz R., Fernández Turiel J.L., García Vallès M., Gimeno D., Pérez C. (2007) - Groundwater arsenic distribution in South-western Uruguay. *Environ. Geol.*, 53, p. 827-834.

Manning B.A., Goldberg S. (1997) - Adsorption and Stability of Arsenic III at the Clay Mineral-Water Interface. *Environ. Sci. Technol.*, 31, p. 2005-2011.

Mass M.J., Tennant A., Roop B.C., Cullen W.R., Styblo M., Thomas D.J., Kligerman A.D. (2001) - Methylated trivalent arsenic species are genotoxic. *Chem. Res. Toxicol.*, 14, p. 355-361.

Masscheleyn P.H., DeLaune R.D., Patrick W.H. Jr. (1991) - Effect of redox potential and pH on arsenic speciation and solubility in a contaminated soil. *Environ. Sci. Technol.*, 25, p. 1414-1419.

Matisoff G., Khourey C.K., Hall J.F., Varnes A.W., Strain W.H. (1982) - The Nature and Source of Arsenic in Northeastern Ohio. *Ground Water*, 20, p. 446-456.

Matschullat J. (2000) - Arsenic in the geosphere – a review. *Sci. Tot. Environ.*, 249, p. 297-312.

Mazumder D.N.G. (2001) - Diagnosis and treatment of chronic arsenic poisoning. In United Nations Synthesis Report on Arsenic in Drinking Water. World Health Organisation, Geneva, 390 p. (http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/arsenic3/en/print.html).

MEDD (2004) - Bilan des rejets industriels en France. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques. (http://www.eaufrance.fr/docs/industrie/rejets_industriels/2004/accueil.htm).

Michel C., Jean M., Coulon S., Dictor M.-C., Delorme F., Morin D., Garrido F. (2007) - Biofilms of As(III)-oxidising bacteria: formation and activity studies for bioremediation process development. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 77, p. 457-467.

Michel P. (1993) - L'arsenic en milieu marin. Biogéochimie et Ecotoxicologie. Repères Océans n° 4. IFREMER, Plouzané, 62 p.

Michon J. (2006) - Étude de l'oxydation biologique de l'arsenic As(III) par le consortium bactérien CAsO1 : mise au point de méthodes de détection et application à la détoxification d'effluents. Thèse de l'Université de Limoges, Limoges, 239 p.

Midzic S., Silajdzic I. (2005) - Bosnia and Herzegovina. In Wolkersdorfer C. & Bowell R. Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe. *Mine Wat. Environ. Supplementary Material* (24/3), p. 47-50.

Midzic S., Silajdzic I. (2005) - Serbia and Montenegro. In Wolkersdorfer C. & Bowell R. Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe., *Mine Wat. Environ. Supplementary Material* (24/3), p. 45-47.

Milhan S. Jr., Strong T. (1974) - Human arsenic exposure in relation to a copper smelter. *Environ. Res.*, 7, p. 176-182.

Miramond N., Miau D., Brochard F. (2006) - Diagnostic du phénomène Drainage Minier Acide sur des mines d'or primaire en Guyane française - Évaluation des risques associés. GEM Impact-DIREN, Guyane Française, 110 p.

Montgomery D. L., Ayotte J. D., Carroll P. R., Hamlin P. (2003) - Arsenic concentration in private bedrock wells in southeastern New Hampshire.

Morgada M.E., Mateu M., Bundschuh J., Litter M.I. (2008) - Arsenic in the Iberoamerican region. The IBEROARSEN Network and a possible economic solution for arsenic removal in isolated rural zones. *e-Terra*, 5 (5), 11 p. (http://e-terra.geopor.pt/eng/index_en1.html).

Morin G., Juillot F., Casiot C., Bruneel O., Personne J.-C., Elbaz-Poulichet F., Leblanc M., Ildefonse P., Calas G. (2003) - Bacterial Formation of Tooeleite and Mixed Arsenic(III) or Arsenic(V)-Iron(III) Gels in the Carnoulès Acid Mine Drainage, France. A XANES, XRD, and SEM Study. *Environ. Sci. Technol.*, 37, p. 1705-1712.

Mosaferi M., Yunesian M., Mesdaghinia A., Naidu A., Nasser S., Mahvi A.H. (2003) - Arsenic occurrence in drinking water of I.R. of Iran: the case of Kurdistan province. In Fate of arsenic in the environment. Ahmed M.F., Ali M.A. & Adeel Z. (éds.). Proceedings of the BUET-UNU International Symposium, International Training Network Centre, Bangladesh University of Engineering and Technology, United Nations University, Tokyo, p. 1-6.

Mosaferi M., Yunesian M., Mesdaghinia A.R., Nasser S., Mahvi A.H., Nadim H. (2005) - Correlation between Arsenic Concentration in Drinking Water and Human Hair. Iran. *J. Environ. Health Sci. Eng.*, 2, p. 13-21.

Mukherjee A., Sengupta M.K., Hossain M.A., Ahamed S., Das B., Nayak B., Lodh D., Rahman M.M., Chakraborti D. (2006) - Arsenic Contamination in Groundwater: A Global Perspective with Emphasis on the Asian Scenario. *J. Health. Pop. Nut.*, 24, p. 142-163.

Müller D. (2004) - Analyse génétique et moléculaire du stress arsenic de souches bactériennes isolées d'environnement contaminés par l'arsenic. Thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 166 p.

Nadakavukaren J.J., Ingermann R.L., Jeddloh G., Falkowski S.J. (1984) - Seasonal variation of arsenic concentration in well water in Lane County, Oregon. *Bulletin of Environ Cont.Toxicol.*, 33, p. 264-269.

Navoni A., De Pietri D., Piñeiro A., Villaamil E.C. (2008) - Geo-referencing of drinking water arsenic content in Buenos Aires province - Argentina. In Arsenic in the environment. Arsenic from nature to humans. Book of Abstracts. 2nd international Congress, Valencia, 21-23 may 2008, p. 397.

Nguyen V.A., Bag S., Viet P.-H., Kim K.-W. (2009) - Contamination of groundwater and risk assessment for arsenic exposure in Ha Nam province, Vietnam. *Environ. Int.*, 35, p. 466-472.

Nickson R.T., McArthur J.M., Shrestha B., Kyaw-Myint T.O., Lowry D. (2005) - Arsenic and other drinking water quality issues, Muzaffargarh District, Pakistan. *Appl. Geochem.*, 20, p. 55-68.

Nicolli H.B., Suriano J.M., Gomez Peral M.A., Ferpozzi L.H., Baleani O.A. (1989) - Groundwater Contamination with Arsenic and Other Trace Elements in an Area of the Pampa, Province of Córdoba, Argentina. *Environ. Geol. Wat. Sci.*, 14, p. 3-16.

Niemec D. (2005) - Ancien site industriel et minier des Farges (Saint-Yrieix-la-Perche). Cheni SA, propositions de prescriptions des travaux de réhabilitation du site. DRIRE Limousin, R-2005-04-102 DN/DN, 11 p.

Niemec D. (2007) - Bilan 2006 (et perspectives 2007). Mise en sécurité en après-mine et aspects environnementaux des anciens sites miniers en Limousin. DRIRE Limousin, 28 p.

Nimick D.A., Moore J.N., Dalby C.E., Savka M.W. (1998) - The Fate of Geothermal Arsenic in the Madison and Missouri Rivers, Montana and Wyoming. *Wat. Resources Res.*, 34, p. 3051-3067.

Nriagu J. (2002) - Arsenic Poisoning Through the Ages. In Environmental Chemistry of arsenic. Williams T.F. Jr. (ed.), Marcel Dekker Inc., New York-Basel, p. 1-26.

OMS (1994) - Directives de qualité pour l'eau de boisson, Deuxième édition, Volume 1: Recommandations. OMS, Genève, 204 p.

OMS (2009a) - L'arsenic dans l'eau de boisson. (<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs210/fr>).

OMS (2009b) - Les maladies liées à l'eau. Arsénicose. (http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/arsenicosis/fr/index.html).

ORE (2009) - Répertoire des acteurs de l'environnement - Poitou-Charentes. Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales - Deux-Sèvres (DDASS79). Observatoire Régional de l'Environnement Poitou-Charentes. (http://www.observatoire-environnement.org/acteur/rubrique-imprim.php3?id_rubrique=66).

Ortiz-Escobar M.E., Hue N.V., Cutler W. (2006) - Recent developments on arsenic: contamination and remediation. In Recent research developments in bioenergetics. Volume 4. Pandalai S.G. (ed.). Transworld Research Network, Keral, Inde, p. 1-32.

Page G.W. (1981) - Comparison of groundwater and surface water for patterns and levels of contamination by toxic substances. *Environ. Sci. Technol.*, 15, p. 1475-1481.

Pandey P.K., Khare R.N., Sharma R., Sar S.K., Pandey M., Binayake P. (1999) - Arsenicosis and deteriorating groundwater quality: Unfolding crisis in central-east Indian region. *Curr. Sci.*, 77, p. 686-693.

Parga J.R., Cocke D.L., Valenzuela J.L., Gomes J.A., Kesmez M., Irwin G., Moreno H., Weir M. (2005) - Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera Mexico. *J Hazard.Mat.*, B124, p. 247-254.

Peirera M.R., Àvila P.F. (2006) - Arsenic contamination of surface and groundwater in sulfide-rich environments. Case studies from Portugal. In Workshop of As distribution in Ibero-America, Centro Atómico Constituyentes, San Martín, Prov. de Buenos Aires, Argentina. November 27-30, 2006. Litter M. I. (éd.). CNEA-AGENCIA-CYTED-UNSAM, p. 105-106.

Petrusevski B., Sharma S., Schippers J.C., Shordt K. (2007) - Arsenic in Drinking Water. Thematic Overview Paper 17. McIntyre P. (éd.), IRC Int. Wat. San. Centre, 57 p. (www.irc.nl/content/download/.../TOP17_Arsenic_07.pdf).

Pfeifer H.-R., Hansen J., Hunziker J., Rey D., Schafer M., Serneels V. (1996) - Arsenic in Swiss soils and waters and their relation to rock composition and mining activity. In Contaminated soils: 3rd International Conference of Biogeochemistry of Trace Elements, Paris, May 15-19. Prost R. (éd.). D:/data/communic/ 050.PDF, Colloque 85. INRA, Paris.

Poisson A. (1899) - Cinq traités d'alchimie des plus grands philosophes : Paracelse, Albert le Grand, Roger Bacon, R. Lulle, Arn. de Villeneuve. Chacornac, Paris, 134 p. (http://www.ebook-esoterisme.com/livres/alchimie/5_traites_d_alchimie.pdf).

POLESSP - Pôle de compétences Sites et Sédiments Pollués. (<http://www.polessp.org>).

Projet COBIAS (2008) - Livrable D1. Cahier des charges. Solétanche Bachy, Saur & BRGM, 32 p.

Quintanilla J. (1992) - Evaluation of arsenic in bodies of superficial water of South Lipez of Bolivia (South-West). In International Seminar Proceedings: Arsenic in the

Environment and Its Incidence on Health. Sancha A. M (ed.). Universidad de Chile, Santiago (Chili), p. 109-121.

Rahman M.M., Sengupta M.K., Ahamed S., Chowdhury U.K., Lodh D., Hossain A., Das B., Roy N., Saha K.C., Palit S.K., Chakraborti D. (2005) - Arsenic contamination of groundwater and its health impact on residents in a village in West Bengal, India. *Bulletin of the World Health Organization*, 83, p. 49-57.

Rahman M.M., Sengupta M.K., Chowdhury U.K., Lodh D., Das B., Ahamed S., Mandal D., Hossain M.A., Mukherjee S.C., Pati S., Saha K.C., Chakraborti D. (2006) - Arsenic contamination incidents around the world. In *Managing arsenic in the environment*. Naidu R., Smith E., Owens G., Bhattacharya P. & Nadebaum P. (éds.). CSIRO, Collingwood (Australie), p. 3-30.

Ravault C., Fabres B., Ledrans M. (2002) - Exposition chronique à l'arsenic hydrique et risques pour la santé Bilan des données épidémiologiques Évaluation quantitative des risques sanitaires en Auvergne. Institut de veille sanitaire - Département santé environnement, Saint-Maurice (France), 108 p.

Ravenscroft P., Brammer H., Richards K.S. (2009) - Arsenic pollution. A global synthesis. Wiley-Blackwell, Ames, Iowa (États-Unis), 616 p.

Ritchie J.A. (1961) - Arsenic and antimony in New Zealand thermal waters. *New Zealand J. Sci.*, 4, p. 218-229.

Robertson F.N. (1989) - Arsenic in ground-water under oxidizing conditions, south-west United States. *Environ. Geochem. Health*, 11, p. 171-185.

Robinson B., Clothier B., Bolan N.S., Mahimairaja S., Greven M., Moni C., Marchetti M., van den Dijssel C., Milne G. (2004) - Arsenic in the New Zealand environment. In *SuperSoil 2004: 3rd Australian/New Zealand Soils Conference*, 5-9 December 2004, University of Sydney, Australia. The Regional Institute Ltd, Gosford (Australia), 8 p. (http://www.regional.org.au/au/asssi/supersoil2004/s3/oral/1418_robinsonb.htm).

Roussel C. (1998) - Hydrochimie, bilans géochimiques et spéciation de l'arsenic et des métaux Pb, Zn, Cu dans les haldes d'une ancienne mine d'or, Chéni, Haute-Vienne, France. Thèse de l'Université de Limoges, Limoges, France.

Royal Commission (1903) - Royal Commission Appointed to Inquire into Arsenical Poisoning from the consumption of beer and other articles of food or drink. Final report. Part I. Wyman & Sons, London.

RSDE : Action Nationale de Recherche et de Réduction des Rejets de Substances Dangereuses dans les Eaux. (<http://rsde.ineris.fr>).

SAGE de la Vienne (2008) - Diagnostic et objectifs du bassin de la Vienne. 75 p. (http://www.eptb-vienne.fr/IMG/pdf/diagnostic_sage_vienne.pdf).

Sancha A.M., Castro de Esparza M.L. (2008) - Facing the problem of contamination with arsenic in Latin America : Diagnosis, impact, and mitigation. In Arsenic in the environment. Arsenic from nature to humans. Book of Abstracts. 2nd international Congress, Valencia, 21-23 may 2008, p. 361.

Seddique A.A., Masuda H., Mitamura M., Shinoda K., Yamanaka T., Itai T., Maruoka T., Uesugi K., Ahmed K.M., Biswas D.K. (2008) - Arsenic release from biotite into a Holocene groundwater aquifer in Bangladesh. *Appl. Geochem.*, 23, p. 2236-2248.

Shuvaeva O.V., Bortnikova S.B., Korda T.M., Lazareva E.V. (2000) - Arsenic speciation in a contaminated gold processing tailings dam. *Geostand. Geoanalytic. Res.*, 24: p. 247-252.

SIG Mines France : SIG et données - Mines et exploitations. (http://sigminesfrance.brgm.fr/sig_exploitations.asp).

SIG Mines France (2009). L'Or. (<http://sigminesfrance.brgm.fr/telechargement/substances/Au.pdf>).

SIG Ressources minérales de la Guyane. Le projet SIG Guyane. (<http://gisguyane.brgm.fr/sig.htm>).

SITES POLLUES - Portail Sites-Pollués du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, dédié aux sites et sols (potentiellement) pollués ou radio-contaminés. (<http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr>).

Smedley P.L. (1996) - Arsenic in rural groundwater in Ghana. *Journal of African earth Sciences*, 22: p. 459-470.

Smedley P.L., Kinniburgh D.G. (2001) - Source and behaviour of arsenic in natural waters. In United Nations Synthesis Report on Arsenic in Drinking-Water, UNO, Geneva.

Smedley P.L., Kinniburgh D.G. (2002) - A review of the source behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.*, 17, p. 517-568.

Smedley P.L., Knudsen J., Maiga D. (2007) - Arsenic in groundwater from mineralised Proterozoic basement rocks of Burkina Faso. *Appl. Geochem.*, 22, p. 1074-1092.

Smedley P.L., Nicolli H.B., Barros A.J., Tullio JO (1998) - Origin and mobility of arsenic in groundwater from the Pampean Plain, Argentina. In Proceedings of the 9th International Symposium on Water-Rock Interaction, WRI-9, Taupo, New Zealand, 30 March–3 April 1998. Arehart G. B. & Hulston J. R. (eds.). Balkema, Rotterdam, p. 275-278.

Smith A.H., Goycolea M., Haque R., Biggs M.L. (1998) - Marked increase in bladder and lung cancer mortality in a region of northern Chile due to arsenic in drinking water. *Am. J. Epidemiol.*, 47, p. 660-669.

Smith E., Smith J., Smith L., Biswas T., Correll R., Naidu R. (2003) - Arsenic in Australian Environment: An Overview. *J. Environ. Sci. Health, Part A*, 38, p. 223-239.

Sorvari J., Schultz E., Rossi E., Joutti A., Lehtinen H., Vaajasaari K., Kauppila T. (2007) - Risk assessment of natural and anthropogenic arsenic in the Pirkanmaa region, Finland. Geological Survey of Finland, Espoo, 126 p.

Southwick J.W., Western A.E., Beck M.M., Whitley T., Isaacs R., Petajan J., Hansen C.D. (1983) - An epidemiological study of arsenic in drinking water in Millard County Utah. In *Arsenic: Industrial, Biomedical Environmental Perspectives*. Lederer W.H. & Fensterheim R.J. (eds.). Van Nostrand Reinhold Company, New York-Toronto-London-Melbourne, p. 210-225.

Stellman M., Stellman S.D., Christian R., Weber T., Tomasallo C. (2003) - The extent and patterns of usage of Agent Orange and other herbicides in Viêt Nam. *Nature*, 422, p. 681-687.

Styblo M., Del Razo L.M., Vega L., Germolec D.R., LeCluyse E.L., Hamilton G.A., Reed W., Wang C., Cullen W.R., Thomas D.J. (2000) - Comparative toxicity of trivalent and pentavalent inorganic and methylated arsenicals in rat and human cells. *Arch. Toxicol.*, 74, p. 289-299.

Sun G. (2004) - Arsenic contamination and arsenicosis in China. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, 198, p. 268-271.

Tandukar N., Bhattacharya P., Mukherjee A.B. (2001) - Preliminary assessment of arsenic contamination in groundwater in Nepal. In *Proceedings of the International Conference on Arsenic in the Asia-Pacific Region: Managing Arsenic for our Future*, 20-23 November 2001. CSIRO, Adelaide (Australia)-Glen Osmond (Australia), p. 103-105.

Terade H., Katsuta K., Sasagawa T., Saito H., Shirata H., Fukuchi K., Sekiya T., Yokoyama Y., Hirokawa S., Watanabe Y., Hasegawa K., Oshina T., Sekiguchi T. (1960) - Clinical observation of chronic toxicosis by arsenic. *Nihon Rinsho*, 118, p. 2394-2403.

Testud F. (1998) - Pathologie toxique en milieu de travail. Lacassagne, ESKA, Lyon, 447 p.

Thornton I., Farago M. (1997) - The geochemistry of arsenic. In *Arsenic Exposure and Health Effects*. Chappell W. R., Abernathy C. O. & Calderon R. L. (eds.). Chapman & Hall, London, p. 1-16.

Tsuchiya K. (1977) - Various effects of arsenic in Japan depending on type of exposure. *Environ. Health Persp.*, 19, p. 35-42.

Turpeinen R., Pantsar-Kallio M., Kairesalo T. (2002) - Role of microbes in controlling the speciation of arsenic and production of arsines in contaminated soils. *Sci. Tot. Environ.*, 285, p. 133-145.

Van Halem D., Bakker S.A., Amy G.L., van Dijk J.C. (2009) - Arsenic in drinking water : a worldwide water quality concern for water supply companies. *Drink. Wat. Eng. Sci.*, 2, p. 29-34.

Varsanyi I. (1989) - Arsenic in deep groundwater. In Proceedings of the 6th International Symposium on Water-rock interaction (WR1-6). Malvern. Miles D.L. (éd.). Balkema, Rotterdam, p. 715-718.

Vaughan D.J. (2006) - Arsenic. *Elements*, 2, p. 71-75.

Vink B.W. (1996) - Stability relations of antimony and arsenic compounds in the light of revised and extended Eh-pH diagrams. *Chem. Geol.*, 130, p. 21-30.

Voronov A.N. (2000) - Some features of mineral waters in Russia. *Environ. Geol.*, 39, p. 477-481.

Walker M., Benson M., Shaw D. (2005) - Significance of private water supply wells in a rural Nevada area as a route of exposure to aqueous arsenic. *J. Wat. Health*, 3, p. 305-312.

Wang L., Huang J. (1994) - Chronic arsenic from drinking water in some areas of Xinjiang, China. In Arsenic in the Environment. Part II : Human Health and Ecosystems Effects. Nriagu J.O. (ed.). Wiley & Sons, New York, p. 159-172.

Wang S., Zhao X. (2009) - On the potential of biological treatment for arsenic contaminated soils and groundwater. *J. Environ. Management*, 90, p. 2367-2376.

Welch A.H., Lico M.S. (1998) - Factors controlling As and U in shallow ground water, southern Carson Desert, Nevada. *Appl. Geochem.*, 13, p. 521-539.

Williams M., Fordyce F., Pajitprapapon A., Charoenchaisri P. (1996) - Arsenic contamination in surface drainage and groundwater in part of the southeast Asian tin belt, Nakhon Si Thammarat Province, southern Thailand. *Environ. Geol.*, 27, p. 16-33.

Wyllie J. (1937) - An investigation of the source of arsenic in a well water. *Can. Pub. Health J.*, 28, 128-135.

Yu G., Sun D., Zheng Y. (2007) - Health Effects of Exposure to Natural Arsenic in Groundwater and Coal in China : An Overview of Occurrence. *Environ. Health Persp.*, 115, p. 636-642.

Zaldívar R. (1974) - Arsenic contamination of drinking water and foodstuffs causing endemic chronic poisoning. *Beiträge zur pathologischen Band*, 151, p. 384-400.

Zierold K. M., Knobeloch L., Anderson H. (2004) - Prevalence of Chronic Diseases in Adults Exposed to Arsenic-Contaminated Drinking Water. *Am. J. Pub. Health*, 94, p. 1936-1937.

Annexe 1

Les cinq volets du projet COBIAS

Volet 1 : Identification des facteurs limitants sur site :

- Tâche 1.1 : Établir un cahier des charges (par Solétanche Bachy et SAUR) ;
- Tâche 1.2 : Étudier des pilotes en condition réelle et y déterminer les paramètres de fonctionnement optimal en vue de mieux les maîtriser en laboratoire (par GRESE, BRGM, Eco-solution, SAUR et Solétanche Bachy).

Volet 2 : Étude du biofilm bactérien As-oxydant :

- Tâche 2.1 : Sélectionner les souches bactériennes oxydant l'arsenic et identifier leurs gènes pour l'arsénite oxydase (par UDS et BRGM) ;
- Tâche 2.2 : Analyser la voie de biosynthèse des exopolymères composant le biofilm (par UDS) ;
- Tâche 2.3 : Améliorer les performances des souches bactériennes As(III)-oxydantes et métal-résistantes (par Eco-solution).

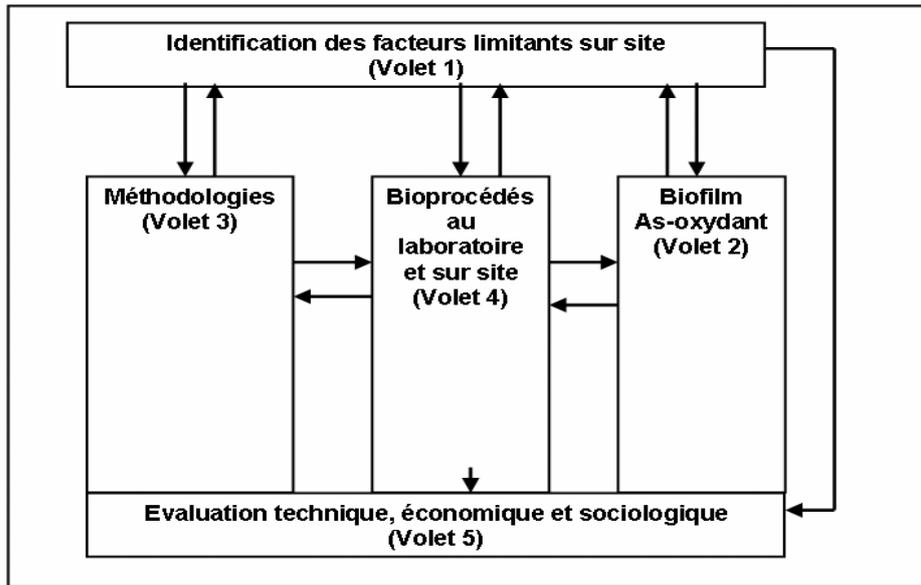
Volet 3 : Développement de méthodologies :

- Tâche 3.1 : Valider les méthodes de dosage de l'arsenic (par GRESE) ;
- Tâche 3.2 : Développer ou optimiser les techniques d'étude du biofilm (par BRGM et UDS).

Volet 4 : Optimisation des bioprocédés au laboratoire et sur site :

- Tâche 4.1 : Sélectionner les matériaux pour le garnissage des bioréacteurs (par GRESE, BRGM, UDS et Solétanche Bachy) ;
- Tâche 4.2 : Optimiser le traitement biologique *ex situ* d'eaux faiblement contaminées pour la potabilisation (par GRESE, BRGM et Eco-solution) ;
- Tâche 4.3 : Optimiser le traitement biologique *in situ* d'effluents miniers et d'eaux arséniées (par BRGM, GRESE et Solétanche-Bachy) ;
- Tâche 4.4 : Démontrer l'efficacité du bioprocédé *ex situ* en action de potabilisation (par BRGM, SAUR, GRESE et Eco-solution) ;
- Tâche 4.5 : Démontrer l'efficacité du bioprocédé *in situ* en action de traitement de pollution industrielle (par Solétanche Bachy, BRGM et GRESE).

Volet 5 : Évaluation technique, économique et sociologique du bioprocédé de traitement de l'arsenic dans les eaux pré-potabilisables et effluents industriels et miniers (par BRGM, SAUR, Solétanche Bachy, Eco-solution et GRESE).



Les cinq volets du projet COBIAS et leurs interrelations d'après <http://www.cobias.brgm.fr>

Annexe 2

Composés d'arsenic cités dans le texte (classés par groupes) et signification des symboles chimiques utilisés

ARSENICS INORGANIQUES	
<p style="text-align: center;">Arsenic élémentaire</p> <p>Arsenic natif (As)</p>	<p style="text-align: center;">Arsenic hydrique</p> <p>Arsine ou hydrogène arsénié ou trihydrure d'arsenic (AsH₃)</p>
<p style="text-align: center;">Arséniures</p> <p>- Arséniure de cuivre, ou paxite (CuAs₂) - Arséniure de gallium (GaAs)</p>	<p style="text-align: center;">Sulfures d'arsenic</p> <p>- Arsénopyrite ou mispickel (FeAsS) - Orpiment ou trisulfure d'arsenic (As₂S₃) - Réalgar ou disulfure d'arsenic (As₄S₄)</p>
<p style="text-align: center;">Acides arsénieux ou Arsénite As(III)</p> <p style="text-align: center;">HnAsO₃ (1 < n < 3)</p> <p>- Arsénolite ou anhydride arsénieux ou trioxyde d'arsenic (As₂O₃)</p>	<p style="text-align: center;">Acides arséniques ou Arséniates As(V)</p> <p style="text-align: center;">HnAsO₄ (0 < n < 3)</p> <p>- Arséniate de plomb [Pb₃(AsO₄)₂] - Arséniate de sodium [Na₃(AsO₄)] - Pharmacosidérite (arséniate de fer hydraté) KFe₄ + 3 (AsO₄)₃ (OH)₄ 6-7 H₂O</p>
ARSENICS ORGANOMÉTALLIQUES	
FORMES METHYLEES	FORMES ORGANIQUES
<p style="text-align: center;">Arsines méthylées</p> <p>- Monométhylarsine (MMA) CH₃H₂As - Diméthylarsine (DMA) (CH₃)₂HAs - Triméthylarsine (TMA) (CH₃)₃As</p> <p style="text-align: center;">Acides arséniques méthylés</p> <p>- Acide arsenic diméthyle ou acide cacodylique (DMMA) (CH₃)₂HO₂As</p>	<p>- Arsénobétaine (AsB) (CH₃)₃AsCH₂CO₂</p>

Annexe 3

Unités de mesure et de concentration

c	centi	j	jour	μ	micro
d	déci	k	kilo	pH	potentiel d'hydrogène
Eh	Potentiel redox	l	litre	ppb	partie par milliard
g	gramme	m	mètre	ppm	partie par million
h	heure	min	minute	t	tonne
ha	hectare	mg	milligramme	%	pourcentage

Unités de concentration/

- 1 milligramme par kilogramme (mg/kg) = 1 000 microgrammes par kilogramme (μg/kg) ;
- 1 partie par million (ppm) = 1 milligramme par kilogramme (mg/kg) ;
- 1 partie par milliard (ppb) = 1 microgramme par kilogramme (μg/kg).

On considère qu'un litre (1 l) d'eau pèse environ un kilogramme (1 kg) :

- $10 \text{ dm}^3 = 1 \text{ l}$;
- $1 \text{ m}^3 = 1\,000 \text{ l}$.

$1 \mu\text{g/l} = 0,1 \mu\text{g/dm}^3 = 0,001 \text{ mg/l} = 0,001 \text{ mg/kg} = 0,001 \text{ ppm} = 1 \text{ ppb}$

Annexe 4

Répartition des sites par régions françaises selon BASOL

Actualisation faite le 03/07/2009(d'après <http://basol.ecologie.gouv.fr/tableaux/home.htm>).

Régions	Nombre total de sites référencés sur BASOL	Nombre de sites potentiellement pollués à l'arsenic			État du site parmi le nombre total de sites potentiellement pollués à l'arsenic				
		Total	Concentration anormale d'arsenic dans les		T	R	E	C	A
			eaux superficielles et/ou sédiments	eaux souterraines					
Alsace	258	22	3	12	1	11	1	9	0
Aquitaine	254	14	0	7	1	3	7	3	0
Auvergne	82	23	1	18	0	11	2	9	1
Bourgogne	78	8	1	7	0	3	3	1	1
Basse-Normandie	65	7	0	4	0	4	2	1	0
Bretagne	62	9	1	3	0	4	0	5	0
Centre	164	28	4	22	0	19	2	6	1
Champagne-Ardenne	154	16	5	9	0	11	0	5	0
Corse	7	2	2	0	0	0	0	2	0
Franche-Comté	87	10	1	10	0	6	0	4	0
Guadeloupe, Guyane, Martinique	24	0	0	0	0	0	0	0	0
Haute-Normandie	214	23	3	18	2	10	1	9	1
Ile-de-France	408	40	4	25	3	21	6	10	0
Limousin	48	4	2	1	0	2	0	2	0
Lorraine	329	69	5	28	2	44	6	17	0
Languedoc-Roussillon	88	13	4	3	0	9	2	2	0
Midi-Pyrénées	168	40	3	26	0	25	4	10	1
Nord-Pas de Calais	558	60	5	30	3	32	3	21	1
Provence-Alpes-Côte d'Azur	160	9	1	2	0	6	0	2	1
Pays de la Loire	94	7	1	1	0	6	1	0	0
Picardie	204	23	4	14	1	16	2	2	2
Poitou-Charentes	66	6	0	5	0	6	0	0	0
La Réunion	12	2	0	0	0	2	0	0	0
Rhône-Alpes	599	102	8	47	3	55	14	30	0
TOM	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	4 184	537	58	292	16	306	56	150	9

T : sites traités libres de toute surveillance et sans restriction d'usage

R : sites traités sous surveillance et/ou restriction d'usage

E : sites en cours de traitement

C : sites non traités mais diagnostic en cours prescrit par arrêté préfectoral

A : sites non traités mais mis en sécurité et/ou devant faire l'objet d'un diagnostic, car fortement susceptibles d'être pollués.

Annexe 5

Liste des anciens sites miniers rejetant de l'arsenic en France métropolitaine et données de rejet quantifiées en kg/an

Département	Nom du site	Cordonnée X	Coordonnée Y	Données (kg/an)
pes-Maritimes	Duranus	997279	1888003	-
pes-Maritimes	Lucéram	1004585	1889126	-
pes-Maritimes	Salèse	995503	1913928	-
ide	Cabrespine	609215	1817837	-
ide	Carnoulès	732298	1902631	207
ide	Castanviels	613122	1818739	-
ide	Nesplié	604608	1820542	-
ide	La Combe du Saut	601503	1815133	3150
ide	Villardonnell	598898	1814231	-
eyron	Engualès (Mirabel)	615210	1962906	-
eyron	Le Coulet	683694	1894970	-
eyron	Le Viala	617361	1966108	-
antal	Bonnac	662912	2022944	-
antal	Sansard	653226	1982626	-
antal	Veze	652207	2030341	-
orrèze	Puyrazit	543800	2359000	-
orrèze	Pont Vieux	621500	2359800	-
orrèze	Rodier	686002	2046160	-
orse	Lozari	1148525	1759250	-
orse	Matra	1182559	1724289	-
euse	Le Châtelet	610288	2135603	6000
euse	Moutier-Rozeille	588500	2101100	-
ordogne	Fouilloux	500757	2058918	-
ordogne	Tindex	503607	2059966	-
ordogne	Pochevialle	504906	2058965	-
nistère	Lopérec	126181	2383287	14
aut-Rhin	Mines Amélie (Ste-Marie-aux-Mines)	960347	2370734	2170
aute-Vienne	Baugiraud	535500	2121100	-
aute-Vienne	Champvert (La Porcherie)	539800	2066600	-
aute-Vienne	Cheni Les Farges	509200	2062900	1000
aute-Vienne	Drouly	520400	2061500	-
aute-Vienne	Gareillas	522400	2063100	-
aute-Vienne	Gros Galet	502500	2060750	63
aute-Vienne	Laurières	514500	2063500	14
aute-Vienne	La Joubertie	520300	2062500	-
aute-Vienne	La Tourmerie	518800	2062200	-
aute-Vienne	Le Couret	530500	2110600	-
aute-Vienne	Lécuras	515700	2069300	-
aute-Vienne	Maranas	529830	2108530	-
aute-Vienne	Moissac	514003	2054959	-
aute-Vienne	Nord-Limoges	515967	2100981	-
aute-Vienne	Réneix	542300	2064600	-
aute-Vienne	Saint-Hilaire-Bonneval	525500	2081100	-
éault	Citou Rieussec	616027	1819341	-
zère	Collet De Dèze (La Felgerette)	725722	1916825	-
ly-de-Dôme	Argentelle	636900	2086500	-
ly-de-Dôme	Bonnabaud	638500	2087000	-
ly-de-Dôme	Giat	610000	2089300	-
ly-de-Dôme	Les Praciaux	627350	2120050	-
ly-de-Dôme	Miouze	637800	2084700	-
ly-de-Dôme	Rosier	637200	2088400	-
renées-Orientales	Glorianes	617540	1734023	-
renées-Orientales	Puig des Maurous	612679	1730414	-
ône-et-Loire	Haut Folin	729263	2222544	-
avoie	Saint-Paul sur Isère	919500	2074400	-

Annexe 6

Localisation des mines du district minier du haut bassin de l'Isle

LES NEUF MINES DU DISTRICT MINIER AURIFERE DU HAUT BASSIN VERSANT DE L'ISLE						
Zone	Numéro sur les Fig. 15 et 16	Nom	Localisation	Commune		Dates d'exploitation Type de mine
			Identifiant BASIAS (site)	X	Y	
			Identifiant Base de Sous Sol (gîtes)			
1	1	Clovis	Concession de Laurieras _ Non trouvé _	_ Non trouvé _		1995-1997 Mine à ciel ouvert
	2	Laurieras (ou l'Aurièras)	Correspond au Puits Roux situé à 400 m au sud de l'Aurièras LIM8700304 07126X4003/GT	514500	2063500	1985-2000 Mine souterraine
2	3	Cheni Les Farges (Cheni Douillac)	A 200 m à l'ouest de la Feynie et à 100 m au nord de la RD 59. LIM8700298 07126X4001/GT	509200	2062900	1921-1944 Mine souterraine
	4	Moulin de Cheni	A 200 m au sud-ouest du moulin et à 300 m au sud-est du pont de l'Isle LIM8700264 07125X4012/GT	507900	2062600	1997-2000 Mine souterraine
3	5	Masvieux	A 400 m au sud de Masvieux, de part et d'autre de la route Ladignac-Cheni LIM8700253 07125X4019/GT	506220	2064300	1991-1992 Mine souterraine
	6	Cirège (Sirège)	A 300 au nord-est de la ferme de Cirège LIM8700266 07125X4015/GT	504050	2062500	- Mine souterraine
	7	Renardière	Correspond à Le Boumeix Rochefade (froide) LIM8700258 07125X4002/GT	503350	2061550	1986-1990 Mine à ciel ouvert
	8	Gros Galet	Sur le coteau tombant sur la rive droite de l'Isle LIM8700265 07361X4001/GT 07361X4013/GT	502500	2060750	1928-1993 Mine à ciel ouvert
	9	Fouilloux	Le stérile est situé près de Le Chalard à 2km au nord du gîte AQI2402071 (stérile)	500757	2058918	1988-1993 Mine à ciel ouvert

Annexe 7

Lettre d'accompagnement du questionnaire, suivie du texte introductif du questionnaire, puis du questionnaire



Orléans, le 24 mai 2009

Nicolas MANLIUS
BRGM d'Orléans, EPI – Université Paris 7 Diderot

N/Réf. : NM/ARSENIC/L001/2009

Objet : Demande de participation à une enquête sur l'utilisation de bactéries pour limiter l'arsenic dans les rejets aqueux industriels et miniers dans le cadre du projet de recherche COBIAS.

Madame, Monsieur,

Le service EPI (Environnement industriel et Procédés Innovants) du BRGM coordonne un projet de recherche ANR intitulé COBIAS (Compréhension du rôle du Biofilm bactérien et maîtrise de son développement lors du traitement d'eaux ArSéniées en bioréacteurs à lit-fixe) en partenariat avec l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, l'Université de Limoges, la PME Eco-Solution et les entreprises SAUR et Solétanche Bachy.

Le projet COBIAS se propose de développer des technologies simples et peu onéreuses utilisant des bactéries pour limiter la concentration en arsenic dans les effluents industriels et miniers qui sont rejetés dans les rivières et les eaux souterraines.

Dans ce cadre, des essais pilotes seront prévus sur l'ancien site minier de Cheni Douillac, à Saint-Yrieix-la-Perche.

Un des volets du projet consiste à réaliser une enquête pour évaluer la perception que les principaux acteurs concernés et les utilisateurs potentiels ont sur le procédé de biotraitement utilisant des bactéries. L'enquête se présente sous forme d'un questionnaire que nous souhaitons vous soumettre lors d'un entretien.

L'enquête se déroule entre le lundi 08 juin et le vendredi 12 juin. Pour fixer un rendez-vous, nous vous serions reconnaissant de nous indiquer sur l'emploi du temps ci-joint une plage horaire d'1h durant laquelle nous pourrions vous soumettre le questionnaire. Si vous souhaitez obtenir des renseignements complémentaires sur notre projet, n'hésitez pas nous contacter aux coordonnées ci-dessous.

Espérant bénéficier de votre contribution, nous vous prions de recevoir, Madame, Monsieur, nos salutations les meilleures.

Nicolas MANLIUS (Brgm)

Service EPI
Environnement industriels et procédés innovants
Bâtiment G1
Enquête suivie par Fabienne BATTAGLIA-BRUNET, Tél. 02 38 64 39 30
COBIAS : <http://www.cobias.brgm.fr>
Brgm Établissement public à caractère industriel et commercial – RCS 58 B 5614 Paris – SIRET 58205614900419
www.brgm.fr

Centre scientifique et technique
3 avenue Claude-Guillemin, BP 6009
45060 Orléans Cedex 2 – France
Tél. 02 38 64 34 34 – Fax 02 38 64 35 18

Enquête sur l'acceptabilité du traitement bactérien des rejets aqueux miniers ou industriels contenant de l'arsenic

Projet de recherche coordonné par le BRGM Réalisée dans le cadre du projet COBIAS (ANR PRECODD 2007) : « COMpréhension du rôle du Biofilm bactérien et maîtrise de son développement lors du traitement d'eaux ArSéniées en bioréacteurs à lit-fixe »

Les activités minières induisent souvent la mobilisation de métaux et de métalloïdes toxiques tels que l'arsenic. En particulier, les minerais d'or contiennent de l'arsenic et leur traitement en vue d'extraire le métal précieux génère des déchets solides contenant l'arsenic résiduel et qui, à force d'être stockés, s'accumulent sous forme de terrils. L'arsenic peut alors être disséminé dans l'environnement autour des anciens sites miniers par ruissellement d'eaux de pluie, infiltration vers les nappes souterraines ou rejet d'eaux d'exhaure ou d'effluents.

Le district minier du haut bassin versant de l'Isle (Haute-Vienne) s'inscrit dans cette problématique. Il est constitué de neuf sites miniers et d'autant de terrils qui peuvent atteindre jusqu'à 30 m de hauteur. Situées non loin de la rivière Isle, ces terrils sont susceptibles d'y rejeter de l'arsenic alors même que l'Isle est utilisée plus en aval comme eau de consommation. En réalité, la concentration en arsenic dissous dans l'eau de l'Isle n'est pas significativement influencée par le rejet de ces terrils (en raison de phénomènes de dilution et de précipitation ou adsorption de l'arsenic sur les particules solides), mais ses rejets sont à même d'induire une pollution des sédiments qui aura ensuite un impact sur l'écosystème.

L'arsenic contenu dans ces terrils doit donc être traité, en particulier l'As(III), une forme d'arsenic mobile et donc dangereuse. Or, quand une eau contient de l'As(III), son traitement requiert une étape d'oxydation le transformant en As(V), une forme d'arsenic beaucoup moins dangereuse. Pour réaliser cette étape, les procédés habituellement employés utilisent des oxydants chimiques. Sur ce fait, le BRGM a identifié en 1997 sur le site de CHENI - les-Farges une bactérie, *Thiomonas arsenivorans*, pouvant croître de façon tout à fait naturelle en oxydant l'As(III) en As(V).



Photographie du terril du site de CHENI Les Farges (Saint-Yrieix-la-Perche) en 1997, avant sa sécurisation

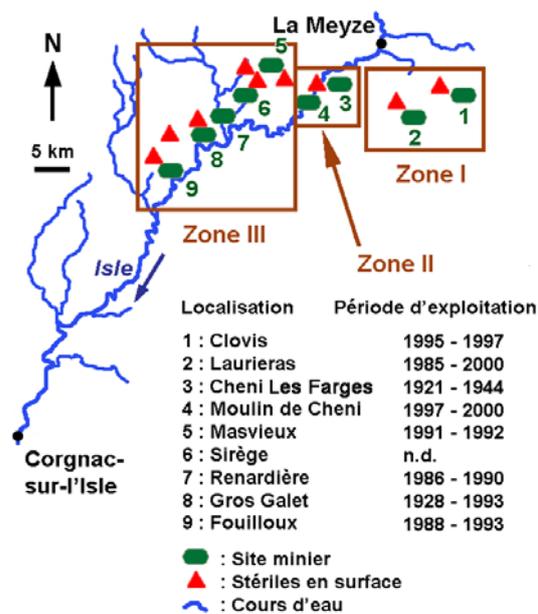
Il existe déjà quelques bioprocédés utilisant des bactéries pour oxyder de faibles concentrations en arsenic en vue de potabiliser l'eau. Ils présentent un intérêt technique, économique et environnemental par rapport aux procédés chimiques habituels de décontamination de l'arsenic des eaux. En effet, ils sont simples d'utilisation, consomment peu d'énergie et, bien qu'ils nécessitent parfois l'apport de substrats de croissance pour les bactéries, ils évitent l'emploi de produits chimiques non seulement coûteux mais qui risquent, de plus, d'entraîner une pollution collatérale.

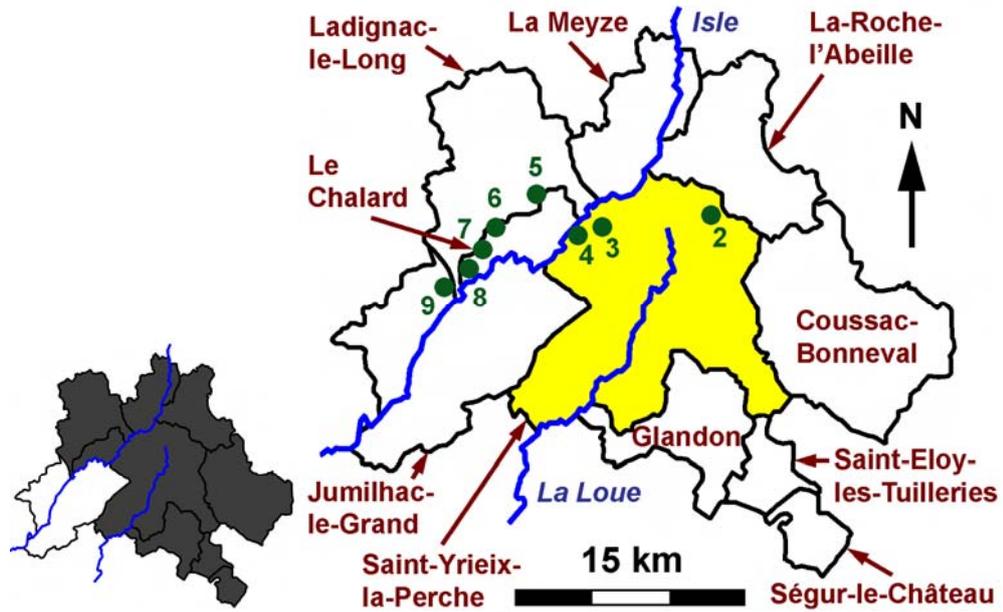
La bactérie isolée à partir du site de CHENI Les Farges, peut-être parce qu'habituee à se développer dans un environnement minier, présente les avantages supplémentaires d'être très efficace car très oxydante, de ne pas nécessiter l'apport de substrat de croissance, et surtout, de pouvoir traiter des eaux à forte concentration en arsenic.

Dans le cadre du projet COBIAS, basé sur un consortium de six partenaires (BRGM, Université de Strasbourg, Université de Limoges, Eco-Solution, SAUR, Solétanche Bachy), des bioprocédés originaux (cf. annexe) utilisant des bactéries provenant de sites miniers sont développés. L'objectif final de ce projet est d'optimiser puis d'évaluer la faisabilité de ces bioprocédés en conditions *in situ*.

Dans le cadre de ce projet, une enquête auprès des principaux acteurs concernés portant sur la perception de l'utilisation des bioprocédés ci-dessus décrits est menée. Elle s'appuie sur le questionnaire suivant :

FICHE D'INFORMATION SUR LA PERSONNE INTERROGEE	
NOM	
Prénom	
Fonction	
Date	/ 2009
Lieu	





Localisation administrative de certains sites miniers du haut bassin versant de l'Isle. On voit que les sites miniers précédemment décrits sont situés sur les communes de Saint-Yrieix-la-Perche, Ladignac-le-Long, Le Chalard et Jumilhac-le-Grand. Les chiffres correspondent à ceux de la légende de la figure précédente.

La Communauté de Communes du Pays de Saint-Yrieix est composée de neuf communes qui apparaissent en gris-sombre dans le médaillon : sept communes sont situées en Haute-Vienne (Coussac-Bonneval, Gandon, Ladignac-le-Long, La Meyze, La Roche-l'Abeille, Le Chalard, Saint-Yrieix-la-Perche) et deux en Corrèze (Saint-Éloy-les-Tuilleries et Ségur-le-Château).

QUESTIONNAIRE (19 questions)

Q. 1. Connaissez-vous les sites des anciennes mines du haut bassin de l'Isle ?		
<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Vaguement	<input type="checkbox"/> Non

Q. 2. Etes-vous informé(e) du fait que les anciennes mines ont un impact sur la qualité de l'eau et des sédiments ?		
<input type="checkbox"/> Bien informé	<input type="checkbox"/> Vous en avez déjà entendu parler	<input type="checkbox"/> Pas informé du tout

Q. 3. Etes-vous conscient que la qualité des eaux à long terme dépend de la préservation de la qualité des sédiments ?	
<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non

Q. 4. Indiquez selon vous les pollutions le plus souvent dénoncées dans le haut bassin de l'Isle (classez-les par ordre d'importance)	
1	
2	
3	
4	

Q. 5. Avez-vous eu connaissance d'éventuels problèmes environnementaux liés à l'arsenic dans le haut bassin de l'Isle ?		
<input type="checkbox"/> Vous en avez eu largement connaissance	<input type="checkbox"/> Vous en avez eu vaguement connaissance	<input type="checkbox"/> Vous n'en avez jamais eu connaissance

Q. 6. D'après vous, les impacts les plus importants d'une présence de l'arsenic dans le haut bassin de l'Isle porteraient sur...		
<input type="checkbox"/> La pêche	<input type="checkbox"/> L'agriculture	<input type="checkbox"/> La santé humaine
<input type="checkbox"/> Autres (précisez)		

Q. 7. Quel type d'eau buvez-vous ?			
<input type="checkbox"/> Eau du robinet uniquement	<input type="checkbox"/> Eau du robinet et un peu d'eau en bouteille	<input type="checkbox"/> Eau en bouteille et un peu d'eau du robinet	<input type="checkbox"/> Eau en bouteille uniquement

Q. 8. Quelle est, selon vous, la qualité de l'eau du robinet dans le haut bassin de l'Isle ?		
<input type="checkbox"/> Très mauvaise	<input type="checkbox"/> Moyenne	<input type="checkbox"/> Très bonne

Q. 9. Pensez-vous que la facture d'eau du haut bassin de l'Isle soit...		
<input type="checkbox"/> Elevée	<input type="checkbox"/> Moyenne	<input type="checkbox"/> Peu élevée

Q. 10. Seriez-vous prêt à accepter une augmentation de la facture d'eau pour limiter la concentration en arsenic dans les ressources en eaux du haut bassin de l'Isle ?	
<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non

Q. 11. Etes-vous informé(e) de travaux de sécurisation menés sur les anciens sites miniers du haut bassin de l'Isle ?	
<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non

Q. 12. Parmi les facteurs suivants, quel est celui qui, selon vous, présente le plus de risque pour la santé humaine ?		
<input type="checkbox"/> Les bactéries	<input type="checkbox"/> L'arsenic	<input type="checkbox"/> Les produits chimiques
<input type="checkbox"/> Autres (précisez)		

Q. 13. Pensez-vous que les bactéries utilisées puissent générer un risque de dissémination ?	
<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non

Q. 14. Saviez-vous que de très nombreuses bactéries sont déjà utilisées pour le traitement des eaux (eaux usées, eaux polluées) ?	
<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non

Q. 15. Classez dans l'ordre de préférence en les numérotant de 1 à 4 les critères qui vous semblent les plus importants pour choisir le traitement des eaux à mettre en place, pour une efficacité équivalente	
Le coût (le moins cher)	La facilité (le plus simple à appliquer)
Le plus propre en terme de bilan environnemental (non consommateur d'énergie et de réactifs chimiques)	Autre (précisez) :

Q. 16. Cochez dans la liste ci-dessous le type de procédé de traitement de l'arsenic dans l'eau que vous choisiriez

<input type="checkbox"/> Procédé chimique (oxydant chimique tel l'hypochlorite de sodium)	<input type="checkbox"/> Procédé physico-chimique (p. ex. lit filtrant de sable et de limaille de fer oxydée)	<input type="checkbox"/> Procédé biologique
		<input type="checkbox"/> Sans opinion

Q. 17. Quelles seraient vos réticences vis-à-vis de l'utilisation d'un procédé biologique pour traiter l'arsenic de l'eau ?

<input type="checkbox"/> Risque biologique (antibiorésistance)	<input type="checkbox"/> Défaillance technique	<input type="checkbox"/> Mauvaise publicité pour le tourisme
<input type="checkbox"/> Autres (précisez)		

Q. 18. Pensez-vous que le procédé biologique décrit puisse être intégré à la liste des procédés applicables ?

<input type="checkbox"/> A court terme	<input type="checkbox"/> A moyen terme	<input type="checkbox"/> Autre (précisez)
<input type="checkbox"/> A long terme	<input type="checkbox"/> Après une opération de démonstration à grande échelle	

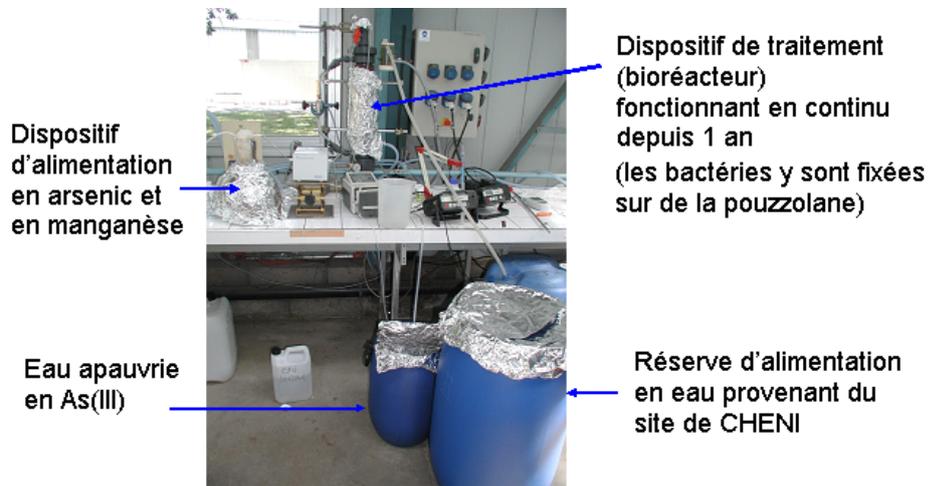
Q. 19. Si vous pensez que le procédé biologique décrit puisse être intégré à la liste des procédés applicables, sous quelles conditions pensez-vous qu'il devrait l'être ?

--

Annexe explicative au questionnaire

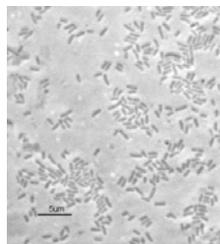
Exemple de dispositif de traitement en cours de mise au point dans le cadre du projet COBIAS, avec une eau issue du site de CHENI LES FARGES (Saint-Yrieix-la-Perche)

Problématique : L'eau contient à la fois du **manganèse** [pour piéger l'As(V)] et de l'**arsenic**. L'oxydation biologique par la bactérie *Thiomonas arsenivorans* du manganèse et de l'arsenic [sous sa forme mobile et toxique, l'As(III)] conduit à l'élimination simultanée de ces deux éléments.



Dispositif expérimental fonctionnant au BRGM depuis 1 an

Le bioréacteur a été inoculé avec *T. arsenivorans*, bactérie spécialisée dans l'oxydation de l'arsenic, et avec d'autres bactéries naturellement présentes dans l'eau du site.



Thiomonas arsenivorans (bactérie issue du site de CHENI LES FARGES isolée par le BRGM) utilisée pour inoculer le bioréacteur.

Annexe 8

Planning des rendez-vous pris à Limoges dans le cadre de l'enquête sociologique

	Lundi 8 juin	Mardi 9 juin	Mercredi 10 juin	Jeudi 11 juin	Vendredi 12 juin
MA TIN	10h - 11h Fédération de la Haute-Vienne pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique LIMOGES	9h - 10h Service Interministériel Régional de Défense et de Protection Civile de la Préfecture de la Haute-Vienne LIMOGES	9h - 10h Service environnement, habitat et cadre de vie du Conseil Régional du Limousin LIMOGES	9h - 10h Division sous-sol - Environnement Industriel de la DRIRE du Limousin LIMOGES	9h - 10h Service tourisme du Conseil Général de la Haute-Vienne LIMOGES
			11h - 12h Service environnement et eau potable du Conseil Général de la Haute-Vienne LIMOGES	11h - 12h ADEME du Limousin LIMOGES	11h - 12h Chambre Départementale d'Agriculture de la Haute-Vienne. Pôle eau - environnement LIMOGES
AP RE S- MID I	15h - 16h Station de traitement des eaux usées de la Ville de Limoges LIMOGES	13h - 14h Association Agrée de Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques de Saint-Yrieix SAINT-LEONARD DE NOBLAT	14h - 15h Service de l'eau et des milieux aquatiques de la DIREN du Limousin LIMOGES		14h - 15h Association d'Industriels pour la Protection de l'Environnement. Environnement et projet SAILLAT-SUR-VIENNE
			16h - 17h <u>Service sanitaire de la DDASS de la Haute-Vienne</u> LIMOGES	15h - 16h Chambre Départementale d'Agriculture de la Haute-Vienne. Pôle animal SAINT-YRIEIX-LA-PERCHE	
			18h - 19h Limousin Nature Environnement – Sources et Rivières du Limousin LIMOGES		

Annexe 9

Tableau synoptique synthétisant les réponses recueillies à l'issue de l'enquête sociologique

Numéro question	Questions	Réponses	TOTAL / 20																				
			DRIRE Limousin	DDASS HV	DIREN Limousin	Préfecture HV Protection Civile	CR Limousin Environnement	CG HV Environnement	CG HV Tourisme	CG HV Chambre agri. HV	Ville Limoges Eau potable	Ville Limoges Eau usee	MAIRIE Ladignac	MAIRE Junilhac	MAIRE Le Chaland	CREN Limousin	Assoc. Industriels Protec. environn.	LNE - RSL	Féd. Pêche envli. Haute- Vienne	Assoc. Pêche Saint-Yrieix	DROSERA	Soc. Myco. Lmo.	
7	Quel type d'eau bue	Eau du robinet	X				X			X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	12	
		Eau robinet-bouteille		X	X	X		X								X							6
		Eau bouteille																X	X				2
8	Qualité eau du robinet	Très bonne		X	X	X	X	X		X	X	X		X		X	X	X				12	
		Moyenne							X				X			X			X		X	5	
		Très mauvaise											X									1	
9	Coût de la facture eau robinet	Peu élevé			X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X					10	
		Moyen										X				X					X	3	
		Elevé							X				X					X	X			4	
10	Accepter augment. facture	Oui			X	X	X		X	X				X	X	X	X	X	X	X		10	
		Non	X						X	X			X			X	X					7	

Numéros questions	Questions	15				16			17		
		Propret à enviro n.	Facilité d'utils a.	Coût	Autre	Biologi q.	Physi co-chimi que	Chimi que	Mauvaise publicité	Détailian, technique	Risque biologi q.
	TOTAL / 20	15	2	2	2	12	8	0	5	10	
	Soc. Myco. Limo.	1	2	3		X					
	DROSERA	1	2	3		X				X	
	Assoc. Pêche Saint-Yrieix	1	2	3		X				X	
	Féd. Pêche envl. Haute-Vienne	1	3	2		X	X			X	
	LNE - RSL	1	2	3		X				X	
	Assoc. Industriels Protec. environn.			1			X		X		
	CREN Limousin	1	2	3	4	X				X	
	MAIRE Le Chalard	1				X			X		
	MAIRE Jumilhac	1	3	2		X			X		
	MAIRIE Ladignac	1	2	3		X					
	Ville Limoges Eau usée	2	3	4	1		X			X	
	Ville Limoges Eau potable	3	1	4	2		X				
	Chambre agri. HV	2	1	2		X					
	CG HV Tourisme	1	2	3						X	
	CG HV Environnement	1	2	3			X			X	
	CR Limousin Environnement	1	3	2		X			X		
	Préfecture HV Protection Civile	1	2	3			X				
	DIREN Limousin	1		1			X			X	
	DDASS HV				1	X					
	DRIRE Limousin	1	2	3		X	X			X	

TOTAL / 20		7	1	11	3	14	3	3
Soc. Myco. Limo.				X				
DROSERA	X							X
Assoc. Pêche Saint-Yrieix	X					X		
Féd. Pêche env. Haute-Vienne			X			X		
LNE – RSL			X					X
Assoc. Industriels Protec. Environn.			X			X		
CREN Limousin		X				X		
MAIRE Le Chalendar			X					
MAIRE Jumilhac	X						X	
MAIRIE Ladignac	X					X		
Ville Limoges Eau usée			X		X	X		
Ville Limoges Eau potable						X		
Chambre agri. HV	X					X		X
CG HV Tourisme			X			X	X	
CG HV Environnement			X			X		
CR Limousin Environnement			X		X	X		
Préfecture HV Protection Civile	X					X		
DIREN Limousin			X			X		
DDASS HV	X				X	X		
DRIRE Limousin			X				X	
Réponses	A court terme	A moyen terme	Après démonst. à grande échelle	Dispositif réglementaire	Suivi et contrôle	Après avis tierce	Inform er élus et popul a.	
Questions	Procédé biologique peut être appliqué			Conditions d'application du bioprocédé				
Numéros questions	18			19				



Centre scientifique et technique
Service environnement industriel et procédés innovants
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34